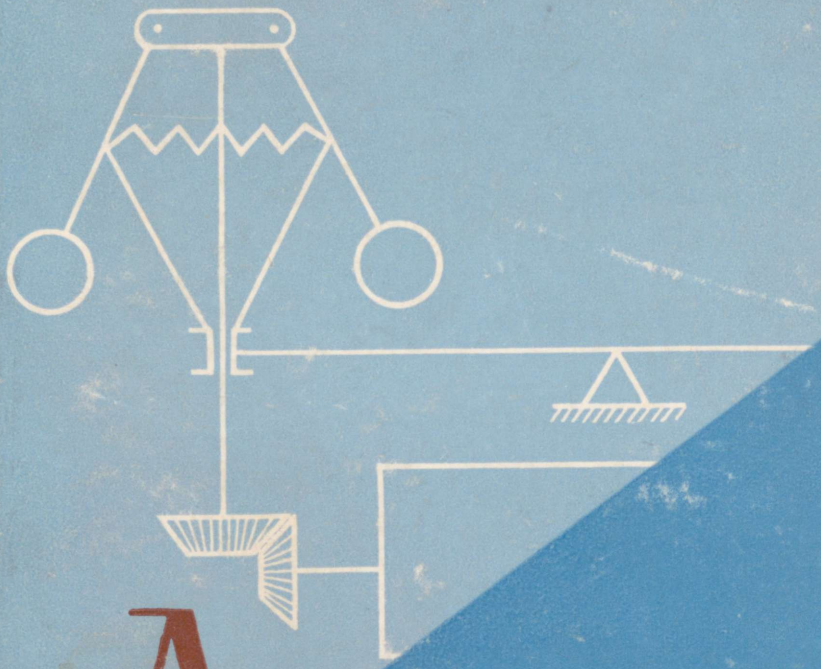


E. KÜNNAP

Automaat-reguleerimine

A-23349/V

E. KÜNNAP

AUTOMAAT-REGULEERIMINE

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1960

Raamat tutvustab lugejaid automaatreguleerimise teooriaga ja regulaatorite konstruktsioonide põhielementidega, kaasa arvatud uuemad saavutused sellel alal. Analüüsitakse reguleeritavate objektide ja regulaatorite dünaamilisi omadusi, käsitletakse süsteemide stabiilsuse tingimusi ning kvaliteeti. Puudutatakse mõnede tähtsamate tööstuslike protsesside automatiseerimist.

Raamat on määratud inseneridele ja tehnikutele, kes tegelevad tööstuslike protsesside automatiseerimisega. Samuti on teos õppevahendiks tehnikumide õpilastele ja Tallinna Polütehnilise Instituudi üliõpilastele, kes ei spetsialiseeru automaatika erialal.

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
50558

Retsensent tehn. tead. kand. H. Sillamaa

SISSEJUHATUS

Tööviljakuse suurendamine, mis on üheks tähtsaimaks tehnilise progressi aluseks, ja töötingimuste parendamine nõuavad kõigis rahvamajandusharudes tootmisprotsesside laialdasemat mehhaniseerimist ja automatiseerimist. Mehhaniseerimiseks nimetatakse mitmesugustes tööstusharudes masinate kasutamist, mis asendavad inimese füüsilist tööd. Täiesti mehhaniseeritud tööstuses jääb teenindava personali ülesandeks ainult masinate töö juhtimine. Automatiseerimiseks nimetatakse mehhaniseeritud protsesside operatiivjuhtimise mehhaniseerimist, s. t. masinate töö juhtimise mehhaniseerimist. Automaatseadmete abil on võimalik teostada tootmisprotsesse niisuguse intensiivsuse, täpsuse, kõrge kvaliteedi ja ökonoomsusega, milleks inimene oma füüsiliste omaduste tõttu ei ole suuteline. Automaatika võimaldab juhtida selliseid protsesse, mida inimene üldse ei saa juhtida kas protsessi liiga suure kulgemiskiiruse või tervist kahjustava mõju tõttu.

Inimene kasutas oma igapäevaste vajaduste rahuldamiseks juba ammugi masin-tööriista ja masin-ajamit. Nende mõlema masina koostöö juhtimiseks ilmus kolmas masin, masin-juhtija. Automatiseerimisideega tegeles inimkond juba õige vanal ajal. Juba paar tuhat aastat tagasi elanud Heroni töödes kirjeldatakse mitmesuguseid küllalt teravmeelseid isetegutsevaid seadmeid, mis olid leiutatud juba sajad ja tuhanded aastad enne teda. Need kõik olid enamasti valmistatud inimeste lõbuks ja ajaviiteks ning ei saanud omada mingit tööstuslikku tähtsust, sest tööstuslikku tootmist polnud sel ajal veel olemaski. Esimeseks automaadiks, mis loodi praktiliseks kasutamiseks, oli kell.

Automatiseerimisseadmete kasutamise alguseks tööstuses võib pidada 18. sajandit. Esimese tööstuslikku tähtsust omava automaatregulaatori ehitas 1763. a. I. I. Polzunov oma «tuletegevuse» masinaga koos töötava aurukatla vee nivoo reguleerimiseks. Polzunovi regulaator täitis kaht ülesannet: mõõtis vee taset katlas ja liigutas toiteventiili. Esimese pöörlemiskiiruse regulaatori konstrueeris aurumasinale 1784. a. James Watt. Neid mõlemaid samal

printsiibil töötavaid otsese toimega regulaatoreid kasutatakse veel tänapäevalgi.

Tööstuslike protsesside areng ja nende kvaliteedile suuremate nõuete esitamine tingis seda, et automaatregulaatorid täienesid ning tekkis vajadus luua uusi konstruktsioone. See nõudis ka uurimisi automaatreguleerimise teooria valdkonnas. Reguleerimisteooria kohta avaldas esimesi tõsisemaid töid, mis pole oma tähtsust kaotanud veel tänapäevalgi, vene teadlane professor I. A. Võšnegradski 1877.—1879. a. Võšnegradski näitas oma töödes, et reguleerimistehnika põhilised raskused lahendatakse reguleerimissüsteemide dünaamika uurimisega, kusjuures reguleeritavat objekti ja regulaatorit ei tule uurida eraldi, vaid koos. Ta kasutas esimesena süsteemide lineariseerimise metoodikat, tuletas kolmanda astme võrrandi stabiilsuse tingimused ning näitas, kuidas konkreetselt mõjub reguleerimissüsteemi stabiilsusele süsteemi üks või teine parameeter.

Võšnegradski tööd kõrgema astme võrrandite uurimisel jätkas slovaki teadlane Stodola. Tema palvel töötas matemaatik Hurwitz välja stabiilsuse tingimuse meelevaldset järku süsteemi jaoks.

XIX ja XX sajandil avaldati stabiilsuse kohta rida töid (N. J. Žukovski, A. M. Ljapunov jt.).

Pärast Oktoobrirevolutsiooni puudutasid oma töödes tähtsaid automaatreguleerimise teooria küsimusi I. N. Voznessenski, A. A. Andronov, B. V. Bulgakov, N. M. Krõlov, N. N. Bogoljubov jt.

Automaatreguleerimise teoorias on süsteemide omaduste uurimisel tähtis koht sagedusmeetodil. Siin on suuri teeneid A. V. Mihhailovil, kes oma vastavasisulise töö avaldas 1938. a.

Käesoleval ajal on automaatreguleerimise teooria valdkonnas nõukogude teadlaste, nagu V. S. Kulebakini, V. V. Solodovnikovi, J. I. Neimarki, A. A. Andronovi, N. N. Bogoljubovi, I. Z. Tsõpkini, A. A. Feldbaumi jt. töödel silmapaistev koht.

Automatiseerimist rakendatakse kõigis NSV Liidu rahvamajandusharudes, kõige rohkem aga metallurgias, energeetikas ja naftatöötlemistööstuses. Kuid praegu on automatiseeritud ainult üksikud agregaadid ja tehnoloogilise protsessi sõlmed. Kogu tootmise kompleksne automatiseerimine, kas või tähtsamates ja suuremates lõikudeski, pole aga saavutanud veel vajalikku taset. Tootmise automatiseerimine jääb tugevasti maha rahvamajanduse vajadustest ning tööde ulatust sel alal tuleb lähematel aastatel tublisti suurendada. Partei ja valitsus pühendavad pidevalt suurt tähelepanu automatiseerimise küsimustele. On püstitatud ülesanne üksikute operatsioonide ja agregaatide automatiseerimiselt üle minna tsehhide või kogu ettevõtte täielikule automatiseerimisele.

Kompleksse automatiseerimise üheks tähtsamaks tunnuseks on seadmete või nende kompleksi juhtimine ja kontrollimine ühest punktist. Sel juhul automatiseeritakse nii põhilised tehnoloogilised protsessid kui ka abioperatsioonid (transport- ja laadimistööd,

pakkimine jne.), kusjuures masinate ja mehhanismide juures puudub pidev valvepersonal.

Tootmise laialdane automatiseerimine avab enneolematud võimalused tööviljakuse tõstmiseks, sotsialismi tingimustes aitab aga ka tõsta töötajate kultuurilis-tehnilist taset. Mida rohkem automaatikat tootmises juurutatakse, seda enam läheneb töölise töö inseneri tööle ning kaob vahe füüsilise ja vaimse töö vahel.

*

Kuna käesolev teos on esimeseks eestikeelseks raamatuks automaatreguleerimise alal, siis tuli autoril luua palju uusi eestikeelseid termineid. Ettepanekud ja arvamused nii uute terminite kui ka raamatu kohta üldse palutakse saata aadressil: Eesti Riiklik Kirjastus, tehnilise kirjanduse toimetus, Tallinn, Pärnu mnt. 10.

Autor avaldab tänu retsensendile tehniliste teaduste kandidaadile H. Sillamaale tähelepanu juhtimise eest ebatäpsustele, mis esinesid esialgses käsikirjas.

I. AUTOMAATKONTROLL, -KAITSE, -JUHTIMINE JA -REGULEERIMINE

1. Automaatkontroll

Siia kuulub mitmesuguste valmistoodete mõõtmete ja kvaliteedi, mitmesuguste füüsikaliste suuruste, nagu temperatuuri, rõhu, elektripinge ja -voolu, värvuse, kontsentratsiooni, kulu, nivoo jne. automaatne kontrollimine. Automaatkontrollseadmed võivad ka arvestada väljastatava produktsiooni hulka, automaatselt dokumenteerida, sorteerida, praakida jms.

Automaatkontrolli võib jagada kahte liiki: automaatmõõtmine ja automaatsignalisatsioon.

Automaatmõõtmisel antakse mõõteelemendi näidud edasi riistadele, mille järgi teenindav personal saab teateid mõõdetavate füüsikaliste suuruste muutuste kohta. Mõnikord kirjutatakse selle suuruse muutumised üles diagrammile. Automaatsignalisatsiooni puhul kontrollitakse tavaliselt mõõdetavate füüsikaliste suuruste äärmisi väärtusi. Masina või seadme kõrvalekaldumine normaalsest töörežiimist mõjutab signaalseadmeid (valguslikke, helilisi või mõlemaid). Tihti üks ja sama automaatkontrollseade mõõdab ja signaliseerib. Näiteks võib mõõta nivood, rõhku, temperatuuri jne. ja nende muutumisel üle lubatud piiride tekitada signaali kas juhtkilbil või mõnes muus soovitud kohas.

Soojustehnilistel kontrollseadmetel on kaks ülesannet: pidevalt jälgida tehnoloogilist protsessi (operatiivne kontroll) ja analüüsida seadme tööd (arvestuslik kontroll).

Soojusjõuseadmeis kontrollitakse väga mitmesuguseid suurusi, nagu rõhku, temperatuuri, nivood jne. Peale selle on mõnikord vaja mõõta suurusi, mida tavaliste mõõteriistadega otseselt mõõta ei saa, näit. šahtveski söega täitumise astet, söetolmu hulka punkris jms. Seni, kuni veel puudub selleks vajalik aparatuur, tuleb niisuguseid mõõtmisi tihti teha kaudsel teel. Näiteks võib veskis oleva söe hulka mõõta õhurõhu langusega veskis jne.

Mitteautomatiseeritud seadmeis teostatakse tavaliselt operatiivset kontrolli mõõteriistade abil. Automatiseeritud seadmeis on

tavaliselt isekirjutav aparaat, mis võimaldab teostada nii operatiivset kui ka arvestuslikku kontrolli. Tehnilist kontrolli automatiseeritakse eriti masinaehituses. On loodud automaatseid riistu ja mitmesuguseid tehnilisi vahendeid keeruliste detailide mõõtmete ja töötlemise kvaliteedi kontrollimiseks. Nende suur mõõtetäpsus ja -kiirus ületavad tihti inimvõimete piirid. Automaatkontrollseadmete abil peetakse arvestust väljastatava produktsiooni hulga kohta, sorteeritakse toodangut mõõtmete, kaalu, kõvaduse ja teiste näitajate järgi ning markeeritakse kas automaatse värvimisega, pealekleepimisega või viimasel ajal ka radioaktiivsete isotoopide abil.

Produktsiooni sorteerimiseks mõõtmete järgi kasutatakse väga erisuguseid elemente ja kontrollseadmeid. Nendeks võivad olla mitmesugused kaliibrid, kontakt- ja kontaktivabad elektriseadmed jms. Kaliibreid kasutatakse esemete sorteerimisel, kui on vaja ainult määrata, kas mõõtmed vastavad vajalikele väärtustele või mitte, kusjuures juhul, kui see vastavus puudub, selle suurust ei registreerita. Kontaktseadmed võimaldavad ära määrata ka vea suuruse mitme parameetri suhtes, kuid nende puuduseks on mõõteelemendi kulumine, korrosioon ja erosioon. Kontaktivabadest kontrollaparaatidest annavad parimaid tulemusi induktiivsed ning radioaktiivsete isotoopidega riistad, mida kasutatakse näiteks traadi, niidi, lõnga jms. jämeduse, paberilindi, pleki jms. paksuse määramiseks.

2. Automaatkaitse

Automaatkaitse ülesandeks on kas tehnoloogilise protsessi kulgemine täielikult seisma panna, kui ilmnevad ebanormaalsused, mis võivad tekitada avarii (näiteks elektrimootori väljalülitamine lühise puhul, turbiini väljalülitamine, kui temperatuur laagrites tõuseb lubatust kõrgemale), või töösse rakendada kaitseseadmed, mis peavad likvideerima avarii tekkimise võimaluse (näiteks kaitseventiilide avamine rõhu liigse tõusmise puhul). Et automaatkaitseseadmed on ühel või teisel viisil seotud juhtimisorganitega, siis võib seda pidada ka automaatjuhtimise eriliigiks.

Automaatkaitse ja -signalisatsioon on üksteisega väga tihedalt seotud. Tihti täidab üks ja sama seade mõlemaid ülesandeid. Näiteks rõhu suurenemisel üle teatud piiri hakkab tööle signalisatsioon. Kui teenindav personal rõhu vähendamiseks midagi ette ei võta, katkestab kaitseseade tehnoloogilise protsessi kulgemise. Kaitseseade on teatud määral reserviks automaatjuhtimisseadmeile selleks juhuks, kui viimane ei ole korras. Seepärast töötab ta enamasti sõltumatuna automaatreguleerimisaparatuurist.

Automaatkaitse eriliigiks on automaatblokeering. Automaatblokeerimisseade ei lase reguleeritavas seadmes toimuda ebaõigeid operatsioone, mis võiksid esineda kas eksituse või avarii tõttu.

Automaatblokeerimisseadmeid on kahte liiki: keelu- ja lubamisseadmed ning avariiseadmed.

Keelu- ja lubamisblokeeringut kasutatakse mehhanismide ebaõigete sisse- ja väljalülitamiste vältimiseks. Näiteks ei saa auruturbiinidel avada edasikäiguventiili enne, kui tagasikäiguventiil on suletud.

Avariiblokeering on määratud avarii puhul nende mehhanismide kindlas järjekorras automaatseks väljalülitamiseks, mis asuvad protsessi kulgemise traktil eespool avarii poolt väljalülitatud mehhanismi. Mehhanismide automaatne blokeering on eriti vajalik täiesti automatiseeritud seadmeis, mille teenindamiseks puudub küllaldane valvepersonal. Kui näiteks aurukatlal läheb rikki suitsuimeja, siis peab kohe seiskama ventilaatorid, välja lülitama või miinimumini vähendama kütuse pealeandmist jne.

Automaatblokeeringut kasutatakse laialdaselt raudteel, elektrijaamades ja elektrivõrkudes. Automatiseeritud tööpinkidel jätab blokeerimisseade pingi seisma, kui selle koormus tõuseb üle lubatava (nii hoitakse ära pingi purunemine) või kui tekib töölise vigastamise võimalus. Automaatvooluliinidel, valtsimismasinail ja teistel selletaolistel seadmetel kasutatakse blokeerimisseadmeid, mis ei lase järgmisel operatsioonil toimuda enne, kui eelmine on täielikult lõpetatud.

On vajalik, et automaatreguleerimisseadmel üks ja sama reguleeriv organ ei saaks automaatregulaatorilt ja distantsjuhtimisseadmelt samaaegselt vastassuunalisi impulsse. Seda saab vältida kahel viisil: kas käsitsi teenindatava ümberlülitiga, mis lülitab töösse kas automaatregulaatori või distantsjuhtimisseadme, või eriblokeeringuga. Viimane lülitab automaadid kohe välja, kui antakse impulss distantsjuhtimisseadme abil. Sel juhul võib teenindav personal end segada seadme töösse, ilma et oleks vaja teha mingeid ümberlülitusi.

3. Automaatjuhtimine

Automaatjuhtimise peamisteks funktsioonideks on käivitamine, seiskamine, pidurdamine, reverseerimine, mitmesuguste mehhanismide pööramine kindla nurga võrra sõltuvalt ajast, läbikäidud teest või mõnest muust tegurist. Soojusjõuseadmeis kuulub automaatjuhtimisele küttepindade ülepuhumine, tuha eemaldamine, masuudipihustite töösse lülitamine, kui tolmu põletamise protsess on katkenud, reservis olevate vee- ja abimagistraalide sisselülitamine jne.

Eriti laialdaselt kasutatakse automaatjuhtimist elektrimootorite juures. Tehakse vahet üksiku elektrimootori ja mitme sidestatud elektrimootori automatiseeritud juhtimise vahel. Üksik elektrimootor käitab lihtsaimad masinad, mis pole seotud teiste masinate ja mehhanismide tööga. Keerulistes ja võimsamates masinates kasutatakse paljumootorilisi automatiseeritud elektriajameid. Näi-

teks on Uraali tehastes toodetud võimsal treipingil kümneid elektrimootoreid, mis käitavad pingi üksikud sõlmed. Paberitööstuses kasutatav paberi valmistamise agregaat koosneb pressvõllide grupist, paljudest kuivatussilindritest, paberi lõikamise aparaatidest jne. Kõigil neil on ajamiks elektrimootorid, millede üldine võimsus ulatub tuhandete kilovattideni. Paberimass liigub katkematu lindina võllilt võllile, silindrilt silindrile. Võllide ja silindrite liikumiskiirused, s. t. nende ajamitena kasutatavate elektrimootorite pöörlemiskiirused, samuti nende käivitamine ja seiskamine peavad olema omavahel ranges kooskõlas (vastasel korral katkeb paberilint ja tehnoloogiline protsess on rikutud). Seda kõike peab tagama nende mootorite automaatjuhtimine.

Metallurgias on bluumingutel ja mitmesugustel valtsmasinatel samuti keeruline elektriseade, mis vajab kooskõlastatud automatiseeritud juhtimist. Automaatliinid, automaattsehhid ja automaattehased vajavad veelgi keerulisemat vastastikku sidestatud elektrimootorite ja teiste seadmete kooskõlastatud tööd.

Elektriajamite automaatjuhtimisega tagatakse mitte ainult sisseseade kooskõlastatud tööd, vaid ka ettevõtte suurt tootlikkust, elektrienergia kokkuhoidu ning ohutut tööd.

Väikese võimsusega elektrimootoreid käivitatakse, seisatakse ja reverseeritakse käivitusreostaatideta kontaktorite või magnetkäivitite abil. Suure võimsusega elektrimootoreid käivitatakse ja pidurdatakse ning nende pöörlemiskiirusi tüüritakse rootori või staatori ahelasse lülitatud reostaatide või kontaktorite abil.

Elektrimootori automatiseeritud juhtimise puhul lülitatakse käivitusreostaadi või kontaktori sektsioonid automaatselt ümber sõltuvalt voolust. Elektrimootorit võib automaatselt juhtida ka sõltuvalt pöörlemiskiirusest. Sel juhul lülitatakse nimetatud sektsioonid ümber, kui elektrimootor on saavutanud antud pöörlemiskiiruse. Automaatjuhtimisprotsessi iseärasus seisab selles, et teostatavate operatsioonide iseloomu antud hetkel ei määrata tehnoloogilise protsessi olekuga, s. t. juhtimisorganid mõjuvad objektile, kuid objekt juhtimisorganile mõju ei avalda.

4. Automaatreguleerimine

Automaatreguleerimine hõlmab kontrolli ja juhtimise elemente. Automaatreguleerimisprotsessi iseärasus seisab selles, et teostatavate operatsioonide iseloom antud hetkel on täielikult määratud tehnoloogilise protsessi olekuga, s. t. objekt mõjub regulaatorile ning regulaator omakorda objektile. Tööstuslikku (tehnoloogilist) protsessi, mis kulgeb masinas või seadmes, iseloomustavad üks või mitu suurust (rõhk, temperatuur, kulu jne.). Protsessi normaalseks kulgemiseks on vaja mõningaid neist suurustest hoida kas konstantseina või muutuvaina mingi kindla seaduspärasusega.

Neid suurusi nimetatakse reguleeritavateks suurusteks, parameetriteks või koordinaatideks.

Protsessid, mis kuuluvad reguleerimisele, võivad olla väga mitmesugused: soojuslikud, elektrilised, aerodünaamilised jt. Aparaate ja seadmeid, milledes need protsessid kulgevad, nimetatakse reguleerimisobjektideks.

Protsessid, mis kulgevad reguleerimisobjektides, võivad olla kas liht- või liitprotsessid. Lihtprotsessiks nimetatakse protsessi, mille reguleerimisel hoitakse antud väärtusel ainult üht parameetrit, näiteks vedeliku nivookõrgust paagis, ahju temperatuuri, auru rõhku jne. Liitprotsessiks nimetatakse protsessi, mille reguleerimisel nõutakse mitme parameetri reguleerimist. Näiteks aurukatlas on vaja hoida samaaegselt konstantseina auru rõhku ja temperatuuri, CO_2 sisaldust koldest väljuvates gaasides, vee taset katla trumlis, hõrendust kolderuumis jne. katla igasuguse koormuse puhul.

Igasuguse liitprotsessi reguleerimine taandub objekti üksikutes lõikudes kulgevate lihtprotsesside reguleerimiseks. Seadet, mis teostab reguleerimist, nimetatakse regulaatoriks. Regulaator koos reguleerimisobjektiga moodustavad reguleerimissüsteemi.

Seega nimetatakse automaatreguleerimissüsteemiks suletud dünaamilist süsteemi, milles toimub reguleeritava suuruse jooksva (tegeliku) väärtuse mõõtmine ja selle võrdlemine etteantud väärtusega ning mis sõltuvalt nende väärtuste erinevuse märgist ja suurusest (mõnikord aga ka selle erinevuse tuletisest ning integraalist aja järgi) avaldab automaatset mõju reguleerimisorganile, mille asendi muutuse tagajärjel see erinevus väheneb lubatud väikese väärtuseni.

Olenevalt sellest, milline peab olema reguleeritava suuruse antud väärtus igal hetkel, võib automaatreguleerimissüsteemid jagada kolme gruppi.

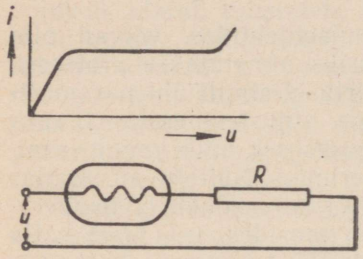
1. Reguleeritava suuruse etteantud väärtus on konstantne. Neid süsteeme nimetatakse stabiliseerivateks süsteemideks. Siia kuulub vedeliku nivoo kõrguse reguleerimine paagis, auru rõhu reguleerimine aurukatlas, pinge reguleerimine generaatoris jne. Allpool käsitletakse peamiselt neid süsteeme ning nimetatakse lühidalt automaatreguleerimissüsteemideks.

2. Süsteemid, milledes reguleeritava suuruse etteantud väärtus muutub aja funktsioonina kindla seaduspärasusega varem püstitatud programmi järgi. Neid nimetatakse programmreguleerimissüsteemideks. Näiteks peab metalli termilise töötlemise ahju temperatuur sõltuvalt tehnoloogilisest protsessist ajaliselt muutuma.

3. Süsteemid, milledes reguleeritava suuruse etteantud väärtus muutub väga laiades piirides ükskõik millise seaduspärasusega. Neid nimetatakse jälgivsüsteemideks. Iseloomulikuks näiteks on siin kompensaator, mis jälgib tema poolt registreeritud temperatuuri.

Reguleeritava parameetri etteantud väärtuse säilitamine võib toimuda kahel viisil.

1. Võib kasutada mõningate süsteemi kuuluvate elementide sisemisi omadusi, nn. stabilisaatoreid, mis muutliku sisenemissuuruse ehk -signaali muudavad peaaegu konstantseks väljumissuuruseks ehk -signaaliks. Näitena võib nimetada barretterit (joon. 1-1), mis kujutab endast vesinikuga täidetud terashõõgniitlampi. Niiti kuumutab teda läbiv vool. Voolu tugevnemisel niidi takistus suureneb. Lamp on ehitatud nii, et toitepinge (sisenemissignaali U) lõialdasel muutumisel läbi niidi kulgev vool (väljumissignaal) praktiliselt vähe muutub. Barretter lülitatakse järjestikku koormusega R, milles tuleb vool hoida konstantne. Selleks koormuseks võib olla näiteks raadiolampide kütteniidid.



Joon. 1-1. Barretter

2. Võib kasutada automaatreguleerimisseadmeid, mis reageerivad reguleeritava parameetri kõrvalekaldumisele antud väärtusest, kusjuures need kõrvalekaldumised võivad praktiliselt olla ükskõik missugused.

Iga lihtprotsessi kulgemisele vastab kolme suuruse muutumine. Esimeseks muutuvaks suuruseks on objekti koormus, s. t. energia või aine hulk, mida tarbija ära võtab või mis objektis ümber töötatakse ajaühiku jooksul. Objekti koormuse muutus toimub väliste põhjuste mõjul. Koormuse muutuse võimalikud piirid on tingitud seadme konstruktsioonist ja mõõtmetest.

Teiseks muutuvaks suuruseks, mis objekti poolt väljatöötatud aine või energia seisundi kvalitatiivselt ära määrab, on reguleeritav parameeter. Reguleeritava parameetri kõrvalekaldumine tema antud väärtusest näitab objekti normaalse töörežiimi rikkumist.

Kolmandaks muutuvaks suuruseks reguleerimisprotsessis on reguleeriva keskkonna sisenemine objekti. See suurus iseloomustab aine või energia hulka, mis läheb objekti ja mille abil taastatakse reguleeritava parameetri antud väärtus. Selle muutmine toimub regulaatori abil. Põhimõtteliselt võib koormuseks olla ka juurdevool. Sel puhul reguleeritakse aine äravoolu. Mis on koormuseks ja mida reguleeritakse, see sõltub skeemist.

Automaatregulaator peab koosnema järgmistest peamistest osadest.

1. Tajuvelementidest ehk tajuritest. Tajuriks nimetatakse elementi, mis reageerib reguleeritavale parameetrile (sisenemissuurus), nagu rõhk, temperatuur, kiirus, asendimuutus, kontsentratsioon, värvus jne., ning muundab selle kas mehaaniliseks, hüdrau-

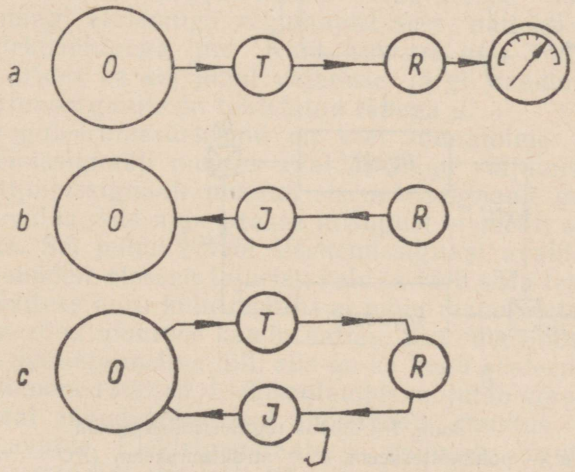
liliseks, pneumaatiliseks või elektriliseks suuruseks (väljumissuurus). Siinjuures võib esineda mitmekordset muundamist. Näiteks muundatakse algul rõhu muutus mehaaniliseks asendimuutuseks ja see omakorda elektriliseks suuruseks.

2. Täitevmehhanismist (täiturist), mille ülesandeks on tajurilt saadud reguleerimissignaali kohaselt muuta reguleeriva keskkonna sisenemist reguleerimisorgani abil objekti selliselt, et taastada reguleeritava parameetri nominaalväärtus. Nominaalväärtuseks nimetatakse reguleeritava parameetri etteantud, valitud väärtust.

3. Sidestusest tajurite ja reguleerimisorganite vahel.

Protsessi normaalsel kulgemisel, kui näiteks reguleeriva keskkonna sisenemine vastab koormusele, on reguleeritav parameeter etteantud väärtuse piirides ja regulaator ei tegutse. Niisugust reguleerimissüsteemi seisundit nimetatakse tasakaaluolekuks. Süsteemi häirimisel, s. t., kui siseneva reguleeriva keskkonna ja koormuse vahel tekib mittevastavus, mida nimetatakse häirivtoimeks, häirivsignaaliks ehk häiringuks, ja mis alati muudab reguleeritava parameetri suurust, astub regulaator tegevusse. Niisugust reguleeritava parameetri muutust reguleerimissüsteemi ühest tasakaaluolekust teise üleminekul nimetatakse siirdeprotsessiks.

Siirdeprotsessi iseloom sõltub reguleerimisobjekti omadustest, regulaatori konstruktsioonist ning reguleerimissüsteemi koostamise viisist. Reguleerimissüsteem peab olema koostatud nii, et



Joon. 1-2. Automatiseerimise peamiste vormide põhimõtteskeemid:

O — objekt, *T* — tajur (mõõteelement), *R* — registreeriv riist (juhtimiselement), *J* — jõuelement (reguleeriv seade)

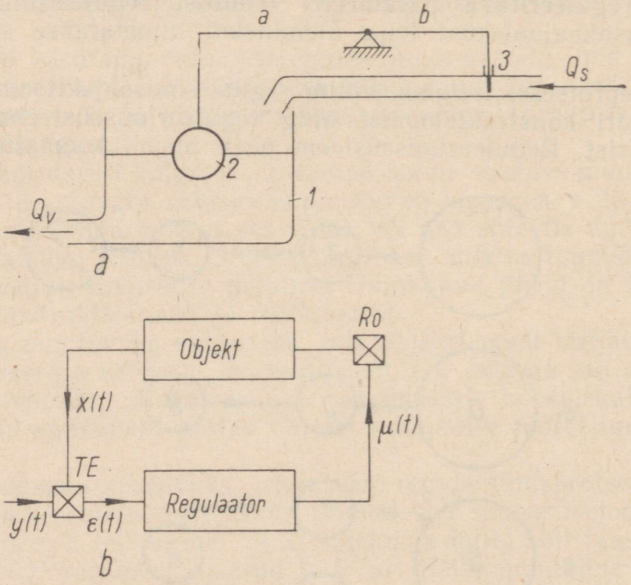
siirdeprotsessi lõpul taastub reguleeritava parameetri antud väärtus, s. t. ta peab olema stabiilne.

Automatiseerimise peamiste vormide põhimõtteskeemid on toodud joonisel 1-2.

Joonisel 1-2, *a* on esitatud automaatkontrolli skeem. Kontrollseadme tegevus võib väljenduda ainult mõõtmises, signaliseerimises, registreerimises, sorteerimises jm., kusjuures objektis toimuva tehnoloogilise protsessi kulgemist ei mõjutata. Joonisel 1-2, *b* on esitatud tehnoloogilise protsessi automaatjuhtimise skeem. Sel juhul mõjub juhtimisorgan küll reguleerimisorgani abil objektile, kuid objektilt ei tule reguleeritava parameetri muutuse käigust teateid tagasi juhtimisorganile. Joonisel 1-2, *c* kujutab automaatreguleerimise skeemi. Siin on ühendatud nii kontrollimis- kui ka juhtimisfunktsioon.

Automaatreguleerimissüsteemi lihtsaima näitena on joonisel 1-3 toodud vee nivoo reguleerimise skeem.

Objektiks on veepaak *1* (joon. 1-3, *a*), reguleeritavaks parameetriks nivoo, tajuriks ujuk *2*, reguleerimisorganiks siiber (ven-



Joon. 1-3. Nivoo reguleerimise skeem:
a — põhimõtteskeem, *b* — struktuurskeem (*RO* — reguleerimisorgan, *TE* — tajuvelement)

tiil) *3* ning sidestuseks kang *ab* nende vahel. Koormuseks on äravool Q_v. Kui vee äravool Q_v võrdub juurdevooluga Q_s, siis reguleeritav parameeter, s. t. nivoo kõrgus, ei muutu. Kui aga äravool ja juurdevool pole võrdsed, siis sõltub parameetri muutumise kii-

rus ja märk selle ebavõrdsuse suurusest ning objekti akumulatsioonivõimest, s. o. käesoleva näite puhul veepaagi geomeetrilistest mõõtmetest. Kõik reguleerimisprotsessi nähtused toimuvad objekti mõjumisega regulaatorile (tajuri kaudu) ja regulaatori mõjumisega objektile (reguleerimisorgani kaudu). Tajuri ühendamiskohta objektiga nimetatakse objekti sisendiks, reguleerimisorgani ühendamiskohta objektiga aga tema väljundiks. Objekti sisend ja väljund ühendatakse reguleerimisseadme kaudu.

Automaatreguleerimissüsteem võib koosneda mitte ainult kahest elemendist ehk lülist, s. o. regulaatorist ja objektist, vaid neid võib olla rohkem. Kui objektil on mitu reguleeritavat parameetrit, siis peab ka regulaatoreid olema vähemalt niisama palju. Joonisel 1-3, *b* toodud skeem koosneb kahest lülist: objektist ja regulaatorist. Reguleeritav suurus — nivoo kõrgus — on $x(t)$. Objekti väljumissuurus, s. t. reguleeritava parameetri tegelik väärtus, antakse regulaatori sisendisse. Seda nimetatakse põhi- ehk peatagasisideks. Regulaatorile antakse seadurite abil veel teine mõju — $y(t)$, milleks on reguleeritava parameetri antud väärtus. Regulaator püüab säilitada võrdsust reguleeritava parameetri tegeliku ja antud väärtuse vahel, s. o. $x(t) = y(t)$, kui $t \to \infty$.

Stabiliseerivates ehk automaatreguleerimissüsteemides on $y(t)$ konstantne suurus, s. t. $y(t) = C$, programmreguleerimis- ja jälgivsüsteemides on aga $y(t)$ muutuv suurus ning antakse vastava elemendi abil vahetpidamatult regulaatori sisendisse. Regulaator reageerib vahele $\varepsilon(t) = y(t) - x(t)$, mida nimetatakse vea signaaliks. Stabiliseerimissüsteemides määratakse konstantne suurus $y(t)$ mingi etalooniga regulaatori sees, näiteks vedruga, konstantse elektripingega jne. Kuid suurust $y(t)$ võib muuta mõningates piirides ka sel juhul vajaduse järgi seadurite abil. Mõju reguleerimisorganile on tähistatud tähega μ.

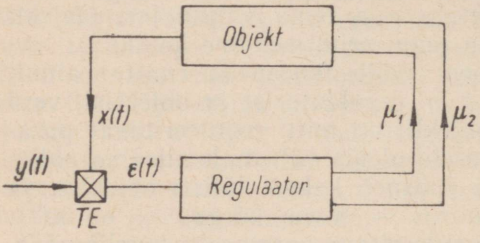
Automaatreguleerimissüsteemil on veel suunatoime. Kui elemendis sisenemissignaali muutus avaldab mõju väljumissignaali muutusele, väljumissignaali muutus sisenemissignaali muutusele aga mõju ei avalda, siis nimetatakse niisugust elementi suundtoimeliseks lüliks. Sel puhul ei või sisenemissignaal avaldada olulist mõju tagasisidele otseselt tajurist, vaid ta võib seda teha ainult läbi objekti. Näiteks auru kulu muutus ei mõju manomeetrile otseselt, vaid alles rõhu muutuse kaudu katlas. Kui süsteemis on kas või ainult üks suundtoimeline lüli, siis on ka kogu süsteem suundtoimeline. Veel mõned näited. Elektronlambis mõjutab võrele antav sisenemissignaal anoodvoolu, kuid anoodvoolu muutus võrepingele mõju ei avalda. Elektrigeneraatoris mõjutab ergutuspinge klemmipinget, vastupidi aga mitte.

Kui reguleerimissüsteem koosneb ainult ühest objektist ja ühest regulaatorist, siis nimetatakse süsteemi ühekontuuriliseks.

Praktikas esineb ka keerulisemaid süsteeme kui ühekontuurilisi, milles on ainult üks tagasiside. Nii võib reguleeritava parameetri muutumisel regulaator avaldada mõju mitmele reguleeri-

misorganile. Näiteks aurukatlas võivad rõhu muutuse tagajärjel asuda tegevusse nii kütuse- kui ka õhuregulaator. Sel juhul on kontuuris kaks tagasisidet (joon. 1-4).

Mõnedes seadmetes on vaja reguleerida mitut suurust (näiteks aurukatlas auru rõhku, auru temperatuuri, vee nivoo kõrgust, hõrendust koldes, CO_2 sisaldust väljuvates gaasides jne., lennukil kurssi, kallakut, kõrgust jne.). Saame mitmekontuurilise süsteemi, mida iseloomustab see, et mingisse punkti rakendatud mõju võib tulla tagasi esialgsesse punkti mitut erinevat teed kaudu.

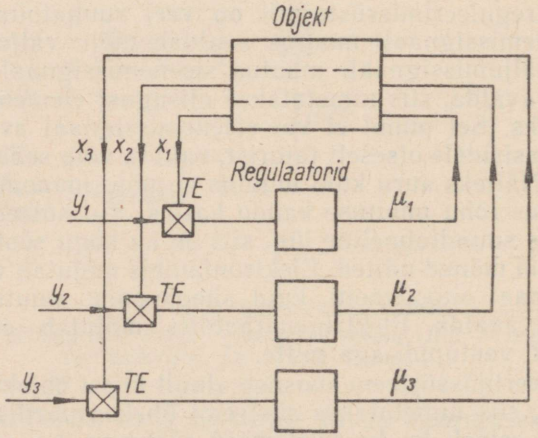


Joon. 1-4. Kahekontuuriline reguleerimissüsteem

Mitme reguleeritava suurusega mitmekontuurilise süsteemi näitena võib nimetada lennukimootori reguleerimise süsteemi, kus reguleeritavateks suurusteks võivad olla mootori pöörlemiskiirus, eelsüütenurk, õli temperatuur, jahutusvee temperatuur jt. suurused.

Mitme reguleeritava suurusega automaatreguleerimissüsteemid jagatakse sidestatud ja sidestamata süsteemideks.

Sidestamata reguleerimissüsteemideks nimetatakse niisuguseid süsteeme, milledes regulaatorid, olles määratud mitmesuguste suuruste reguleerimiseks, pole omavahel ühendatud ja võivad üksteisele mõju avaldada neile ühise objekti kaudu, s. t. regulaatorid nagu oleksid ühendatud omavahel paralleelselt (joon. 1-5).



Joon. 1-5. Mitmekontuurilise sidestamata reguleerimissüsteemi struktuurskeem

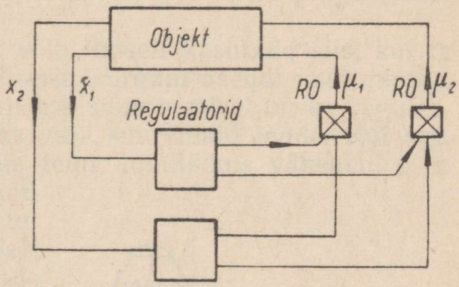
Sel juhul on nagu kolm eraldi kontuuri kolme eraldi juhtimiskanaliga. Tegelikult on aga parameetrid x_1, x_2 ja x_3 omavahel sidestatud objekti kaudu ja ühe regulaatori tegevus muudab kõiki neid parameetreid.

Sidestamata reguleerimissüsteemid jagatakse omakorda sõltuvaiks ja sõltumatuiks.

Sõltuvad sidestamata reguleerimissüsteemid on niisugused süsteemid, kus ühe reguleeritava suuruse muutus sõltub ülejäänud parameetrite muutustest. Seetõttu ei saa niisugustes süsteemides erisuguste reguleeritavate suuruste reguleerimist vaadelda sõltumatult, teistest isoleeritult. Selle süsteemi funktsioneerimise näitena võib nimetada lennuki automaatset reguleerimist, s. o. automaatpiloodi tegevust. Oletame, et lennuk on kaldunud kursist kõrvale. Automaatpiloot pöörab pöördetüüri, kuid õige pöörangu tegemiseks tuleb lennukit ka vastavalt kallutada. Seetõttu aga lennuki frontaalne takistus suureneb ning lennuki nina kaldub allapoole. Seda tasakaalustab kohe kõrgustüür. Näeme, et sel juhul ei saa kolme reguleeritava parameetri — kursi, pikikallaku ja ristkallaku reguleerimist pidada üksteisest isoleerituiks, vaid nad on kõik omavahel tihedalt seotud.

Sõltumatuid sidestamata reguleerimissüsteeme iseloomustab asjaolu, et temas ühegi reguleeritava suuruse muutus ei sõltu teiste suuruste muutustest, mistõttu reguleeritavate suuruste reguleerimise protsessi võib vaadelda üksteisest isoleeritult. Näitena võib nimetada hüdroturbiini pöörlemiskiiruse ja tema poolt käivitatava elektrigeneraatori pinge reguleerimist. Et generaatori pinge reguleerimine toimub tavaliselt mitu korda kiiremini kui turbiini pöörete arvu reguleerimine, siis võib neid reguleerimisprotsesse vaadelda üksteisest sõltumatult.

Sidestatud reguleerimissüsteemideks nimetatakse niisuguseid süsteeme, milledes mitmesuguste reguleeritavate suuruste regulaatorid on omavahel sidestatud, mõjudes üksteisele väljaspool reguleerimisobjekti, s. t. regulaatorid nagu oleksid omavahel ühendatud järjestikku (joon. 1-6).



Joon. 1-6. Mitmekontuurilise sidestatud reguleerimissüsteemi struktuurskeem

Sidestatud reguleerimise erijuhuks on autonoomne reguleerimine. Sel puhul on sidestus regulaatorite vahel niisugune, et ühe reguleeritava suuruse muutus reguleerimise protsessis ei kutsu esile teiste reguleeritavate suuruste muutust, s. t. iga parameetri nominaalväärtuse taastamine toimub sõltumatult teiste parameetrite muutustest.

Näeme, et automaatreguleerimise põhimõtteskeeme on mitmesuguseid ja nad on keerulisemad kui automaatjuhtimise põhimõtteskeemid. Kuid viimasel ajal on palju keerulisemaks muutunud ka automaatjuhtimise skeemid, kus on kasutusele võetud ka tagasiside elemente. Sel puhul seisab erinevus automaatreguleerimise ja automaatjuhtimise vahel selles, et automaatreguleerimissüsteemil on eespool nimetatud põhitagasiside ja terve rida kohalikke tagasisidesid, automaatjuhtimissüsteemides aga põhitagasiside puudub ja tal võivad olla ainult kohalikud tagasisided. Automaatreguleerimissüsteem moodustab nn. suletud süsteemi, automaatjuhtimissüsteem aga avatud süsteemi. Nende juures peatutakse allpool üksikasjalisemalt.

II. AUTOMAATREGULAATORID JA TEMA ELEMENDID

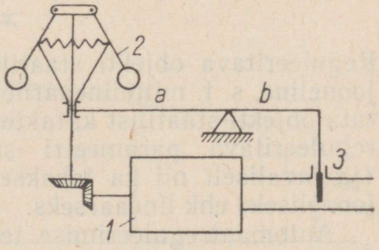
1. Otsene ja kaudne reguleerimine

Kõik automaatreguleerimissüsteemid jagatakse otsese ja kaudse toimega süsteemideks.

Otsese toimega automaatreguleerimissüsteemiks nimetatakse niisugust süsteemi, kus on otsese toimega regulaator, s. t. kus regulaatori reguleerimisorgani asendi muutus teostatakse vahetult tajuvelemendiga (joon. 2-1).

Joonisel 2-1 on tootud otsese toimega jõumasina pöörlemiskiiruse ja joonisel 1-3, *a* paagis oleva vedeliku nivoo reguleerimise süsteem. Nendes süsteemides toimub objekti *1* reguleerimisorgani *3* asendi muutmine regulaatori tajuvelemendi *2* (ujuk, tsentrifugaalmehhanism jne.) toimel ilma kõrvalise energiata. Regulaatori justeerimine (töökorda seadmine, väljareguleerimine) toimub kangiõlgade pikkuse (joon. 1-3, *a*) või vedru pinge (joon. 2-1) valikuga.

Otsese toimega regulaatorit võib ilmselt kasutada siis, kui ta tajuril on küllalt võimsust reguleerimisorgani asendi muutmiseks. Kuid masinate ja seadmete võimsuse suurenemisel on ka reguleerimisorganite asendi muutmiseks vaja suuremaid jõude. Kui aga suurendada tajuri võimsust, siis tema tundlikkus väheneb, s. t. on vaja parameetri suuremat kõrvalekaldumist etteantud väärtusest, enne kui regulaator sellele reageerib. Selleks et saavutada regulaatori vajalikku tundlikkust ja samaaegselt küllaldast jõuvaru reguleerimisorgani asendi muutmiseks, asetatakse regulaatori tajuri ja reguleerimisorgani vahele võimendi, nii et tajur ainult tüüriks selle abienergia rakendamist reguleerimisorganile. Nii saadaksegi kaudse toimega regulaatoriga reguleerimissüsteem.



Joon. 2-1. Otsese toimega pöörlemiskiiruse regulaatoriga automaatreguleerimissüsteem

Kaudse toimega automaatreguleerimissüsteemiks nimetatakse seega niisugust süsteemi, milles regulaatori tajur mõjub reguleerimisorganile mitte vahetult, vaid spetsiaalse võimenduslüli kaudu, mida toidetakse täiendavast kõrvalisest energiaallikast.

2. Staatiline, astaatiline ja isodroomne reguleerimine

Reguleerimissüsteemi nimetatakse välise häiringu suhtes staatiliseks, kui häiringu puhul, mis püüab aja jooksul läheneda mingile püsimajäänud konstantsele väärtusele, reguleeritava suuruse kõrvalekaldumine püüab sellest häiringu suurusest sõltuvalt samuti läheneda konstantsele väärtusele. Matemaatiliselt väljendatakse seda võrrandiga

$$y = c_1 \Delta x, \qquad (1)$$

kus y on reguleeriv mõju, Δx — reguleeritava suuruse kõrvalekalle nominaalväärtusest, c_1 — lüli ebaühtlus ehk statism.

Joonisel 1-3, *a* on näidatud vee nivoo staatilist reguleerimist paagis. Ujuk on jäigalt ühendatud reguleerimisorganiga. Vee väljumise Q_v suurenemisel paagist vedeliku nivoo alaneb, ujuk laskub allapoole ning reguleerimisorgan tõuseb ülespoole, sissevoolava vedeliku Q_s hulk suureneb ning nivoo hakkab tõusma. Tasakaal saabub siis, kui $Q_s = Q_v$. Mida suurem on kulu, seda rohkem on ventiil lahti ja seda madalamal on ujuk, seega ka nivoo, ning vastupidi.

Staatilise reguleerimissüsteemi iseloomustavad omadused on niisiis selles, et 1) ta on tasakaalus reguleeritava suuruse mitmesuguste väärtuste puhul ja 2) igale reguleeritava parameetri muutuvale väärtusele vastab üksainus kindel reguleerimisorgani asend.

Et saavutada nimetatud seost tajuvelemendi (ujuki) ja reguleerimisorgani vahel, peab reguleerimiskontuur (reguleerimissüsteem) koosnema staatilistest elementidest, s. t. lülidest, milledes süsteemi tasakaaluseisundi puhul väljumissuurus x_v üheselt sõltub sisenemissuurusest x_s, s. o.

$$x_v = f(x_s). \qquad (2)$$

Reguleeritava objekti staatiline karakterkõver on üldiselt kõverjooneline, s. t. mittelineaarne. Kuid reguleerimisprotsessis ei kasutata objekti staatilist karakteristikut kogu ulatuses. Võttes arvesse reguleeritava parameetri suhtelist väikest kõrvalekallet võib (ja tavaliselt nii ka tehakse) seda karakterkõverat pidada sirgjooneliseks ehk lineaarseks.

Automaatreguleerimise teoorias kasutatakse samuti reguleerimissüsteemi ebaühtluse ehk statismi mõistet (joon. 2-2).

Koormuse muutumisel nullist kuni mingi maksimumini Q_{max} võib reguleeritav suurus muutuda piirides x_{min} kuni x_{max}. Selles

intervallis võetakse üks x-i väärtus x_0 nominaalseks. Mõnikord võetakse selleks maksimumi ja miinimumi aritmeetiline keskmine, s. o.

$$x_0 = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}. \tag{3}$$

Reguleeritava suuruse mingi püsimajäänud väärtuse x ja tema nominaalväärtuse x_0 vahet nimetatakse absoluutseks staatiliseks veaks:

$$\Delta x = x - x_0. \tag{4}$$

Absoluutse staatilise vea ja nominaalväärtuse suhet nimetatakse suhteliseks staatiliseks veaks:

$$\frac{\Delta x}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0}. \tag{5}$$

Kogu staatilise vea piirkonna suhtelist väärtust

$$\delta = \frac{x_{max} - x_{min}}{x_0} \tag{6}$$

nimetatakse reguleerimissüsteemi ebaühtluseks ehk statismiks.

Süsteemi statismi nimetatakse positiivseks, kui koormuse kasvamisel püsimajäänud reguleeritava parameetri suurus väheneb, ja negatiivseks, kui ta koormuse kasvamisel suureneb.

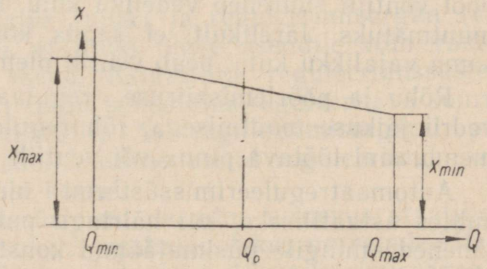
Otsese toimega staatilise regulaatori eriomaduseks on see, et reguleerimisorgani ümberasetumise kiirus on võrdeline parameetri muutmise kiirusega, kuid ei sõltu parameetri kõrvalekaldumisest enesest:

$$\frac{dy}{dt} = c_1 \frac{d\Delta x}{dt}, \tag{7}$$

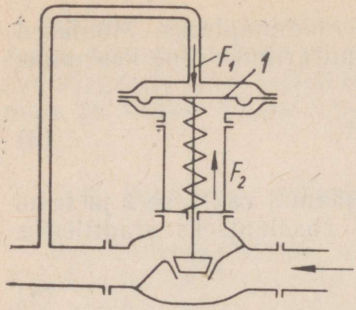
millest saamegi: $y = c_1 \Delta x$.

Siit ongi näha, et reguleerimisorgani asend sõltub reguleeritava parameetri kõrvalekaldumise suurusest, kusjuures regulaator seda kõrvalekaldumist ei likvideeri.

Otsese toimega staatilises rõhuregulaatoris (joon. 2-3) on reguleeritava süsteemi püsimajäänud seisundis membraan *1* tasakaalustatud üksteisele vastassuunaliselt mõjuvate vedeliku rõhuga F_1 ja vedru rõhuga F_2. Vedru



Joon. 2-2. Staatilise reguleerimissüsteemi karakterkõver



Joon. 2-3. Otsese toimega staatiline rõhuregulaator

poolt tekitatud jõud sõltub membraani asendist: mida madalamale on laskunud membraan, seda suurem on pinge, mis mõjub vedru poolt küljest, ja järelikult peab vedeliku rõhk selle tasakaalustamiseks olema ka suurem.

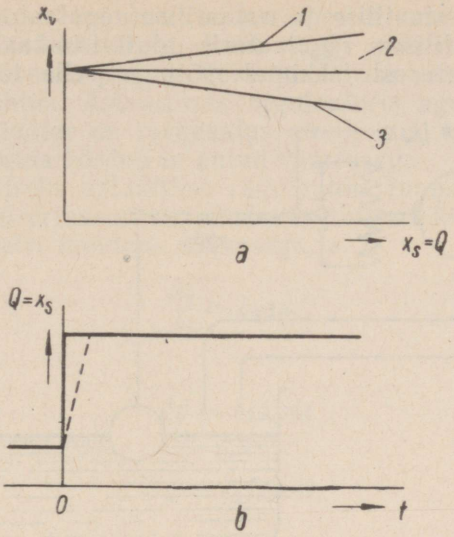
Vedeliku kulu vähenemisel ta rõhk tagapool ventiili suureneb ja reguleeritava süsteemi tasakaal on rikutud. Paindudes rõhu suurenemisel allapoole, suleb membraan ventiili, samaaegselt ka surub vedru kokku ning vähendab vedeliku kulu. Süsteemi uus tasakaaluseisund tekib ventiili väiksema avamisastme puhul kui varem, kusjuures membraanile mõjuvad jõud F_1 ja F_2 on suuremad, s. t. rõhk on torustikus nüüd kõrgem. Vedeliku kulu suurenemisel toimub vastupidine nähtus. Vedeliku rõhk sõltub vedeliku kulust: suurimale vedeliku kulule vastab väikseim rõhk ja vastupidi. Sellel regulaatoril on positiivne statism.

Jõumasina pöörlemiskiiruse reguleerimisel tulevad kiiruse kahanemisel regulaatori (joon. 2-1) vihid keskteljele lähemale, muhv läheb allapoole ja masinasse siirduva töötava aine hulk suureneb. Kuid seejuures suureneb ka regulaatori vedru pikkus, ta jõud järelikult väheneb, ning selleks, et saavutada tasakaalu nurkkiirusest ω sõltuva vihtide tsentrifugaaljõu ja vedru poolt tekitatud jõu vahel, peab masina pöörete arv vähenema. Tähendab, ka siin esineb positiivne statism: koormuse suurenemisel pöörete arv langeb ja vastupidi.

Igasuguse staatilise regulaatori konstruktsioonis on element, mis võimaldab muuta reguleerimise statismi suurust. Ujukregulaatoril muudetakse seda kangi õlgade *a* ja *b* (joon. 1-3, *a*) pikkuste suhte ning samuti ventiili läbilaskepinna muutmisega. Vedeliku kulu või rõhu reguleerimisel sõltub reguleerimissüsteemi statism veel vedeliku viskoossusest ja rõhust eespool reguleerimisventiili. See on seletatav asjaoluga, et rõhu suurenemisel eespool ventiili suureneb vedeliku kulu, kui ventiili avamisaste jääb muutmatuks. Järelikult, et saada konstantse viskoossuse puhul sama vajalikku kulu, peab ventiil olema vähem avatud.

Rõhu ja pöörlemiskiiruse regulaatoril võib statismi muuta vedru jäikuse muutmisega, rõhuregulaatoril aga peale selle veel membraani töötava pinna või ventiili läbilaskepinna muutmisega.

Automaatreguleerimissüsteemi nimetatakse välise häiringu suhtes astaatiliseks, kui häiringu puhul, mis püüab aja jooksul läheneda mingile püsimajäänud konstantsele väärtusele, reguleeritava parameetri väärtus jääb endiseks (ebaühtlus ehk statism võrdub nulliga).



Joon. 2-4. Staatiliste ja astaatiliste reguleerimissüsteemide karakterkõverad:
a — väljumissuuruse muutus, *b* — sisenemissuuruse muutus.
1 — negatiivse statismiga, *2* — astaatilise (statism võrdub nulliga), *3* — positiivse statismiga süsteemi karakterkõver

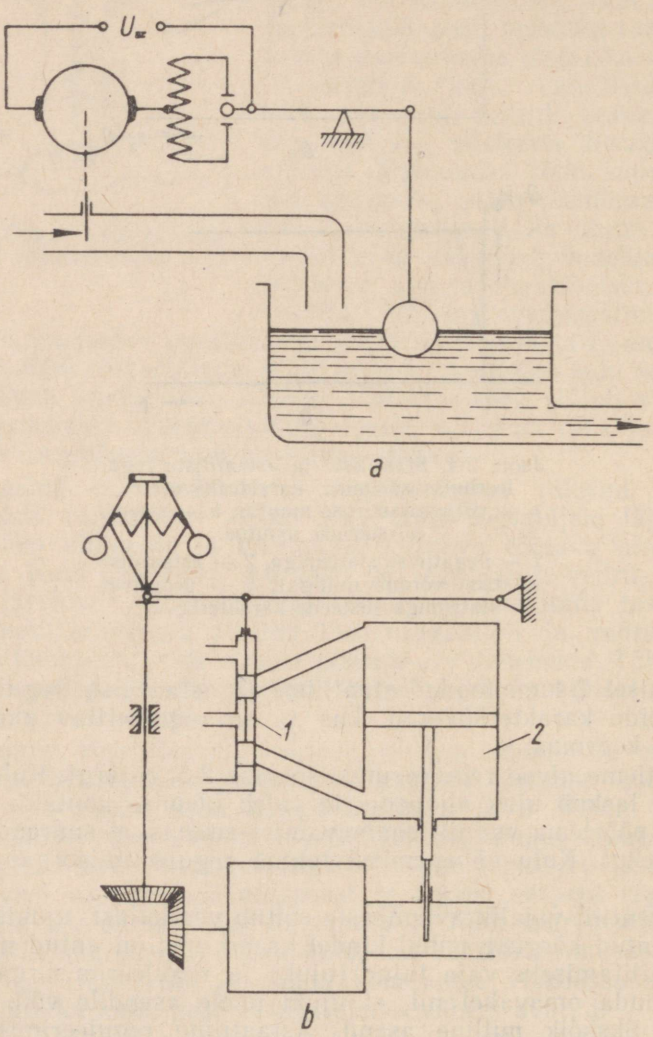
Joonisel 2-4 on toodud staatiliste ja astaatiliste reguleerimissüsteemide karakterkõverad, kus x_v on reguleeritav parameeter ja x_s — koormus.

Vaatleme nivoo reguleerimist joonise 2-5, *a* järgi. Kulu suurenemisel laskub ujuk allapoole ja suleb ülemise kontakti. Mootor hakkab pöörlema ventiili enamavamise suunas, et suurendada vee sissetulekut. Kulu vähenemisel toimib reguleerimisorgan vastassuunas.

Et ventiili vajalik avamisaste sõltub vee kulust, ujukil on aga nivoo antud kõrguse puhul kindel asend, siis on antud nivookõrguse säilitamiseks vaja tajur (ujuk) ja reguleerimisorgan (ventiil) siduda omavahel nii, et ujuki ühele asendile võib vastata ventiili ükskõik milline asend. Astaatiline reguleerimissüsteem iseloomustub sellega, et 1) ta on tasakaalus reguleeritava suuruse ainukesel, antud väärtusel ja 2) reguleerimisorganil peab olema võimalus võtta ükskõik milline asend reguleeritava parameetri ühe ja sama väärtuse korral.

Astaatilise reguleerimissüsteemi peamine erinevus staatilisest seisab niisiis selles, et süsteemi tasakaaluolekus on reguleeritaval parameetril alati sama väärtus, sel ajal kui reguleerimisorgan on asendis, mis vastab koormusele.

Mis puutub staatilise ja astaatilise regulaatori erinevusesse, siis kehtib staatilises regulaatoris alati tasakaal reguleeritava parameetri muutusest tekkinud mõju ja selle tõttu regulaatori



Joon. 2-5. Astaatilised reguleerimissüsteemid:
a — vedeliku nivoo astaatiline automaatreguleerimissüsteem, *b* — pöörlemiskiiruse astaatiline hüdrauliline automaatreguleerimissüsteem

tajuris tekkinud mõju vahel. Kui rõhuregulaatoris membraan liikus reguleeritava parameetri suurenemise tõttu alla, siis suurenes ka seda membraani tasakaalustava vedru pinge. Kui pöörlemis-

kiiruse regulaatoris reguleeritav parameeter suurenes, siis eemaldusid vihid pöörlemisteljest, kuid siingi suurendas nende käik tasakaalustava vedru pinget. Rõhu ja kiiruse vähenemisel toimus vastupidine nähtus. Astaatilises regulaatoris aga see seos puudub ning regulaator on tasakaalus ainult siis, kui reguleeritava parameetri väärtus võrdub ta antud väärtusega.

Teiseks eriliseks astaatilise regulaatori tunnuseks on see, et temal on reguleerimisorgani ümberasetamise kiirus proportsionaalne parameetri muutuse suurusega, s. t.

$$\frac{dy}{dt} = c_2 \Delta x,$$

millest

$$dy = c_2 \Delta x dt$$

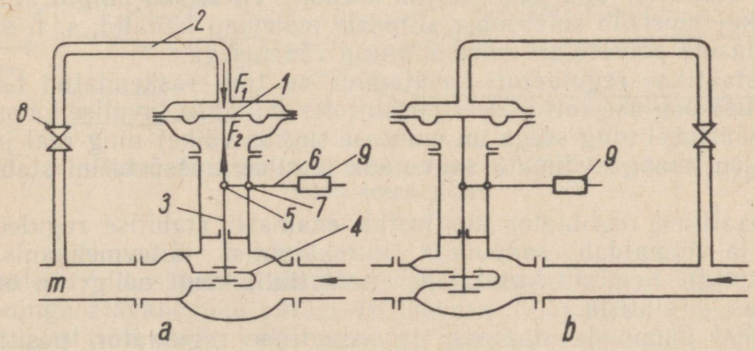
ja

$$y = c_2 \int \Delta x dt, \qquad (8)$$

kus y — reguleeriv mõju,
c_2 — võrdelisuse tegur,
Δx — reguleeritava suuruse kõrvalekalle oma nominaalväärtusest.

Astaatilised regulaatorid on üldiselt kaudse toimega. On võimalik valmistada ka otsese toimega astaatilist regulaatorit (joon. 2-6).

Tajuriks on siin jällegi lame membraan *1*. Membraani peal olev ruum on ühendatud toru *2* abil veetorustiku selle osaga, mil-



Joon. 2-6. Otsese toimega astaatiliste rõhuregulaatorite skeemid:
a — «pärast ventiili», *b* — «enne ventiili»

les soovitakse hoida konstantset rõhku (joonisel 2-6, *a* äravoolupoolel). Membraaniga on jäigalt seotud varras *3*, mille teises otsas on ventiil *4*. Varras on libiseva toe *5* abil ühendatud kangiga *6*,

mis pöördub liikumatu telje *7* ümber. Kangi teisel otsal on raskus *9*, mille mõjul ventiil püüab avaneda.

Jõud, mida tekitab vee rõhk membraanil, püüab ventiili sulgeda. Raskuse *9* poolt tekitatud moment valitakse nii, et jõud F_2, mis mõjub vardale alt üles, oleks võrdne jõuga F_1, mida tekitab membraan reguleeritava rõhu normaalse väärtuse puhul, s. t. raskuse asendiga valitakse reguleeritava parameetri, s. o. vee rõhu antud väärtus torustikus. Seejuures on ventiil liikumatu ja kogu süsteem on tasakaalus. Kui rõhk torus tagapool ventiili kasvab, siis suureneb ka membraanile mõjuv jõud. Sel juhtumil $F_1 > F_2$ ja ventiil hakkab sulguma ning seetõttu rõhk torustikus tagapool ventiili langema. Kang pöördub raskuse *9* mõjul kaarel, mille keskpunktiks on telg *7*. Et membraani käik on väike suurus, siis võib kaart pidada peaaegu sirgeks jooneks. Raskuse poolt tekitatud moment on seega konstantne suurus membraani iga asendi puhul. Niisiis $F_2 = \text{const}$. Et tasakaal võib esineda ainult siis, kui $F_2 = F_1$, saab süsteem olla tasakaalus ainult juhul, kui rõhk torustikus võrdub tema antud väärtusega, kusjuures kulu, s. t. ventiili avamisaste võib olla ükskõik missugune.

Vee liikumise kiirus impulsstorus *2* ja järelikult ka ventiili ümberasetumise kiirus on võrdeline vee rõhu muutusega. Ventiili *4* liikumise kiirust võib muuta drosseli ventiili *8* abil. See on vajalik, nagu näeme allpool, nn. stabiilse reguleerimisprotsessi saavutamiseks.

Astaatiline kiirusregulaator saab olla ainult kaudse toimega (elektriline, hüdrauliline) (joon. 2-5, *b*).

Hüdraulilise regulaatori muhv mõjub kangi kaudu tüürkolvile (kolvipaarile *1*). Nagu jooniselt näha, võib reguleerimisorgan *2* (kolb silindris) olla ükskõik mis asendis. Ta seisab paigal ainult siis, kui tüürkolb suleb oma silindris mõlemad kanalid, s. t. siis, kui masina pöörete arv võrdub antud väärtusega.

Astaatilise regulaatori kasutamine on tihti raskendatud tema tegevuse aegluse tõttu (sest parameeter hoitakse tavaliselt nominaalväärtusel ning seega on muutuse suurus väike) ning real juhtudel on temaga võimatu saavutada reguleerimissüsteemi stabiilsust.

Staatiline regulaator kindlustab enamasti stabiilse reguleerimise ja võimaldab saavutada kiirekäigulisi täitevmehhanisme (täitureid). Seetõttu kasutatakse neid tihti, kuigi neilgi on oma puudus — statism.

Püüd ühendada staatilise ja astaatilise regulaatori positiivsed omadused viis isodroomsete regulaatorite konstrueerimisele.

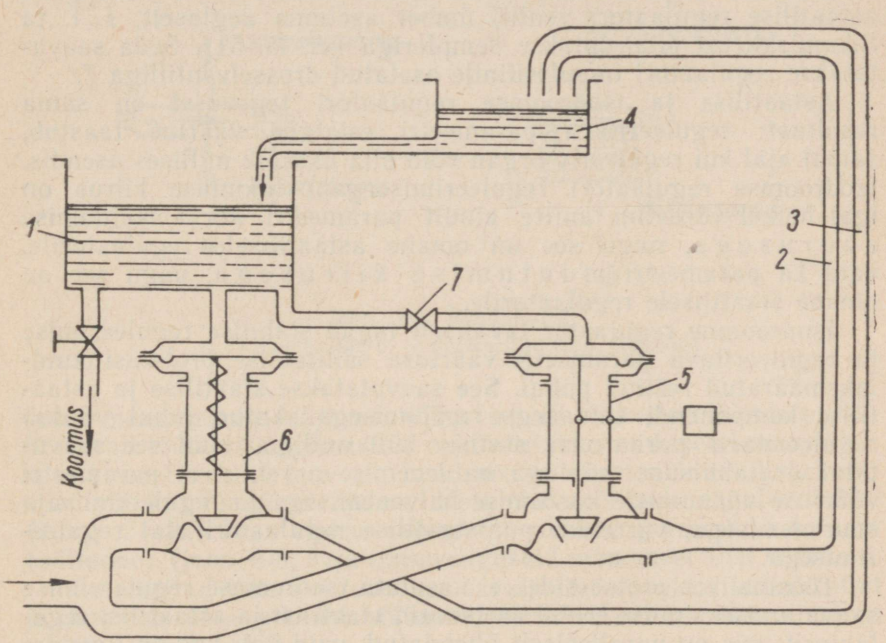
Isodroomses regulaatoris ehk inertse elastse tagasisidega regulaatoris on reguleeriv mõju võrdeline reguleeritava parameetri kõrvalekaldega ja selle kõrvalekalde integraaliga:

$$y = c_1 \Delta x + c_2 \int \Delta x \, dt.$$

Isodroomse regulaatori töötamispõhimõttega tutvumiseks vaat-

leme kunstlikku skeemi, mis koosneb paralleelselt ühendatud staatilisest ja astaatilisest regulaatorist (joon. 2-7).

Reguleeritavaks parameetriks on vedeliku nivoo kõrgus paagis *1*. Reguleeriv keskkond (vedelik) voolab torude *2* ja *3* kaudu vahepaaki *4* ja sealt paaki *1*. Vedeliku hulk, mis väljub vahepaagist *4*, sõltub vedeliku nivoost selles. Järelikult peab objekti koormuse suurenemisel nivoo paagis *4* tõusma kõrgemale, milleks sinna peab tulema teatud hulk vedelikku rohkem. Paagi *4* olemasolu tõttu on reguleerimisobjektil teatud hilinemus. (Hilinemuseks nimetatakse nähtust, mispuhul reguleerimisorgani asendi muutusest tingitud



Joon. 2-7. Otsese toimega isodroomse nivooregulaatoriga automaatreguleerimissüsteemi skeem

reguleeriva keskkonna muutus ei jõua objektini hetkeliselt, vaid mõninga ajavahemiku pärast. Hilinevaks lüliks nimetatakse seega niisugust lüli, mille väljumissuurus muutub vastavalt sisenemissuurusele, kuid jääb temast maha mingi konstantse aja võrra, mida nimetatakse hilinemisajaks). Toruga *2* on ühendatud astaatiline regulaator *5*, toruga *3* aga staatiline regulaator *6*.

Koormuse suurenemisel langeb nivoo paagis *1*. Samaaegselt astuvad tegevusse mõlemad regulaatorid, suurendades vedeliku juurdevoolu paaki *4*. Mõninga ajavahemiku möödumisel võrdsustub vedeliku juurdevool paaki *1* äravooluga mingi madalama nivoo

juures. Sel hetkel katkeb staatilise regulaatori tegevus, kuid astaatiline regulaator jätkab vedeliku juurdevoolu suurendamist, mistõttu nivoo paagis *1* hakkab tõusma. Sedamööda, kuidas nivoo tõuseb, vähendab staatiline regulaator vedeliku juurdevoolu paaki *4*, astaatiline suurendab aga juurdevoolu endiselt. Reguleerimisprotsess lõpeb sel hetkel, kui nivoo paagis *1* on saavutanud esialgse kõrguse. Uuel tasakaaluseisundil läheb staatilise regulaatori ventiil e n d i s s e asendisse vastavalt normaalsele nivoole paagis *1*. Astaatilise regulaatori ventiil läheb u u d e asendisse, mis vastab objekti koormuse muutusele.

Selleks et reguleerimisprotsess oleks stabiilne (vt. V ptk.), peab astaatilise regulaatori ventiil ümber asetuma aeglaselt, s. t. ta liikumiskiirust pidurdatakse dempferiga (vt. lk. 51). Seda saavutatakse regulaatori impulssliinile asetatud drosselventiiliga *7*.

Astaatilise ja isodroomse regulaatori tegevusel on sama resultaat: reguleeritava parameetri esialgne väärtus taastub, samal ajal kui reguleeriv organ võib olla ükskõik millises asendis. Isodroomse regulaatori reguleerimisorgani liikumise kiirus on igal hetkel võrdeline mitte ainult parameetri kõrvalekaldumise s u u r u s e g a, nagu see on omane astaatilisele regulaatorile, vaid ka parameetri m u u t u m i s e k i i r u s e g a, nagu see on omane staatilisele regulaatorile.

Isodroomne regulaator tavaliselt tagab stabiilse reguleerimise ja reguleeritava parameetri väärtuse säilitamise protsessi kindlaksmääratud režiimi puhul. See saavutatakse staatilise ja astaatilise komponendi samaaegse mõjumisega. Antud juhul võrdub reguleeritava parameetri statism küll nulliga, kuid see saavutatakse stabiilsuse mõninga halvenemise arvel, s. o. parameetri väärtuse võnkumiste kustumise halvenemisega ja reguleerimisaja suurenemisega, võrreldes puhtstaatilise regulaatori abil reguleerimisega.

Tööstuslikes protsessides ei kasutata isodroomse reguleerimise saavutamiseks mitte eraldi asetsevaid staatilist ja astaatilist regulaatorit, mis on paralleelselt ühendatud, vaid üht, kus on ühendatud mõlema regulaatori omadused. Seda saavutatakse inertse elastse tagasisidega.

3. Regulaatorite konstruktsioonide elemente

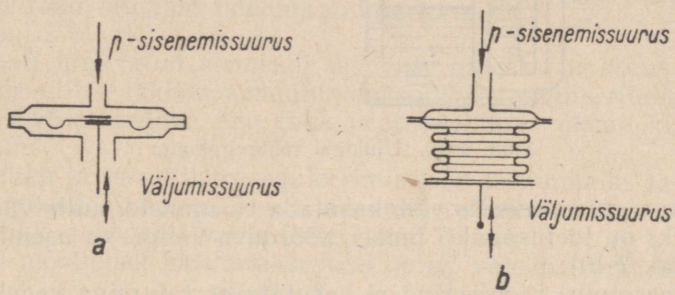
Et automaatregulaator suudaks oma funktsioone täita, peavad tal selleks olemas olema vastavad elemendid — tajurid, võimendid ja reguleerimisorganid. Nimetatud elemente nimetatakse regulaatori põhielementideks, sest juba ühe puudumisel neist pole olemas ka automaatregulaatorit.

Automaatregulaatorite elementide tehniline kujundus on väga mitmesugune. Iga elementi iseloomustavad sisenemis- ja väljumissuurus. Sisenemissuuruse antud elemendile määravad süsteemi teised elemendid, väljumissuurus aga iseloomustab antud ele-

menti ning määrab tema mõju süsteemi teistele elementidele. Mõned, mõnikord aga isegi kõik elemendid on suunalise toimega. Peaaegu kõik tajurid on suunalise toimega.

Tajurid. Vaatleme mõningaid tajurite liike, mida sagedamini kasutatakse tööstuslike protsesside automatiseerimisel.

Kui on tarvis reguleerida rõhku, mille suurus ei ületa üht atmosfääri, või hõrendust, mis pole suurem kui mõnikümmend millimeetrit veesammast, siis kasutatakse tajureina tasapinnalisi või gofreeritud membraane. Äärtelt kinnitatud ümmarguse tasapinnalise membraani (joon. 2-8, *a*) läbipaindel on lineaarne sõl-

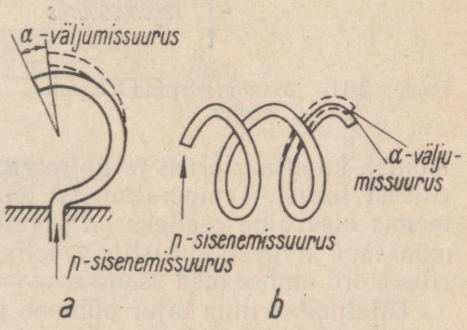


Joon. 2-8. Rõhutajurid:
a — membraan, *b* — gofreeritud toru (sülfoon)

tuvus membraanile mõjuvast rõhust ainult väikeste rõhkude puhul. Sõltuvalt töötamistingimustest valmistatakse neid membraane õhukesest roostevabast terasest, fosforpronksist, monelmetallist, kummist või kummeeritud riidest. Keskmiste rõhkude reguleerimisel (1,5 . . . 5 atü) kasutatakse tajureina umbseid gofreeritud torusid (sülfoone) (joon. 2-8, *b*) ja mitmesuguseid manomeetrilisi vedrusid.

Gofreeritud toru (sülfoon) on tavaliselt tombakist valmistatud ja muudab oma pikkust sõltuvalt rõhkude vahest tasase põhja mõlema poole vahel.

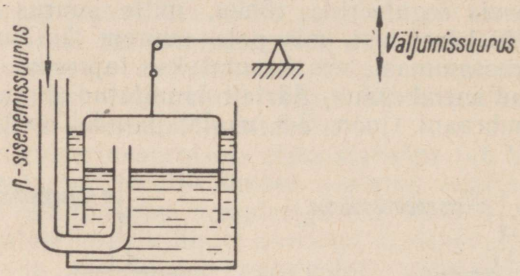
Suurte rõhkude mõõtmiseks (üle 5 atü) kasutatakse umbset elliptilise ristlõikega manomeetrilist nn. Bourdon'i toru (joon. 2-9, *a*). Rõhu suurenemisel torus püüab elliptiline ristlõige muutuda ümmarguseks ning toru ise seetõttu tõmbuda sirgemaks. Seetõttu muudab tema umbne ots oma asendit nurga α võrra. Materjaliks on valgevask või teras.



Joon. 2-9. Rõhutajurid:
a — Bourdon'i toru, *b* — manomeetriline spiraalne toru

Manomeetrilised spiraal-

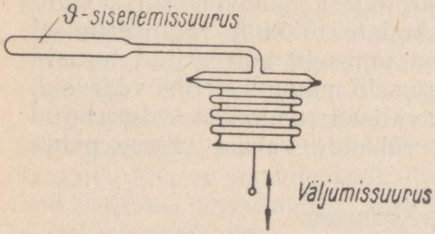
vedrud (joon. 2-9, *b*) on õhukeseseinalised ovaalse ristlõikega, samuti umbsed torud. Nende vaba otsa asendi muutus α on tunduvalt suurem kui Bourdon'i torudel. Keerdude arv on 2 . . . 5, mõnikord kuni 7, ning α_{max} on kuni 60°.



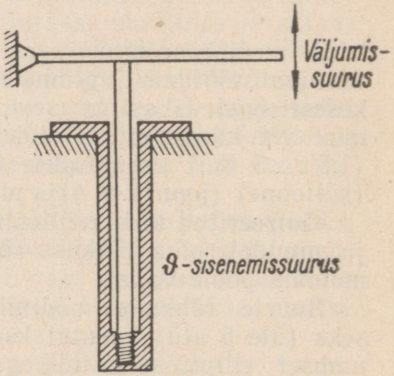
Joon. 2-10. Ujukiga rõhuregulaator

Rõhu reguleerimiseks võib kasutada ka ujukeid, mille väljumissuuruseks on toetuspunkti ümber pöörduva kangi õla asendi muutus (joon. 2-10).

Temperatuuri reguleerimisel kasutatakse tajureina vedelik- või gaastermomeetreid (joon. 2-11). Need koosnevad väikesest bal-



Joon. 2-11. Manomeetriline termomeeter

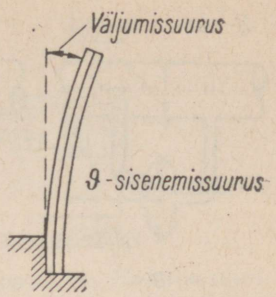


Joon. 2-12. Dilatomeetriline tajur

loonist, kapillaartorust ja gofreeritud membraanist või manomeetrilisest torust. Temperatuuri ϑ muutumisel muutub ka termosüsteemis olev aine (selleks on tavaliselt atsetoon, piiritus, vesi või mõni muu kergesti aurustuv vedelik) rõhk ning seega ka manomeetrilise toru umbse otsa asend *s*.

Dilatomeetriline tajur põhineb joonpaisumisel. Valgevasest või terasest valmistatud toru üks ots on kinnitatud jäigalt mingile alusele, teine ots aga võib temperatuuri muutumisest sõltuvalt vabalt muuta oma asendit (joon. 2-12).

Bimetalltajur koosneb kahest jäigalt üksteise külge kinnitatud erineva joonpaisumisteguriga metall-liistust (joon. 2-13). Temperatuuri muutumisel pikenevad need erinevalt ja kogu plaat kõverdub. Tajuri väljumissuuruseks on seega selle plaadi vaba otsa paindumine.



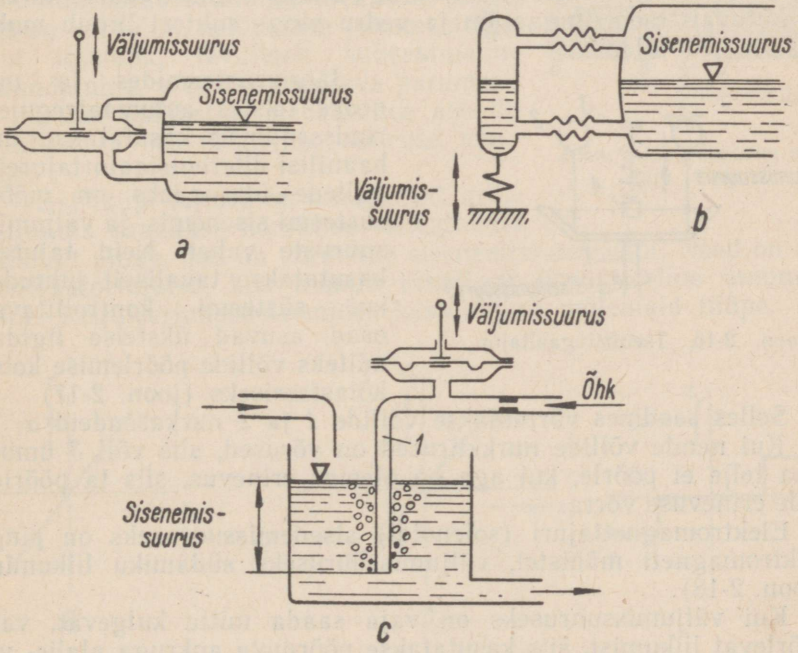
Joon. 2-13. Bimetalltajur

Nivoo reguleerimisel on tajuriks tavaliselt ujuk (joon. 1-3, *a*), harvemini membraan (joon. 2-14, *a*) või kaaluline nivoomõõtja (joon. 2-14, *b*). Selleks kasutatakse ka rõhu muutust pneumaatilises torus (joon. 2-14, *c*).

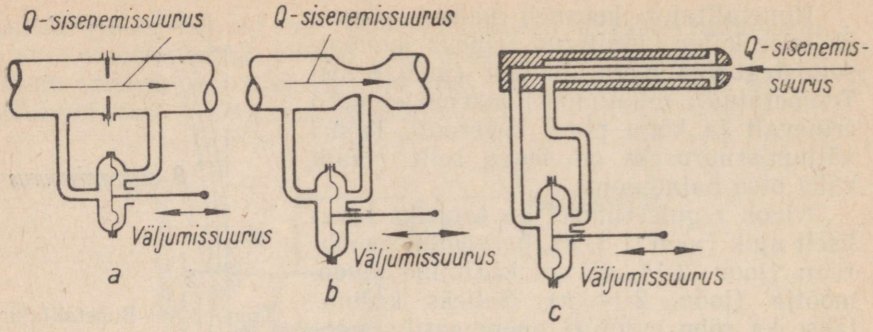
Viimati nimetatud elemendi tegevuse aluseks on torus *1* esineva hüdraulilise takistuse muutumine sõltuvalt reguleeritava nivoo kõrgusest. Sisseantava õhu rõhk peab seejuures olema kindlasti konstantne.

Vedeliku ja gaasi kulu reguleerimisel on levinumaiks tajureiks mitmesugused diafragmad, s. t. avadega vaheseinad, mis on pandud vedeliku või gaasi voolu teele (joon. 2-15, *a*).

Kulu mõõtmisel kasutatakse veel, kuigi vähemal määral, Ven-



Joon. 2-14. Nivootajurid:
a — membraaniline, *b* — kaaluline, *c* — pneumaatiline

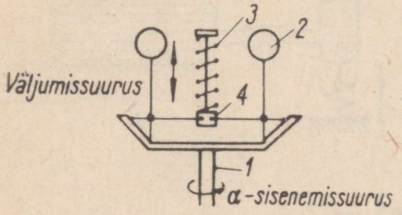


Joon. 2-15. Kulutajurid:
a — diafragma, *b* — Ventour'i toru, *c* — Pitot' toru

tour'i (joon. 2-15, *b*) või Pitot' (joon. 2-15, *c*) toru, kus samuti tekib staatiline rõhkude vahe, mis on võrdeline neist torudest ajaühiku jooksul läbimineva vedeliku või gaasi hulgaga.

Nurkkiiruse reguleerimisel kasutatakse tajureina tsentrifugaalpendleid (joon. 2-1 ja 2-16).

Nurkkiiruse muutus põhjustab ka vardale *1* (joon. 2-16) kinnitatud vihtide *2* poolt tekitatud tsentrifugaaljõu muutuse. Tsentrifugaaljõud tasakaalustatakse vedruga *3* ning antakse edasi muhvile *4*. Sõltuvalt tsentrifugaaljõu ja vedru pinge suhtest liigub muhv kas üles või alla.



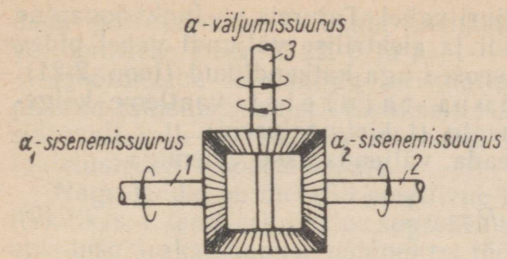
Joon. 2-16. Tsentrifugaaltajur

Jälgivsüsteemides ja mõnedes teistes automaatreguleerimisseadmeis kasutatakse mehaanilisi diferentsiaatortajureid, millede ülesandeks on mõõta süsteemi sisenemis- ja väljumissuuruste vahet. Neid tajureid kasutatakse tavaliselt juhtudel, kui süsteemi kontrollitavad osad asuvad üksteise ligidal, näiteks võllide pöörlemise kooskõlastamiseks (joon. 2-17).

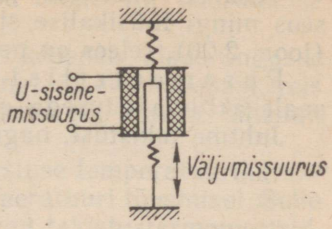
Selles seadmes võrreldakse võllide *1* ja *2* nurkasendeid α_1 ja α_2. Kui nende võllide nurkkiirused on võrdsed, siis võll *3* ümber oma telje ei pöörle, kui aga on olemas erinevus, siis ta pöörleb selle erinevuse võrra.

Elektromagnettajuri (solenoidi) sisenemissuuruseks on pinge elektromagneti mähistel, väljumissuuruseks südamiku liikumine (joon. 2-18).

Kui väljumissuuruseks on vaja saada mitte kulgevat, vaid pöörlevat liikumist, siis kasutatakse pöörduva ankruga alalis- või vahelduvvoolu-elektromagnetit. Alalisvoolu puhul tasakaalustatakse niisuguse elektromagneti ankur vedruga, kusjuures sisene-



Joon. 2-17. Diferentsiaatortajur

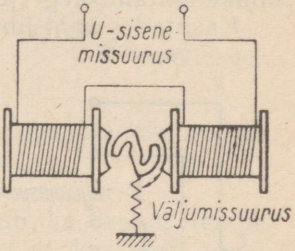


Joon. 2-18. Elektromagnet

mispinge muutumisel pöördub ankur vastava nurga võrra (joon. 2-19).

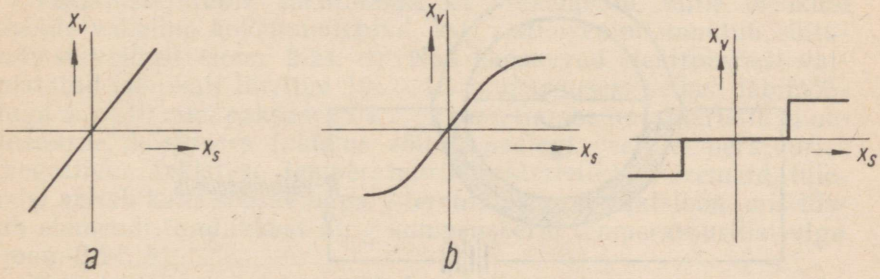
Vahelduvvoolu puhul kasutatakse alumiiniumankruga elektromagnetit.

Elektrilise väljundiga tajurid on väljumissuuruse iseloomust sõltuvalt kaht tüüpi. Esimeseks tüübiks on nn. parameetrilised elemendid, kus kasutatakse sõltuvalt reguleeritava parameetri muutusest kas aktiiv-, induktiiv- või mahtuvusliku takistuse muutumisi. Need lülitatakse mõõteskeemidesse, millel on kõrvaline toiteallikas. Väljumissuuruseks saadakse tavaliselt pinge, mis on võrdeline mõõdetava parameetriga. Siin toimubki tavaliselt kaheastmeline muundamine, s. o. reguleeritava parameetri muutus põhjustab mehaanilise asendimuutuse ja see elektrilise suuruse muutuse.



Joon. 2-19. Pöörduva ankruga magnet

Teist tüüpi tajurid on niisugused, mille väljundis saadakse kõrvalise toiteallikata vahetult pinge, mis on võrdeline sisenemissuurusega. Need on nn. generaatortajurid, kus toimub tavaliselt üheastmeline muundamine. Reguleerimissüsteemides kasutatakse mõlemaid tüüpe.



Joon. 2-20. Tajuri karakterkõverad: *a* — lineaarne, *b* — ebalineaarne

Joon. 2-21. Relee karakterkõver

Tehakse vahet relee ja tajuri vahel. Tajureis on funktsionaalne seos mingi füüsikalise sisendi ja elektrilise väljundi vahel pidev (joon. 2-20), relees on need seosed aga katkendlikud (joon. 2-21).

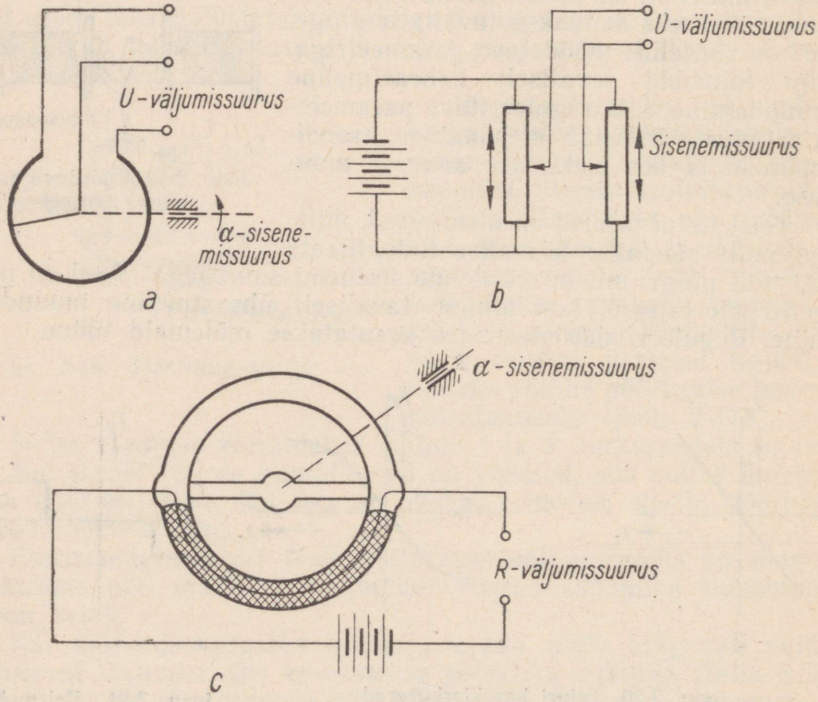
Parameetrilist tüüpi tajureist vaatleme kõigepealt aktiivtakistusega elemente (takistustajureid).

Juhtme takistust, nagu teada, väljendatakse valemiga

$$R = \varrho \frac{l}{S}, \tag{9}$$

kus ϱ on aine eritakistus, l — juhtme pikkus ja S — juhtme ristlõikepind. Elektrilise takistustajuri töötamispõhimõte seisab selles, et temas muudetakse sisenemissuurusena üht valemis esinevat suurust. Seejuures muutub kogutakistus selles ahelas, kuhu ta on rakendatud, seega ka väljumissuurusena elektripinge või elektrivool. Levinuimaks on reostaattajurid, kus sõltuvalt parameetri muutusest muutub aktiivtakistus. Need töötavad nii alalis- kui ka vahelduvvooluga, on lihtsa konstruktsiooniga ja töökindlad. Puuduseks on neil hõõrduvate pindade olemasolu ja seega suhteliselt lühike töötamisaeg (joon. 2-22).

Kasutades kaht libiseva kontaktiga reostaati, võime neid raken-



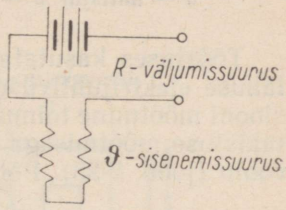
Joon. 2-22. Reostaattajurid

dada potentsiomeetrina kahe mehaanilise nihke või pöördumise võrdlemiseks (joon. 2-22, *a* ja *b*).

Hõõrdevaba kontaktiga reostaattajur koosneb klaasrõngasse pandud takistustraadist (tavaliselt plaatina) ja elavhõbedast, mis sõltuvalt selle rõnga pöördenurgast rohkem või vähem lühistab takistustraati (joon. 2-22, *c*).

Nagu teada, on metallil positiivne takistuse temperatuurikarakteristik, s. t. tema eritakistus suureneb temperatuuri tõusmisel. Selle omaduse ärakasutamise põhimõttel töötavad takistustermomeetrid. Kasutamisviisi poolest võib neid jagada kahte liiki:

1. Takistustermomeetrid aine voolamiskiiruse, rõhu, kontsentratsiooni jne. mõõtmiseks. Need on ehitatud väga peenest (0,02 ... 0,1 mm) ja lühikesest (1 ... 50 mm) traadist, mida kuumutatakse elektrivooluga temperatuurini 100 ... 400° C. Traat on mõõdetava keskkonna sees ning selle keskkonna kiiruse, rõhu jne. muutumise mõjul muutub ka selle takistustraadi jahutamise intensiivsus, seega ka temperatuur ning aktiivtakistus.

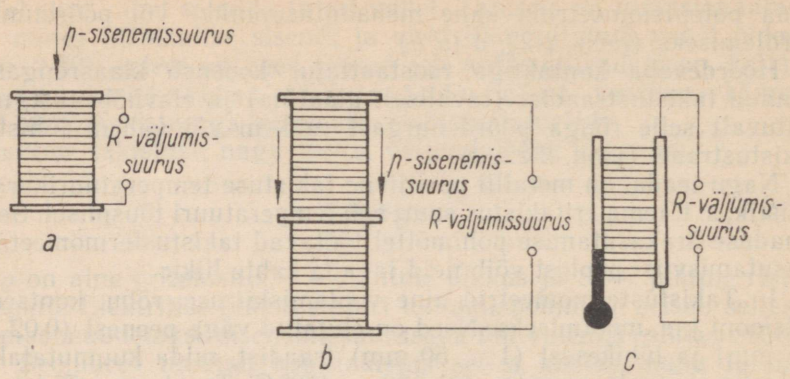


Joon. 2-23. Metalltakistustermomeeter

2. Takistustermomeetrid aine temperatuuri mõõtmiseks. Siin on takistustraat mähitud karkassile ning tavaliselt väljastpoolt kestaga kaitstud. Soojus, mis tekib traadis elektrivoolu mõjul, on sel juhul palju väiksem soojusest, mida ta saab mõõdetavalt keskkonnalt. Sõltuvalt selle keskkonna temperatuuri muutumisest muutub ka traadi temperatuur, seega ka ta aktiivtakistus. Materjaliks on kas vask (mõõtepiirkond —260° ... +150°) või plaatina (mõõtepiirkond —193° ... +1000°, tavaliselt kasutatakse siiski temperatuurini kuni 500°) (joon. 2-23). Pooljuht-takistustermomeetritel (termistoridel) on negatiivne takistuse temperatuurikarakteristik, s .t. temperatuuri tõusmisel nende takistus väheneb ja palju tunduvamal määral kui metallidel. Seetõttu kasutatakse neid tehnikas üha laialdasemalt.

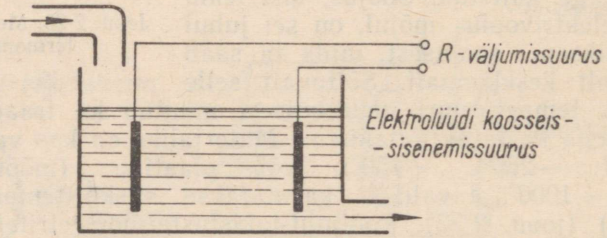
Takistustajureina kasutatakse ka söesambaid, mille üksikute seibide vaheline kokkupuutepind, s. t. ristlõikepind muutub sõltuvalt survejõust (joon. 2-24, *a*). Nad koosnevad elektronsöest valmistatud hoolikalt lihvitud 10 ... 15 ümmargusest seibist läbimõõduga 5 ... 10 mm, paksusega 1 ... 2 mm. Samba karakteristik ei ole lineaarne, kusjuures takistus sõltub pealegi veel temperatuurist (negatiivne takistuse temperatuurikarakteristik). Paremaid tulemusi annab kahe söesambaga diferentsiaalkonstruktsioon, mis tõstab elemendi tundlikkust ning kompenseerib temperatuurilist viga (joon. 2-24, *b*).

Takistustermomeetrina võib kasutada ka kontakttermomeetrit, s. o. elavhõbedasammast, mis temperatuurist sõltuvalt muudab välisahela takistust (joon. 2-24, *c*).



Joon. 2-24. Söesammas-takistustajurid:
a — lihttajur, *b* — diferentsiaaltajur, *c* — elavhõbe-takistustajur

Tööstuses kasutatakse väga laialdaselt tajureid, mis töötavad lahuse elektrijuhtivuse mõõtmise printsiibil. Vedeliku kontsentratsiooni mõõtmine toimub kahe elektroodi vahel oleva vedeliku aktiivtakistuse mõõtmisega. Tavaliselt kasutatakse siinjuures vahelduvvoolu (joon. 2-25). Põhimõtteliselt võib seda printsiipi kasutada ka



Joon. 2-25. Elektrolüütiline tajur

nivoo mõõtmiseks. Takistustajureid kasutatakse kas sild-, diferentsiaal- või kompensatsioonskeemis. Nad on praktiliselt inertsita. Tajuri väljumissuurus (pinge või vool) tavaliselt võimendatakse.

Induktiivtajurites kasutatakse induktiivsuse muutumist sõltuvalt magnetahela magnetilise takistuse muutumisest.

Ahela *1* takistus muutub sõltuvalt ankru *2* asendi muutumisest (joon. 2-26, *a*). Õhuvahe β suurenemisel kasvab magnetiline takistus, pooli *2* induktiivsus aga väheneb. Õhuvahe vähenemisel ka magnetiline takistus väheneb ja pooli induktiivsus suureneb.

Diferentsiaalset induktiivtajurit kasutatakse sel juhul, kui on vaja saada suuremat tundlikkust (joon. 2-26, *b*). Ühtlasi väheneb sel puhul ka tema lineaarse karakteristiku ning ankru asendimuutuse tagasimõju induktiivsusele.

Induktiivtajur võib olla ka avatud magnetahelaga (solenoid).

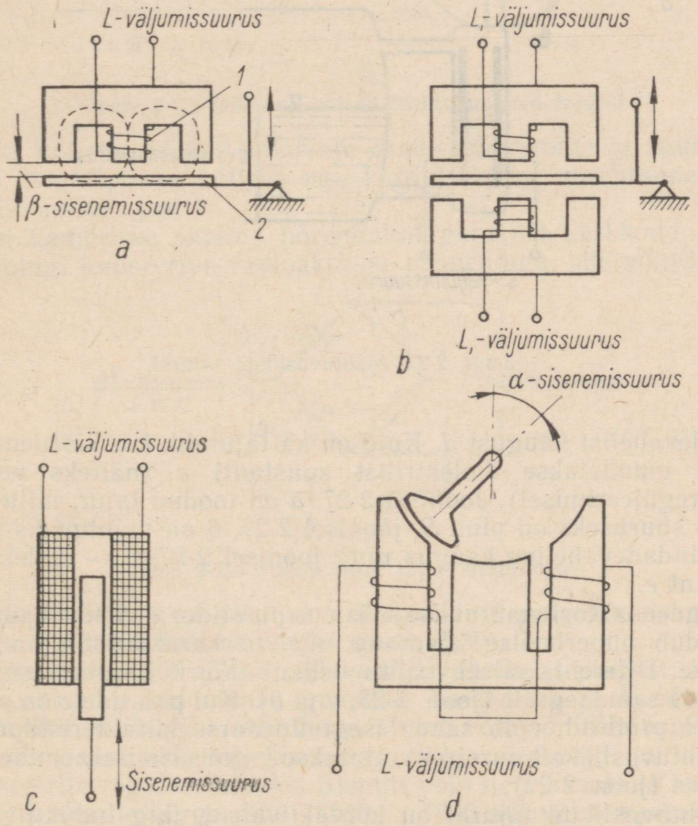
See tajur koosneb poolist ja terassüdamikust. Südamiku lineaarne asendimuutus põhjustab pooli induktiivsuse muutuse (joon. 2-26, c). Ka siin kasutatakse diferentsiaalset skeemi suurema tundlikkuse saamiseks.

Pöörleva liikumise puhul kasutatakse skeemi, mis on toodud joonisel 2-26, *d*.

Tavaliselt lülitatakse induktiivtajureid kas sild- või diferentsiaalskeemi. Toiteks kasutatakse eranditult vahelduvvoolu. Nende positiivseks omaduseks on hõõrduvate pindade puudumine, puuduseks aga vahelduvvoolu tarve ja suur tundlikkus toitevoolu sageduse suhtes. Seetõttu on tihti vaja spetsiaalset vahelduvvoolugeneraatorit või muundajat.

Kondensaatori mahtuvus arvutatakse valemiga

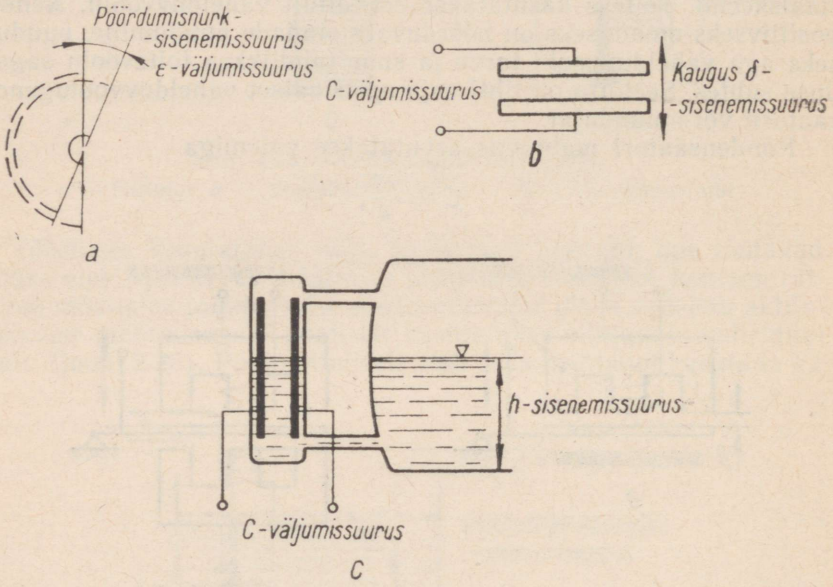
$$C = \frac{\varepsilon S}{d},$$



Joon. 2-26. Induktiivtajurid:
a — ühepoolne, *b* — diferentsiaalne, *c* — avatud ahelaga (solenoid), *d* — pöörleva liikumisega

kus ε on dielektriline konstant (õhul $\varepsilon = 0{,}89 \cdot 10^{-13}$ F/cm), S — kondensaatori töötav pind ja d — plaatidevaheline kaugus.

Mahtuvuslike tajurite töötamispõhimõte seisab selles, et sisenemissuurusena kasutatakse üht valemi paremal pool olevat suurust, mille tõttu väljumissuurusena muutub tema mahtuvus. Tavaliselt muudetakse kas pinda S tema pööramisel ümber ristt elje või



Joon. 2-27. Mahtuvuslikud tajurid

pindadevahelist kaugust d. Kuid on ka tajureid, kus sisenemissuurusena muudetakse dielektrilist konstanti ε (näiteks vedeliku nivoo reguleerimisel). Joonisel 2-27, *a* on toodud tajur, mille muutuvaks suuruseks on pind S, joonisel 2-27, *b* on muutuvaks suuruseks pindadevaheline kaugus ning joonisel 2-27, *c* — dielektriline konstant ε.

Kondensaatori mahtuvuse sõltuvus plaatidevahelisest kaugusest väljendub hüperboolse kõverana, s. t. ta karakteristik on ebalineaarne. Diferentsiaalsel mahtuvuslikul tajuril kasutatakse kahte tööpinda samaaegselt (joon. 2-28, *a* ja *b*). Kui plaatidele on valitud sobivad profiilid, võib saada isegi lineaarse karakteristiku.

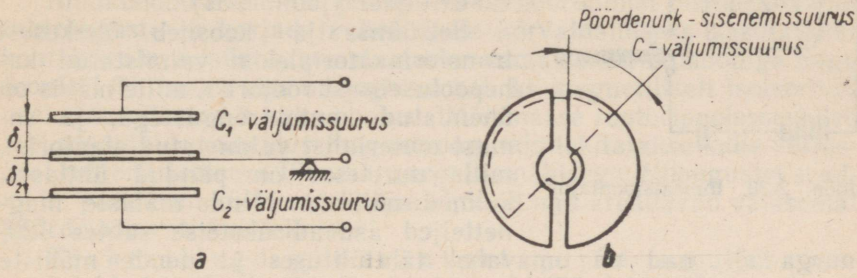
Mahtuvuslikke tajureid kasutatakse reguleerimisskeemides sildlülituses (joon. 2-29).

Mahtuvuslikud tajurid on kontaktivabad ning induktiivtajuritega võrreldes suure tundlikkusega ja väikese üldkaaluga. Nende puuduseks on see, et nad on tundlikud ümbritseva keskkonna temperatuuri ja niiskuse suhtes ning nende toitmiseks on vaja kõrg-

sageduslikku energiaallikat (10 . . . 100 kHz). Seepärast on vaja kõrgsagedusgeneraatorit, mis teeb aga üldskeemi suhteliselt keeruliseks ja süsteemi kalliks.

Elektrilise väljumissuurusega tajurite hulka kuuluvad ka fotoelemendid.

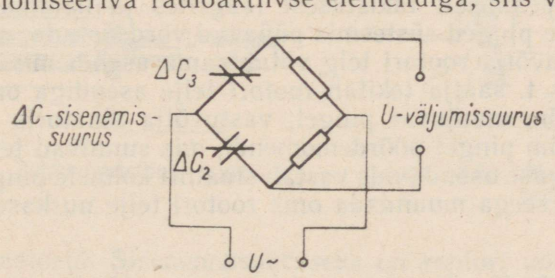
Fotoelektrilisteks tajuriteks võivad olla nii sisemise kui ka välise fotoefektiga fotoelemendid, ent samuti ka fototakistid. Posi-



Joon. 2-28. Diferentsiaalsed mahtuvuslikud tajurid

tiivseks küljeks on neil liikuvate osade puudumine ja suur tundlikkus, negatiivseks küljeks aga karakteristiku muutumine sõltuvalt töötamise ajast.

Kui kambrisse suletud hõrendatud gaasilist keskkonda mõjutada mingi ioniseeriva radioaktiivse elemendiga, siis võib ionisat-

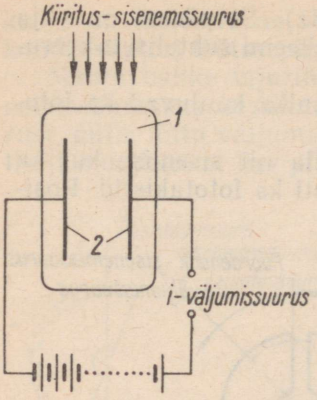


Joon. 2-29. Mahtuvuslik tajur sildlülituses

sioonikambrisse *1* paigutatud elektroodide *2* pingestamisega tekitada kambris ionisatsioonvoolu (joon. 2-30).

Ionisatsioonvool sõltub elektroodidevahelisest pingest, ioniseeriva keskkonna iseloomust, gaasilise keskkonna ja kambri enda parameetritest. Nende sõltuvuste alusel võib ionisatsioontajureid kasutada gaasi kulu või koosseisu, kõrge vaakuumi ja ka teiste parameetrite reguleerimiseks. Samuti võib neid kasutada ka kinnises nõus olevate kõrge rõhu (5000 . . . 7000 at) või temperatuuriga (~ 2500° C) vedelike nivoode reguleerimiseks.

Jälgiv- ja mõnedes teistes automaatreguleerimissüsteemides kasutatakse ühe võlli nurkasendi muutuse sünkroonseks edasiand-



Joon. 2-30. Ionisatsioontajur

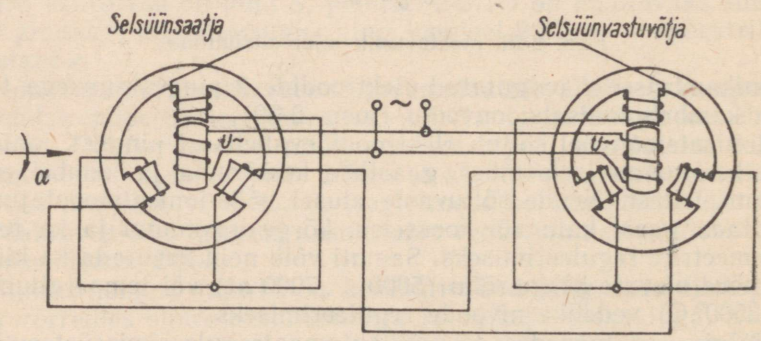
miseks teisele või kahe võlli nurkasendite võrdlemiseks selsüüne. Need on ühefaasilise ergutusmähisega ja kolmefaasilise sekundaarmähisega (sünkroniseerimismähisega) elektrimootorid, väliselt sarnased sünkroongeneraatorite ja -mootoritega.

Selsüünseade koosneb saatjast ja vastuvõtjast (joon. 2-31).

Selsüünsaatja koosneb õhukesest transformaatoriplekist valmistatud kahepooluselisest rootorist, mille mähis on ühendatud kontaktrõngastega, ja samast materjalist valmistatud staatorist, mille uuretesse on pandud ühtlaselt kolmed mähised. Nende mähiste magnetteljed asuvad üksteise suhtes 120° nurga all, nad on omavahel tähtlülituses ja nende mähiste otsad on välja toodud kolme klemmi alla. Kui rootori kontaktrõngad on lülitatud vahelduvvoolu allikaga, siis tekib rootoris vahelduv magnetväli, mis põhjustab vahelduvad pinged staatori kolmel mähisel.

Vastuvõtja on sama konstruktsiooniga.

Üks selsüünidest (selsüünsaatja) määrab rootori nurkasendi, teine (selsüünvastuvõtja) jälgib teda sünfaasselt mõninga veaga, mis sõltub peamiselt takistusest laagrites ja hammasülekandes. Kõigi faaside pinged süsteemis püüavad võrdsustuda, mis viib selleni, et vastuvõtja rootori telg võtab sama asendi mis saatja rootori telgki, s. t. saatja tekitab rootori telje asendiga oma staatori mähistes kolm muutuvat pinget, vastuvõtja staatoris aga tekitavad need kolm pinget pöördemomendi, mis sunnivad tema rootorit võtma niisuguse asendi, mis vastab staatori kolmele pingele. Saatja ülesanne on seega muundada oma rootori telje nurkasend pingete



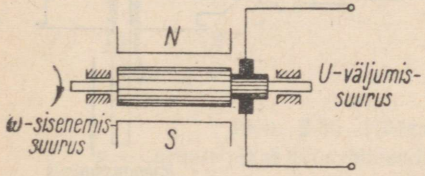
Joon. 2-31. Selsüünseade

grupiks, mis on ergutuspingega kas faasis või vastufaasis, vastuvõtja aga muundab need pinged oma rootori nurkasendeiks. Järelikult jälgivad saatja ja vastuvõtja rootorite teljed üksteist nii, nagu oleksid nad ühendatud mehaaniliselt. Praktikas kasutatakse veel selsüünide töötamist transformaatorirežiimis, mille ülesandeks on mõõta võllide asendite erinevust, ja diferentsiaalskeemis, mille ülesandeks on võllide asendite ja kiiruste liitmine ja lahutamine. Sel juhul on ka rootoritel kolmefaasiline mähis.

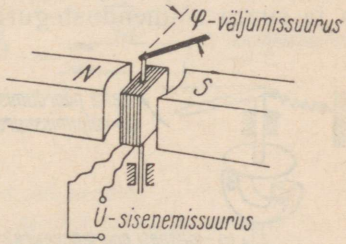
Induktsioonselsüünide puuduseks on hõõrdumise olemasolu kontaktrõngaste ja harjade vahel. Selle kõrvaldamiseks kasutatakse kontaktivabu selsüüne, kus staator on sama konstruktsiooniga nagu joonisel 31, rootor aga on jagatud kaheks magnetiliselt isoleeritud osaks, moodustades kaks poolust. Mõlemasse rootoripoolesse tuleb läbi otsapilude vahelduv magnetvoog, mis tekitatakse kahe väljaspool rootorit asetseva liikumatu ergutusmähisega. Niisugustel seadmetel puuduvad küll kontaktpinnad, kuid nad arendavad väiksemat pöördemomenti kui eelmised.

Elektrilised generaatortajurid, nagu juba eespool öeldud, muundavad reguleeritavad mitteelektrilised suurused ilma täiendava energiaallikata vahetult pingeks või vooluks.

Tahhomeetrilised tajurid on miniatuursed alalis- või vahelduv-



Joon. 2-32. Tahhomeetriline tajur



Joon. 2-33. Magnetelektriline tajur

voolugeneraatorid. Sisenemissuuruseks on rootori pöörlemise kiirus, väljumissuuruseks — pinge harjadel (joon. 2-32).

Tahhogeneraatoreid kasutatakse reguleerimissüsteemides ka diferentsieerivelemendina, s. o. elemendina, mille väljumisparameetriks on sisenemisparameetri muutumise kiirus, s. t. esimene tuletis aja järgi.

Kui ühendada kaks eri materjalist juhet, siis tekib ühenduskoha kuumutamisel nende vabade otste vahel emj. Neid juhtmeid nimetatakse termopaariks. Tekkinud emj. sõltub termopaari materjalist ja temperatuuride vahest ühendatud otste ja vabade otste vahel. Materjalideks, millest valmistatakse termopaare, on tavaliselt plaatina-plaatinaroodium, kromell-alumell, vask-konstantaan, vask-kopell jt.

Tööstuses kasutatakse veel teisigi eriotstarbelisi generaatorta-

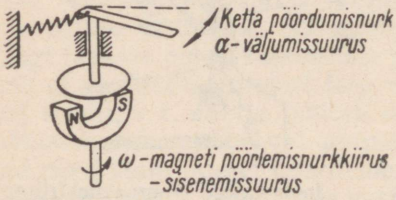
jureid, nagu vesinikuioonide kontsentratsiooni määramiseks nn. pH-tajureid jt.

Tajureist, kus elektriline suurus muundatakse mehaaniliseks liikumiseks, kasutatakse tööstuses magnetelektrilisi (joon. 2-33). Induktsioontahhomeetreis (joon. 2-34) aga muundatakse mehaaniline sisenemissuurus mehaaniliseks väljumissuuruseks elektri kaasabil.

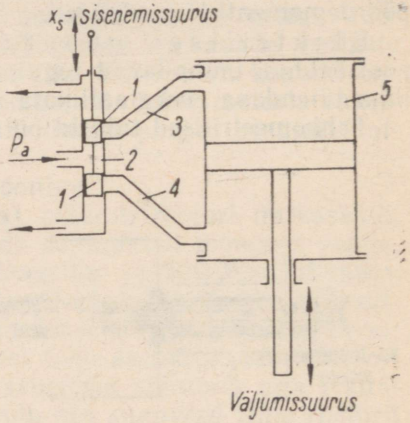
Võimendid ja teenurid. Võimenduselemente kasutatakse automaatreguleerimissüsteemides väga mitmesuguseid ning nende ülesandeks on tajuvelemendist või korrigeerivast elemendist tuleva sisenemissuuruse võimsuse suurendamine selle tasemeni, mis on küllaldane võimenduselemendiga ühendatud reguleerimisorgani asendi muutmiseks.

Tehakse vahet võimendi ja teenuri vahel. Teenuriks nimetatakse kinemaatilise väljundiga, võimendiks aga mittekinemaatilise väljundiga seadet. Võimendusteguriks nimetatakse mõlemal juhul väljumisvõimsuse (-jõu) ja sisenemisvõimsuse (-jõu) suhet.

Hüdraulilised ja pneumaatilised teenurid on sujuva toimega ja suure võimendusteguriga,



Joon. 2-34. Induktsioontahhomeeter



Joon. 2-35. Silindrilise tüürkolviga hüdraulilise teenuri skeem

mis ulatub kuni mitme tuhandeni. Tööstuses on hüdraulilistest ja pneumaatilistest teenureist levinumad 1) silindrilised tüürkolviga, 2) drosselplaat või -nõel koos düüsiga, 3) joatoru- ja 4) kombineeritud teenurid.

Silindrilise tüürkolvi skeem on toodud joonisel 2-35.

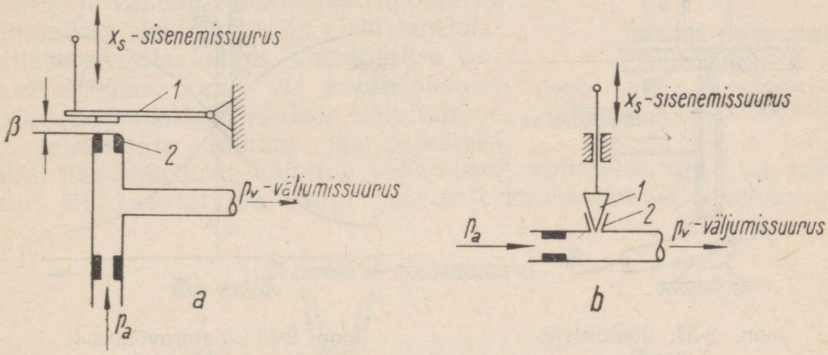
Kaks jäigalt ühendatud tüürkolbi (kolvipaar) *1* liiguvad silindris *2* suhteliselt väikese jõu toimel suuruse x_s võrra ja suunavad suurema hulga töötavat ainet (tavaliselt õli rõhuga $p_a = 2 \ldots 6$ atü ja rohkemgi) kas ülemisse *3* või alumisse *4* kanalisse, mõjutades seega vastavas suunas ka hüdraulilise teenuri *5* kolbi. Hüdrauliline teenur koosneb silindrist ja temas liikuvast kolvist (täiturist), mis on reguleerimisorganiga jäigalt ühendatud. Tasakaaluasendis suleb kolvipaar mõlemad kanalid, õli ei lähe teenuri silindrisse, täitur on tegevuseta, reguleerimisorgan seisab. Vali-

des kolvipaari kanalitele vastavad profiilid, võib muuta töötava aine liikumise kiirust teenurisse, järelikult ka reguleerimise kiirust. Seda tüüpi võimendi karakteristik, s. o. õli kulu sõltuvus kolvipaari asendi muutusest piki oma telge (resp. õli rõhk teenuri kolvile, seega ka väljumisjõud) on tegelikult lineaarne ainult teatud piirides.

Kolvipaari täiskäik on väiksematel seadmetel 2 . . . 4, suurematel ca 10 mm ning nad võivad ruumis olla ükskõik millises asendis. Nimetatud tüürkolbe kasutatakse tavaliselt hüdraulilistes, harvem pneumaatilistes regulaatorites.

Düüsi koos drosselplaadiga või drosselnõelaga kasutatakse tavaliselt pneumaatilistes, harvem hüdraulilistes seadmetes (joon. 2-36).

Plaadi *1* (joon. 36, *a*) asendi muutmiseks on vaja võrdlemisi



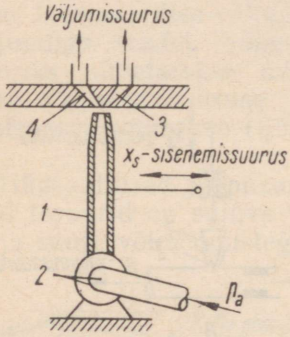
Joon. 2-36. Hüdraulilised võimendid:
a — drosselplaat-düüsvõimendi, *b* — drosselnõel-düüsvõimendi

väikest jõudu. Kui me muudame ta asendit x_s võrra, muutub ka plaadi *1* ja düüsi *2* vahel olev pilu β, mille kaudu pideva joana väljub töötav aine. Töötav aine (õli, vesi, õhk) tuleb torusse rõhuga p_a. Sõltuvalt pilust β on rõhk väljundis p_v kas võrdne rõhuga p_a (kui $\beta = 0$) või seda väiksem, mida suurem on β, s. t. on võrdeline suurusega x_s. Võimendi karakteristik, s. t. $p_v = p(\beta)$ ei ole lineaarne, kuid sobiva düüsiava valikuga, mis sõltub töötava aine viskoossusest ning rõhust, võib saada mõningas piirkonnas peaaegu lineaarse karakteristiku.

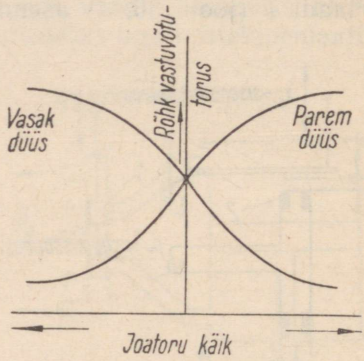
Joonisel 36, *b* on toodud drosselnõelaga võimendi skeem. Nagu eelmisegi skeemi puhul, põhjustab siin nõela *1* lineaarne asendimuutus oma pesas *2* rõhu muutuse väljundis p_v ning on sellega analoogiline. Kui rõhkude suhe $\frac{p_v}{p_a}$ püsib piirides 0,4 . . . 0,9, on karakteristik lineaarne. Nõela ja plaadi käigu maksimaalne pikkus on 0,4 . . . 0,5 mm.

Joatoruvõimendeid kasutatakse hüdraulilistes seadmetes (joon. 2-37). Selles võimendis pöördub joatoru *1* suhteliselt väikese jõu mõjul ümber telje *2*. Torusse tuleb töötav aine rõhuga $p_a = 2 \ldots 8$ atü. Sõltuvalt sellest, kas toru ots on rohkem ava *3* või *4* vastas, voolab sellest avast sisse ka töötavat ainet rohkem. Töötavaks aineks on tavaliselt õli, harvemini vesi. Toru otsa maksimaalseks käiguks on 2 . . . 5 mm. Karakteristik $\frac{Q}{Q_{max}}$ ja seega ka p_v pole sõltuvalt toru otsa käigust lineaarne (joon. 2-38), mis on selle võimendi üheks puuduseks.

Kui ühekordne võimendus ei ole teenuri käivitamiseks küllaldane, kasutatakse tavaliselt mitmesuguseid kombineeritud võimendeid. Need koosnevad ülaltoodud võimendite elementidest. Näitena kombineeritud hüdraulilistest võimendeist on joonisel 2-39 toodud kombineeritud võimendi «joatoru-tüürkolb».



Joon. 2-37. Joatoruvõimendi



Joon. 2-38. Joatoruvõimendi karakterkõverad

Kui häiriv signaal puudub, on keskasendis nii joatoru *1* kui ka kolb *2*, ning kanalid *8* on suletud. Kui aga regulaatori tajurist tuleb signaal, kaldub joatoru kõrvale ning väike osa töötavast ainest läheb kas kanali *4* või kanali *5* kaudu kolvi otstele *6* või *7*. Seetõttu muudab kolb *2* oma asendit ning avab ühe kanalitest *8* sekundaarsele töötavale ainele teenurisse minekuks. Toru *3* kaudu läheb sekundaarne töötav aine, milleks on tavaliselt õli, kolvi *2* silindrisse. Toru *9* kaudu väljub teenurist tulev töötav aine. Sel viisil võimendatakse suhteliselt väike jõud, mis kulub joatoru asendi muutmiseks, kaheastmeliselt võrdlemisi suureks jõuks.

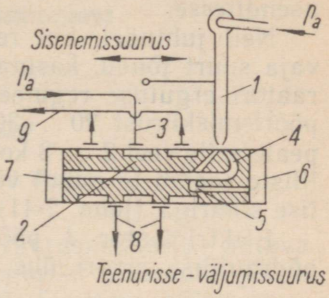
Täitureiks on ülalkirjeldatud võimenditel tavaliselt kas ühekolvilised ühe- või kahepoolse tegevusega hüdraulilised või pneumaatilised teenurid, kus töötava aine rõhkude vahe, mis on tingitud kas drosselkolbide või joatoru asendist nende neutraalasendi

suhtes, mõjub teenuri kolvile (täiturile), sundides seda liikuma väiksema rõhu suunas (joon. 2-35 ja 2-40).

Viimasega aga on jäigalt ühendatud reguleerimisorgan.

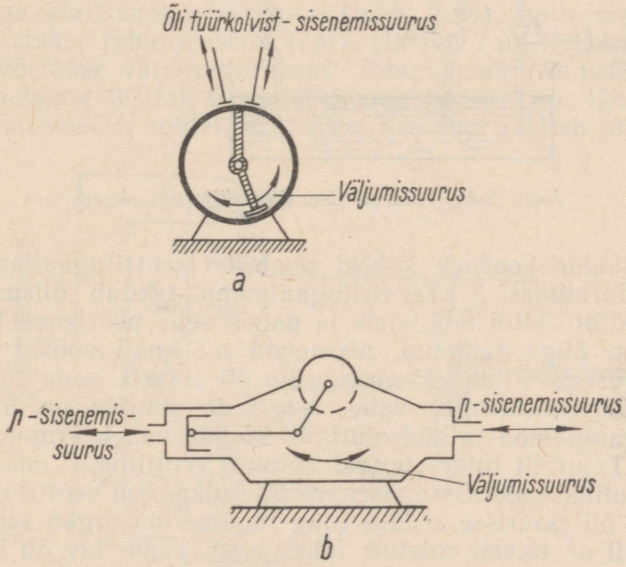
Joonisel 2-40 on toodud pöörleva (*a*) ja edasi-tagasi pöörleva (*b*) liikumisega teenuri skeem.

Kasutatakse veel mitmekolvilisi teenureid ning membraanteenureid, kus membraani läbipainde suurus, seega ka temale kinnitatud reguleerimisorgani asendi muutus sõltub membraani kummalegi poolele suunatud töötava aine rõhkude vahest. Tavaliselt kasutatakse neid pneumaatilistes seadmetes. Membraani käigu pikkus on kuni 40 mm ning töötava aine rõhu korral 1,05 ... 1,5 atü on tema poolt tekitatud jõud kuni 200 kg.



Joon. 2-39. Kombineeritud võimendi «joatoru-tüürkolb»

Elektriliste teenurite hulka kuuluvad alalis- ja vahelduvvoolu-elektrimootorid. Enamikus elektrilistes ja elektromehaanilistes regulaatorites kasutatakse teenureina ühe-, kahe- või kolmefaasilist asünkroonmootorit, millede käivitamine ja seiskamine toimub magnetkäiviti abil. See omakorda käivitub vahereleest, vaherelee aga juba tajurist. Nii kasutatakse siingi vähemalt kaheastmelist võimendust.



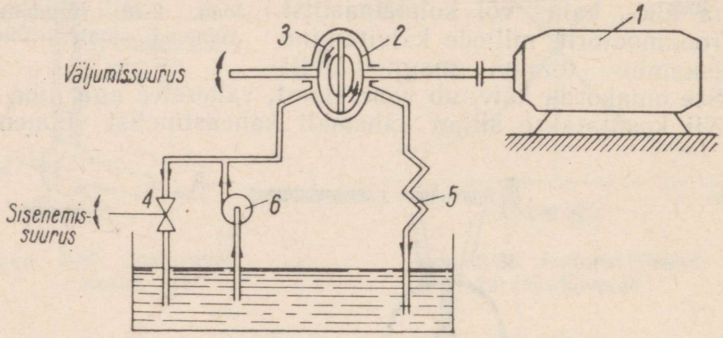
Joon. 2-40. Hüdraulilised teenurid:
a — pöörleva kinemaatikaga, *b* — edasi-tagasi ja pöörleva kinemaatikaga

Viimasel ajal reguleeritakse vahelduvvoolumootorit ka üheastmelise magnetvõimendiga.

Alalisvoolumootoreid tüüritakse kas elektronlampidega, tiratronidega, magnetvõimendajatega, elektromagnetiliste ning hüdrauliliste siduritega ja teiste seadmetega. Kõigi elektrimootorite ahelais peavad olema avariide vältimiseks ette nähtud nn. lõppiirajad või mõned muud seadmed, mis katkestavad elektrimootori toitevoolu, kui reguleerimisorgan on jõudnud äärmistesse asenditesse.

Neil juhtudel, kui reguleerimisorgani asendi muutmiseks on vaja suurt jõudu, kasutatakse süsteemi generaator-mootor. Generaatori ergutuse reguleerimise teel võib sujuvalt muuta mootori pöörlemiskiirust 20 . . . 30 korda ning mootori enda ergutuse abil peale selle veel 2 . . . 3 korda, seega kokku 40 . . . 90 korda. Hüdrauliliste seadmete puhul võib samasugust efekti saada ka hüdraulilise siduriga (joon. 2-41).

Elektrimootor *1* pöörleb jääva kiirusega ja on ühendatud hüdraulilise siduri ühe poolega — tsentrifugaalpumbaga. Hüd-

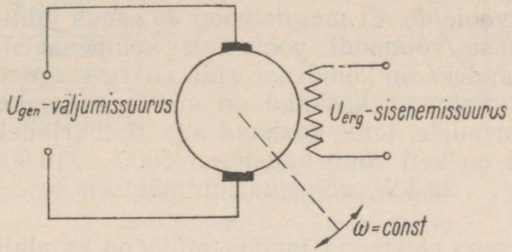


Joon. 2-41. Hüdraulilise sidurvõimendi skeem

rauliline sidur koosneb kahest poolest: tsentrifugaalpumbast *2* ja hüdroturbiinist *3*. Tsentrifugaalpump tekitab õlisurve, mis mõjub hüdroturbiini labidatele ja paneb selle pöörlema. Kui hüdrosidur on õliga täidetud, pöörlevad mõlemad pooled peaaegu sama kiirusega. Mida vähem aga on õli siduris, seda suurem on poolte pöörlemiskiiruste vahe, s. t. seda suurem on libisemine tsentrifugaalpumba ja hüdroturbiini võllide vahel. Pump *6* töötab pidevalt. Tajureilt tulev signaal antakse ventiilile *4*, mis reguleerib hüdraulilisse sidurisse siseneva õli hulka. Kui ventiil on täiesti lahti, siis õli sidurisse ei lähe ning reguleerimisorgan seisab. Kui aga ventiil on täiesti suletud, läheb kogu pumbatav õli hüdraulilisse sidurisse ning reguleerimisorgan muudab oma asendit maksimaalse kiirusega. Õli voolab paaki tagasi läbi jahuti *5*.

Elektromagnetiliste ja elektronvõimendite hulka kuuluvad

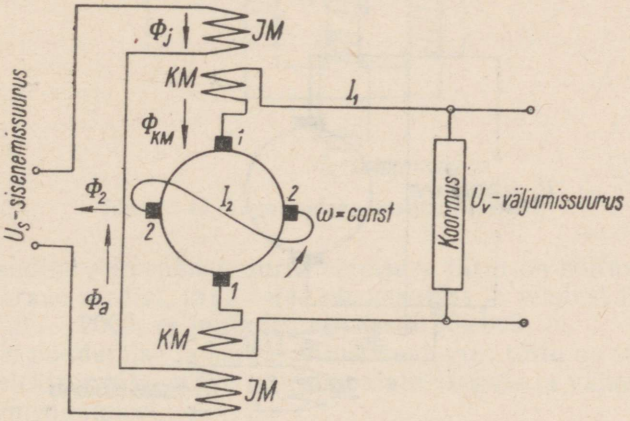
elektrimasin-, magnet-, elektron- ja tiratronvõimendid. Elektrilised võimendid annavad suuri võimendusi väikese gabariidi juures ning neis saab kasutada standardseid tüüpdetaile. Lihtsamaks elektrimasinvõimendiks on alalisvoolugeneraator (joon. 2-42).



Joon. 2-42. Elektrimasinvõimendi skeem

Generaatorist saadava ja generaatori ergutusmähisesse antava võimsuse suhet nimetatakse võimendusteguriks võimsuse järgi. Tavalistel generaatoritel on see 20 ... 100. Suurema võimendusteguri saavutamiseks kasutatakse kaheastmelist võimendust. Kuid sellega suureneb ka nende inerts. Soov saada suurt võimendust võimalikult väikese inertsi juures viis spetsiaalsete elektrimasinvõimendite konstrueerimisele. Tehakse vahet põikergutusväljaga ja iseergutava elektrimasinvõimendite vahel.

Põikergutusväljaga võimendi on suhteliselt väikese ergutusvõimsusega alalisvoolugeneraator (joon. 2-43), mille ergutusmähist kasutatakse juhtmähisena (*JM*). Harjad *2* on lühistatud, harjadelt *1* võetakse väljumisvõimsus. Juhtmähiste *JM* poolt tekitatud magnetvoog tekitab harjadel *2* emj. Et need on lühises, siis on tekkinud vool I_2 suhteliselt tugev. See vool tekitab magnetvoo



Joon. 2-43. Põikergutusväljaga elektrimasinvõimendi skeem

Φ_2, mis on suunatud ristharjade *2* telge mööda. Ankru pöörlemisel ja magnetvoo Φ_2 olemasolul tekib harjadel *1* elektrimasinvõimendi väljumis-emj. (U_v).

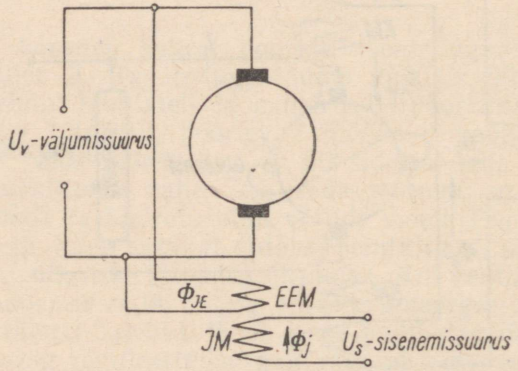
Voolu I_1 olemasolu korral tekib välisahelas ankrureaktsiooni magnetvoog Φ_a, mis on vastassuunaline võrdlemisi nõrgale juhtmähise magnetvoole Φ_j. Et magnetvoog Φ_j saaks juhtida võimendi režiimi, pannakse võimendi poolustele kompensatsioonimähised *KM*, mille ülesandeks on kompenseerida ankru magnetvoogu magnetvooga Φ_{KM}. Esimene kaskaad on siin ergutusahelast lühises olevatele ristharjadele, teine kaskaad aga ristharjadelt põhiharjadele. Tavaliselt on neil võimendustegur 5000 ... 10 000. Väljumisvõimsus on 0,1 ... 24 kW, võimsus juhtmähiseis aga 3 ... 5 W ja vähemgi.

Endaergutusega elektrimasinvõimendiks on ka alalisvoolugeneraator, kuid kahe ergutusmähisega: juhtmähisega *JM* ja endaergutusmähisega *EEM* (joon. 2-44). Ta on veidi suurema inertsiga kui põikergutusväljaga elektrimasinvõimendi, kuid konstruktsioonilt lihtsam, sest puudub teine harjade paar. Ka võimendustegur on tal väiksem kui eelmisel võimendil.

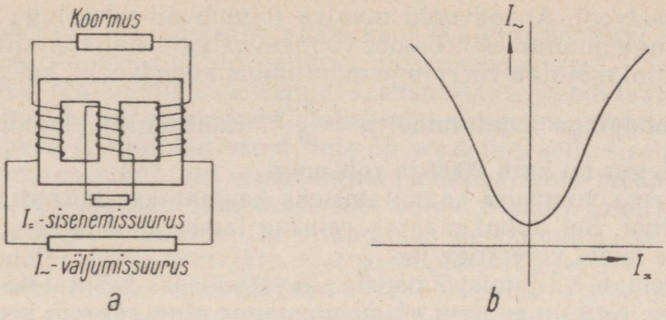
Magnetvõimendi ülesandeks on võimendada elektrilist signaali. Siin kasutatakse terase magnetilise läbitavuse muutust magneetimis-alalisvoolu muutumisel (joon. 2-45, *a*).

Trafoplekist või permalloist valmistatud võimendi kolmesambalise südamiku keskmisele osale on mähitud üks või mitu suure keerdude arvuga alalisvoolumähist. Äärmistel sammastel on vahelduvvoolumähised. Alalisvoolu tugevnemisel suureneb ka magnetväli kogu südamikus, selle magnetiline läbitavus väheneb, väheneb ka vahelduvvoolumähiste induktiivtakistus ning seega tugevneb võimendist väljuv vahelduvvool.

Joonisel 2-45, *b* on näidatud võimendist väljuva vahelduvvoolu muutumine sõltuvalt võimendisse sisenevast alalisvoolust. Vahel-



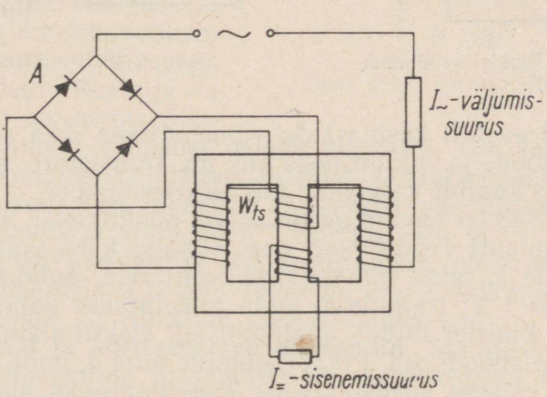
Joon. 2-44. Endaergutusega elektrimasinvõimendi skeem



Joon. 2-45. Magnetvõimendi:
a — skeem, *b* — karakterkõver

duvvoolu muutuse ja seda tekitava alalisvoolu muutuse suhet nimetatakse magnetvõimendi võimendusteguriks voolu järgi. Et võimendustegurit suurendada, kasutatakse tihti positiivset tagasisidet. Selleks ühendatakse ühe tüürvooluharu (tagasisideharu w_{ts}) alaldaja *A* kaudu järjestikku vahelduvvooluahelasse (joon. 2-46). Alaldatud tagasisidevool, olles võrdeline koormusvooluga, mõjub samas suunas mis sisenemissignaal $I_=$.

Magnetvõimendeid kasutatakse mitte ainult võrgu- (50 Hz) vaid ka kõrgematel sagedustel, s. o. sagedustel 400 . . . 3000 Hz. Mag-



Joon. 2-46. Tagasisidega magnetvõimendi

netvõimendite võimendustegurid võimsuse järgi on sõltuvalt sagedusest, terase sordist, tagasiside olemasolust ja teistest faktoritest piirides 50 . . . 2000, erijuhtudel aga kuni 300 000.

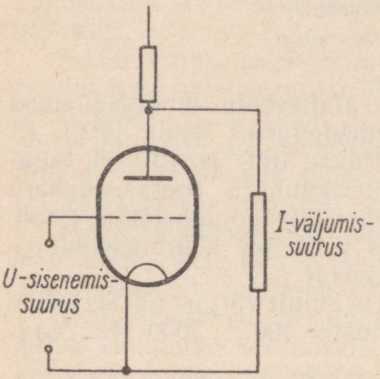
Inertsi puudumise ja kõrge võimendusteguri tõttu on väga laialt levinud elektronvõimendid, eriti madalate pingete ja väikeste võimsuste võimendamisel.

Joonisel 2-47 on toodud lihtsaim skeem trioodi kasutamiseks pingevõimendina. Sisenemissuuruseks on võrepinge, väljumissuuru-

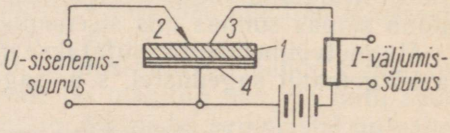
seks anoodvool. Anoodvoolu muutus toimub nii võrepinge kui ka anoodpinge muutumisel. Lambi võimendustegur näitab, mitu korda tugevamini mõjutab võrepinge muutumine anoodvoolu, kui niisama suur anoodpinge muutumine: $\mu = \frac{dU_a}{dU_v}$. Kaasaegsete lampide võimendustegur on kuni 2000 ja rohkemgi.

Suurema võimsuse saavutamiseks kasutatakse mitmeastmelist võimendust. Sel puhul määrab eelmise lambi anood-vahelduvvool järgmise lambi võrepinge jne.

Suuremate väljumisvõimsuste saavutamiseks kasutatakse tiratronlampe. Neil on suurem võimendustegur ning kõrgem kasutegur kui elektronlambil. Tiratroni töötamispõhimõte seisab selles, et inertse gaasiga täidetud kolmeelektroodilises elektronlambis võre ei tüüri anoodvoolu, vaid tüürib oma potentsiaaliga ainult lambi süttimise momenti.



Joon. 2-47. Elektronvõimendi



Joon. 2-48. Punkttransistor

Viimaseil aastail kasutatakse võimenditena ikka rohkem pooljuht-punkttrioode ja -pindtrioode ehk nn. transistore, mis on palju väiksemad ja kaalult kergemad kui elektronlambid.

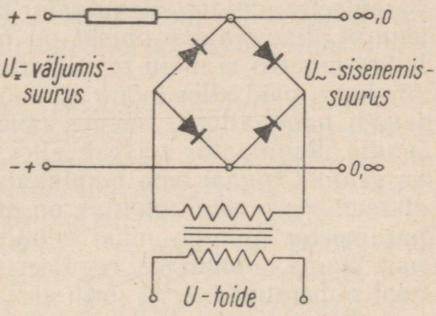
Joonisel 2-48 on toodud germaanium-punkttrioodi skeem. Vastu germaaniumplaati *1* puutuvad oma otstega kaks volframtraati *2* ja *3*. Traadile *2*, mida nimetatakse emitteriks, antakse positiivne pinge näiteks 1 V, traadile *3*, mida nimetatakse kollektoriks, aga pinge 50 V. Emitter täidab analoogiliselt elektronlambile katoodi, kollektor aga anoodi osa. Plaadi alumine pind *4*, mida nimetatakse baasiks, on väikese siirdetakistuse saavutamiseks metalliseeritud ning täidab ülesandeid, mis on analoogilised võre toimega. Emitteri pinge tekitab germaaniumplaadis elektrilaenguid, muudab ta vabade elektronide arvu ja tüürib kollektori voolu. Saavutatav võimendustegur pinge ja voolu järgi on sõltuvalt lülitusviisist kuni 40 ja isegi rohkem.

Mõnedel dielektrikutel, nagu boor- ja strontsiumtitanaadil, samuti boor- ja pliitsirkonaadil jt., on dielektrilised konstandid väga tugevasti sõltuvad neile rakendatud pingest. Järelikult sõltub neist aineist valmistatud dielektrikutega kondensaatorite mahtuvus neile antud pingest. Kui niisugust kondensaatorit kasutada

mingis elektriahelas, siis selle ahela vool (väljumissuurus) sõltub kondensaatorile rakendatud pingest (sisenemissuurus).

Mõnedes reguleerimissüsteemides kasutatakse modulaatoreid, mille ülesandeks on muundada alalispinge (sisenemissuurus) vahelduvpingeks (väljumissuurus), mis on võrdeline selle sisendpingega, kusjuures juhul, kui sisendsignaal muudab oma polaarsust, muudab vahelduvpinge oma faasi 180° võrra. Samuti kasutatakse ka faasitundlikke elemente (faasitundlikke detektoreid), mis täidavad modulaatoriga võrreldes just vastupidist ülesannet. Faasitundlikes elementides muundatakse vahelduvpinge alalisvooluks, mille suund sõltub sellest, kas võimendi väljundis tekkiva vahelduvvoolu faas ühtib seda elementi toitva vahelduvvoolu faasiga või mitte. Modulaatoreis ja faasitundlikes detektoreis kasutatakse nii pooljuhte kui ka elektronlampe. Modulaatoreina võib kasutada ka magnetvõimendeid.

Pooljuhtidega faasitundliku elemendi skeem on toodud joonisel 2-49.



Joon. 2-49. Faasitundlik element

Kui reguleerimissüsteemi väljundis on vaja võimsusi sajandikest vattidest kuni paarikolmekümne vatini, siis kasutatakse tavaliselt elektronvõimendeid ja väikese võimsusega magnetvõimendeid. Kui aga on vaja suurema sisenemisvõimsuse puhul väljundis võimsusi mõned kilovatid, siis kasutatakse elektrilistest võimendeist tiratron-, magnet- ja elektrimasinvõimendeid ning peale selle veel, olenevalt süsteemist, pneumaatilisi, hüdraulilisi ja mehaanilisi võimendeid. Kui on vaja suuri väljumisvõimsusi (kümned kilovatid), siis kasutatakse elektrimasin- ja hüdraulilisi võimendeid. Kui aga võimendi inerts pole määrav ega oluline, kasutatakse ka võimsaid magnetvõimendeid.

Stabiliseerivad ja korrigeerivad elemendid. Stabiliseerivate ja korrigeerivate elementide ülesandeks on stabiliseerida reguleerimisprotsessi. Nende elementide hulka kuuluvad dempfer ehk katarakt, tagasiside reguleerimisorganilt tajuvelemendile ja elemendid, mis viivad reguleerimisprotsessi tuletisi ja integraale.

Katarakti kasutatakse niisuguse lüli juures, millel on suur mass ja elastsus, s. t. millel on kalduvus võnkumistele. Katarakti ülesandeks on võnkumiste summutamine. Mehaanilistes süsteemides kasutatakse magnetilisi vedelik- ja õhkkatarakte, elektrilistes süsteemides aga elektrilisi katarakte. Nende töötamise põhimõte seisab selles, et nad avaldavad takistuslikku mõju ainult kinemaatikas. Näiteks õlikatarakt koosneb õliga täidetud silindrist ja kolvist. Kolb jagab silindri kaheks ruumiks. Need ruumid on oma-

vahel ühendatud kas kolvis oleva väikese ava või silindri küljes oleva peene toru kaudu. Kui avaldada kolvile survet, siis hakkab kolvi pooltel esineva rõhkude vahe tõttu õli suurema rõhuga ruumist voolama väiksema rõhuga ruumi. Rõhkude tasakaalustumise kestus sõltub rõhkude vahest, õli viskoossusest ja ühendusava läbimõõdust. Rõhkude vahe sõltub kolvi liikumiskiirusest silindri suhtes. Õli viskoossus teataval temperatuuril on konstantne suurus. Ühendusava läbimõõt on tavaliselt muudetav suurus, järelikult suvaliselt konstantne suurus. Seega on dempferis tekkinud takistus võrdeline kolvi suhtelise liikumiskiirusega silindris.

Elektrilises dempferis on analoogilisteks suurusteks rõhkude vahe ja õli voolamise kiirusega elektripinge ja -vool.

Kui mingil põhjusel reguleeritavas objektis kaob tasakaal siseneva ja väljuva energia või ainete hulga vahel, siis reguleeritav parameeter muutub. Regulaator hakkab tööle tasakaalu taastamise suunas. Iga reaalne objekt on inertne, mistõttu reguleeriva aine hulga muutus ei mõju reguleeritavale parameetrile, seega ka tajurile kohe, vaid alles mõne aja möödumisel. Seda inertsi iseloomustavad, nagu allpool näeme, objekti kui ka teiste lülide ajakonstandid. Regulaator seiskub alles siis, kui reguleeritav parameeter on saanud tagasi oma nominaalväärtuse. See tähendab aga seda, et reguleeriva aine muutus on suurem kui tasakaaluks vajalik ja parameeter muutub nüüd eelmisega võrreldes vastupidises suunas. Sama toimub ka reguleerimisorgani asendi muutusel. Eespool nimetatud inertsi tõttu ei vasta reguleeriva aine hulga muutus jällegi tasakaaluolekule. Tekib reguleeritava parameetri kasvava amplituudiga võnkumine ümber tasakaaluseisundi, s. t. reguleerimissüsteem on ebastabiilne. Selle vältimiseks tuleks reguleeriva keskkonna hulga muutus katkestada varem (seisata reguleerimisorgan), kui selle muutuse tagajärg pole veel jõudnud tajurini. Seda tehaksegi tagasiside abil reguleerimisorganilt tajurile. Nimetatud tagasisided võivad olla kas jäigad, elastsed või inertsed-elastsed (isodroomsed). Jäiga tagasiside mõju jääb kestma ka pärast siirdeprotsessi lõppu, elastsete tagasisidede mõju aga mitte: nad avaldavad reguleerimisprotsessile mõju ainult siirdeprotsessi vältel.

Kõigi nende elementide, samuti ka tuletiste ja integraalide sissetoomise juures peatutakse allpool lähemalt.

4. Otsese toimega regulaatorid

Automaatreguleerimine tekkis otsese toimega regulaatorite baasil. Nende regulaatorite positiivseks omaduseks on suhteliselt lihtne konstruktsioon ning suur töökindlus. Allpool vaatleme neist tüüpilisemaid.

Toodetakse normaliseeritud otsese toimega regulaatoreid rõhu, temperatuuri ja nivoo reguleerimiseks.

Otsese toimega rõhuregulaatori skeemi esitasime joonisel 2-6. Toodetavad normaliseeritud otsese toimega rõhuregulaatorid on määratud mitteagressiivsete gaaside, õhu, nafta, õli ja kuni 300°-se temperatuuriga auru antud rõhu automaatseks säilitamiseks torustikes.

Tehaste poolt toodetakse otsese toimega rõhuregulaatoreid kahes modifikatsioonis: tüüp 25ч10нж, nn. «pärast ventiili» (vt. joon. 2-6, *a*) ja tüüп 25ч12нж, nn. «enne ventiili» (vt. joon. 2-6, *b*). Regulaatorid «pärast ventiili» hoiavad rõhu konstantse torustikus reguleerimisventiili taga, vaadelduna reguleeritava keskkonna liikumise suunas, regulaatorid «enne ventiili» aga torustikus eespool ventiili.

Reguleerimisventiil on mõlemal modifikatsioonil topeltpesaline. Topeltpesalist reguleerimisventiili liigutab membraan-vastukaaluseade *9*. Rõhu impulsi võtmine torustikust (koht *m*) reguleerimismembraanile peab toimuma mitte ligemal kui toru kümnekordse läbimõõdu kaugusel ventiilist.

Regulaatorid «enne ventiili» ja «pärast ventiili» erinevad üksteisest ainult taldrikute asendi poolest pesa suhtes: esimesel juhul on taldrikud asetatud nii, et nende laskumisel allapoole — membraanile mõjuva rõhu toimel — läbipääsuava suureneb, teisel juhul aga väheneb. Regulaatori ventiili korpus on arvestatud rõhule 16 kg/cm² temperatuuril kuni 200° C. Membraan on valmistatud kummeeritud riidest. Membraaniga reguleeritava keskkonna temperatuur ei tohi olla kõrgem kui 40° C. Kui aga reguleeritava keskkonna temperatuur on kõrgem, siis täidetakse membraanikarbi ülemine pool kas veega või mõne muu vedelikuga, mis ei segune selle keskkonnaga.

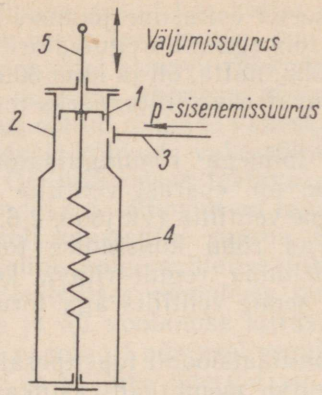
Gaasi rõhu reguleerimiseks piirkonnas 0,01 . . . 0,3 kg/cm² «pärast ventiili» ehk 0,5 . . . 3 kg/cm² «enne ventiili» toodetakse ЛАЗ-tüüpi, piirkonnas 0,2 . . . 6 kg/cm² aga АРДГ-tüüpi otsese toimega regulaatoreid.

РДП-tüüpi otsese toimega rõhuregulaator on määratud kütteõli rõhu säilitamiseks torustikus pärast ventiili. Õli temperatuur ei tohi olla kõrgem kui 100° C. Tajuriks on gofreeritud lame roostevabast terasest membraan. Neid regulaatoreid valmistatakse neljas tüüpmõõdus, õli maksimaalse läbilaskega 600, 900, 1200 ja 2500 liitrit tunnis.

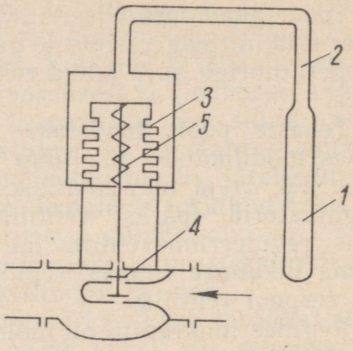
Otsese toimega kolb-rõhuregulaatoris (joon. 2-50) ühendatakse silindris *2* kolvi *1* all asuv ruum toru *3* abil keskkonnaga, mille rõhku reguleeritakse. Vedru *4* abil tasakaalustatakse regulaator mingile rõhule. Reguleeritava rõhu suurenemisel või vähenemisel liigutab kolviga *1* ühendatud varras *5* reguleerimisorganit tarvilikus suunas.

Selle tüübi positiivseks omaduseks on võrdlemisi pikk töökäik, puuduseks aga küllaltki suur hõõrdumine kolvi ja silindri vahel.

Otsese toimega РПД-tüüpi temperatuuriregulaatoreid (joon. 2-51) kasutatakse mitmesugustes rahvamajandusharudes. Regu-



Joon. 2-50. Otsese toimega kolb-rõhuregulaatori skeem



Joon. 2-51. Otsese toimega manomeetrise temperatuuriregulaatori skeem

laator koosneb termoballoonist *1*, kapillaarist *2*, otseselt reguleerimisventiiliga *4* ühendatud sülfoonist *3* ja vedrust *5*.

Termosüsteem on osaliselt täidetud madalal temperatuuril keeva vedelikuga (piiritus, atsetoon, vesi, tärpentin vm.). Selle hulk valitakse nii, et reguleeritava temperatuuri alumine piir oleks veidi kõrgem täitevedeliku keemistemperatuurist. Kui reguleeritavasse keskkonda asetada termoballoon, siis ta kuumeneb ning vedelik termosüsteemis aurustub, kusjuures ta rõhk on ligikaudu võrdeline mõõdetava keskkonna temperatuuriga. Termoballoonist antakse nimetatud rõhk kapillaari kaudu edasi sülfoonile ning sealt reguleerimisventiilile. Membraanil tekib rõhu mõjul jõud, mis on võrdeline tekitatud rõhuga ja tema efektiivpinnaga ning mis tasakaalustatakse vedru abil. Vedru pinge valikuga saab seega määrata termoballoonis oleva vedeliku rõhku, s. t. reguleeritava keskkonna temperatuuri (reguleeritava parameetri väärtust).

РПД-tüüpi regulaatorid valmistatakse kas otsese või pööratud ventiiliga. Otseseid ventiile kasutatakse juhul, kui reguleerimine toimub kuumutava keskkonna abil (ventiilid sulguvad, kui reguleeritava keskkonna temperatuur tõuseb), pööratud ventiile aga juhul, kui reguleerimine toimub jahutava keskkonna abil (ventiilid sulguvad, kui reguleeritava keskkonna temperatuur alaneb).

Regulaatorid valmistatakse järgmiste reguleeritava keskkonna temperatuurivahemike jaoks: 30 . . . 40, 40 . . . 50, 50 . . . 60, 60 . . . 70, 70 . . . 80, 80 . . . 90, 90 . . . 100 ja 100 . . . 110° (eritellimisel kuni 160°-ni). Kõigil neil regulaatoreil liigub reguleerimisorgan temperatuuri muutumisel 10° võrra ühest äärmisest asendist teise. Termoballoon on arvestatud rõhule kuni 10 kg/cm^2.

Agressiivse keskkonna temperatuuri reguleerimisel kaitstakse termoballoon kaitsekestaga. Parema kontakti saamiseks peab kesta ja termoballooni vaheline ruum olema kas täidetud vedelikuga,

mille keemistemperatuur on vähemalt 10° C kõrgem reguleeritava keskkonna maksimaalsest temperatuurist, või metallipuruga.

Dilatomeetriline otsese toimega temperatuuriregulaator agressiivse keskkonna temperatuuri reguleerimiseks koosneb termotorust, mis on asetatud spetsiaalvedelikuga täidetud kestasse ja moodustab torustikuga ühise terviku. Selles torustikus voolab keskkond, mille temperatuuri reguleeritakse. Temperatuuri muutumisel muutub ka termotoru temperatuur ning seega ka pikkus, mis antakse kangide või trosside süsteemi kaudu edasi reguleerimisorganile.

Otsese toimega regulaatorite hulka kuulub ka katla nivoo dilatomeetriline regulaator.

Elektriga soojendatavate objektide temperatuuri reguleerimiseks kasutatakse bimetallplaatidega soojusreleesid, mis on asetatud väikese võimsusega (5 . . . 10 A) seadmete puhul kütteahelasse (suuremate võimsuste puhul aga magnetkäiviti poolide ahelaisse).

Vee nivoo reguleerimiseks kinnistes paakides kasutatakse РУ-1-tüüpi regulaatorit. Põhimõtteskeem on toodud joonisel 2-52.

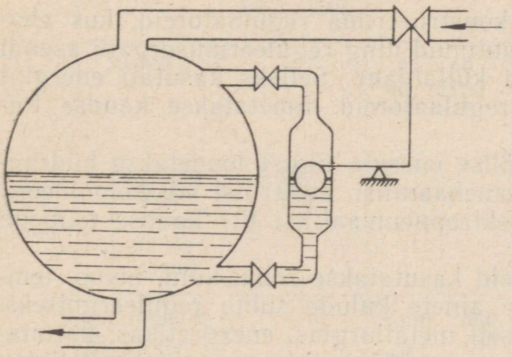
Reguleerimisventiil on kahetaldrikuline, käigu pikkus on tal 20 mm ning ujuki käigu pikkus $\pm$ 100 mm.

Otsese toimega pöörlemiskiiruse regulaatorina kasutatakse koonilisi või tasapinnalisi tsentrifugaalregulaatoreid (joon. 2-1 ja 2-16).

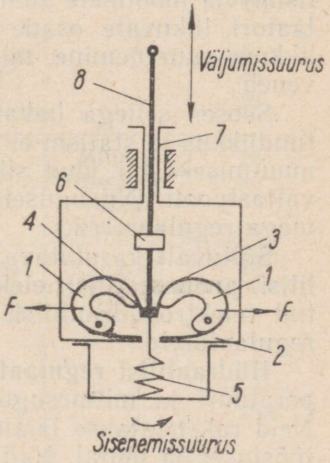
Igasugusele liikumisele avaldab alati hõõrdumine vastupanu. Seepärast, kui regulaator on tasakaalus nurkkiirusel ω_0, siis on vaja nurkkiiruse teatavat suurenemist kuni ω_s-ni või vähenemist kuni ω_v-ni, enne kui muhv hakkab liikuma üles või alla. Suhet

$$\varepsilon = \frac{\omega_s - \omega_v}{\omega_0} \qquad (10)$$

nimetatakse ebatundlikkusteguriks.



Joon. 2-52. Ujukikambriga otsese toimega nivooregulaator



Joon. 2-53. «Veerevate» vihtidega pöörlemiskiiruse regulaatori skeem

See mõiste on analoogiliselt maksev kõigi regulaatorite kohta.

Selleks et vähendada ebatundlikkustegurit, tuleks vähendada hõõrdumist regulaatoris. Regulaator, kus libisemishõõrdumine on asendatud veerehõõrdumisega, on toodud joonisel 2-53. Seda moodust kasutatakse hüdroturbiinide regulaatorites. Siin muudavad vihid *1* pöörlemiskiiruse muutumisel oma asendit ilma libisemiseta, veeremise teel korpuse *2* siledat pinda mööda. Iga vihti ümbritseb lai lehtvedru *3*, mille üks ots on kinnitatud korpuse *2* külge, teine ots aga on muhviga *6* ühendatud plaadi *4* külge. Vihtide *1* profiil on valitud nii, et vedrud *3* veerevad libisemiseta plaatide *2* pinda mööda. Plaatide otsad on ühendatud vedruga *5*, mis tasakaalustab pöörlevate masside tsentrifugaaljõu *F*. Pöörlev muhv *6* annab oma edasi-tagasi liikumise edasi juhtpuksis *7* olevale mittepöörlevale vardale *8*. Regulaatori korpusega koos pöörleb ka juhtpuks, mistõttu välditakse selle varda teljeline hõõrdumine. Selles regulaatoris puudub peaaegu üldse libisemishõõrdumine ning veerehõõrdumine vihtide ja lehtvedru *3* vahel on väike.

Masinaehituses kasutatakse mitmesuguste masinaelementide valmistamisel nende geomeetriliste mõõtmete regulaatoreis tajureina mitmesuguseid vardaid, rulle jms., mis otseselt ühendatakse reguleerimisorganitega, s. t. need regulaatorid on samuti otsese toimega.

5. Kaudse toimega regulaatorid

Masinate ja agregaatide võimsuse ning neis toimuvate protsesside kiiruste suurenemine esitas suuremaid nõudmisi ka regulaatorite töö kvaliteedile. Suurtel võimsustel suureneb reguleerimisorgani asendi muutmiseks vajalik jõud, kuid otsese reguleerimise puhul võib seda saavutada ainult regulaatori ebaühtluse (statismi) ja mõõtmete suurenemise arvel. Sellega aga kaasub regulaatori liikuvate osade massi suurenemine, niisiis ka ebatundlikkuse suurenemine, mistõttu reguleerimisprotsessi kvaliteet halveneb.

Seoses sellega hakati konstrueerima regulaatoreid, kus ebatundlikkus ja statism ei muutunud ning reguleerimisorgani asendi muutmiseks oli jõud siiski küllaldane. Selleks kasutati energiat väljastpoolt. Niisuguseid regulaatoreid nimetatakse kaudse toimega regulaatoreiks.

Sõltuvalt kasutatava välise energia liigist toodetakse hüdraulilisi, pneumaatilisi, elektromehaanilisi, elektrilisi või kombineeritud (elektrohüdraulilisi, elektropneumaatilisi jt.) kaudse toimega regulaatoreid.

Hüdraulilisi regulaatoreid kasutatakse rõhu, kulu, nivoo, temperatuuri ja mitmesuguste ainete kulude suhte reguleerimiseks. Neid rakendatakse laialdaselt metallurgias, energeetikas, keemiatööstuses ja mujal. Nad on suure töökindlusega, suhteliselt lihtsa konstruktsiooniga, ei nõua neid ekspluateerivalt personalilt kõrget kvalifikatsiooni ning täitevmehhanismid võivad arendada küllaltki

suuri jõude. Töötavaks aineks on tavaliselt kas õli või vesi. Tüürivaks elemendiks on kas joatoru või kolvipaar. Nende ülesandeks on muundada mõõdetav suurus vedeliku rõhuks, mis omakorda paneb tööle regulaatori täituri. Regulaatoreid võib asetada ka plahvatusohtlikesse ruumidesse. Joatoruregulaatoritel on suur tundlikkus (tavaliselt toodetavatel regulaatoritel 6 . . . 7 g 50 mm kaugusel toru pöördepunktist), suhteliselt suur toru sisemise ava ristlõige õli läbilaskmiseks (läbimõõt 1,8 või 2,1 mm sõltuvalt soovitud õlikulust, täitevmehhanismi soovitud ajakonstandist ja jõust, mida on vaja edasi anda reguleerimisorganile). Nad pole õli puhtuse suhtes nii tundlikud kui tüürkolbregulaatorid ning on seetõttu tööstuses viimastest enam levinud. Seeriaviisiliselt toodab hüdraulilisi regulaatoreid tehas «Teplokontrol».

Tabel 1

«Teplokontrol»-süsteemi regulaatorite membraantajurite liigitus

Nimetus	Tüüp	Tööpiirkond		Lubatav staatiline rõhk	Töötamiskeskkond	Membraani efektiivpind cm²
		mm H_2O	mm Hg			
Ühemembraanilised	УИМН-1	0,5 . . . 10 1 . . . 25	— —	0,01	Õhk või mitteagressiivne gaas	1576 726
	УИМС-1	4 . . . 100 6 . . . 160 16 . . . 400	— — —	0,1		226 111 57
	УИМС-3	2 . . . 40 3 . . . 63	— —	0,06		491 330
	УИМВ-1	30 . . . 630 50 . . . 1000 80 . . . 1600	— — —	10		60,2 40 25
	УИМВ-2	—	4 . . . 40 40 . . . 100	25	Mitteagressiivne vedelik või gaas	75 30
Kahemembraanilised	УИРУ-1 rõhkude vahe nivoo membraanil	+ 100 . . . — 100	—	64 ja 160	Katlavesi	80
	УИРУ-1 rõhkude vahe auru kulu membraanil	— — —	Kuni 400 „ 735 „ 1000			28,5

Tabel 2

«Teplokontrol»-süsteemi regulaatorite sülfoontajurite liigitus

Nimetus	Tüüp	Mõõtmise piirkond kg/cm²	Mõõdetav rõhkude vahe		Lubatav staatiline rõhk	Sülfooni efektiivpind cm²
			kg/cm²	mm Hg		
Tasakaalustatud sülfoon	УИС-1	6 ... 10			10	8,2
		10 ... 16			16	8,2
		16 ... 25			25	8,2
		25 ... 32			32	8,2
		32 ... 64			64	3,6
		64 ... 125			125	2,2
Tasakaalustamata sülfoon	УИС-2	1 ... 6	—	—	6	1,35
	УИС-3	0,05 ... 0,5	—	—	0,5	4,37
		0,2 ... 2	—	—	2	1,35
Kaksiksülfoon	УИДС-1	—	2 ... 5	—	10 ... 32	8,2
		—	2 ... 8	—	32 ... 64	3,6
Diferentsiaalsülfoon	УИДС-2	—	—	40 ... 400	16	4,3
		—	—	60 ... 630	40	4,3
				100 ... 1000	60	4,3

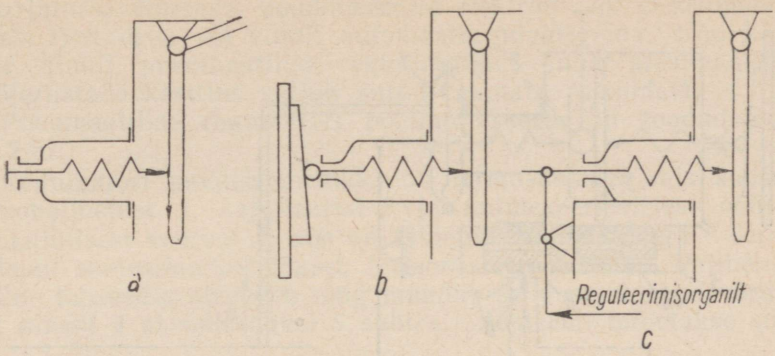
«Teplokontrol»-süsteemi regulaatorite tajureiks on membraanid, sülfoonid ja Bourdon'i torud. Mõõteelementide tundlikkuse lävi on keskmiselt mitte rohkem kui 0,5%, mõnedel juhtudel ei ületa see aga 0,05 ... 0,1% mõõdetava suuruse maksimaalsest väärtusest.

Nende tajurite kasutamise piirkond sõltuvalt mõõdetava rõhu suurusest on toodud tabelites 1 ja 2.

Reguleeritava parameetri valimiseks (etteandmiseks) kasutatakse hüdraulilistes regulaatorites vedruseadureid ja lekaale. Vedruseadureid toodetakse kolme liiki: käsitsi justeerimisega tüüp МРН-1 (joon. 2-54, *a*), profileeritud lekaalide abil justeerimisega tüüп МНЛ-1 (joon. 2-54, *b*) ja justeerimisega kas isodroomilt või täiturilt tüüp МНЛИ-1 (joon. 2-54, *c*).

«Teplokontrol»-tüüpi hüdrauliliste regulaatorite tüürivaks seadmeks on joatoru. Joatoruregulaatoreid on lihtne kasutada rõhu, nivoo, vedelike või gaaside voolamise kiiruse, kulude suhte jne. reguleerimiseks, kusjuures mõõteelemendina rakendatakse membraani. Temperatuuri reguleerimisel kasutatakse kas dilatomeetrilist mõõteelementi või termoballooni.

Joatoruvõimendid valmistatakse tavaliselt nii, et jõud, mis mõjub joatorule mõõteelemendilt, oleks alati suunatud joatoru

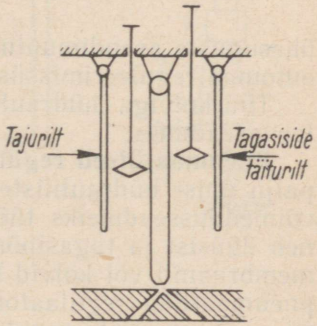


Joon. 2-54. Seadurid:
a — käsitsi justeerimisega, *b* — lekaaljusteerimisega, *c* — tagasisidega reguleerimisorganilt

poole, mitte aga joatoru poolt, s. t. ta töötab survele, mitte tõmbele. Joatorule mõjuva jõu suuruse muutmiseks, nii et tajuri käigupikkus jääb muutumatuks, kasutatakse korrektorit. Mõnikord pannakse korrektor ka joatoru teisele, tagasiside poolele (joon. 2-55).

Tavaliselt kasutatakse üht korrektorit regulaatori esialgsel justeerimisel, teist aga justeerimise muutmiseks ekspluateerimise ajal. Seda tehakse juhtkilbilt käsiratta ja painduva võlli abil.

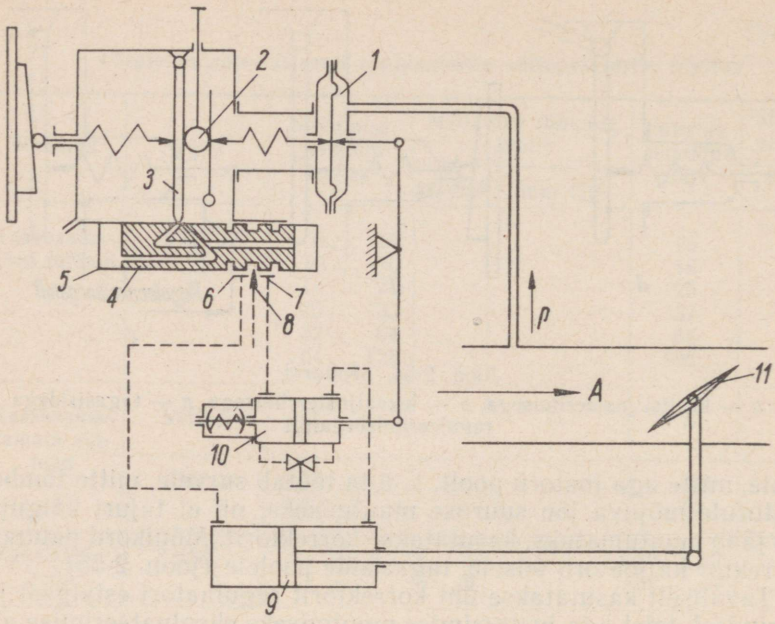
Joatoruregulaatoreid valmistatakse nii tagasisideta kui ka jäiga ja elastse tagasisidega. Joonisel 2-56 on toodud kaheastmelise võimendusega elastse tagasisidega joatoruregulaatoriga reguleerimissüsteemi skeem rõhu reguleerimiseks gaasitorustikus.



Joon. 2-55. Joatoru koos korrektoritega

Reguleeritava rõhu *p* kõrvalekaldumisel nominaalväärtusest kallutab membraan *1* korrektori *2* kaudu joatoru *3* keskasendist kõrvale. Seetõttu muutub rõhk kolvi *4* otstel ja see liigub silindris *5* väiksema rõhu suunas. Võimenduse esimene aste teostatakse seega joatoruga *3*, teine aste aga kolviga *4*. Silindris *5* on avad *6* ja *7* töötava aine (õli) juhtimiseks hüdraulilise teenuri kolvi *9* ühele või teisele poolele. Õli tuleb silindrisse *5* toru *8* kaudu. Kui näiteks rõhk torus *A* tõuseb üle nominaalväärtuse, kaldub joatoru *3* vasakule, kolb *4* liigub samuti vasakule, ava *7* ühendatakse avaga *8* ning õli läheb läbi isodroomi *10* teenuri kolvi *9* paremale poolele. Seal rõhk tõuseb, kolb *9* liigub vasakule, avades rohkem klapi *11* ning rõhk torus *A* langeb. Rõhu langemisel torus *A* toimib regulaator vastupidises suunas.

Ühelt ja samalt reguleerimisorganilt mitme reguleerimisorgani



Joon. 2-56. Elastse tagasisidega hüdraulilise joatoruregulaatoriga reguleerimissüsteemi põhimõtteskeem

ühesuguste asendimuutmiste saamiseks kasutatakse hüdraulilistes automaatreguleerimissüsteemides sünkronisaatoreid.

Tüürkolviga hüdraulilisi regulaatoreid kasutatakse tavaliselt laevaseadmeis.

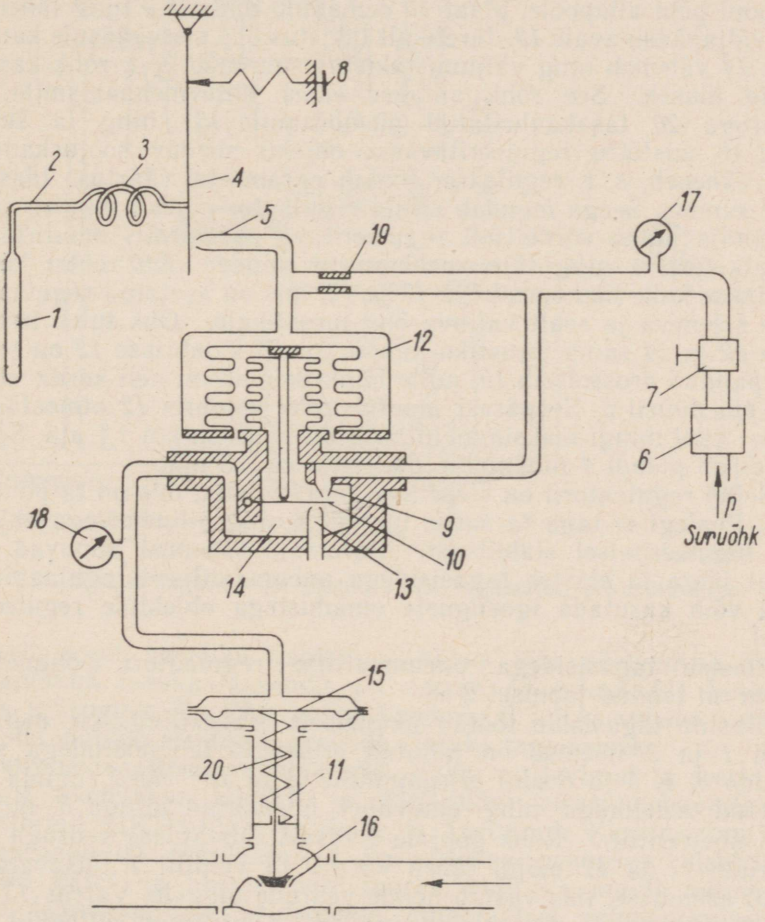
Pneumaatilised regulaatorid. Pneumaatilistel regulaatoritel on palju ühist hüdrauliliste regulaatoritega. Ka siin on tüürimis- ja võimendusseadmeiks tüürkolvid, joatorud või süsteem, mis koosneb düüsist ja tagasipõrkeplaadist. Täitevmehhanismideks on kas membraanid või kolvid koos silindritega. Eri konstruktsioonidega pneumaatilisi regulaatoreid toodetakse rõhu, temperatuuri, kulu, nivoo jt. suuruste reguleerimiseks. Tööstuses kasutatakse laialdaselt AVC-tüüpi pneumaatilisi regulaatoreid.

Tüürkolb- ja joatoruregulaatoreid kasutatakse siin harva. Seeriaviisiliselt toodetavates pneumaatilistes regulaatorites on tüürimis- ja võimendusseadmeks düüs ja drosselplaat, mis muudab mõõdetava suuruse täitevmehhanismi mineva õhu rõhuks (vt. lk. 43). Stabiliseerimisvahendeina kasutatakse pneumaatilistes regulaatorites jäika ja elastset tagasisidet. Pneumaatilistes regulaatorites on töötavaks aineks puhas kuiv õhk. Pärast komprimeerimist rõhuni 2 . . . 10 atü läheb õhk läbi reduktori, mis hoiab tema rõhu enne regulaatorisse minekut automaatselt konstantsena. Pneumaatilisi regulaatoreid toodetakse kas komplektis näite- või

isekirjutusseadmetega, kombineeritud elektron- või elektromehaaniliste riistadena või ainult automaatregulaatoreina. Siin käsitleme ainult pneumaatilisi regulaatoreid, kuna pneumaatiliste mõõteriistade käsitlus väljub antud raamatu raamidest.

Pneumaatilise regulaatori põhimõtteskeem on toodud joonisel 2-57.

Regulaatori mõõteelemendiks on termosüsteem, mis koosneb termoballoonist *1*, kapillaarist *2* ja mitmekeermelisest õõnsast torukujulisest vedrust *3*, mis on täidetud lämmastikuga. Termoballooni soojendamisel tõuseb termosüsteemis rõhk. Mitmekeermeline toruvedru sirgeneb ning muudab selle muutusega võrdeliselt plaadi *4* asendit düüsi *5* suhtes. Süsteemi toidetakse suru-



Joon. 2-57. Pneumaatilise temperatuuriregulaatori põhimõtteskeem

õhuga 2 ... 10 kg/cm². Enne süsteemi minekut läbib õhk filtri *6* ning reduktori *7*. Filtris puhastatakse õhk kõigist lisandeist ning reduktoris stabiliseeritakse rõhk 1,1 atü-le.

Esimeses relees (*4* ja *5*) muundatakse tajurilt saadud impulss õhu rõhuks. Vajalik nominaalrõhk, mis vastab parameetri nominaalväärtusele, määratakse seadekruvi *8* abil.

Teises relees, mille moodustavad düüs *9* ja plaat *10*, toimub võimendus. Tema ülesandeks on tõsta õhu rõhku suuruseni, mis on vajalik täitevmehhanismi *11* töölerakendamiseks.

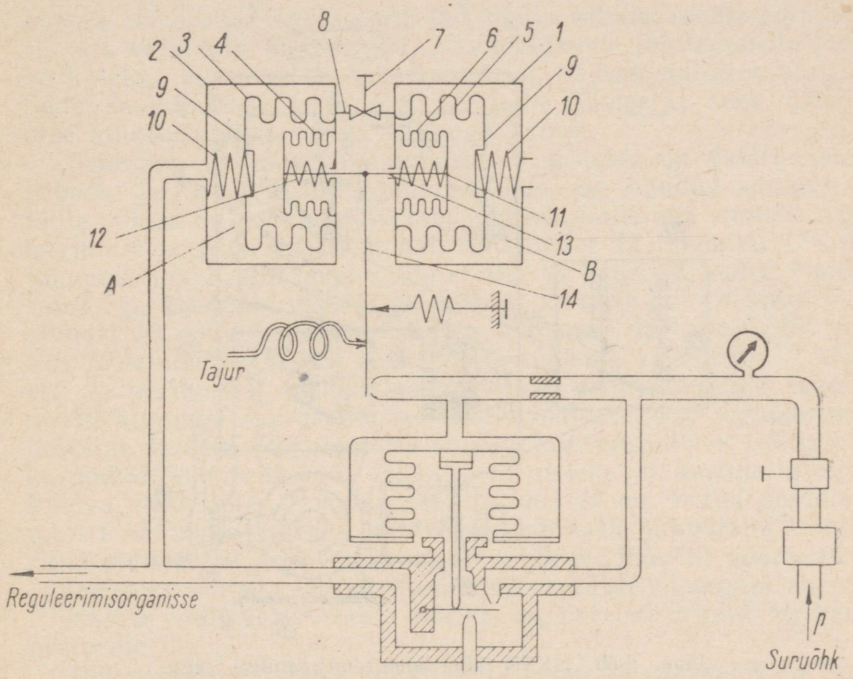
Kui temperatuur kaldub oma nominaalväärtusest kõrvale, läheb plaat *4* düüsile *5* ligemale või eemaldub sellest. Temperatuuri tõusmisel nominaalsest kõrgemale läheneb plaat düüsile ja takistus õhu väljapääsule düüsist suureneb ning rõhk sülfoonide kambris *12* tõuseb. Kui aga rõhk kambris *12* tõuseb, siis langeb sülfooni põhi allapoole, plaat *10* eemaldub düüsist *9* ning läheneb õhu väljapääsu avale *13*. Järelikult takistus õhu sissepääsule kambrisse *14* väheneb ning väljumistakistus suureneb, s. t. rõhk kambris *14* tõuseb. See rõhk antakse edasi täitevmehhanismile *11* (vedruga *20* tasakaalustatud membraanile *15*) ning ta suleb klapi 16, mistõttu reguleeritavasse objekti siirduv soojuskandja hulk väheneb, s. t. regulaator töötab parameetri väärtuse taastamise suunas. Seega muudab antud regulaator objekti mineva soojuskandja hulka võrdeliselt reguleeritava parameetri muutusega. Regulaatorisse ning täitevmehhanismi mineva õhu rõhku kontrollitakse kahe manomeetriga *17* ja *18*, mis on asetatud regulaatorisse siseneva ja sealt väljuva õhu torustikule. Õhk tuleb kambrisse *12* ja *14* sama torustiku kaudu, ainult kambrisse *12* on teele ette pandud drosselseib *19*, mille läbilaskepind on neli korda väiksem kui düüsil *5*. Seepärast muutub rõhk kambris *12* atmosfäärirõhust kuni mingi maksimumini, mis on väiksem kui 1,1 atü. Sealjuures on plaadi *4* nihkumine düüsist *5* ca 0,5 mm.

Sellel regulaatoril on staatiline karakteristik, mis on ta puuduseks. Pealegi ei taga ta suure inertsiga ning hilinemisega objektide reguleerimisel stabiilsust. Paremaid tulemusi annavad sel puhul jäiga ja elastse tagasisidega pneumaatilised regulaatorid. Neid võib kasutada igasuguste omadustega objektide reguleerimisel.

Elastse tagasisidega pneumaatilise regulaatori põhimõtteskeem on toodud joonisel 2-58.

Elastne tagasiside töötab järgmiselt. Kahesilindrilise metallkarbi *1* ja *2* sisemus on jagatud erinevate läbimõõtudega sülfoonide *3*, *4*, *5* ja *6* abil eriruumideks *A* ja *B*. Need ruumid on täidetud vedelikuga ning omavahel ühendatud toruga *8*, milles asub nõelventiil *7*. Rõhk põhjale *9* tasakaalustatakse vedruga *10*. Vedrude *11* ja *12* mõjul läheb varras *13* ventiili *7* täisavamise puhul asendisse, mis vastab nende vedrude pingele. Varras *13* on jäigalt ühendatud drosselplaadiga *14*. Ülejäänud sülfoonid on ühendatud välisõhuga. Regulaatori tegevus on samasugune nagu

eespool kirjeldatud regulaatoril, ainult täitevmehhanismi membraanile minev õhurõhk läheb ka karpi *A*. Karbis *A* olev väline sülfoon liigub kas paremale või vasakule sõltuvalt sellest, kas täitevmehhanismi membraanile läinud õhu rõhk suurenes või vähenes. Kui selle sülfooni põhi liigub näiteks paremale, siis surub ta osa vedelikku läbi nõelventiili karpi *B*. Vedeliku rõhud kambrites tasakaalustuvad mõne aja möödudes, kusjuures see aeg sõltub vedeliku viskoossusest ja nõelventiili avamisastmest. Varda *13*, seega ka plaadi *14* asendi muutumise kiirus tagasiside mõjul on kahe liikumise vahe (ühelt poolt õhu rõhu muutumise kiirus ruumis *B*



Joon. 2-58. Elastse tagasisidega pneumaatilise regulaatori põhimõtteskeem

ja teiselt poolt vedeliku voolamise kiirus läbi nõelventiili *7*). Püsimajäänud tasakaaluasendis on varras *13* (plaat *14*) keskasendis igasuguse õhurõhu puhul kambris *B*. Kui suleme ventiili *7*, siis muutub elastne tagasiside jäigaks tagasisideks.

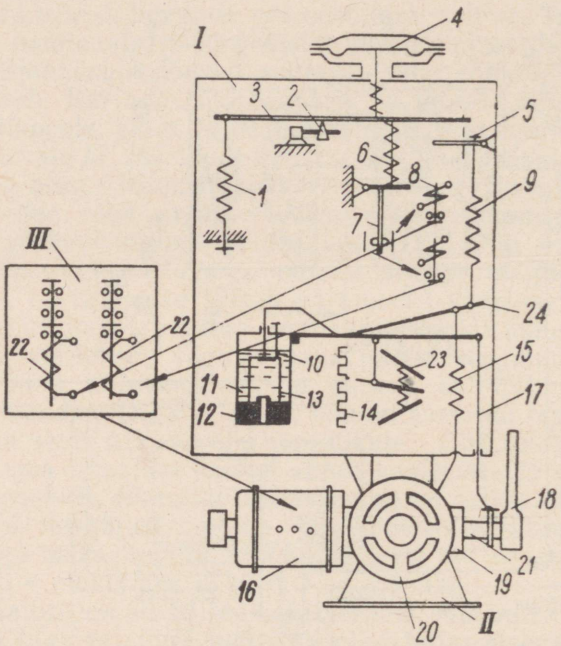
Elektromehaanilised regulaatorid. Enam on levinud ja seeriaviisiliselt toodetakse ЦКТИ- ja АРП-tüüpi elektromehaanilisi regulaatoreid. ЦКТИ-tüüpi (Katelde ja Turbiinide Keskinstituut) elektromehaanilisi regulaatoreid kasutatakse peamiselt elektrijaamades katel- ja abiseadmete juures, kuid ka mujal mitmesuguste tehnoloogiliste protsesside automaatsel reguleerimisel.

Näitena vaatleme ЦКТИ hõrendusregulaatorit tüüp KPP-1,

mida kasutatakse katlakoldes valitseva hõrenduse automaatsel reguleerimisel (joon. 2-59).

Regulaator koosneb kolmest peamisest osast: korpusest *I*, mis sisaldab mõõteorganit, releed ja muid aparaate, reduktorist *II*, mille ülesandeks on reguleerimisorganite, nagu reostaatide, siibrite jms. asendi muutmine, ja reverseerivast magnetkäivitist *III*, mis lülitab tööle elektrilise teenuri.

Mõõteorganina (tajurina) kasutatakse membraani *4*. Regulaatori tegevus põhineb peakangile *3* rakendatud momentide toi-



Joon. 2-59. ЦКТИ-tüüpi elektromehaanilise regulaatori põhimõtteskeem

mel, mida tekitavad ühelt poolt membraan *4* ja teiselt poolt vedru *9*. Seepärast kuulub vaadeldav elektromehaaniline regulaator jõuregulaatorite hulka, erinevalt harilikest hüdraulilistest regulaatoritest, milledel on kinemaatiline toime. Tasakaal on olemas siis, kui momentide summa võrdub nulliga ning elektrilüliti *7* mõlemad kontaktid on avatud.

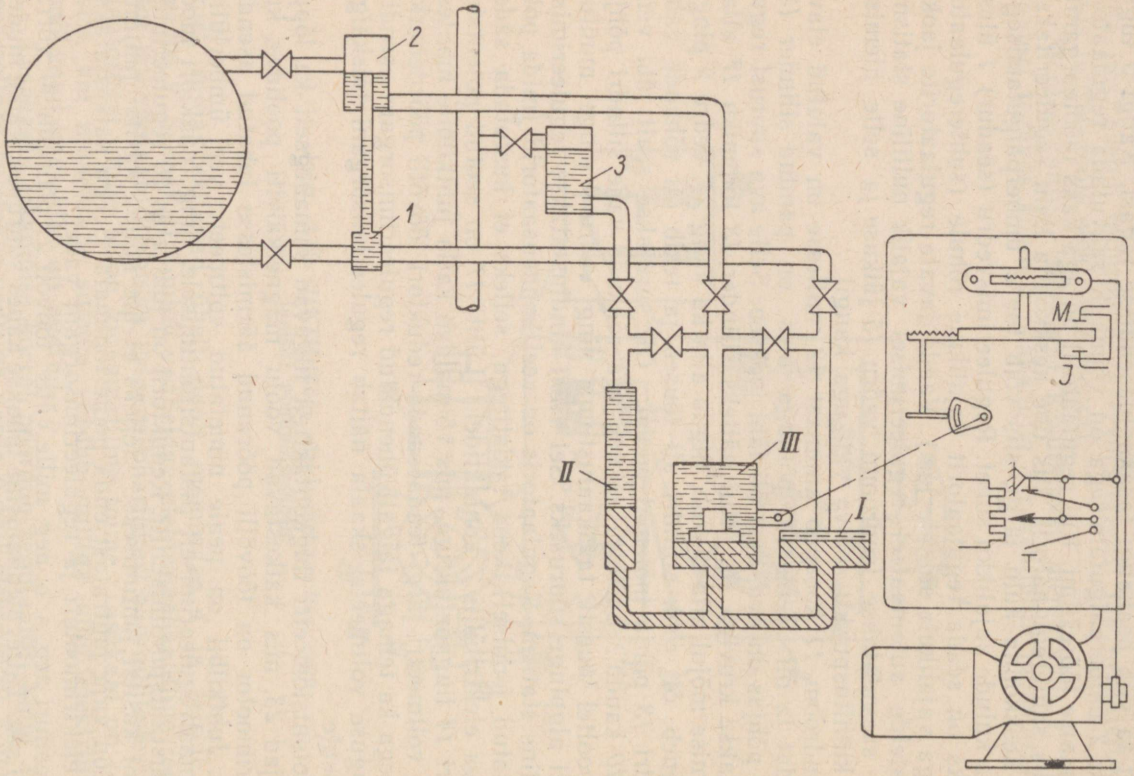
Tasakaalu rikkumise korral pöördub regulaatori kang *3*. Seoses sellega suletakse vedruga varda *6* abil elektrilüliti *7* üks kontaktidest ja see omakorda lülitab tööle ühe vahereleedest *8*. Vahe-relee suleb magnetkäiviti *22* ühe pooli ahela ning see käivitab elektrimootori *16*, mis reduktori *19* kaudu võllil *21* oleva kan-

giga *18* muudab reguleerimisorgani asendit. Töövõllilt *21* saab oma liikumise ka regulaatori lüliti (tõmmik) *17*, mis muudab vedru *9* pinget. Vedru pinge muutus antakse edasi kangikese *5* kaudu peakangile *3*. Tõmmiku *17* liikumine on suunatud nii, et ta viib peakangi tasakaaluasendisse tagasi. Kangi *3* tugipunkti *2* ümberpaigutamisega on võimalik saavutada regulaatori optimaalse töörežiimi. Kui regulaatoril on aga kaks mõõteorganit, näiteks suhteregulaatoril, kus ühe keskkonna kulu reguleeritakse teise keskkonna kulu järgi, siis võib toe *2* ümberpaigutamisega muuta kulude vajalikku suhet. Reguleerimisvedru (seadur) *1* ülesandeks on seada regulaatorit vajalikule rõhule (suhteregulaatoris aga vajalikule suhtele jne.). Vaadeldavate regulaatorite jaoks on katelde automaatsel reguleerimisel vajalik nulliline statism. Seda saavutatakse isodroomi vedru *15* jäikuse ja selle ülemise otsa kinnituspunkti sobiva valikuga kangil.

Isodroom *11* koosneb anumast *12*, millesse on valatud elavhõbedat ja õli. Temasse, põhjaga üles, on pandud silinder *13*, mille põhjas on ava, kust õli läbi jookseb. Selle ava suurust reguleeritakse kruviga *10*. Kui näiteks silinder *13* tõmmiku *17* allaliikumise mõjul alla laskub, liigub alla ka kang *24*, vedru *9* pinge suureneb, õli rõhk silindri all tõuseb ja tekib õli rõhkude vahe silindri *13* põhja mõlemal poolel. Õli surutakse sealt läbi ventiili *10* kaudu. Seetõttu hakkab aga rõhkude vahe silindri põhja eri pooltel uuesti tasakaalustuma ning vedru *9* pinge muutub uuesti algpinge suuruseks. Sel viisil kindlustatakse reguleerimise nulliline statism. Regulaatoris on veel kondensaatorid (mida pole kujutatud joonisel) koos takistitega, selleks et kustutada sädet liikuva elektrilüliti *7* kontaktidel. Lüliti *17* on seotud potentsiomeetri *14* liugkontaktiga, mis võimaldab katla juhtkilbile monteeritud voltmeetri järgi teada saada reduktori töövõlli pöördenurka ja seega ka temaga jäigalt ühendatud reguleerimisorgani asendit. Niisuguse voltmeetri skaala näitab reguleerimisorgani täiskäigu protsente.

Potentsiomeetri liugkontaktiga liiguvad samaaegselt ka lõppiirajad *23*, mis katkestavad voolu magnetkäiviti poolides, kui elektrimootor on töövõlli pööranud äärmistesse lubatud asenditesse. Juhtkilbil on peale nimetatud voltmeetri veel ümberlüliti automaatreguleerimiselt distantsijuhtimisele, ning reduktori mootori distantsjuhtimislüliti. Reduktoril on juhtratas *20* reguleerimisorgani käsitsi juhtimiseks. Selleks et üle minna käsitsi juhtimisele, on vaja juhtratast enda poole tõmmata. Seega katkestatakse side elektrimootori ja reguleerimisorgani vahel.

Teenuri aeg, s. o. aeg, mille vältel töövõll *21* pöördub 90° võrra, on 30 sek. Täitevmehhanisme tehakse kahes suuruses: väike mudel, kus väändemoment töövõllil on 50 kgm, ja suur mudel väändemomendiga 240 kgm. Konstruktsioonilt on nad täiesti sarnased. Ülekandearv on mõlemal käsitsi töötamisel 1 : 40, elektrimootoriga töötamisel 1 : 2800. Asünkroonmootori (elektriline teenur)



Joon. 2-60. Katla veenivoo elektromehaanilise kaheimpulsilise regulaatori põhimõtteskeem

pöörlemiskiirus on 1400 p/min ja teda toidetakse 220- või 380-voldise vahelduvvooluga. Väikeste mudelite elektrimootori võimsus on 250 W, suurematel 400 W. Neid regulaatoreid kasutatakse laialdaselt katla automatiseerimise praktikas rõhu, õhkude või gaaside suhte, õhu hulga jne. regulaatoreina. Tajuriks võib ühe membraani asemel olla kaks membraani (suhteregulaator), Bourdon'i toru (rõhuregulaator), solenoid (õhuregulaator), termosüsteem madalate temperatuuride reguleerimiseks, termostaattoru katla vee nivoo reguleerimiseks jt.

Teise näitena elektromehaaniliste regulaatorite kohta vaatleme kaheimpulsilist regulaatorit tüüp АРП-IV, mis on määratud katlatrumlis oleva vee nivoo reguleerimiseks.

Regulaator valmistatakse kahes variandis, staatilistele rõhkudele 34 ja 75 ata (joon. 2-60).

Regulaatori mõõteseadmeks on kolmekambriline elavhõbedaga täidetud nõu.

Kambrisse *I* tuleb rõhu impulss muutuva nivooga anumast *1*, mis on ühendatud katla ülemise trumli veeruumiga, kambrisse *II* impulss kondensatsiooninõust *3*, mis on ühendatud küllastunud või ülekuumendatud auru toruga, ning kambrisse *III* — konstantse nivooga anumast *2* (tasakaalustav anum), mis on ühendatud trumli aururuumiga.

Kambrite *I* ja *III* elavhõbedanivoode vahe sõltub rõhkude vahest neis kambreis, s. o. vee nivoo kõrgusest katla trumlis. Kambrite *II* ja *III* elavhõbedanivoode vahe sõltub rõhkude vahest neis kambreis, s. o. rõhu langusest aurutorustikus (katla trumlist kuni kondensatsioonianumani *3*), ning on võrdeline auru kulu ruuduga. Kambris *III* summeeritakse vee nivoo muutuse ja auru kulu impulss. Kambris *III* antakse elavhõbedanivoo muutus edasi elavhõbeda pinnal oleva ujuki abil mehaanilise ülekande kaudu regulaatori juhtivale seadmele.

Kui vee nivoo katlas tõuseb, voolab elavhõbe kambrist *I* kambritesse *III* ja *II*, ujuk tõuseb üles ja temaga ühendatud sektor ühendab mehaanilise ülekande abil regulaatori kontaktid *M*, mille tagajärjel regulaator vähendab katlasse mineva vee hulka. Nivoo tõusmisel seda vee hulka aga suurendatakse.

Katla koormuse suurenemisel suureneb rõhu langus aurutorustikus ja elavhõbe voolab kambrist *III* kambritesse *I* ja *II*. Sealjuures laskub ujuk allapoole, kontaktid *J* ühendatakse ning katlasse mineva vee hulk suureneb. Katla koormuse vähenemisel tõuseb ujuk üles ja regulaator vähendab katlasse mineva vee hulka. Tasakaalustav anum *3* peab olema üles monteeritud nii, et anuma *2* ja anumaid *1* ja *2* ühendava toru nivoode vahe oleks piirides 150 . . . 300 mm.

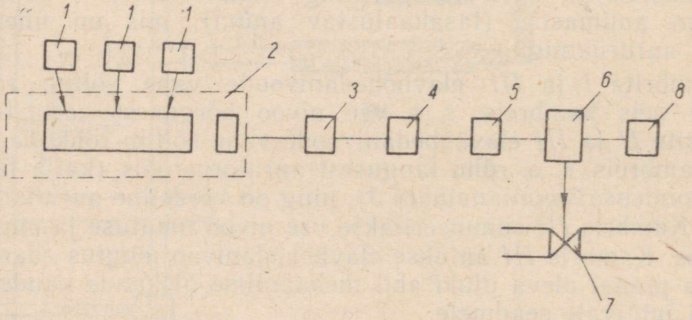
Kõik elektromehaanilised regulaatorid varustatakse tootvate tehaste poolt täielikult vajalike lülititega, täitevmehhanismidega, mitmesuguste reostaatidega, näiteabinõudega, jälgivsüsteemidega

jne., mis võimaldavad neid regulaatoreid kasutada väga mitmesuguste automaatreguleerimissüsteemide koostamiseks.

ВТИ- (Üleliiduline Soojustehnika Instituut) tüüpi elektronregulaatoreid kasutatakse laialdaselt soojuselektrijaama soojusliku osa automatiseerimisel, kuid ka mitmetes muudes tööstusharudes tehnoloogiliste protsesside reguleerimisel.

Nende regulaatorite töötamise põhimõte seisab selles, et kõigepealt muundatakse reguleeritavad suurused (rõhk, temperatuur, kulu jm.) nendega võrdelisteks elektrilisteks suurusteks, tavaliselt pingeks, ning reguleerimine toimub juba nende elektriliste suuruste kaudu. Tajureiks on nendel elektronregulaatoritel ЧМ-tüüpi manomeetrid ja ДМ-tüüpi diferentsiaalmanomeetrid rõhu ja kulu, termopaarid ja takistustermomeetrid temperatuuri, ДТ-tüüpi diferentsiaaltõmbemõõtjad väikeste rõhkude, hõrenduste ja rõhkude vahe, ДП-tüüpi tajurid lineaarsete asendimuutuste ja Д-ТТ-tüüpi transformaatorid voolu reguleerimiseks.

Reguleerimisseadme struktuurskeem, mis koosneb primaarsetest riistadest, regulaatorist, magnetkäivitist, elektrilisest teenurist ja käivitusaparatuurist, on toodud joonisel 2-61.



Joon. 2-61. ВТИ-tüüpi elektronregulaatori struktuurskeem

Primaarsed riistad *1*, mis muundavad mõõdetavad suurused elektripingeks, mõjuvad elektronregulaatorile *2*, milles on mõõteblokk, elektronblokk ja seadur reguleeritava parameetri nominaalväärtuse valimiseks regulaatoris. Ümberlüliti *3* ja distantsjuhtimislüliti *4* kaudu mõjutatakse vajaduse korral otseselt magnetkäivitit *5*, mille abil elektriline teenur *6* käivitub vajalikus suunas, muutes vastavalt ka reguleerimisorgani *7* asendit. Teenuri võlli asendi distantskontroll toimub asendinäitaja *8* (voltmeeter) abil.

Primaarsete riistade hulka kuuluvad termopaarid ja takistustermomeetrid, mida vaatlesime juba eespool. Auru, vee, mitteagressiivsete vedelike ja gaaside rõhu mõõtmine toimub ЧМ-tüüpi manomeetriga. Tajuriks on Bourdon'i toru, mille vaba ots on mehaaniliselt ühendatud induktsioontajuri südamikuga.

Manomeetreid valmistatakse nominaalrõhule 35, 60, 100 ja 150

atü. ДМ-tüüpi diferentsiaalmanomeeter on ette nähtud mitteagressiivsete vedelike, aurude ja gaaside rõhu languste mõõtmiseks staatilise rõhu juures kuni 180 atü. Tegevuse põhimõttelt on ta sarnane eespool nimetatud manomeetriga ЧМ, ainult selle vahega, et tajuriks on siin sülfoon, mille põhi on samuti kinnitatud induktsioontajuri südamiku külge. Nominaalseteks rõhkude vahedeks, mille mõõtmiseks valmistatakse diferentsiaalmanomeetreid, on 40, 100, 250, 400, 650 ja 1000 mm Hg.

ДТ-tüüpi diferentsiaaltõmbemõõtjat kasutatakse väikeste rõhkude, hõrenduste ja mitteagressiivsete gaaside ja õhu rõhu languste mõõtmiseks, kui staatiline rõhk või hõrendus pole kõrgem kui 1000 mm H_2O. Selle riista töötamise põhimõte on analoogiline eelmistega. Tajuriks on kummeeritud riidest membraan. Nominaalseteks rõhkude vahedeks, mille mõõtmiseks valmistatakse diferentsiaaltõmbemõõtjaid, on 20, 100, 200 ja 300 mm H_2O.

ДП-11-tüüpi asendimuutusetajuri ülesandeks on tekitada elektrilist impulssi, mis on võrdeline mingi seadme lineaarse asendimuutusega. Töötamise põhimõttelt on ta analoogiline eelnimetatuga. Ainult tajuri esimeseks astmeks on kang, mis ühendatakse reguleeritavate suuruste mehhanismidega. Kangi lineaarne asendimuutus muudetakse elektriliseks impulsiks. Kangi maksimaalseks käiguks on $\pm$ 30 mm.

Д-ТТ-tüüpi transformaatortajur on määratud elektrilise impulsi tekitamiseks, mis on võrdeline voolu kõrvalekaldega nominaalsest. Ta on määratud voolule kuni 5 A (maksimum).

Elektronregulaatoreid tehakse mitmesuguseid, kusjuures iga liik on määratud koostöötamiseks kindlat tüüpi primaarsete riistadega.

Elektronregulaator koosneb mõõteblokist, elektronvõimendist, tagasisidevahendist ja tüürimisseadmest. Mõõteblokis toimub parameetri mõõtmise teel primaarsetest riistadest saadud elektriliste signaalide lahutamine nende nominaalväärtusega võrduvatest elektrilistest signaalidest. Tasakaaluseisundis, kui parameetri väärtus võrdub tema nominaalväärtusega, võrdub pinge mõõtebloki väljundis nulliga. Kui aga reguleeritav parameeter on sellest väärtusest kõrvale kaldunud, tekib mõõtebloki väljundis pinge, mille suurus on võrdeline parameetri kõrvalekalde suurusega, faasi aga määrab kõrvalekalde märk.

Elektronblokis on magnet- ja elektronvõimendid (magnetvõimendid mõnedel tüüpidel puuduvad ning võimendus toimub ainult elektronlampidega), tagasisidekomplekt ja tüürimisseade (polariseeritud relee). Tüüriv impulss antakse mõõteblokist pärast võimendust elektronblokki ja sealt tüürimisseadmele.

Reguleeritava parameetri nominaalväärtuse valimiseks on igal regulaatoril seadur, mida võib elektronregulaatorist eemale üles monteerida.

ВТИ-tüüpi elektronregulaatoreist toodetakse järgmisi liike: ЭР-III — koostöös induktsioontajuriga, ЭР-Т — koostöös termo-

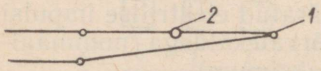
paariga, ЭР-С — koostöös takistustermomeetriga ja ЭР-ТТ — koostöös transformaatortajuriga.

ЭР-III-tüüpi regulaatori võimendusseade koosneb sisenemistransformaatorist, kahest elektronvõimendite kaskaadist ja polariseeritud releest.

ЭР-Т-, ЭР-С- ja ЭР-ТТ-tüüpi regulaatoritel on sisenemistransformaatori asemel magnetvõimendi. Stabiliseerivate elementidena kasutatakse ЭР-III-tüüpi regulaatoreis elastset tagasisidet, ЭР-Т-, ЭР-С- ja ЭР-ТТ-tüüpi regulaatoreis aga inertset elastset tagasisidet, kus erinevalt tavalisest elastsest tagasisidest võetakse arvesse ka reguleerimisparameetri muutumise kiirust. Sel puhul nendes regulaatorites parameetri muutumise kiiruse suurenemisel tagasiside mõju väheneb.

Elektronvõimendist tulev pinge antakse edasi polariseeritud relee mähistele, mille kontaktid tüürivad tagasisidele ning reverseeriva magnetkäiviti poolidele rakendatavat alalispinget.

Elektronregulaatori töötamise jälgimise hõlbustamiseks on kaks erivärvilist indikaatorlampi, mis hakkavad kumbki helendama vastavalt sellele, mis suunas käivitub teenur. Regulaatori justeerimine toimub lihtsalt regulaatori esiplaadile väljatoodud takistite sobitamise ja nuppude pööramise teel.

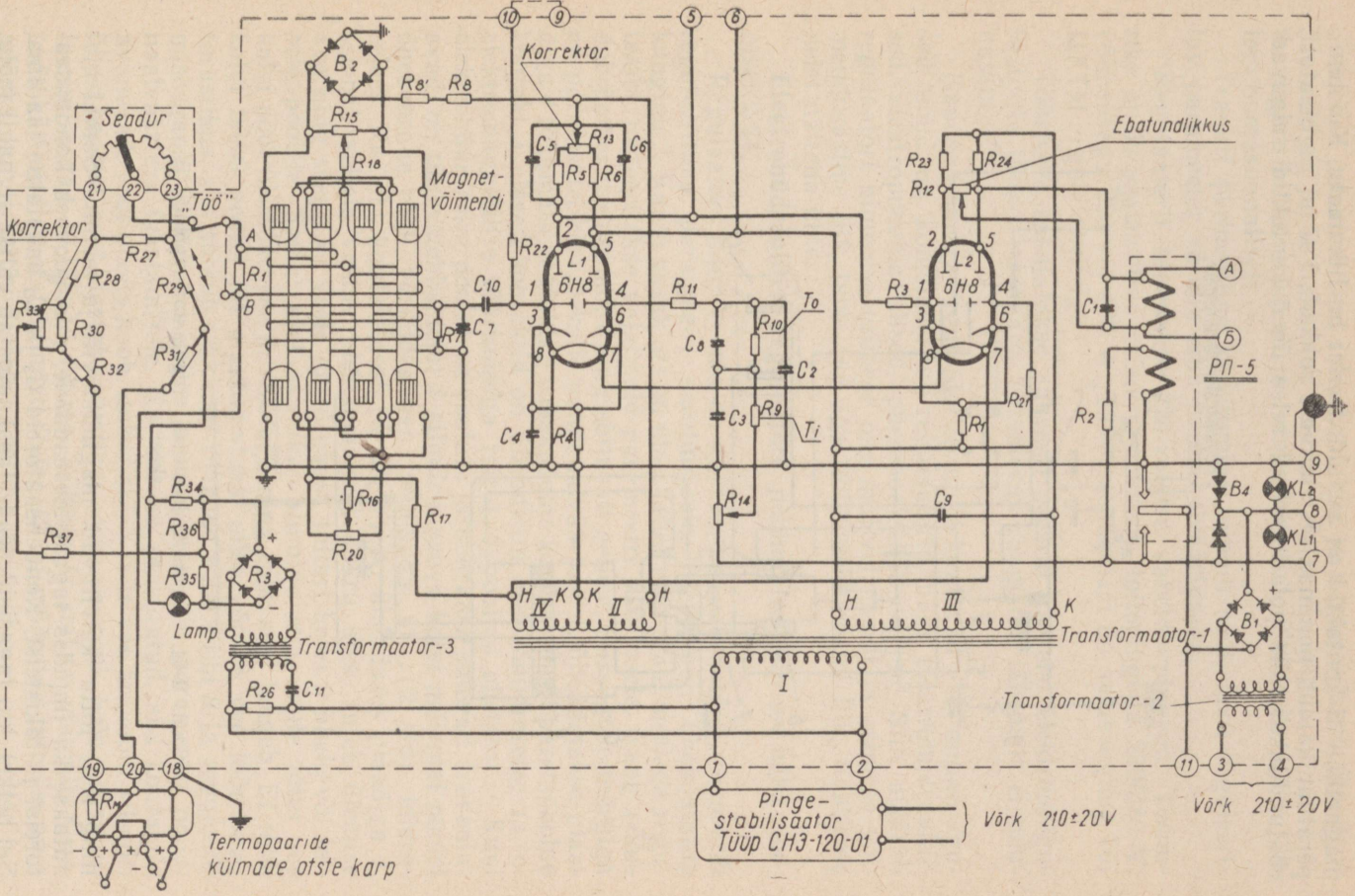


Joon. 2-62. «Kiiruslik» termopaar

ЭР-Т-tüüpi elektronregulaatorites kasutatakse harilikke ja nn. kiiruslikke termopaare. Viimased on spetsiaalselt välja töötatud automaatreguleerimise tarvis. Ühe jootekoha asemel on sellel termopaaril kaks jootekohta, mida tinglikult nimetatakse «väikeseinertsiliseks» ja «inertsiliseks» (joon. 2-62).

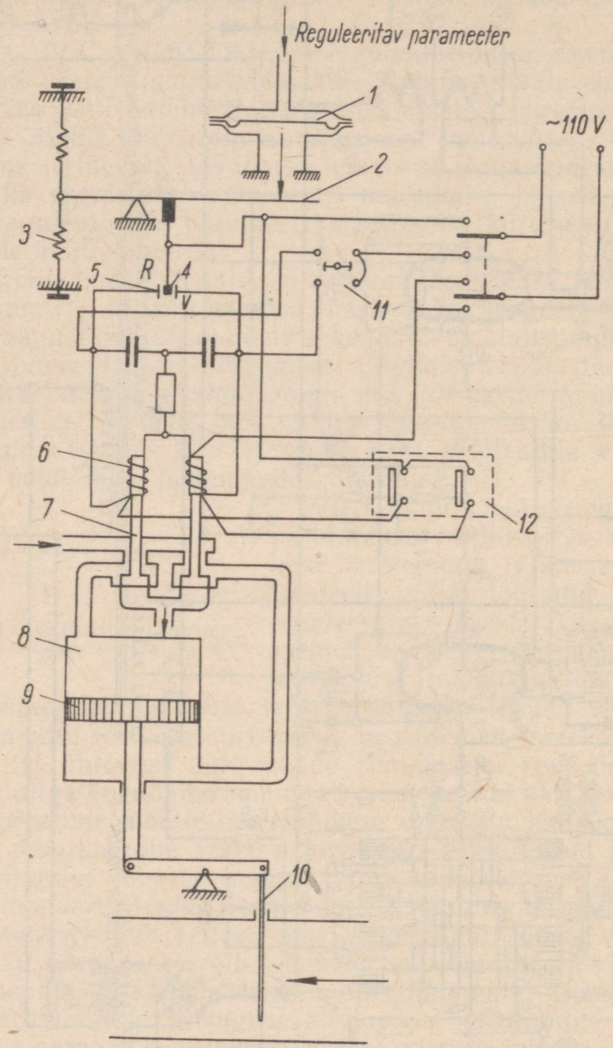
Muutumatu temperatuuri puhul on mõlemad jootekohad *1* ja *2* kuumutatud ühteviisi ning nende summaarne emj. on peaaegu võrdne nulliga (nende termopinged on suunatud üksteisele vastu). Kui temperatuur muutub, siis väikese inertsiga jootekoha *1* temperatuur muutub kohe, inertse *2* oma aga alles teatud aja pärast. Mida kiiremini muutub temperatuur, seda kõrgem termopinge tekib termopaari vabade otste vahel, kusjuures termopinge muutumise suund sõltub sellest, kas temperatuur tõusis või langes. Kiiruslikku termopaari võib vaadelda kui teineteisele vastusuunatud termopaaride kombinatsiooni, kus kummalgi termopaaril on erinev karakteristik. Niisuguse termopaari kasutamine on võrdne reguleerimisprotsessi esimese tuletise sissetoomisega. Tavaliselt on inertsel jootekohal ajakonstant 160 . . . 180 sek., väikeseinertsilisel aga 30 . . . 60 sek. ВТИ-tüüpi elektronregulaatori konstruktsiooni näitena on joonisel 2-63 toodud elektronregulaatori ЭР-Т-54 skeem.

Kirjeldatud elektronregulaator töötab järgmiselt. Kui reguleeritav temperatuur on nominaalväärtusel, võrdub mõõtebloki väljumispinge punktide *А* ja *Б* vahel nulliga, polariseeritud relee ja



Joon. 2-63. ВТИ-tüüpi elektronregulaatori ЭР-Т-54-skeem

magnetkäiviti kontaktid on avatud, teenur on liikumatu. Kui temperatuur kaldub nominaalsest kõrvale rohkem, kui on regulaatori ebatundlikkus, siis polariseeritud relee ühed kontaktid sulguvad



Joon. 2-64. Elektrohüdraulilise regulaatori põhimõtteskeem

ning selle tõttu käivituvad magnetkäiviti ja teenur. Samal ajal antakse ka impulss tagasisideseadmele, mis koosneb kondensaatoreist ja takisteist. Kondensaatoreid C_3 ja C_2 hakatakse laadima. Sel hetkel, kui tagasisideseade tasakaalustab välise signaali mõju,

avanevad polariseeritud relee kontaktid ja teenur seiskub. Kondensaatorid C_2 ja C_3 hakkavad takistite R_9 ja R_{10} kaudu tühjenema, tasakaal rikutakse uuesti ja teenur käivitub lühikeseks ajaks jällegi samasuunaliselt.

Teenuri perioodiline käivitumine toimub seni, kuni reguleeritav parameeter võrdub oma nominaalväärtusega.

Regulaatorit toidetakse 220-voldise vahelduvpingega. Teenuriks on kolmefaasiline asünkroonmootor, toitepingega 220/380 V, võimsusega 250 või 400 W. Täitevmehhanism on samasugune kui ЦКТИ regulaatoritelgi.

Tööstuses kasutatakse vähemal määral ka teisi elektronregulaatorite tüüpe, mida aga käesolevas raamatus lähemalt ei puudutata.

Kaudse toimega regulaatorite hulka kuuluvad veel mitmesugused muud, nn. kombineeritud regulaatorid, nagu elektrohüdraulilised, elektropneumaatilised, pneumoelektrilised jne. Siin määrab regulaatori nimetuse esimese osa mõõteelemendi ja esimese võimendusastme liik, teise osa aga täitevmehhanismi liik. Vaatleme neist näitena ühte.

Elektrohüdraulilise regulaatori põhimõtteskeem on näha joonisel 2-64.

Regulaatori tajur *1*, mis on näidatud membraanina, reageerib reguleeritava parameetri muutumisele. Membraan ühendatakse kangiga *2*. Kangi vasak ots on ühendatud vedruga *3*, millega regulaator justeeritakse vajalikule parameetri väärtusele. Kang pöördub ümber toetuspunkti ning sõltuvalt sellest, missuguse märgiga on parameetri kõrvalekalle nominaalväärtusest, ühendatakse plaadiga *4* liikumatu kontakti *5* vasakpoolne kontakt *R* või parempoolne kontakt *V*. Need kontaktid on ühendatud elektrohüdrorelee (s. o. elektromagnetilise tüürimisega relee) *6* poolide ahelasse. Kuni elektrohüdrorelee poolid on vooluta ja ankrud *7* sulevad äravooluavad, on täitevmehhanismi *8* silindris asuva kolvi mõlemal poolel ühesuurune rõhk, võrdudes vee töörõhuga (1 . . . 2 atü) hüdrorelees. Kui üks kontaktidest (*R* või *V*) on ühenduses plaadiga *4*, tõmbab sellele vastav elektromagnet ankru üles, suleb ülemise ava ning seega ka veele juurdepääsu täituri kolvi *9* ühele või teisele poolele. Samal ajal avatakse alumine ava, mille tõttu see kolvi pool ühendatakse äravooluga ning rõhk seal langeb. Et rõhk kolvi teisel poolel jäi muutumatuks, olles võrdne vee töörõhuga torustikus, siis sunnib tekkinud rõhkude vahe kolbi *9* ja reguleerimisorganit *10* liikuma selles suunas, mis viib parameetri nominaalväärtuse taastamisele. Kui see on saavutatud, siis kontaktid avanevad, vool poolis kaob, ankur suleb jälle vee äravoolu silindri ühest poolest, seal taastub torustikus oleva vee rõhk, kolb *9* ja reguleerimisorgan *10* jäävad seisma. Lülitite *11* abil on võimalik teostada käsitsi distantsjuhtimist. Relee *12* on määratud impulsi andmiseks, kui elektrohüdrorelee poolides on vool.

Radioaktiivse kiirgusega töötavad regulaatorid. Teaduses ja tehnikas on viimastel aastatel tehtud suuri edusamme aine omaduste ja koosseisu uurimisel, eriti aatomienergia kasutamise osas. Asjaolu, et on võimalik võrdlemisi odavalt ja massiliselt toota kunstlikke radioaktiivseid isotoope (keemilise elemendi isotoopideks nimetatakse selle elemendi eri liike, milledes aatomi tuuma laengud on ühesugused, kuid aatomi massid on erinevad), lubab neid laialdaselt kasutada tajuvelementidena automaatseadmeis. Vaatleme neist tüüpilisemaid.

Tehakse vahet radioaktiivse kiirguse kolme eri liigi vahel:

a) α-kiired — kiiresti liikuvad positiivse laenguga mateeriaosakesed.

b) β-kiired — negatiivse laenguga elektronide voog, mis liigub väga suure kiirusega (ligikaudu valguse kiirusega).

c) γ-kiired — elektromagnetilise kiirguse voog, millel on sama olemus mis röntgenikiirtelgi ning mis erineb neist ainult võnkesageduse poolest.

Radioaktiivsete automaatikavahendite loomise põhialuseks on radioaktiivse kiirguse läbitungivus-, neeldumis- ja hajumisomaduse ärakasutamine. Väga suur tähtsus on seejuures asjaolul, et sel puhul on võimalik kontaktivabalt mõõta mitmesuguseid füüsikalisi suurusi ja kontrollida protsesse, mis kulgevad täiesti kinnistes nõudes. Tihtipeale pole seda küllalt täpselt võimalik teha ühegi muu mõõtmismeetodiga.

Kiirgusallikana kasutatakse tavaliselt radioaktiivset koobaltit Co^{60}.

Radioaktiivse isotoobiga regulaatoreid kasutatakse mitmesugustes tootmisprotsessides toodetava produktsiooni (terase, paberi, alumiiniumi, vase, tina, plastmassi, kummi, klaasi, lõnga vm.) paksuse määramiseks ja reguleerimiseks. Sellel on väga suur tähtsus eriti niisuguste tootmisprotsesside juures nagu metallide kuum- ja külmvaltsimine, sest see võimaldab metalli paksust jälgida ja muuta juba valtsimisprotsessi käigus.

Et mõõta vedeliku tihedust tema voolamisel torustikus, ilma et tajur oleks sinna torustikku asetatud, on valmistatud radioaktiivsed tihedusemõõtjad. Eriti häid tulemusi on saavutatud gammapulbimõõtjatega, mis määravad pinnase (liiva, savi) hulka vee ja pinnase segus. Samuti võib seda põhimõtet kasutada maakide rikastamisel ja tootmisel. Radioaktiivsete tajurite abil on võimalik määrata väga väikesi lineaarseid asendimuutusi ja vibratsioone. Kasutatakse radioaktiivseid pöörete lugejaid, mitmesuguste esemete gabariitide mõõtjaid, toodete arvu loendajaid konveieril jpm.

Radioaktiivsed isotoobid võimaldavad uurida keemilisi ja füüsikalisi protsesse. Lisanud ainele väga väikese hulga radioaktiivseid isotoope, võime jälgida selle aine liikumist kogu keemilise protsessi vältel. Radioaktiivsed isotoobid registreeritakse sealjuures ionisatsioonikambri ja loendaja abil. Seda uurimisviisi nimetatakse «märgitud aatomite» meetodiks. Nimetatud meetodit kasu-

tatakse ka meditsiinis, agrotehnikas ja teistes teaduse ja tehnika harudes.

«Märgitud aatomite» meetodi kasutamisel gaasi ja vedeliku kulu automaatseks kontaktivabaks mõõtmiseks ja reguleerimiseks lastakse mõõdetavasse keskkonda (gaasi, vedelikku) teatud kindla ajavahemiku järel radioaktiivset ainet, mille läbivoolu vastuvõtja registreerib. Nii määratakse selle keskkonna liikumise kiirus. Kuid kulu võib mõõta ka sel teel, et mõõdetavat keskkonda ainult kiiritatakse väljastpoolt kindlate ajavahemike järel. Seejuures tekivad torustikus nn. ioonpaketid, mille läbiminek vastuvõtupunktist registreeritakse. Kiiritaja ja vastuvõtja on mõõdetavast keskkonnast isoleeritud ning torustikus puudub igasugune mõõteelement. Varieerides kiiritusperioodi pikkust võib saada väga suurt mõõtmis- ja reguleerimistäpsust ning pealegi võimaldab see meetod gaasi või vedeliku kulu vahetpidamatut distantsmõõtmist suure täpsusega küllaltki lihtsate vahenditega.

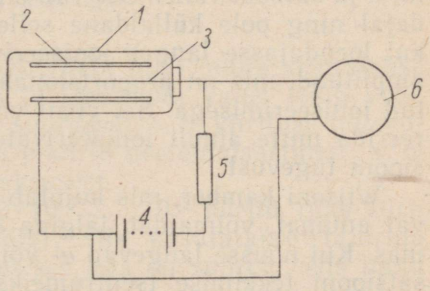
Radioaktiivsust täheldatakse ja mõõdetakse kiirguse järgi, mida kiirgab radioaktiivne aatom. α-, β- või γ-kiirte läbiminek ainetest tekitab rea nähtusi, mida võib registreerida spetsiaalsete riistadega.

Radioaktiivse kiirguse omadusel ioniseerida ainet põhinevad ionisatsioonkiirgamise registreerimise meetodid. Radioaktiivse kiirguse fotograafilist toimet kasutatakse radioaktiivsuse uurimisel samuti laialdaselt. Mõnede ainete (fosfooride) omadustel kiirata α-, β- või γ-kiirguse toimel valgust põhineb nn. stsintillatsioonimeetod. Soojuslikku efekti, mis tekib radioaktiivsel kiirgusel, kasutatakse radioaktiivsuse kalorimeetrilisel mõõtmisel. Riistadest, mis registreerivad radioaktiivset kiirgust selle poolt tekitatud ionisatsiooni põhjal, on levinumad ionisatsioonikambrid, Geigeri-Mülleri loendajad, proportsionaalloendajad ja Wilsoni kambrid.

Lihtsaim riist ioonide registreerimiseks, mis tekivad α- ja β-kiirguse mõjul, on ionisatsioonikamber *1* (vt. joon. 2-30).

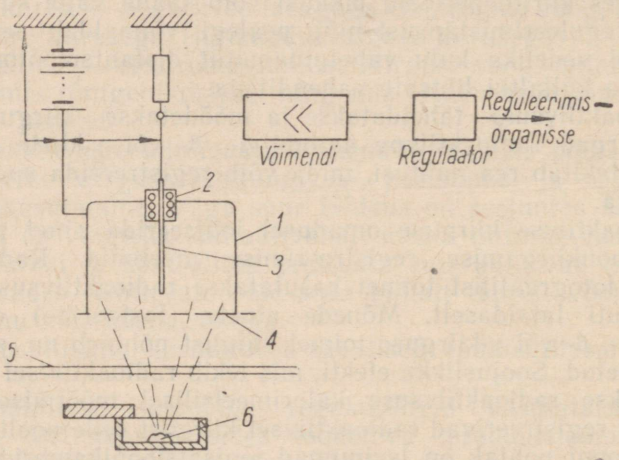
Ionisatsioonvool, mis tekib üksikute laetud osakeste mõjul (α-, β-osakesed või elektronid, mis lüüakse välja kambri seinast γ-footonite poolt), on väga väike. Seda võib mõõta ainult väga tundlike riistadega. Seepärast kasutatakse üksikute osakeste registreerimiseks sagedamini gaasiga täidetud loendustorusid, s. t. Geigeri-Mülleri loendajaid (joon. 2-65).

Loendajad valmistatakse tavaliselt klaastoruna *1*, milles on metallist silinder *2* koos tema keskele tõmmatud metallniidiga *3*. Niidi ja silindri vahel tekitatakse alaline kõrgepingeline elektriväli pingeallikaga *4*.



Joon. 2-65. Geigeri-Mülleri loendaja

Silinder on katoodiks. Loendaja on täidetud gaasiga rõhul kuni 10 . . . 20 cm Hg. Elektrivälja tugevus valitakse nii, et elektron, mis tekib loendajas gaasi ioniseerimisel radioaktiivse kiirgusega, saaks traadile siirdumisel energia, mis on küllaldane gaasi ioniseerimiseks. Tekkinud uued elektronid hajutatakse elektrivälja poolt. Sealjuures tekitavad nad omakorda uusi gaasiioone. Nii tekib elektronide kasvav laviin, mis tormab niidile. Kui niidi ja katoodi potentsiaali vahe on küllaldane, tekib nende vahel lahendus. Niidi potentsiaal küll langeb järsult, ent taastub siis elektronide voolamise tõttu läbi takisti *5*. Sellel takistil tekib lühiajaline pingeimpulss, mille amplituud ei sõltu radioaktiivse kiirguse mõjul tekkinud algionisatsioonist ja mis on küllaldane,



Joon. 2-66. Ionisatsioonikambriga regulaatori põhimõtteskeem

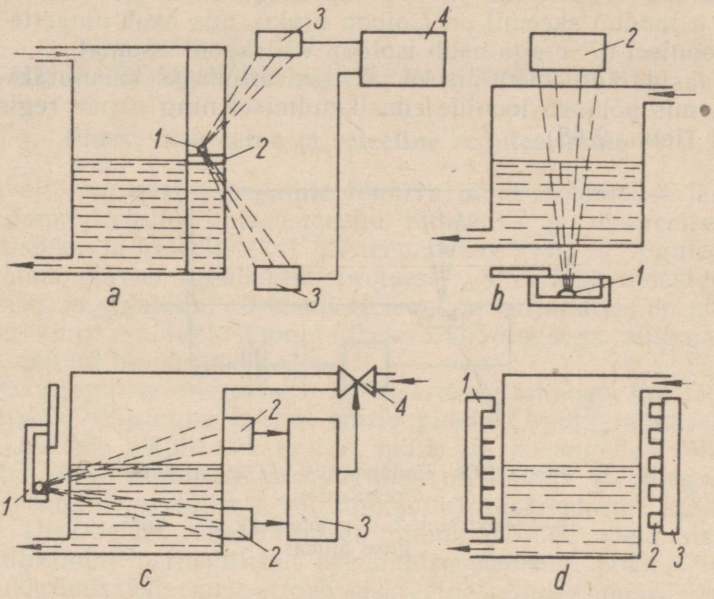
et viia tegevusse registreerivat elektronlampide süsteemi *6*. Selle järgi võib ära määrata osakeste arvu, mis läbisid loendaja.

Proportsionaalloendaja on töötamise põhimõttelt sama, mis Geigeri-Mülleri loendaja, erinev on tal ainult elektrivälja tugevus niidi ja katoodi vahel. See väli on nõrgem kui Geigeri-Mülleri loendajal ning pole küllaldane selleks, et tekiks iseseisev lahendus, kui loendajasse langeb ioniseeriv osake. Tekkival impulsil on amplituud, mis on proportsionaalne ioniseeriva aine poolt tekitatud ioniseerimisega. Sel viisil võib proportsionaalloendaja registreerida mitte ainult ioniseerivate osakeste arvu, vaid ka ionisatsiooni tugevust.

Wilsoni kamber, mis kujutab endast küllastunud auru sisaldavat anumat, võimaldab jälgida α- ja β-osakeste jälgi selles anumas. Kui nõusse langevad α- või β-osakesed, siis on need kondensatsiooni tekkimise tsentrumeiks ning osakeste trajektoore võib näha kambris tekkinud vedelikutilgakeste kaudu.

Radioaktiivset kiirgust kasutatakse peamiselt kontaktivabal automaatkontrollimisel, kuid ka automaatreguleerimisel ja -juhtimisel. Tajuriks on, sõltuvalt vajadusest, kas ionisatsioonikambrid või mitut liiki loendajad.

Pideva lindina liikuva toote paksuse ionisatsioonikamberregulaatori (joon. 2-66) tajur koosneb voolu juhtivast silindrist *1* ja elektroodist *3*, mis on sellest silindrist isoleeritud isolaatoriga *2*. Kambri vastu, mis on kaetud õhukese lehtmetalliga *4*, pannakse



Joon. 2-67. Radioaktiivse tajuriga nivooregulaatorid:
a — ujuki kasutamisega (*1* — kiirguse allikas, *2* — ujuk, *3* — vastuvõtja, *4* — elektronblokk); *b* — aksiaalse kiiritamisega (*1* — kiirguse allikas, *2* — vastuvõtja); *c* — diametraalse kiiritamisega (*1* — kiirguse allikas, *2* — vastuvõtja, *3* — elektronblokk koos võimendiga, *4* — reguleerimisorgan); *d* — pideva reguleerimisega (*1* — kiirguse allikad, *2* — vastuvõtjad, *3* — elektronblokk koos võimendiga)

kontrollitav ese *5* (niit, kangas, paberileht jne.), mida kiiritatakse radioaktiivse isotoobiga *6*. Seina ja elektroodi vahel tekib vool, mille tugevus sõltub ionisatsiooni suurusest, s. o. kiirituse tugevusest. Kiirituse tugevus aga sõltub γ-kiirte neeldumisastmest, s. o. kambri eest mööduva materjali paksusest.

Kui kiirguse intensiivsus on $2 \cdot 10^{-7}$ ... 10^{-3} küriid (üks kürii on $3{,}7 \cdot 10^{10}$ lagunemisakti sekundis), siis kasutatakse tajurina tavaliselt ionisatsioonikambrit, kui see aga on suurem, siis muid riistu, näit. Geigeri-Mülleri loendajat.

Radioaktiivset nivoomõõtjat ja -regulaatorit kasutatakse kin-

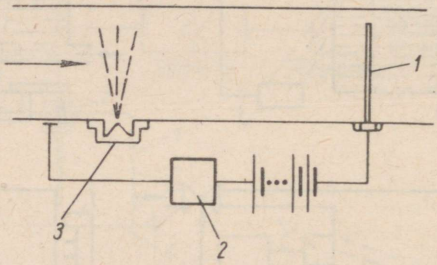
nises nõus asuva vedeliku või ka tahke aine nivoo reguleerimisel. Tüüpilisemad neist on toodud joonisel 2-67.

Kiirgusallikana kasutatakse tavaliselt Co^{60}. Rakendatakse kas otse- või diferentsiaalskeemi.

Diferentsiaalskeemiga (joon. 2-67, *a* ja *c*) saavutatakse väljuva impulsi parem lineaarsus kui otseskeemiga (joon. 2-67, *b*).

Kui suurendada radioaktiivse kiirguse allikate ja vastuvõtjate arvu piki anuma telge (joon. 2-67, *d*), siis saame regulaatori, mis võimaldab reguleerida nivood täpsusega kuni 0,5 mm. Joonisel 2-67, *a* toodud skeemil on isotoop ujukil, mis asub omaette kambris, joonisel 67, *c* aga asub isotoop väljaspool anumat.

Gaaside kulu mõõtmiseks ja reguleerimiseks kasutatakse meetodit, mis põhineb ioonide edasikandmisel ning nende registreerimisel (joon. 2-68).



Joon. 2-68. Radioaktiivse tajúriga kuluregulaator:
1 — elektrood, *2* — mõõteblokk, *3* — kiirguse allikas

Vastuvõtuelektroodile *1* antakse potentsiaal toru korpuse suhtes. Mõõteblokis *2* on süsteem, mis mõõdab voolu vastuvõtuelektroodil. Kui gaasi voolus ioonid puuduvad, siis puudub ka elektroodil vool. Sõltuvalt gaasi voolamise kiirusest muutub ka ionisatsioonvoolu tugevus.

III. AUTOMAATREGULEERIMISSÜSTEEMID

1. Pidev, diskreetne ja releeline reguleerimine

Sõltuvalt reguleerimisorganile toimiva mõju iseloomust jagatakse automaatreguleerimissüsteemid pidevaiks ja diskreetseiks (impulsilisteks ja releelisteks) süsteemideks. Pidevas reguleerimissüsteemis jäävad reguleerimisprotsessi vältel kõik sidestused muutmatuks ja signaalid süsteemi elementide väljundites on pidevad mõju ning aja funktsioonid. Pideva mõjumisega automaatsüsteemi näiteid tõime juba eespool.

Automaatreguleerimissüsteem on diskreetse toimega, kui reguleerimisorgani tüürimine toimub mitte pidevalt, vaid impulsside seeriana, millede amplituud, kestus, märk või ka sagedus sõltub parameetri kõrvalekaldumisest (ka ühes tuletistega ja integraaliga) võrdsetel (kas täpselt või ligikaudu) diskreetsetel ajamomentidel. Diskreetsel reguleerimisel toimub mõjude ahela sisse- ja väljalülitamine perioodiliselt spetsiaalse elemendi poolt. Pidevast reguleerimissüsteemist erineb diskreetne reguleerimissüsteem selle poolest, et temal on võimendile lisaks veel impulsielement.

Diskreetse reguleerimissüsteemi töötamisprintsiibi piltlikuks kujutamiseks näitame, kuidas teda võib saada tavalisest pideva toimega reguleerimissüsteemist.

Vaatleme temperatuuri reguleerimise süsteemi (joon. 3-1).

On vaja hoida konstantset temperatuuri õhuga jahutatavas ahjus (reguleeritav objekt). Reguleerimisorganiks on katted, mille avamisnurk α määrab ahju jahutava õhu hulga. Väline mõju objektile $f(t)$ on mingi funktsioon ajast. Käesoleval juhul muutub ahju temperatuur igasuguste teiste, mitte katete asendist sõltuvate põhjuste mõjul, nagu temperatuuri muutus ahjus soojusliku koormuse muutuse tõttu, jahutusõhu temperatuuri muutus jne.

Regulaatori tajuriks on takistustermomeeter *1*, mis on silla *2* üheks haruks, ja galvanomeeter *3*, mis mõõdab voolu silla diagonaalis. Sild *2* justeeritakse nii, et ahju soovitud temperatuuril, mida on vaja hoida konstantsena, sillas vool puudub. Sel viisil on regulaatori väljumissuuruseks galvanomeetri osuti asendimuutus m, mis on võrdeline temperatuuri muutusega ϑ:

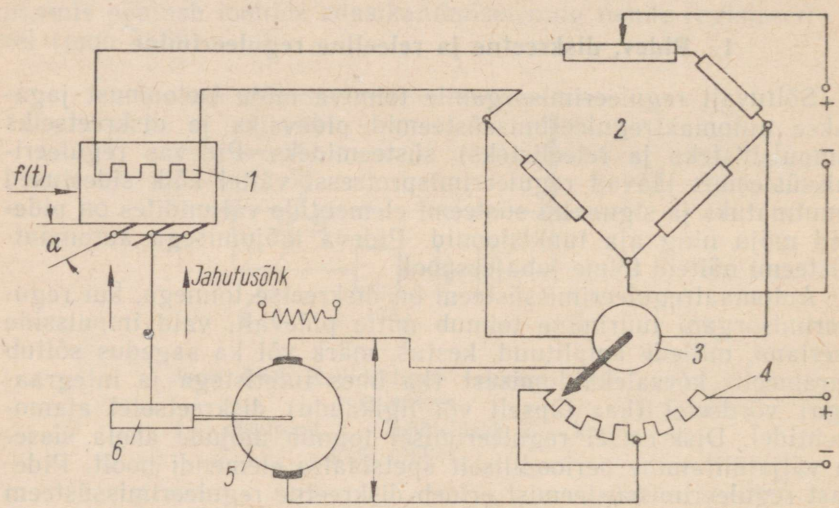
$$m = k_1 \vartheta.$$

Osuti libiseb potentsiomeetrit *4* mööda, mis juhib mootori *5* tööd. Mootori ankrut toidetakse potentsiomeetri kaudu (selles ahelas võib vajaduse korral olla veel võimendi) pingega

$$U_a = k_2 m.$$

Mootor *5* pöörab reduktori *6* kaudu katteid (reguleerimisorganit), andes neile kiiruse $\frac{d\alpha}{dt}$, mis on võrdeline pingega U_a.

Selle süsteemi oluliseks puuduseks on, et galvanomeetri *3* osutil on suur mehaaniline koormus hõõrdumise näol potentsiomeetril



Joon. 3-1. Pideva toimega temperatuuri reguleerimise süsteem

(hea kontakt peab olema kindlustatud). See asjaolu vähendab tunduvalt tajuri tundlikkust, järelikult ka kogu regulaatori tundlikkust väikeste temperatuurimuutuste ϑ suhtes.

Galvanomeetri osuti hõõrdumiseta liikumist potentsiomeetril on võimalik saavutada diskreetse reguleerimissüsteemi abil. Neid süsteeme on mitut liiki. Esimese liigi moodustavad süsteemid, mis muudavad sisenemissuuruse üksteisele järgnevateks impulssideks, millede suurus on võrdeline sisenemissuuruse väärtusega impulsi tekitamise hetkel (joon. 3-2).

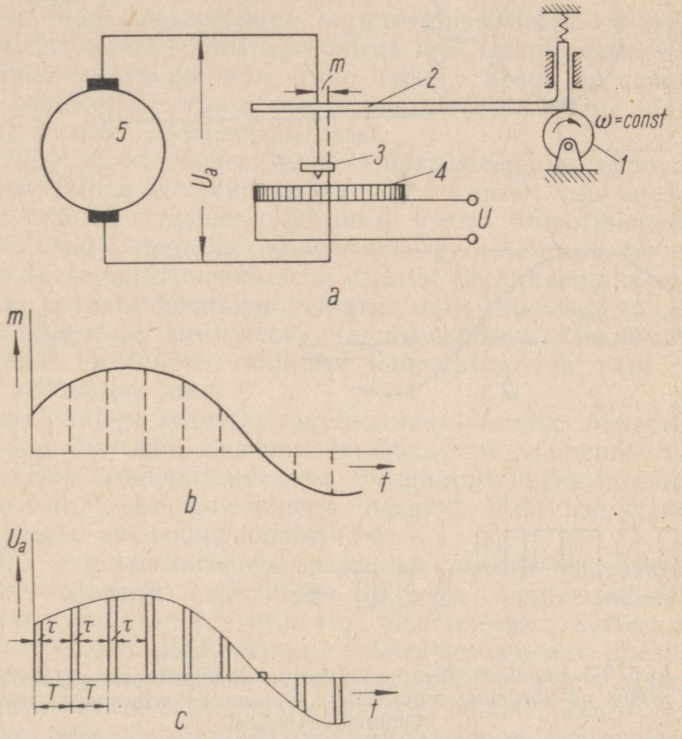
Joonisel 3-2, *a* on galvanomeetri osuti *3* näidatud otsvaates. Ta võib potentsiomeetri *4* kohal liikuda täiesti hõõrdevabalt. Osuti kohale on asetatud nn. langev kaar *2*, mis toetub konstantse kiirusega pöörlevale ekstsentrikule *1*. Kui kaar tuleb alumisse äärmisse asendisse, ühendab ta oma raskusega osuti potentsiomeetriga lühikese ajaühiku vältel. Ülejäänud aja ekstsentriku pöörlemise ajast liigub osuti *3* vabalt potentsiomeetri kohal.

Osuti vahetpidamatu asendimuutuse tõttu sõltuvalt temperatuuri muutusest ($m = k_1\vartheta$, joon. 3-2, *b*) antakse pinge U_a mootori ankru ahelasse lühikeste impulssidena (joon. 3-2, *c*).

Impulsside vaheldumise konstantne periood

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \text{const} \qquad (10)$$

määratakse ekstsentriku pöörlemiskiirusega ω. Impulsside kestus τ on konstantne suurus, samuti impulsside suhteline kestus $\gamma = \frac{\tau}{T}$.



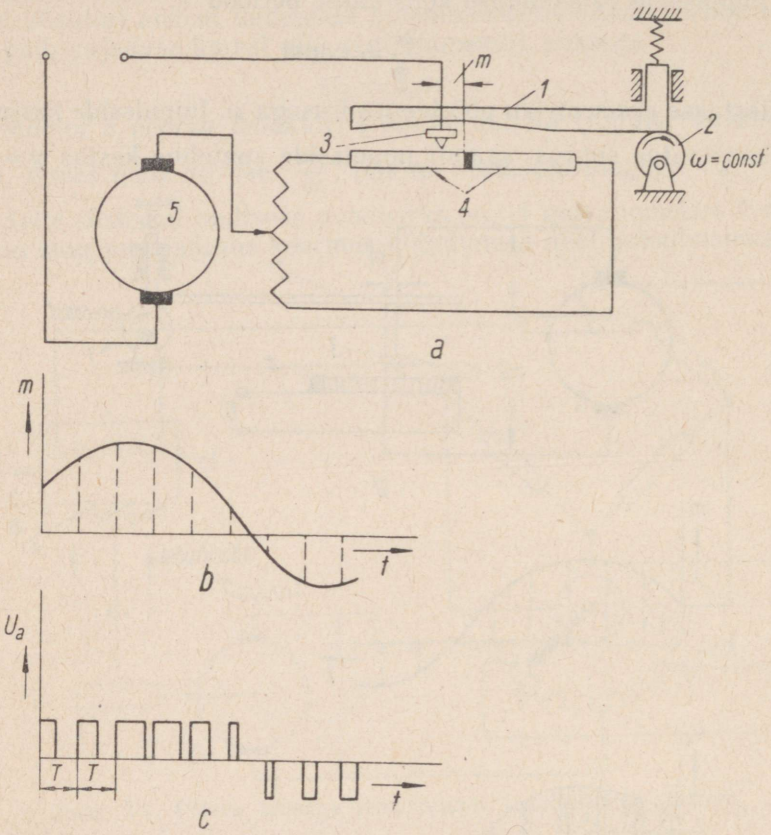
Joon. 3-2. Impulssreguleerimissüsteem, kus tajurilt saadud impulsi suurus on võrdeline reguleeritava parameetri erinevusega tema nominaalväärtusest

Aega $\tau = \gamma T$ nimetatakse tööintervalliks, sest selle aja vältel mõjuvad impulsid täitevmehhanismile. Impulsside suurus U_a on võrdeline osuti kõrvalekaldumisega tasakaaluasendist m ja mootori ankrut toidetakse pingega, mis on diskreetne impulsiline sõltuvus suurusest m:

$$U_a = k_2 m.$$

Teise liigi moodustavad süsteemid, mis muudavad sisenemis-

suuruse üksteisele järgnevateks impulssideks, millede k e s t u s on võrdeline sisenemissuuruse väärtusega impulsi tekitamise hetkel, s. t. $U_a = U = \text{const}$, kuid τ on muutuv suurus (joon. 3-3).



Joon. 3-3. Impulssreguleerimissüsteem, kus tajurilt saadud impulsi kestus on võrdeline reguleeritava parameetri erinevusega tema nominaalväärtusest

Impulsielement on siin tehtud kaldpinda omava langeva kaarena *1* ning potentsiomeetri asemel on üksteisest ühenduskohas isoleeritud kontaktplaadid *4*. Impulsielemendi sisenemissuuruseks on nagu varemgi osuti *3* kõrvalekalle kesk-, s. o. neutraalasendist. Väljumissuuruseks on konstantse suurusega, kuid erineva pikkusega (kestusega) ja märgiga pingeimpulsid. Need tekivad langeva kaare kaldpinna olemasolu tõttu ja sõltuvad osuti asukohast kontaktplaatide keskasendi suhtes tema allasurumise hetkel langeva kaare poolt.

Mõlemad impulsslülide tüübid on lineaarsed, sest parameetri kõrvalekalde ja impulsi vahel on võrdeline sõltuvus. Kui süsteemi

ülejäänud lülid on samuti lineaarsed, siis on reguleerimissüsteem tervikuna lineaarne diskreetne süsteem. Harilikult kasutatakse diskreetsete süsteemide matemaatiliseks kirjeldamiseks ja lahendamiseks tavaliste diferentsiaalvõrrandite asemel nn. lõplike vahedega võrrandeid (ka lineaarseid). Neid käesolevas raamatus ei puudutata.

Automaatreguleerimisse impulsslüli sissetoomise peamiseks sihiks on vabastada regulaatori tajur koormusest. See võimaldab reguleeritava suuruse mõõtmiseks kasutada täpsemaid ja vähem võimsaid seadmeid.

Esimest tüüpi diskreetsetes reguleerimissüsteemides muutub teenuri (elektrimootori) pöörlemiskiirus igas tööintervallis võrdeliselt impulsi suurusega tema tekke hetkel. Seega on sama aja vältel ka reguleerimisorgani asendi muutus sõltuv tema ajamina kasutatava mootori pöörlemiskiirusest.

Teist tüüpi diskreetsetes reguleerimissüsteemides elektrimootori pöörlemiskiirus ei muutu (pinge $U_a = \text{const}$), vaid igas tööintervallis muutub tema sisselülitumise kestus proportsionaalselt impulsi kestusega, seega ka reguleerimisorgani käigu kestus.

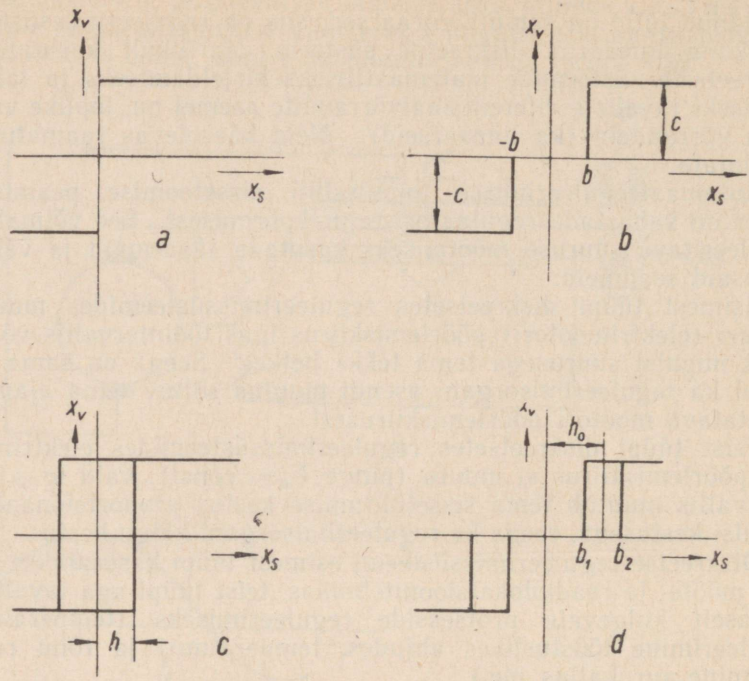
Diskreetse reguleerimissüsteemi esimest tüüpi kasutatakse eeskätt mõõte- ja raadiolokatsioonitehnikas, teist tüüpi aga tavaliselt aeglaselt kulgevate protsesside reguleerimiseks (temperatuuri reguleerimine tööstuslikes ahjudes, temperatuuri ja rõhu reguleerimine aurukatlas jne.).

Releelise toimega automaatreguleerimissüsteemiks nimetatakse süsteemi, kui ühe tema elemendi (mõõteorgani, võimendi) väljumissuurus jääb sisenemissuurusest sõltumatult üheks ja samaks, märk aga sõltub sisenemissuuruse märgist. Releelise elemendi karakterkõverad on toodud joonisel 3-4.

Releeline reguleerimissüsteem kuulub samuti kui diskreetne reguleerimissüsteemgi katkendliku toimega reguleerimissüsteemide hulka. Nende oluline erinevus diskreetsetest süsteemidest seisab selles, et oma põhiolemuselt pole releesüsteemid lineaarsed süsteemid, sest neis toimub regulaatori mõjude ahela sisse- ja väljalülitamine mitte väljastpoolt määratud hetkedel, nagu see toimub diskreetsetes süsteemides, vaid sõltuvalt reguleeritavast suurusest enesest, s. t. sisse- ja väljalülitamisi teostab süsteem ise oma olekuga. Üldjuhul see sisse- ja väljalülitamine pole perioodiline. Need lülitamishetked pole varem teada, neid ei määrata väljastpoolt, vaid süsteemi sisemiste omadustega, tema struktuuriga ja parameetri muutusega ning selle suurusega.

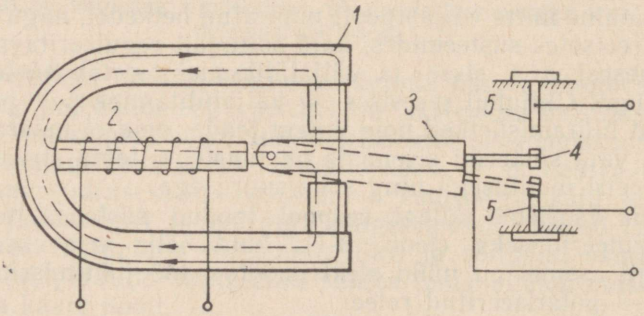
Näitena vaatleme jällegi eespool toodud süsteemi temperatuuri reguleerimiseks (joon. 3-1), kuid selle erinevusega, et impulsslüli asemel on nüüd elektrimootori töö juhtimiseks releeline lüli — polariseeritud relee.

Polariseeritud relee (joon. 3-5) töötamise põhimõte seisab selles, et relee magnetahelasse viiakse sisse täiendav püsivmagnetite magnetvoog.



Joon. 3-4. Releede karakterkõveraid

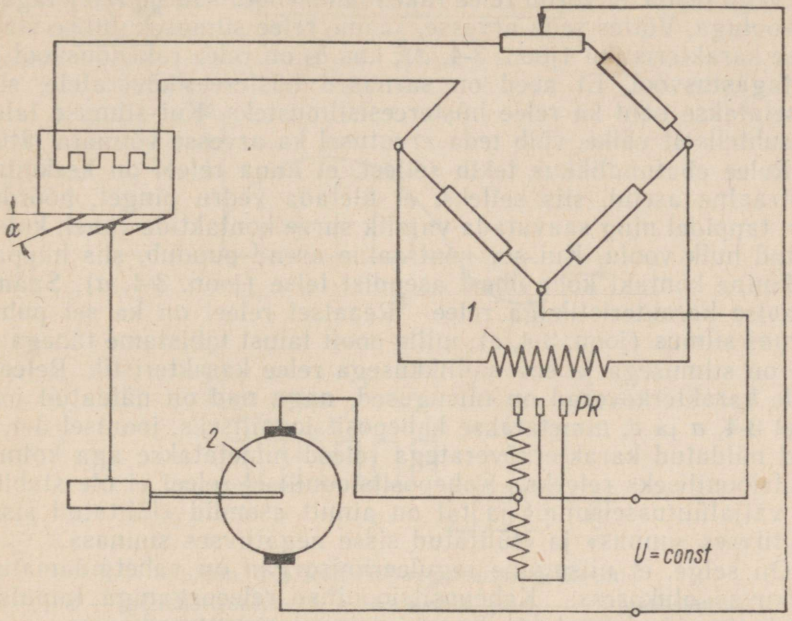
Kolmepositsioonilise polariseeritud relee ankur *3* on kogu aja püsivas magnetväljas keskmises, s. t. neutraalses tasakaaluasendis (joonisel pideva joonega), ning selleks, et teda sellest tasakaalust välja viia, on vaja võrdlemisi väikest täiendavat magnetvoogu. See tekitatakse relee mähises *2*. Eelmagneetimine kiirendab relee kontaktide kokkutõmbumist ja suurendab ta tundlikkust. Püsivmagnet tõmbab ankrut ühesuguse tugevusega nii üles kui ka



Joon. 3-5. Polariseeritud relee:
1 — püsivmagnet, *2* — relee mähis, *3* — ankur, *4* — kontaktplaat, *5* — kontaktid

alla. Selle ebastabiilse oleku likvideerimiseks hoitakse ankur keskasendis väikese vedru abil.

Kui ankrut läbib vool, siis tekib täiendav magnetvoog, mille suund sõltub mähist *2* läbiva voolu suunast, ning sõltuvalt sellest tõmmatakse ankur kas üles või alla (joonisel alla — kriipsjoonega). Käesolevas näites magnetvood summeeruvad all, aga lahutuvad ülal, järelikult tõmmatakse ankur alla, (vastupidise voolu-



Joon. 3-6. Polariseeritud releega temperatuuri reguleerimise skeem

suuna puhul aga tõmmatakse ta üles) ning suletakse üks kontaktidest *5*. Polariseeritud relee tundlikkus on kuni 10^{-5} amprit.

Vaatleme temperatuuri reguleerimist releelise lüli abil (joon. 3-6). Sõltuvalt voolu suunast silla diagonaalis (mähis *1*), s. t. sõltuvalt reguleeritava temperatuuri ϑ märgist, suletakse polariseeritud relee *PR* keskmine kontakt kas parem- või vasakpoolse kontaktiga, juhtides voolu generaatori mähistesse kas ühes või teises suunas. Seetõttu pöörleb ka elektrimootor *2* kas ühes või teises suunas, avades või sulgedes katteid.

Relee kontaktidele *5* (joon. 3-5) tuleb võrgust pinge $U = \text{const}$. Mootori toitepinge U kestus muutub sõltuvalt voolust silla diagonaalis ühe eespool toodud seaduspärasuse järgi (joon. 3-4). Relee keskmise kontakti *4* neutraalasendile vastab $U = 0$. Polariseeritud releesse siseneva voolu puhul $x_s = I = b$ (joon. 3-4, *b*) lülitub relee sisse ja pinge $x_v = U = c$ antakse mootori ühte mähisesse. Voolu I vastupidise suuna puhul, mida loetakse negatiivseks

($I = -b$), toimub samasugune relee sisselülitamine ning sama pinge U antakse nüüd mootori mähisesse vastupidise märgiga, mille tõttu mootor pöörleb ka vastupidises suunas. Seda suunda loeme negatiivseks ning sel puhul $U = -c$. Intervalli $-b \leqslant I \leqslant b$, kus $U = 0$, nimetatakse relee ebatundlikkuseks. Väljumissuuruse $x_v = U$ sõltuvust sisenemissuurusest $x_s = I$ nimetatakse relee staatiliseks karakteristikuks.

Nagu teada, ei võrdu relee rakendamisvoolu suurus relee tagastusvooluga. Võttes seda arvesse, saame relee silmusekujulise staatilise karakteristiku (joon. 3-4, *d*), kus b_2 on relee rakendusvool ja b_1 tagastusvool. Et need on sarnased hüstereesikõveratele, siis nimetatakse neid ka relee hüstereesisilmusteks. Kui silmuse laius on suhteliselt väike, võib teda arvutusel ka arvesse võtmata jätta.

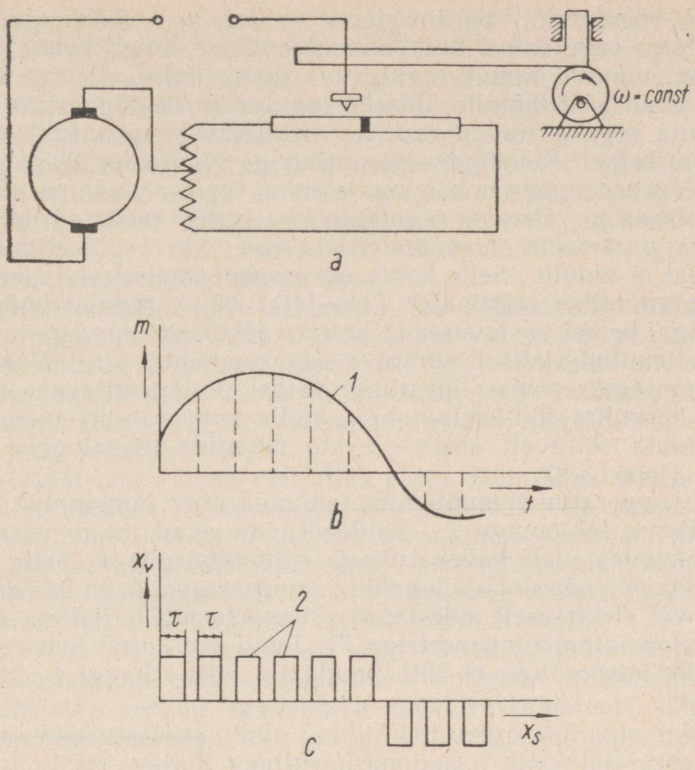
Relee ebatundlikkus tekib sellest, et kuna releel on keskmine neutraalne asend, siis selleks, et ületada vedru pinget, hõõrdumist tappidel ning saavutada vajalik surve kontaktide vahel, kulub teatud hulk voolu. Kui see neutraalne asend puudub, siis hüppab keskmine kontakt kohe ühest asendist teise (joon. 3-4, *a*). Saame ideaalse karakteristikuga relee. Reaalsel releel on ka sel puhul olemas silmus (joon. 3-4, *c*), mille poolt laiust tähistame tähega *h*. See on silmusega ja ebatundlikkusega relee karakteristik. Releed, mille karakterkõverad on niisugused, nagu nad on näidatud joonisel 3-4, *a* ja *c*, nimetatakse kahepositsiooniliseks, joonisel 3-4, *b* ja *d* näidatud karakterkõveratega releed nimetatakse aga kolmepositsiooniliseks releeks. Kahepositsioonilisel releel ei ole stabiilset väljalülitusseisundit ja tal on ainult asendid «lülitatud sisse positiivses suunas» ja «lülitatud sisse negatiivses suunas».

On selge, et niisugune reguleerimisorgan on vahetpidamatult võnkuvas olukorras. Kahepositsioonilise releeorganiga impulssregulaatoreid nimetatakse ka vibratsioonregulaatoreiks.

Kolmepositsioonilise releega regulaatoreid kasutatakse niisuguste protsesside reguleerimisel, kus ei nõuta suurt reguleerimistäpsust (vee nivoo reguleerimine, akumulaatorite laadimine, temperatuuri reguleerimine mitmesugustes objektides jne.).

Vibratsioonregulaatoreid kasutatakse neil juhtudel, kui niisugune süsteemi isevõnkumisprotsess tõstab ta reguleerimiskiirust või kui on vaja ületada süsteemis esinevaid olulisi ebalineaarsusi, nagu kuivhõõrdumist, hüstereesi jne. Näiteks kasutatakse elektrimasina pinge ja pöörlemiskiiruse vibratsioonregulaatoreid. Vibratsioonregulaatorite kasutamise puhul on reguleeritava parameetri kõikumised praktiliselt väga väikesed. Dünaamiliste omaduste poolest on vibratsioonregulaatoritega süsteemid väga lähedased pideva toimega süsteemidele. See lubab nende teoreetiliste analüüside puhul võtta reguleeritavaks parameetriks ta keskmised väärtused, jättes kõrvale ta perioodilisuse komponendid, ning kasutada sel viisil lineaarse reguleerimisteooria meetodeid.

Releelist reguleerimist võib teostada ka teiste abinõudega, näiteks elektromagnetsiduriga.



Joon. 3-7. Releelise reguleerimise skeem:
a — põhimõtteskeem, *b* — sisenemis- ja *c* — väljumissuuruse muutuse graafik (*1* — sisenemisimpulss, *2* — väljumisimpulss)

Mõnikord nimetatakse releeliseks reguleerimiseks ka diskreetset reguleerimist, kui süsteemis on lüli, mis muundab sisenemissuuruse seeria erineva märgiga (polaarsusega) konstantse kõrguse ja kestusega impulssideks (joon. 3-7).

Teenuri (elektrimootori) pöörlemiskiirus ja käigu kestus on konstantsed suurused, seega on konstantne ka reguleerimisorgani käigu suurus. Katted avatakse ja suletakse (joon. 6) perioodiliselt võrdse suuruse võrra.

2. Jälgiv- ja programmsüsteemid

Jälgiv- ja programmsüsteemid on automaatreguleerimissüsteemide eriliigid.

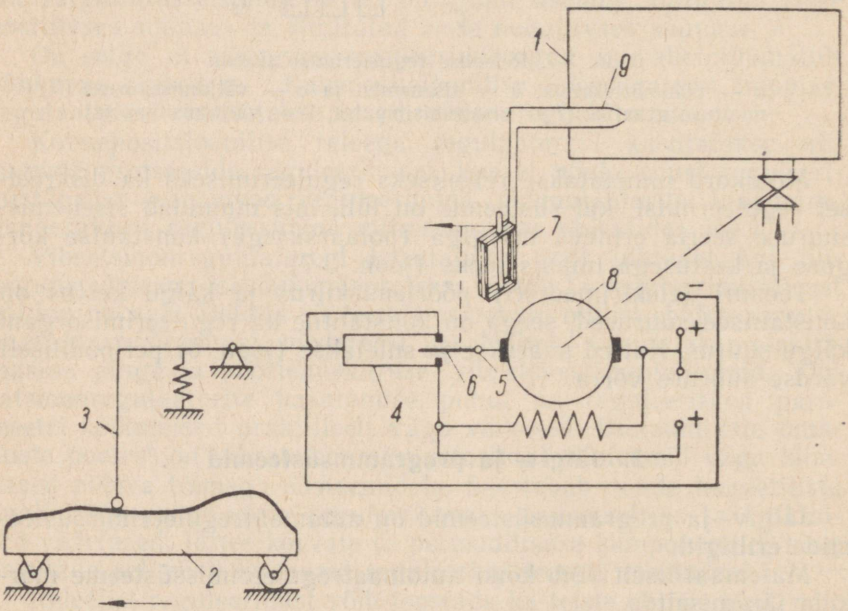
Matemaatiliselt võib kõiki automaatreguleerimissüsteeme märkida järgmiselt:

$$1)\ x = \text{const};\quad 2)\ x = f(t);\quad 3)\ x = f(y), \tag{11}$$

kus x on reguleeritav parameeter, t — aeg, y — sõltumatu muutuja. Üldine regulaatori funktsionaalne skeem kõigil kolmel juhul on sama, muutub ainult regulaatori justeerimise olemus. Kõigil kolmel juhul jääb kõigile ühiseks reguleerimise dünaamika ülesanne: viia reguleeritav parameeter võrdseks tema antud väärtusega igal hetkel. Konstantse parameetriga regulaator ($x = \text{const}$) hoiab kõigi koormuste ja häiringute puhul reguleeritava parameetri konstantsena ja võrdsena regulaatorisse justeerimisel antud reguleeritava parameetri nominaalväärtusega, mis reguleerimisprotsessi ajal ei muutu. Selle kohta on eespool toodud palju näiteid.

Programmiline regulaator [$x = f(t)$] hoiab reguleerimisparameetri igal hetkel vastavuses ta antud väärtusele, mis aga muutub varem etteantud ajaliselt muutuva seaduspärasuse järgi. Vaatleme programmreguleerimise lihtsaimat näidet. Reguleeritavaks objektiks on termilise töötlemise ahi *1*, mille temperatuuri tuleb aegajalt muuta sõltuvalt ahjus olevate detailide tehnoloogia vajadustest (joon. 3-8).

See temperatuuri muutumine on määratav konstantse kiirusega liikuva šablooniga *2*. Šabloonilt annavad liikuv varras ja kang liikumise edasi kaheharulisele kontakthargile *4*. Selle vahel on osuti *6*, mis näitab ahju tegelikku temperatuuri ja on kas mehaaniliselt või elektriliselt sidestatud primaarse mõõteriistaga (tavaliselt automaatpotentsiomeetriga *7*). Juhul kui antud temperatuur ja tegelik temperatuur ei ühti, puudutab osuti *6* kangi *4* üht kon-



Joon. 3-8. Programmreguleerimissüsteemi skeem

takti ning paneb reguleerimisorganiga jäigalt ühendatud elektrimootori tööle. Reguleerimisprotsess lõpeb siis, kui tegelik temperatuur võrdub etteantud temperatuuriga ning osuti *6* asub harude *4* keskel. Analoogiliselt võib programmiliselt reguleerida kõiki teisi füüsikalisi ja elektrilisi suurusi.

Jälgivsüsteemides [$x = f(y)$] hoiab regulaator reguleeritavat parameetrit täiesti vabalt muutuva programmi järgi, mille muutumine, vastandlikult programmsüsteemidele, pole ajaliselt teada ega ette antud, s. t. nad reageerivad sõltumatu muutuja igale suurusele kui täiesti uuele ülesandele.

Jälgivsüsteemides võib etteantud ehk sõltumatuks muutujaks olla kas mingi liikuva keha koordinaadid või mõõdetava suuruse vabalt muutuvad väärtused, tegelikeks ehk sõltuvaiks suurusteks aga mingisugune mõne riista või aparaadi poolt vastuvõetud suurus. Jälgivsüsteem peab kõrvaldama vahe ehk, nagu öeldakse, vea ühe ja teise muutuja vahel.

Jälgivsüsteemi näiteid võib tuua palju. Seda kasutatakse automaatmõõteriistades (automaatpotentsiomeetrid), arvutustehnikas (automaatintegraatorid), liikumise üleandmise seadmeis pikkade vahemaade puhul, raadiolokatsioonis (automaatraadiolokaatorid), astronoomias (automaatteleskoobid), masinaehituses (automaatkopeerimispingid) ja paljudes teistes tehnikaharudes.

Raadiolokaatori või teleskoobi jälgivsüsteemid muudavad võimsate elektriajamite abil automaatselt antenni, seniitkahuri või teleskoobi toru asendit vaadeldava objekti trajektoori jälgedes. Sealjuures kasutatakse nõrku raadio- või valgussignaale, mis kaovad, kui objekt väljub vaatluspiirkonnast. Neis jälgivseadmeis kasutatakse keerulisi võimendeid, kahinafiltreid ja rida igasuguseid muid seadmeid, mis tõstavad seadme töötamise täpsust ja töökindlust.

Automaatkopeerimistööpinkides muudab tajuvelement, «kombates» joonisel detaili piirjoont või mudeli servi, võimsate freeside asendit nii, et töödeldav masinaosa saab soovitud kuju.

Töötamise põhimõtte järgi võib jälgivsüsteeme jagada kolme põhirühma.

1. Süsteemid, kus jälgivmehhanism liigub konstantse kiirusega, sõltumatult vea muutumise kiirusest. Põhiliselt on need releelised süsteemid, mis põhinevad elektrimootori sisse- ja väljalülitamisel, ilma et tema kiirust reguleeritaks. Tänu oma lihtsusele kasutatakse neid laialdaselt.

2. Süsteemid, kus jälgivmehhanism liigub kiirusega, mis on võrdeline vea muutusega. Sel viisil on aeg, mille jooksul saavutatakse nurga ettenähtud muutus, alati ligikaudu sama, muutub ainult selle muutumise kiirus: suuremad nurga muutused likvideeritakse kiiremini, väiksemad aeglasemalt. Niisugune süsteemi töötamisprotsess kõrvaldab praktiliselt jälgivseadme ajami võnkumise nullpunkti (reguleeritava parameetri) ümber ja tagab, eriti nurkade väikeste erinevuste puhul, suure töötamistäpsuse, s. o.

väga väikese vahe (vea) reguleeritava parameetri muutliku antud väärtuse ja seda antud väärtust jälgiva tegeliku väärtuse vahel.

Seda tüüpi jälgivsüsteemid on täiuslikumad nii töötamistäpsuse kui ka -kiiruse poolest.

Selle süsteemi kasutamisel saab mõnede spetsiaalsete väikese profiiliga kõrgesordiliste teraste valtspinkide valtsidevahelist kaugust näiteks hoida täpsusega kuni paar sajandikku millimeetrit.

Proportsionaalsete jälgivsüsteemide positiivsed omadused, mille tõttu neid automaatikas laialdaselt kasutatakse, on:

töötamise sujuvus pöördemomendi võrdelisuse tõttu ühtimatuse nurgaga,

väikene hilinemus, s. t. praktiliselt süsteemi omavõnkumise puudumine,

võimalus kasutada ebakooskõlatajuritena kõiki tajurite tüüpe, mis reageerivad mehaanilisele liikumisele.

Selleks et muuta tavaline tajur ebakooskõlatajuriks, on küllaldane siduda tüüriv võll tajuri liikuva osaga, tagasisidevõll aga tajuri normaalselt paigalpüsiva osaga.

Puudustest võib nimetada:

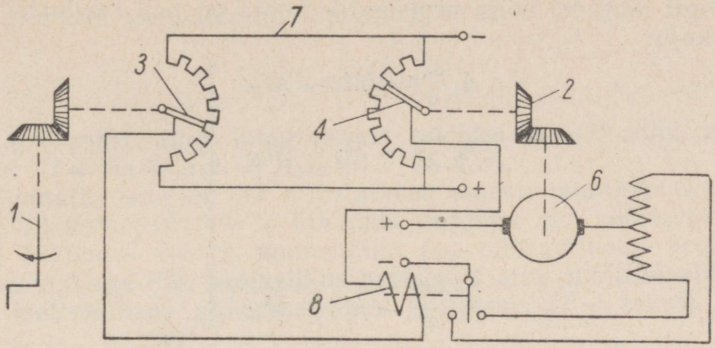
vajadust kasutada süsteemis kõrge töötamistäpsuse ja tundlikkuse saavutamiseks võimendit,

tüüritava võlli väike pöörlemiskiirus väikeste ebakooskõlade puhul, sest sel puhul läheneb pöördemoment nullile.

3. Süsteemid, kus jälgivmehhanism liigub tsükliliselt (perioodiliselt). Need süsteemid mõõdavad perioodiliselt vea suurust ning lülitavad vastavalt vea märgile lühikeseks ajaks tööle elektriajami. Neid süsteeme kasutatakse tavaliselt seal, kus sisenemissuurus muutub aeglaselt.

Kõigis nimetatud seadmetes teostatakse täituri pöörlemissuuna muutus tema mootori reverseerimisega. Mootor töötab järelikult sagedase sisse- ja väljalülitamise tõttu rasketes tingimustes. Et sagedasest reverseerimisest pääseda, kasutatakse väikeseinertsilisi elektromagnetilisi või hüdraulilisi sidureid, mille abil saadakse täituri pöörlemissuuna muutumine tema mootori pöörlemissuunda muutmata. Jälgivsüsteemide hilinemuse vähendamiseks kasutatakse väikese võimsusega elektrimootorite või magnetiliste sidurite juhtimisel tiratrone, millede inerts on elektromagnetilise relee inertsiga võrreldes tühine.

Jälgivsüsteemi näitena vaatleme laeva distantsrooliseadet (joon. 3-9). Siin kasutatakse tasakaalustatud silla skeemi, mille diagonaalis on kas polariseeritud relee või mõni võimendi. Liugkontakt *3* on mehaaniliselt seotud etteandevõlliga *1*, kontakt *4* on aga reduktori *2* kaudu ühendatud elektrimootoriga *6*. Selles seadmes tekib etteandevõlli käsitsi pööramisel silla *7* diagonaalis pinge, mis läbib polariseeritud releed *8* ning sõltuvalt potentsiaalide vahest ja märgist lülitab elektrimootori ühes või teises suunas tööle. Rool liigub kas vasakule või paremale ja ühes temaga ka kontakt *4*, mis liigub niikaua, kuni pingete vahe tasakaalustub.



Joon. 3-9. Reostaatjälgivsüsteem

Ülaltoodud skeemi kohaselt reostaadi kasutamise positiivne omadus jälgivsüsteemides seisab selles, et nad võimaldavad elektrimootori sujuvat tüürimist ka kontaktivabalt. Sel juhul on vaja polariseeritud relee asendada elektron- või elektrimasinvõimendiga. Reostaatelementide asemel võib kasutada ka induktsioonilisi, mahutuvuslikke, fotoelektrilisi ja teisi elemente, milledel puuduvad elektrikontaktid.

3. Objekti ja regulaatori võrrandi koostamise alused

Olgu antud n parameetrit (x_1, $x_2 \ldots x_n$), mis iseloomustavad protsesse seadmes (mitmesugused temperatuurid, rõhud, mingisuguste keemiliste, füüsikaliste või mehaaniliste protsesside kiirus, masina võlli pöörlemiskiirus jne.). Olgu M_1, $M_2 \ldots M_n$ muutuvad suurused, mis iseloomustavad seadme tööprotsesside hulgalist väärtust (näiteks motoorsete jõudude moment, mis paneb pöörlema turbiini võlli, auru hulk, mis antakse seadmest välisele tarbijale, kütuse või õhu hulk, mis antakse katla koldesse, vee hulk, mis läheb paaki jne.).

Nimetame statsionaarseks režiimiks seadme niisugust töötamise olekut, mille puhul kõik suurused M_1, $M_2 \ldots M_n$ on võrdsed vabalt antud väliste koormustega (energia või aine hulga tarbijatega) M_{10}, $M_{20} \ldots M_{n0}$ ja mille puhul iga parameeter säilitab oma konstantse väärtuse x_{10}, $x_{20} \ldots x_{n0}$.

Statsionaarseks režiimiks nimetame järelikult niisugust režiimi, mille puhul

$$\left.\begin{aligned} &1)\ M_1 - M_{10} = M_2 - M_{20} = \ldots = M_n - M_{n0} = 0 \\ &2)\ \frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = \ldots = \frac{dx_n}{dt} = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Olgu lõpuks antud seadmete statsionaarse režiimi rikkumisel toimuvate keemiliste, füüsikaliste või mehaaniliste protsesside kulgemiste seadused.

Kõigil juhtudel kõigi protsesside kohta on neil seadustel järgmine kuju:

$$\left.\begin{aligned} A_1 \frac{dx_1}{dt} &= M_1 - M_{10} \\ A_2 \frac{dx_2}{dt} &= M_2 - M_{20} \\ &\cdots\cdots\cdots \\ A_n \frac{dx_n}{dt} &= M_n - M_{n0} \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

Kui näiteks $x_1 = \omega$ on võlli pöörlemiskiirus, M_1 — motoorsete jõudude moment, M_{10} — takistusjõudude moment, siis väljendab esimene võrrand (13) liikumise hulga momentide seadust. Võrrandi vasakul poolel asetsev tegur A_1, mida teoreetilises mehaanikas nimetatakse pöörlevate masside inertsimomendiks, on pöörleva süsteemi mahutegur temale rakendatud impulsimomentide suhtes.

Kui $x_2 = \Theta$ on gaasi temperatuur, M_2 — gaasi poolt sekundis vastuvõetud soojushulk, M_{20} aga soojushulk, mida gaas saab väljastpoolt, siis väljendab teine võrrand (13) termodünaamika esimest seadust. Sealjuures on tegur A_2 gaasi erisoojus vastavatel tingimustel.

Kui $x_3 = \gamma$ on gaasi või auru tihedus, $M_3 = G$ ja $M_3 = G_0$ — auru või gaasi sisenemine konstantse mahuga ruumi $V_0 = A_3$ ning tema väljumine sealt, siis kolmas võrrand (13) avaldub kujul

$$V_0 \frac{d\gamma}{dt} = G - G_0.$$

Sel juhul väljendab see võrrand aine jäävuse seadust. Kõigil juhtudel, ükskõik milline oleks mahuteguri kuju ja milline oleks jõudude liik, mis lähevad võrrandi vasakule ja paremale poolele, jääb tema kuju muutumatuks. Süsteemi võrrandid (13) on looduse põhilised seadused, nagu seda on energia ja aine jäävuse seadused.

Seadme reguleerimise ülesandeks on seadme poolt ümbertöötatud energia või aine kvalitatiivsete iseloomustuste säilitamine sõltumatult välisest tarbijast.

Tegur $A_1, A_2 \ldots A_n$ iseloomustab süsteemi inertsi ning on arvuliselt võrdne mõjuga (aine hulgaga, soojushulgaga jt.), mis on vajalik, et muuta režiimi kvaliteedinäitajat mõõtühiku võrra. On selge, et mida suurem on see mahutegur, seda vähem on objekt tundlik mõjutamistele (s. t. tema kvaliteedinäitaja x muutub sama mõju puhul vähem).

Mahutegur A võib olla nii konstantne kui ka muutuv suurus. Kui näiteks reguleeritavaks objektiks on paak ja reguleeritavaks suuruseks nivoo kõrgus, siis on ta, juhul kui paagil on kõrguse sihis konstantne ristlõikepind, lineaarne objekt ja $A = \text{const}$, kui aga mitte, siis on ta ebalineaarne objekt ja $A = \text{var}$.

Igale kvaliteedinäitajale x vastab kindel energia või aine hulga tagavara, mis akumuleerub objektis $x_1 = z$:

$$U = A\int_{z_1}^{z_2} dz.$$

Kui $A = \text{const}$ ning integreerime piirides $z_1 = 0$ kuni $z_2 = z$, saame: $U = Az = A_1x_1 = A_2x_2 = \ldots = A_nx_n$.

Üldistatud suurust Ax nimetatakse objekti mahtuvuseks. Kulgeval liikumisel võrdub ta liikumise hulgaga mv, pöörleval liikumisel liikumise hulga momendiga $I\omega$, hüdraulilises protsessis anuma mahuga FH, soojuslikus protsessis aine soojussisaldusega $Gc\Theta$, isotermilises pneumaatilises protsessis ($T = \text{const}$) gaasi kaaluga anumas $\frac{VP}{RT}$ jne.

Mahtuvus võib olla kas koondatud ühte või hajutatud mitmesse ossa. Kui nendes osades akumuleerunud energia või aine üleminek ühest osast teise on raskendatud, siis on objekt mitmemahuline, kui aga mitte, siis moodustavad need osad ühemahulise süsteemi. Seepärast võib vedelikuga täidetud metallanumat, millel on suur soojuse äraande tegur, tervikuna vaadelda kui ühemahulist soojuslikku objekti.

Paljudel juhtudel on ühel ja samal seadmel eri protsesside puhul mitu režiimi kvaliteedinäitajat.

Näiteks võib vedelikuga anumat iseloomustada: 1) vedeliku nivooga, 2) üldise soojusmahtuvusega, 3) üldise massiga ja 4) üldise inertsimomendiga.

Vaadeldes anuma täitumise või tühjenemise protsessi selgub, et ainukeseks režiimi kvaliteedinäitajaks on nivoo kõrgus. Järelikult on mahuteguriks sel puhul nivoo.

Anuma kuumutamise või jahtumise protsessis on ainukeseks režiimi kvaliteedinäitajaks vee temperatuur. Järelikult on mahuteguriks süsteemi erisoojus.

Anuma kulgeval liikumisel on kvaliteedinäitajaks tema lineaarne kiirus. Järelikult on mahuteguriks anuma ja vedeliku mass.

Lõpuks, anuma pöörleval liikumisel on kvaliteedinäitajaks pöörlemise nurkkiirus ning mahuteguriks — inertsimoment.

Niisiis võib vaadeldaval anumal olla protsessist sõltuvalt mitmesuguseid mahutegureid. Seepärast peab režiimi iseloomustamiseks objekti vaatlema vastavast protsessist lähtudes.

Automaatreguleerimissüsteem võib koosneda kaht tüüpi, nimelt kontsentreeritud ja hajutatud parameetritega elementidest.

Kontsentreeritud parameetritega elemendi käitumise määrab täielikult lõplik arv muutuvaid suurusi. Need suurused võivad olla ükskõik millist füüsikalist laadi, nagu temperatuur, rõhk, kiirus, pinge jne. Neid muutuvaid suurusi, mis määravad elemendi olukorra, nimetatakse selle elemendi *üldistatud koordinaatideks*. Üldistatud koordinaatide arv määrab kontsentreeritud parameetritega elemendi vabadusastme.

Kontsentreeritud parameetritega süsteemi lihtsaimaks näiteks on füüsiline pendel, mille oleku määrab ainult üks koordinaat ja millel on üks vabadusaste: pendli raskuskeskme kõrvalekaldumine tasakaaluasendist. Kontsentreeritud parameetritega elementide dünaamikat kirjeldatakse harilike diferentsiaalvõrranditega.

Hajutatud parameetritega elementidel on lõpmatu hulk vabadusastmeid. Nende elementide näitena võib nimetada aurukatla küttepinda, kus soojusvahetus toimub kogu toru pindade ulatuses, mitte aga ühes punktis. Hajutatud parameetritega elemendi dünaamikat kirjeldatakse osatuletistega diferentsiaalvõrrandite abil. Käesolevas raamatus neid ligemalt ei käsitleta.

Kontsentreeritud parameetritega automaatreguleerimissüsteemi võrrandite koostamisel on vaja kõigepealt kokku leppida muutuvate suuruste kõrvalekaldumise suhtelise arvestuse alguse ja suuna kohta. Kõrvalekaldumise alguseks võib pidada muutuva suuruse antud nominaalset või mõnd äärmist väärtust, s. t. väärtust, mis tal on enne välise häiringu rakendumist. Selle välise häiringu mõju ongi vaja jälgida. Muutuvate suuruste muutumise positiivseks suunaks, mis üldiselt valitakse vabalt, loeme suunda, mis vastab tema arvulise väärtuse suurenemisele. Häiringu märk on positiivne, kui häiringu suurenemisel parameetri väärtus kasvab, ning negatiivne, kui see kahaneb. Võib olla ka mõni muu kokkulepe. Teiseks on süsteem vaja lahutada elementaarseteks lülideks, s. o. elementideks, milledel on üks vabadusaste (mida kirjeldatakse ainult ühe parameetri muutusega).

Süsteemi üksikute lülide võrrandid, milledes esinevad kas muutuvad suurused ise või nende suhtelised kõrvalekalded nominaalväärtustest, koostatakse järgmiselt. Eeldades, et kõik muutujad, mis on vaadeldavale lülile sisenemissuurusteks, on kaldunud kõrvale positiivses suunas, seome need sisenevad muutujad eeltoodud seaduspärasuse alusel muutuvate väljumissuurustega. Nii teeme kõigi lülidega. Võrrandite arv peab vastama süsteemi vabadusastmete arvule, s. t. süsteemi iseloomustavate muutuvate suuruste arvule.

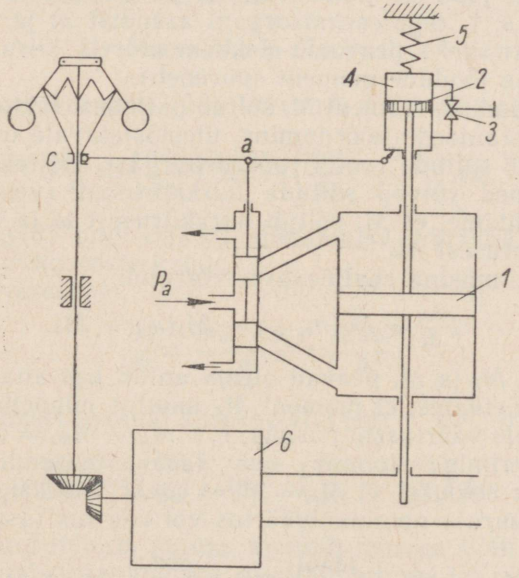
Kõik võrrandid kokku moodustavad reguleerimisprotsessi võrrandisüsteemi.

Reguleerimisprotsessi võrrand peab võimalikult täpsemalt peegeldama süsteemi üksikute faktorite mõju kogu süsteemile. Kuid võib juhtuda, et kõigi faktorite arvessevõtmine põhjustab keerulise võrrandi, mida on raske lahendada. Sel juhul tuleb sisse viia lihtsustusi, jättes välja mõningaid suurusi, mis ei või üldisele reguleerimisprotsessile avaldada nimetamisväärset mõju (idealiseerime protsessi). Võib juhtuda, et saame ebalineaarse võrrandi. Võttes arvesse, et senini pole veel välja töötatud matemaatilisi meetodeid, mis võimaldaksid küllalt lihtsalt uurida ebalineaarseid võrrandeid, asendatakse need tavaliselt ligikaudsete lineaarsete võrranditega (nad lineariseeritakse). Resultaadid, mis on saadud lineariseerimisega või mõningaid vähem tähtsaid suurusi arves-

tamata jättes, mistõttu protsessi ei vaadelda küll täielikult, võimaldavad siiski küllalt õigesti koostada keerukaid reguleerimissüsteemide võrrandeid ja neid edukalt lahendada.

Võrrandite lineariseerimise aluseks on eeldus, et kogu reguleerimisprotsessi vältel kaldub reguleeritav parameeter suhteliselt vähe kõrvale oma nominaalväärtusest (väikeste võnkumiste meetod). Lineariseerimine toimub võrrandite arendamisel Taylori ritta uue tasakaaluseisundi ümber, arvestades, et väline häiring süsteemile on konstantne, kusjuures Taylori reas võtame arvesse ainult rea esimesed liikmed ning ülejäänud liikmed jätame nende väiksuse tõttu tähele panemata.

Et koostada võrrandit muutuvate suuruste tasakaaluasendist kõrvalekaldumiste järgi, on kõigepealt vaja saada sõltuvus koordinaatide vahel süsteemi tasakaalu jaoks, s. t. koostada staatika võrrand. Pärast seda eeldame, et süsteemi tasakaal on rikutud tõuketaolise (hüppelise) häiringu tõttu (s. t. koormuse muutus toimub silmapilkselt mingi suuruse võrra ning jääb selle juurde), mis rakendatakse tasakaalus olevale objektile väljastpoolt (joon. 2-4, *b* täisjoon). Selline koormuse muutus esineb kõige sagedamini ning on süsteemile kõige raskemini talutav. Kõik teisekujulised häiringud tekitavad väiksemaid parameetrite kõikumisi. Nimetatud eeldusel koostame süsteemi dünaamika võrrandi.



Joon. 3-10. Pöörlemiskiiruse isodroomse automaatreguleerimise süsteem:
1 — täitur, *2* — isodroomi kolb, *3* — drosselventiil, *4* — isodroomi silinder, *5* — vedru, *6* — objekt

Lahutades dünaamika võrrandist staatika võrrandi, saame süsteemi siirderežiimi võrrandi kõrvalekaldumiste järgi.

Näitena tuletame jõumasinast (aurumasin, diisel, turbiin) ja kaudse toimega isodroomsest pöörlemiskiiruse regulaatorist koosneva reguleerimissüsteemi elementide võrrandid (joon. 3-10).

Masina võrrand. Väga paljudel jõumasinatel on ainult üks vabadusaste, s. t. ainult üks üldistatud koordinaat, mis täielikult määrab tema seisundi. Selleks on masinavõlli pöörlemiskiirus. Eeldades, et masinal on ainult üks vabadusaste, meie idealiseerime olukorda. Meie ei võta arvesse masinasse mineva auru või gaasi massi ega masina osade elastsust, pidades viimaseid absoluutselt jäikadeks jne.

Kui eeldada, et masinal on üks vabadusaste ja tema mass on konstantne, siis tema liikumise võrrand avaldub kujul:

$$I\frac{d\omega}{dt} = M_l - M_t, \tag{14}$$

kus I — kõigi liikuvate osade inertsimoment taandatult masina võllile,

ω — masina võlli pöörlemise nurkkiiruse üldistatud koordinaat (reguleeritav suurus),

M_l — võllile rakendatud motoorsete jõudude moment,

M_t — võllile rakendatud takistusjõudude moment.

Motoorsete jõudude moment M_l sõltub masinasse mineva energia hulgast, s. t. reguleerimisorgani asendist m ja samuti nurkkiirusest ω (näiteks peavoolu-elektrimootoreis kiiruse vähenemisel motoorsete jõudude moment suureneb).

Takistusjõudude moment M_t sõltub paljudest faktoritest. Mõned neist on konstantsed (hõõrdumine, ülestõstetavate osade raskus), osa neist võib sõltuda rootori pöördenurgast (näiteks auruhaamri ajamil), mõned võivad sõltuda nurkkiirusest (ventilaatori ajamil) jne. Eeldame, et M_t sõltub nurkkiirusest ω ja mingist ajast sõltuvast suurusest M_k.

Nii saame masina ebalineaarse võrrandi

$$I\frac{d\omega}{dt} = M_l(m, \omega) - M_t(\omega) + M_k. \tag{15}$$

Funktsioonid M_l ja M_t peavad olema antud kas analüütiliselt või graafiliselt. Eeldame, et moment M_k muutus hüppeliselt ja pärast seda jäi sellele väärtusele püsima, s. t. $M_k = M_{k0} = \text{const}$.

Lineariseerimine toimub uue tasakaaluasendi $m = m_0$ ja $\omega = \omega_0$ ümber eeldusel, et $M_k = M_0 = \text{const}$. Indeksiga «0» märgitakse selle suuruse nominaalväärtus või väärtus tasakaaluasendis

$$M_l = M_{l0} + \left(\frac{\partial M_l}{\partial m}\right)_{\substack{m=m_0\\ \omega=\omega_0}} \Delta m + \left(\frac{\partial M_l}{\partial \omega}\right)_{\substack{m=m_0\\ \omega=\omega_0}} \Delta\omega + R_1,$$

$$M_t = M_{t0} + \left(\frac{\partial M_t}{\partial \omega}\right)_{\omega=\omega_0} \Delta\omega + R_2.$$

Siin märkus $m = m_0$ ja $\omega = \omega_0$ näitab, et võrrandi Taylori reaks arendamine toimus nende nominaalväärtuste ümber. Edaspidi jääb see asjaolu märkimata, sest see kuulub Taylori rea arenduse mõiste juurde.

R_1 ja R_2 on Taylori rea ebalineaarsed jäägid, mis sisaldavad suuruste m ja ω nominaalväärtusest kõrvalekaldumiste kõrgemaid astmeid.

Et meie käsitleme süsteemis niisuguseid liikumisi, mille puhul kõrvalekalded Δm ja $\Delta\omega$ on väikesed suurused, siis võime ebalineaarsed jäägid R_1 ja R_2 ära jätta. Saame lineariseeritud võrrandi

$$I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = M_{l_0} + \left(\frac{\partial M_l}{\partial m}\right)\Delta m - \left(\frac{\partial M_t}{\partial \omega} - \frac{\partial M_l}{\partial \omega}\right)\Delta\omega - M_{t0} + M_{k0}, \quad (16)$$

kus $\Delta m = m - m_0$ on reguleerimisorgani asendimuutus ja $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ — masina võlli nurkkiiruse muutus — uued muutujad,

m_0 ja ω_0 — püsimajäänud väärtused,

m ja ω — nende väärtus käsitletaval hetkel.

Püsimajäänud režiimil masina võlli kiirus ei muutu, samuti seisab oma normaalasendis reguleerimisorgan, seega $\Delta m = 0$ ja $\Delta\omega = 0$.

Staatika võrrand on järelikult

$$M_{l0} - M_{t0} + M_{k0} = 0. \quad (17)$$

Lahutame võrrandist (16) võrrandi (17). Saame:

$$I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \left(\frac{\partial M_l}{\partial m}\right)\Delta m - \left(\frac{\partial M_t}{\partial \omega} - \frac{\partial M_l}{\partial \omega}\right)\Delta\omega. \quad (18)$$

Võrrand (18) ongi objekti dünaamika võrrand, väljendatud koordinaatide muutuste kaudu.

Võttes arvesse, et

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(\omega - \omega_0)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t}$$

(sest $\omega_0 = \mathrm{const}$), saame võrrandist (18):

$$I\frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t} = \left(\frac{\partial M_l}{\partial m}\right)\Delta m - \left(\frac{\partial M_t}{\partial \omega} - \frac{\partial M_l}{\partial \omega}\right)\Delta\omega. \quad (19)$$

See võrrand näitab, kuidas muutub masina võlli pöörlemiskiirus reguleerimisorgani antud asendimuutuse Δm puhul.

Osatuletised $\frac{\partial M_l}{\mathrm{d}t}$, $\frac{\partial M_l}{\mathrm{d}\omega}$ ja $\frac{\partial M_t}{\partial \omega}$ on antud punkti (m_0, ω_0) jaoks konstantsed suurused. Tuletisi on võimalik leida kas analüütiliselt, kui on antud funktsioonide analüütilised väljendu-

sed, või graafiliselt, kui on antud objekti karakteristikud graafikutena.

Nagu oli öeldud ülalpool, eeldatakse lineariseerimisel parameetrite suhteliselt väikest kõrvalekaldumist oma normaalväärtusest. Tavaliselt väljendatakse parameetrite muutust mitte absoluutväärtustena, vaid suhteliste suurustena nende nominaalväärtuse suhtes. Tähistame masina võlli nurkkiiruse suhtelise muutuse tähega φ ja reguleeriva organi suhtelise asendimuutuse tähega μ, s. o.

$$\varphi = \frac{\Delta\omega}{\omega_n} \text{ ja } \mu = \frac{\Delta m}{m_n}. \tag{20}$$

Suuruseks ω_n on hea valida masina nominaalne pöörlemiskiirus, kuid selleks võib olla ka näiteks lubatud maksimaalne pöörlemiskiirus ω_{max}, reguleerimisorgani nominaalväärtuseks aga tema täiskäik ühest äärmisest asendist teise. Sel juhul muutub μ nullist kuni üheni, mis vastab reguleerimisorgani täiesti suletud ja täiesti avatud asendile.

Lahendame koos võrrandid (20) ja (19). Saame masina dünaamika võrrandid universaalsel kujul:

$$I\omega_n\dot{\varphi} + \omega_n\left(\frac{\partial M_t}{\partial\omega} - \frac{\partial M_l}{\partial\omega}\right)\varphi = m_n\left(\frac{\partial M_l}{\partial m}\right)\mu, \tag{21}$$

kus $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$.

Selles võrrandis on φ ja μ nimetud arvud, kuid teguritel nende ees on momendi mõõtühik.

Jagades võrrandi kõik liikmed teguriga, mis on ühe liikme ees, kõrvaldame võrrandist mõõtühikud. Siis saame võrrandi, mis sisaldab kas nimetuid arve või tegureid, milledel on aja mõõtühik. See on otstarbekas seepärast, et kuna kõik reguleerimisobjektid oma dünaamiliste omaduste poolest jagatakse tüüplülideks, siis on tulemused, mis saadakse mõnede reguleerimissüsteemide kohta, maksvad kõigi dünaamiliselt sarnaste süsteemide kohta, vaatamata sellele, missugustest objektidest ja regulaatoritest käsitletav süsteem koosneb. Tegurid, milledel on aja mõõtühik, väljendavad objekti või regulaatori ajakonstante.

Käesoleva võrrandi puhul on otstarbekohane kogu võrrand jagada mingi konstantse momendiga, mis iseloomustab seda masinat. Jagame selle võrrandi nominaalse, passil antud momendiga M_n, s. o.

$$\frac{I\omega_n}{M_n}\dot{\varphi} + \frac{\omega_n}{M_n}\left[\left(\frac{\partial M_t}{\partial\omega}\right) - \left(\frac{\partial M_l}{\partial\omega}\right)\right]\varphi = \frac{m_n}{M_n}\left(\frac{\partial M_l}{\partial m}\right)\mu. \tag{22}$$

Võrrandis on muutujate $\dot{\varphi}$, φ ja μ ees kolm tegurit. Elimineerime

neist ühe. Selleks jagame kõik võrrandi liikmed μ ees asetseva teguriga. Saame:

$$T_a\dot{\varphi} + k_s\varphi = \mu, \tag{23}$$

kus

$$T_a = \frac{I\omega_n}{m_n\left(\frac{\partial M_l}{\partial m}\right)};\ k_s = \frac{\omega_n\left[\left(\frac{\partial M_l}{\partial \omega}\right) - \left(\frac{\partial M_l}{\partial \omega}\right)\right]}{m_n\left(\frac{\partial M_l}{\partial m}\right)}.$$

Kui jagame võrrandi (22) φ ees asetseva teguriga, saame:

$$T\dot{\varphi} + \varphi = k\mu, \tag{24}$$

kus

$$T = \frac{T_a}{k_s} \text{ ja } k = \frac{1}{k_s}.$$

Teguritel T_a ja T on mõõtühikuks ajaühik, nad iseloomustavad objekti inertsi. Tegurit T nimetatakse objekti ajakonstandiks, k_s ja k on aga nimetud arvud. μ on positiivne, kui ta põhjustab M_l kasvu ja seega ka ω kasvu. Seega

$$\frac{\partial M_l}{\partial m} > 0.$$

Püsimajäänud režiimil $\dot{\varphi} = 0$ ning φ ja μ on omavahel seotud sõltuvusega

$$\varphi = \frac{1}{k_s}\mu = k\mu.$$

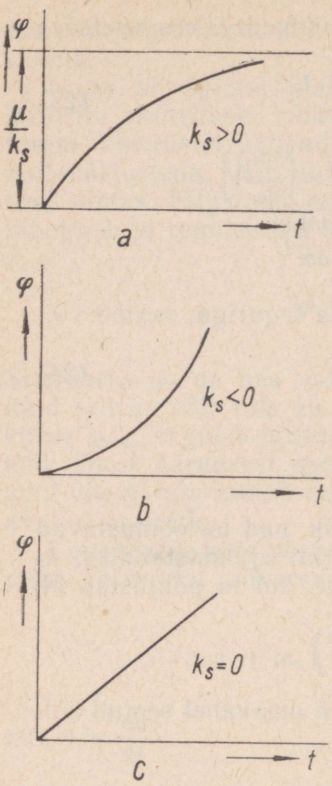
Kui anda μ-le mitmesugused väärtused, siis ka φ muutub sõltuvalt suurusest k_s.

Olgu arvutuse aluseks vana tasakaaluasend ja töötagu masin koordinaatide nominaalväärtusel, seega $\varphi_0 = 0$ ja $\mu_0 = 0$. Muudame reguleerimisventiili asendit positiivses suunas mingi kindla suuruse $\mu = \text{const}$ võrra ja jätame ta sellesse asendisse. Siis, lahendades võrrandi (24), saame:

$$\varphi = k\mu\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = \frac{\mu}{k_s}\left(1 - e^{-\frac{k_s t}{T_a}}\right). \tag{25}$$

Kui $k_s > 0$, siis φ läheneb aja jooksul $(t \to \infty)$ asümptootiliselt suurusele $\frac{\mu}{k_s}$ (joon. 3-11, *a*).

Kui $k_s < 0$, siis on e astmenäitaja positiivne arv ning kiiruse kõrvalekaldumine nominaalsest kasvab vahetpidamatult. Masinal puudub stabiilsus ning ta ei saa töötada regulaatorita (joon. 3-11, *b*).



Joon. 3-11. Reguleerimisobjekti karakterkõverad:
a — isereguleerimisega, positiivse statismiga, *b* — negatiivse statismiga, *c* — isereguleerimiseta (astaatiline)

Kui $k_s = 0$, siis saame:

$$T_a \dot{\varphi} = \mu, \text{ millest } T_a \frac{d\varphi}{dt} = \mu. \quad (26)$$

Lahendades viimase võrrandi, kus integreerime vastavalt piirides 0-st kuni φ-ni ja 0-st kuni μ-ni, saame:

$$T_a \varphi = \mu t, \text{ millest } \varphi = \frac{\mu}{T_a} t. \quad (27)$$

Sellest võrrandist (joon. 3-11, *c*) on näha, et väiksemalgi μ muutumisel φ kas lõpmatult kasvab (kui $\mu > 0$) või kahaneb (kui $\mu < 0$) ning et tasakaal on ainult siis, kui $\mu = 0$.

Suurusel k_s on mitu nimetust, nagu objekti isereguleerimistegur, statism, ebaühtlus.

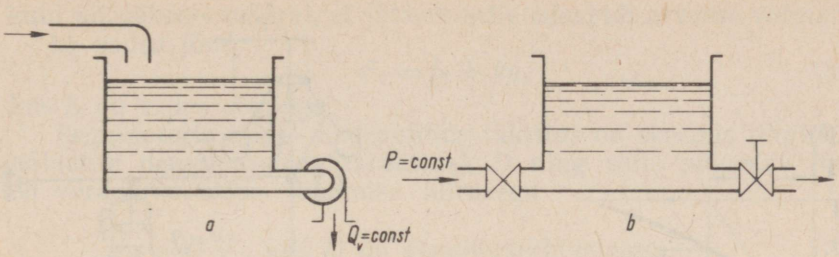
Suurust k (24) nimetatakse võimendusteguriks ning ta on statismi pöördväärtus, s. o. $k = \frac{1}{k_s}$.

Positiivse isereguleerimisega masin (staatiline objekt, $k_s > 0$) võib töötada regulaatorita. Mida suurem on isereguleerimistegur, seda väiksem on masina pöörlemiskiiruse muutus ühe ja sama häiringu puhul. Positiivse isereguleerimisega masinatele pannakse regulaatorid selleks, et vähendada kiiruse staatilist kõrvalekaldumist masinale mõjuvate väliste jõudude muutumisel, s. t. tõsta tema töö täpsust, vähendada staatilist viga.

Negatiivse isereguleerimisega masin ($k_s < 0$) on ebastabiilne ja ilma regulaatorita ta ei ole töövõimeline. Tegelikult masina lõpmatut pöörlemiskiiruse kasvu ei ole olemas. Kiiruse lõpmatut kasvu takistavad ebalineaarsed komponendid, millede muutused on niivõrd suured, et diferentsiaalvõrrand, mis on saadud väikeste kõrvalekallete eeldusel, kaotab oma mõtte.

Isereguleerimiseta masin ($k_s = 0$) on samuti ebastabiilne. Teda nimetatakse ka astaatiliseks objektiks.

Võimendustegur k iseloomustab masina vastuvõtlikkust kiiruse muutumisele reguleerimisorgani asendi muutumise mõjul: mida suurem on k, seda suurem on masina suhteline kiiruse muutus reguleerimisorgani asendi sama muutuse puhul. Teguri k suurenemisel masina stabiilsus väheneb.



Joon. 3-12. Isereguleerimiseta (*a*) ja isereguleerimisega (*b*) veepaak

Isereguleerimise iseloomustamiseks vaatleme veel veepaaki (joon. 3-12).

Joonisel 3-12, *a* toodud skeemil sõltub vee kulu ainult pumba tööst, mitte nivoo kõrgusest, s. t. $Q_v = \text{const}$, joonisel 3-12, *b* aga sõltub nivoo kõrgusest.

Masina ajakonstant iseloomustab vabavõnkumiste kestust masinas välise mõju kindla kuju puhul. Ajakonstant T (võrrand 24) on aeg, mis on vajalik selleks, et koormuseta masina kiirus muutuks nullist kuni nominaalseni (maksimaalseni), kui reguleerimisorgan avaneb nullist kuni üheni (suletud olekust kuni täiesti lahti) eeldusel, et see kiiruse muutus oleks võrdne selle pöörlemiskiiruse muutuse algväärtusega, s. o. selle kiirusega, mis tal on pöörlemise algul. Eeltoodud võrrandi (25) põhjal võib ajakonstanti defineerida veel järgmiselt: objekti ajakonstant konstantse häiringu μ järgi on aeg, mis on vajalik selleks, et koordinaat φ saavutaks 0,632 osa oma nominaalväärtusest. Seda suurust on kerge määrata eksperimentaalselt.

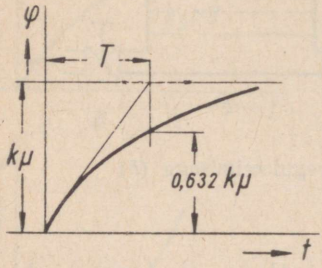
Võrrandist (24) saame, eeldades, et $T = t$:

$$\varphi = k\mu(1 - e^{-1}) = k\mu\left(1 - \frac{1}{2{,}7183}\right) = 0{,}632\ k\mu \text{ (joon. 3-13).}$$

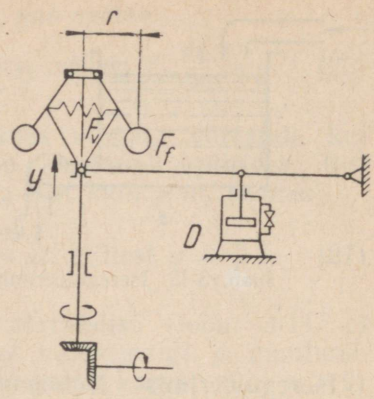
Isereguleerimiseta masina ajakonstant T on aeg, mille jooksul koormamata masinal reguleerimisorgani järsul täielikul avamisel pöörlemiskiirus kasvab nullist kuni nominaalkiiruseni (maksimaalkiiruseni). Sama on maksev ka negatiivse isereguleerimisega masina kohta.

Tsentrifugaal-kiirusregulaator (joon. 3-14). Regulaatori spindel pöörleb võrdeliselt masina nurkkiirusega ω. Koos spindliga pöörlevad ka šarniiridel olevad regulaatori vihid. Regulaatori muhvi positiivseks liikumissuunaks y loeme suunda alt üles, sest see vastab objekti pöörlemiskiiruse suurenemisele. Muhvi liikumise võrrand on järgmine:

$$M\frac{d^2y}{dt^2} = F_f - F_t, \qquad (28)$$



Joon. 3-13. Isereguleerimisega objekti ajakonstandi graafik



Joon. 3-14. Pöörlemiskiiruse tsentrifugaalregulaator koos kataraktiga

kus M — muhvi ja temaga ühes pöörlevate liikuvate osade mass, taandatud muhvile,

F_f — muhvile rakendatud ja tema asendit muutvad tsentrifugaaljõud,

F_t — muhvi liikumist takistavad jõud.

Ühendusvarrastele mõjuvaid tsentrifugaaljõude arvesse ei võeta. Raskuste kaugus nende pöörlemisteljest r on funktsioon muhvi üles- ja allaliikumisest:

$$r = f_1(y).$$

Et muhvi ülesliikumisel r suureneb, siis järelikult

$$\frac{\partial f_1}{\partial y} > 0.$$

Pöörlevate osade tsentrifugaaljõud on $F_f = c\omega^2 r$, kus c on võrdelisuse tegur. Siin on muutlikeks suurusteks ω ja r ning Taylori ritta arendamine toimub nüüd kahe muutuja, ω ja r-i järgi.

$$F_f = c\omega_0^2 r_0 + 2c\omega_0 r_0 \Delta\omega + c\omega_0^2 \left(\frac{\partial r}{\partial y}\right) y, \qquad (29)$$

kus $\Delta y = y_0 - y = 0 - (-y) = y$.

Takistusjõududeks on

a) vihtide, kangide ja muhvi kaal, taandatud muhvi käigule. See kaal sõltub küll y-st, s. o.

$$G = G_0 + \frac{\partial G}{\partial y} \Delta y, \qquad (30)$$

kuid nii vähesel määral, et jätame selle edaspidi arvesse võtmata;

b) vedru jõud

$$F_v = f_0 + ky, \tag{31}$$

kus f_0 on vedru eelpinge.

Regulaatoris esinev hüdrauliline takistus on skeemis tinglikult näidatud dempferina (kataraktina) D ning selle pidurdav jõud on võrdeline osade liikumise kiirusega

$$F_k = D\frac{dy}{dt}, \text{ kus } D \text{ on dempfereerimistegur.} \tag{32}$$

Lahendades koos võrrandid (28), (29), (30), (31) ja (32), saame regulaatori dünaamika võrrandi lineaarses lähenduses

$$M\frac{d^2y}{dt^2} + D\frac{dy}{dt} + \left[k - c\omega_0^2\left(\frac{\partial r}{dy}\right)\right]y + G_0 + f_0 = c\omega_0^2 r + 2c\omega_0 r_0 \Delta\omega. \tag{33}$$

Lahutades sellest võrrandist staatika võrrandi

$$G_0 + f_0 = c\omega_0^2 r_0,$$

kus $c\omega_0^2 r_0$ on tsentrifugaaljõud masina nominaalse pöörlemiskiiruse puhul, saame regulaatori dünaamika võrrandi parameetrite muutuste järgi

$$M\frac{d^2y}{dt^2} + D\frac{dy}{dt} + \left[k - c\omega_0^2\left(\frac{\partial r}{\partial y}\right)\right]y = 2c\omega_0 r_0 \Delta\omega. \tag{34}$$

Viime sisse suhtelised muutujad

$$\frac{y}{y_{max}} = \eta; \quad \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \varphi, \tag{35}$$

kus y_{max} — regulaatori muhvi maksimaalne käik,

ω_0 — masina nominaalne nurkkiirus.

Võttes arvesse seoseid (35), võime võrrandi (34) pärast teisendusi kirjutada kujul

$$T_r^2\ddot{\eta} + T_k\dot{\eta} + \delta\eta = \varphi, \tag{36}$$

kus $T_r^2 = \dfrac{My_{max}}{2c\omega_0 r_0}$ — regulaatori ajakonstant,

$T_k = \dfrac{Dy_{max}}{2c\omega_0 r_0}$ — dempfereerimise ajakonstant,

$\delta = \dfrac{\left[k - c\omega_0^2\left(\dfrac{\partial r}{\partial y}\right)\right]y_{max}}{2c\omega_0 r_0}$ — regulaatori ebaühtlus ehk statism, (37)

$\ddot{\eta} = \dfrac{d^2\eta}{dt^2}$.

δ määrab seose regulaatori muhvi asendi ja masina püsimajäänud kiiruse vahel.

Sel juhul $\ddot{\eta} = \dot{\eta} = 0$, ning

$$\delta = \frac{\varphi}{\eta}. \tag{38}$$

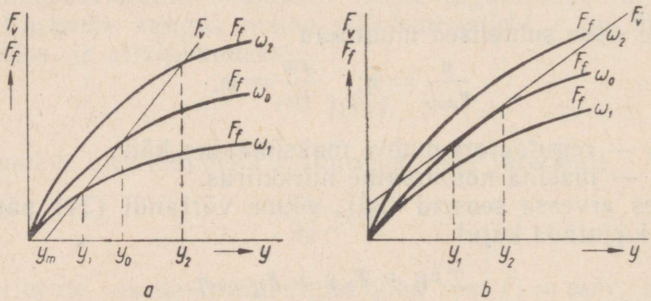
Mida suurem on δ, seda suurem on masina püsimajäänud pöörete arvu muutus reguleerimisorgani sama asendi korral. Kui reguleerimisorgan on avatud täiesti, s. o. $\eta = 1$, siis

$$\delta = \varphi = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_0}.$$

Regulaatoreid, milledel on positiivne statism, nimetasime staatilisteks regulaatoriteks.

Kui $\delta = 0$, siis võrrandist (38) selgub, et $\varphi = 0$ η iga väärtuse puhul. See tähendab seda, et masina nominaalkiiruse korral võib muhvil olla ükskõik milline asend. Tasakaal on ükskõikne. Kiiruse vähimalgi muutumisel ($\varphi \neq 0$) liigub muhv kas täiesti üles (kui $\varphi > 0$) või langeb täiesti alla ($\varphi < 0$). Seda regulaatorit nimetasime astaatiliseks regulaatoriks.

Joonisel 3-15, *a* on regulaatori vedru karakteristik F_v järsem kui ta tsentrifugaaljõudude F_f karakteristik ning regulaator on



Joon. 3-15. Pöörlemiskiiruse staatilise (*a*) ja astaatilise (*b*) tsentrifugaalregulaatori karakterkõverad

staatiline. Nurkkiiruse muutumisel ω_1-st kuni ω_2-ni on muhvil tasakaaluasendid y_1-st kuni y_2-ni. Kui näiteks suruda muhv alla, siis tõstab tsentrifugaaljõud muhvi endisesse asendisse tagasi, sest see on suurem vedru jõust. Kui aga tõstame muhvi üles, siis on vedru jõud suurem kui tsentrifugaaljõud ning ta surub muhvi alla tagasi. Regulaator on stabiilne. Kui masin seisab, siis $\omega = 0$. Sel puhul puudub ka tsentrifugaaljõud ning vedrul on eelpinge, mis vastab muhvi asendile y_{max} ning mis ei lase vihtidel laskuda alla alumise toeni.

Joonisel 3-15, *b* langevad vedru jõud ja tsentrifugaaljõud kokku muhvi asendi vahemikus y_1-st kuni y_2-ni. Selles piirkonnas võib muhvil olla ükskõik milline asend, sest tsentrifugaaljõud ja vedru jõud on võrdsed. Kiiruse vähimalgi muutumisel läheb tsentrifugaaljõud vedru jõust kas suuremaks või vähemaks ja muhv kas liigub üles või langeb alla. Ükskõikne tasakaal on tal ainult mingi kindla pöörlemiskiiruse korral. Iga teise pöörlemiskiiruse puhul tasakaal puudub.

Nagu näha valemist (37), on vaadeldav regulaator staatiline, kui

$$k > c\omega_0^2 \left(\frac{\partial r}{\partial y}\right)$$

(s. t. vedru karakteristik punktis $\omega = \omega_0$ peab olema järsem kui tsentrifugaaljõudude karakteristik), ja astaatiline, kui

$$k = c\omega_0^2 \left(\frac{\partial r}{\partial y}\right)$$

(s. t. punktis $\omega = \omega_0$ langevad need mõlemad karakteristikud kokku). Staatilisele kiirusregulaatorile on iseloomulik eelpingestatud vedru olemasolu, astaatilisele kiirusregulaatorile aga kas vedru täielik puudumine või selle olemasolu korral tema väike jäikustegur.

Kui aga

$$k < c\omega_0^2 \left(\frac{\partial r}{\partial y}\right),$$

siis nimetatakse regulaatorit negatiivse statismiga regulaatoriks. Neid kasutatakse releetüüpi süsteemides ning süsteemides, kus koormuse suurenemisel on vaja parameetri väärtust tõsta, näiteks kui tarbijaile, kes asuvad elektrijaamast kaugel, on vaja tagada normaalne pinge ka elektrijaama suure koormuse puhul. Kui regulaatori liikuvate osade mass on niivõrd väike ja regulaatori muhvi hoidvad jõud niivõrd suured, et suurust T_r^2 ja ka hüdraulilist hõõrumist, mida väljendab aeg T_k, võib jätta tähele panemata, siis saame i d e a a l s e r e g u l a a t o r i võrrandi (38)

$$\delta\eta = \varphi,$$

mida väga tihti kasutatakse reguleerimissüsteemide teoreetilisel uurimisel.

Hüdrauliline teenur (joon. 2-35). Ta koosneb tüürkolvist ja täiturist (kolb koos silindriga). Täituri kolb on jäigalt ühendatud reguleerimisorganiga ning saab oma liikumise sõltuvalt tüürkolvi liikumisest. Et õli on praktiliselt kokkusurumatu, peab õli hulk, mis tuleb tüürkolvi silindrist, võrduma õli hulgaga, mis läheb täituri silindrisse. Võime kirjutada lõpmatu väikese õlihulga pidevuse võrrandi

$$vsb\,dt = F\,dm, \qquad (39)$$

kus v — õli liikumiskiirus tüürkolvi silindris,
s — tüürkolvi käigu pikkus, s. o. akna avamise kõrgus tüürkolvi silindris,
b — selle akna laius,
F — täituri kolvi ristlõige,
m — selle kolvi käigu pikkus.

Võrrandi vasakul poolel on elementaarne õlimaht, mis voolab läbi tüürkolvi silindri akna, paremal poolel aga selle aja jooksul täituri kolvi poolt moodustatud elementaarne maht.

Õli rõhk täituri kolvile koosneb tüürkolvi silindrist tuleva õli rõhu potentsiaalse energia ja selle õli liikumiskiirusest tingitud kineetilise energia summast. Õli liikumiskiirus sõltub õli viskoossusest ja on võrdeline ruutjuurega rõhkude vahest. Et õli potentsiaalne energia on tunduvalt suurem ta kineetilisest energiast õli väikese kiiruse tõttu sisseminekul täituri silindrisse, siis me seda arvesse ei võta, ning eeldame, et õli rõhk kolvile on määratav ainult rõhuga, mis antakse talle pumba poolt, ning jääb konstantseks, s. t. $v = \text{const}$. Seega saame võrrandist (39)

$$F\frac{dm}{dt} = ks. \tag{40}$$

Kasutame suhtelisi suurusi

$\sigma = \frac{s}{s_{max}}$ — tüürkolvi suhteline asendimuutus,

$\mu = \frac{m}{m_{max}}$ — teenuri kolvi suhteline asendimuutus,

s_{max} — tüürkolvi täiskäigu pikkus,

m_{max} — teenuri kolvi (resp. reguleerimisorgani) käigu pikkus.

Siis saame võrrandist (40), et

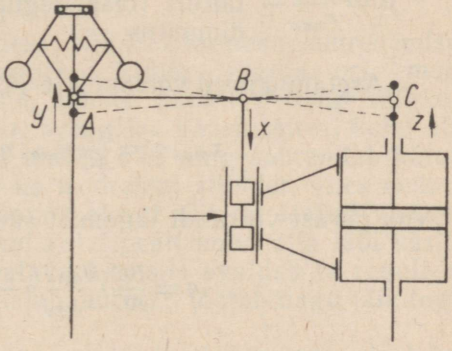
$$T_s\dot{\mu} = \sigma, \tag{41}$$

kus $T_s = \frac{Fm_{max}}{ks_{max}}$ on teenuri ajakonstant. Saime muutliku kiirusega hüdraulilise teenuri võrrandi, teinud sealjuures rida lihtsustusi. Nimelt ei võetud arvesse ei teenuri massi, õli liikumiskiiruse muutumist, mis teatavasti sõltub tüürkolvi silindri akna avamisastmest, ega tüürkolvi tühikäiku.

On olemas konstantse kiirusega teenureid, mis peaaegu hüppeliselt saavad endale maksimaalse kiiruse ning säilitavad selle senini, kuni nad on sisse lülitatud, näiteks jäiga karakteristikuga elektrimootorid.

Nagu näha võrrandist (41), on vaadeldav hüdrauliline teenur astaatilise karakteristikuga. Ta on tasakaalus ainult siis, kui tüürkolb on keskasendis, s. t. mõlemad aknad silindris on suletud, mis vastab masina nominaalsele pöörlemiskiirusele.

Jäiga tagasisidega hüdrauliline teenur (joon. 3-16). Kangile, mis liigutab tüürkolbi, mõjub ühelt poolt tsentrifugaalregulaatori muhv, teiselt poolt täituri kolb. Kui mingil põhjusel masina pöörlemiskiirus langeb, liigub muhv alla, tõmmates endaga kaasa ka tüürkolvi, mis avab alumise akna. Õli pääseb täituri kolvi alumisesse poolesse ning tõuseb üles. Üles liigub ka reguleerimisorgan, suurendades masinasse mineva töötava aine hulka. Kuid täituri kolvi ülestõusmisel pöördub kang ümber punkti A ning tõmbab endaga üles kaasa ka tüürkolvi. Kui see jõuab keskasendisse, jääb täitur seisma, s. t. ta jääb seisma veel enne, kui masina pöörlemiskiirus on saavutanud oma nominaalväärtuse. Kui pöörlemiskiirus tõuseb, on liikumiste suunad vastupidised. Nagu juba varem mainitud, stabiliseerib niisugune regulaatori eelnev väljalülitamine jäiga tagasiside poolt protsessi. Siin ei jääda ootama, kuni reguleeritav parameeter saab tagasi oma nominaalväärtuse objekti kaudu, vaid väljalülitamine toimub juba varem reguleerimisorgani abil. Muhv ja täitur liiguvad alati teineteisele vastassuunas. Tasakaal saabub siis, kui kolvipaar on keskasendis. Seoses sellega, et punkt C kangil pole enam fikseeritud, nagu ta oli seda joonisel 2-5, *b*, siis, kuigi kolvipaar on keskasendis (B asend on konstant), võivad kangi AC otsad olla mitte esialgses, vaid mõnes muus asendis. See tähendab, et regulaator pole tasakaalus mitte ainult nominaalse pöörlemiskiiruse korral, vaid igale tasakaaluasendile vastav pöörlemiskiirus sõltub kangi teise otsa C asendist, s. t. reguleerimisorgani asendist ehk koormusest. Järelikult on jäiga tagasisidega hüdrauliline teenur staatilise karakteristikuga. Jäik tagasiside muudab astaatilise regulaatori staatiliseks.



Joon. 3-16. Jäiga tagasisidega pöörlemiskiiruse tsentrifugaalregulaator

Märgime tüürkolvi liikumise tähega x, muhvi liikumise y ja täituri liikumise z. Nagu juba eespool mainitud, koosneb tüürkolvi liikumine kahest osast: 1) liikumisest x_1, mis on tingitud muhvi liikumisest ja 2) liikumisest x_2, mis on tingitud täituri liikumisest.

Kui täitur on liikumatu ning liigub muhv, siis

$$\frac{x_1}{y} = \frac{BC}{AC}.$$

Kui aga muhv on liikumatu ning liigub täitur, siis

$$\frac{x_2}{z} = -\frac{AB}{AC}.$$

Märk miinus on pandud seepärast, et nüüd on kolvipaari liikumise suund vastupidine ta endisele positiivsele suunale.

Kolvipaari kogu liikumise võrrand:

$$x = x_1 + x_2 = \frac{BC}{AC} y - \frac{AB}{AC} z. \tag{42}$$

Kasutame suhtelisi suurusi

$\sigma = \frac{x}{x_{max}}$ — kolvipaari suhteline asendimuutus,

$\eta = \frac{y}{y_{max}}$ — regulaatori muhvi suhteline asendimuutus,

$\mu = \frac{z}{z_{max}}$ — täituri (resp. reguleerimisorgani) suhteline asendimuutus.

Asetanud need võrrandisse (42), saame:

$$x_{max}\,\sigma = \frac{BC}{AC} y_{max}\,\eta - \frac{AB}{AC} z_{max}\,\mu \tag{43}$$

ehk pärast võrrandi jagamist suurusega x_{max}

$$\sigma = \frac{BC}{AC} \cdot \frac{y_{max}}{x_{max}} \eta - \frac{AB}{AC} \cdot \frac{z_{max}}{x_{max}} \mu.$$

Kangi õlgade pikkus BC ja AC valitakse nii, et muhvi võimalikule maksimaalsele käigule vastab ka tüürkolvi maksimaalne käik. Järelikult

$$\frac{y_{max}}{x_{max}} = \frac{AC}{BC}$$

ning võrrand (43) taandub võrrandiks

$$\sigma = \eta - k_t \mu, \tag{44}$$

kus $k_t = \frac{AB}{AC} \cdot \frac{z_{max}}{x_{max}}$.

Tegurit k_t nimetatakse tagasisideteguriks $(0 < k_t < 1)$.

Jäik tagasiside tõi sisse statismi. Mida suuurem on k_t, seda suurem on statism.

Võrrandid (41) ja (44) koos moodustavad jäiga tagasisidega hüdraulilise teenuri võrrandi

$$T_s\dot{\mu} + k_t\mu = \eta. \qquad (45)$$

Elastse tagasisidega hüdrauliline teenur (isodroomne). Jäik tagasiside on kasulik siirdeprotsessi vältel, kus ta soodustab võnkumiste kustumist, kuid ta osutub kahjulikuks püsimajäänud režiimi korral, põhjustades süsteemis statismi. Kui aga teha tagasiside nii, et ta tegutseb ainult siirdeprotsessi vältel, täiesti puududes püsimajäänud režiimil, siis on süsteemi stabiliseerimine saavutatud statismita. Seda saavutataksegi, nagu juba eespool mainitud, elastse tagasisidega.

Elastne tagasiside võib olla kas hüdrauliline, pneumaatiline või elektriline. Suurema piltlikkuse tõttu kirjeldatakse hüdraulilist elastset tagasisidet (joon. 3-17, *a*).

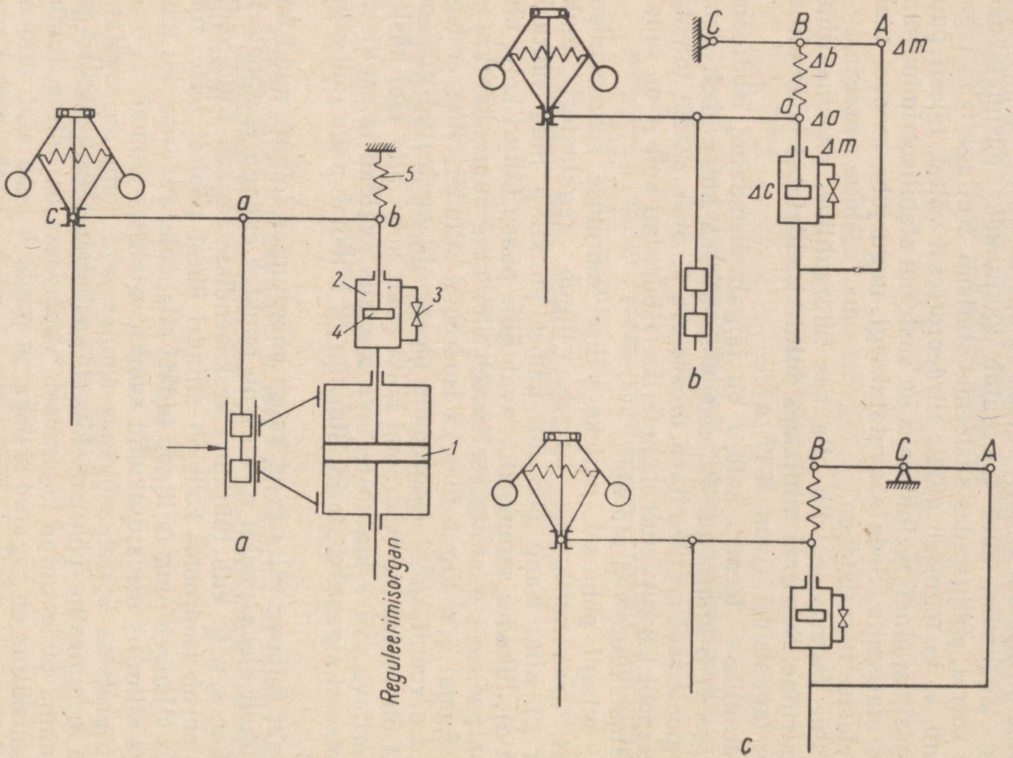
Hüdraulilise teenuri kolb *1* on jäigalt ühendatud isodroomi silindriga *2*. Silindris on õli, mis võib liikuda kolvi ühelt poolt teisele poole läbi reguleeritava drosselava *3*. Seda seadet nimetasime eespool kokkuvõetult dempferiks. Isodroomi kolb *4* on kinnitatud aluse külge vedru *5* abil.

Kui mingil põhjusel, näiteks välise koormuse suurenemisel, mootori pöörlemiskiirus langeb, liigub regulaatori muhv (punkt *c*) alla. Kang pöördub ümber punkti *b* ning tüürkolb (punkt *a*), liikudes samuti alla, avab õlile pääsu täituri kolvi alumisesse poolesse, mistõttu see tõuseb üles ning suurendab kütuse hulka. Samal ajal liigub üles ka isodroomi silinder, viies endaga kaasa isodroomi kolvi. Isodroomis oleval õlil on teatud viskoossus. Et õli voolamine isodroomi kolvi pealt kolvi alla läbi käsitsi reguleeritava ava *3* kestab teatava aja, siis avaldab ta reguleerimisprotsessi alguses teatud vastupanu (s. t. töötab nagu jäik tagasiside).

Punkt *b* tõuseb üles ja et kangi pöördumine toimub nüüd ümber muhvil oleva punkti *c*, siis viib punkt *b* endaga ülespoole ka punkti *a*, s. t. ta viib tüürkolvi keskasendisse tagasi. Kuid vedru mõjul surub isodroomi kolb õli silindri ühest poolest teise, rõhk punktis *b* langeb ning ta liigub tagasi allapoole, avades veidi tüürkolviga silindris olevaid aknaid samas, esialgses suunas.

See protsess kestab mõlemas suunas seni, kuni on taastatud endine nominaalne pöörlemiskiirus, kusjuures reguleerimisorgan võib minna uude, antud koormusele vastavasse asendisse. Endine pöörlemiskiirus on tagatud sellega, et punkt *b* peab alati minema oma endisse asendisse tagasi vedru *5* mõjul, punkt *a* aga peab vastama kolvipaari keskasendile, järelikult peab ka kangil olev punkt *c* olema endises asendis, s. t. selles asendis, mis vastab nominaalsele pöörlemiskiirusele.

Näeme, et siirdeprotsessi algul töötab regulaator kui staatiline, hiljem, püsimajäänud seisundis aga kui astaatiline regulaator. Isodroomne regulaator muutub puhtstaatiliseks regulaatoriks, kui



Joon. 3-17. Elastse tagasisidega pöörlemiskiiruse tsentrifugaalregulaator

me täiesti suleme ava *3*, s. t. tekitame jäiga tagasiside, ning astaatiliseks, kui ta täiesti avame, s. t. tagasiside puudub.

Isodroomset regulaatorit kasutatakse kiiresti ja äkki muutuvate koormuste puhul nii isereguleerimisega kui ka isereguleerimiseta objektide reguleerimisel. Samuti annab ta häid tulemusi objektide reguleerimisel, milles esineb regulaatori toime hilinemine. Seetõttu kasutatakse tööstuslike protsesside automaatsel reguleerimisel väga laialdaselt isodroomset reguleerimist.

Isodroomsel reguleerimisel võime saada nii positiivset kui ka negatiivset statismi kangile *AB* (joon. 3-17, *b* ja *c*) sobiva toetuspunkti valimisega. Joonisel on toodud a) regulaator nullilise statismiga, b) positiivse statismiga, kus punkti *a* asend on võrdeline reguleerimisorgani asendiga (resp. koormusega), ja c) negatiivse statismiga, kus punkti *a* asend on pöördvõrdeline reguleerimisorgani asendiga, s. t. koormuse suurenemisel pöörlemiskiirus ka suureneb.

Isodroomi võrrandi tuletamiseks kasutame joonisel 3-17, *b* näidatud skeemi.

Katarakti silindri asendi muutus võrdub reguleerimisorgani asendi muutusega Δm. Kangi *CBA* punkti *B* asendi muutus Δb suhtub punkti *A* asendi muutusesse Δm kangi seaduse põhjal nagu nende kaugused toetuspunktist, s. o.

$$\frac{\Delta b}{\Delta m} = \frac{BC}{AC}. \tag{46}$$

Punkti *a* asendi muutus Δa on teenuri kolvi asendi muutuse Δm ja katarakti kolvi asendi muutuse (silindri suhtes) Δc vahe:

$$\Delta a = \Delta m - \Delta c.$$

Vedru pikkuse muutus Δl võrdub tema otste asendi muutuste vahega:

$$\Delta l = \Delta b - \Delta a = \Delta m \frac{BC}{AC} - \Delta a.$$

Jätame isodroomi kolvi massi tähele panemata. Siis on isodroomi võrrand

$$F_v + F_k = 0, \tag{47}$$

kus $F_v = c_i \Delta l$ — isodroomi vedru jõud,

$F_k = D_i \frac{\mathrm{d}\Delta c}{\mathrm{d}t}$ — isodroomi katarakti jõud,

D_i — dempfereerimistegur.

Paneme võrrandisse (47) F_v ja F_k väärtused, saame:

$$c_i \Delta m \frac{BC}{AC} - c_i \Delta a + D_i \frac{\mathrm{d}\Delta c}{\mathrm{d}t} = 0.$$

Et $\Delta c = \Delta m - \Delta a$, siis

$$c_i \Delta m \frac{BC}{AC} - c_i \Delta a + D_i \frac{\mathrm{d}\Delta m}{\mathrm{d}t} - D_i \frac{\mathrm{d}\Delta a}{\mathrm{d}t} = 0.$$

Kasutades suhtelisi suurusi

$$\mu = \frac{\Delta m}{m_{max}}, \qquad \xi = \frac{\Delta a}{a_{max}}$$

saame lõplikult:

$$T_i \dot{\xi} + \xi = k_i T_i \dot{\mu} + i\mu, \tag{48}$$

kus $T_i = \frac{D_i}{c_i}$ — isodroomi ajakonstant, s. o. aeg, mis on vaja, et kolb liiguks kataraktis vedru mõjul ühest äärmisest seisust teise kiirusega, mis tal oli liikumise algul. Seda aega saab regulaatoritel tavaliselt vajaduse järgi vabalt valida katarakti kolvi mõlemaid pooli ühendaval kanalil oleva drosseli ava muutmisega.

$$k_i = \frac{m_{max}}{y_{max}}; \quad i = \frac{m_{max}}{y_{max}} \cdot \frac{BC}{AC}. \tag{49}$$

Suurus i iseloomustab isodroomse regulaatori statismi.

Statismita isodroomse regulaatori ehk lühendatult isodroomi ($i = 0$) võrrand on seega

$$T_i \dot{\xi} + \xi = k_i T_i \dot{\mu}. \tag{50}$$

Seega saime võrrandisüsteemi (võrrandid 23, 36, 45):

$$\left.\begin{aligned} &T_a \dot{\varphi} + k_s \varphi = \mu \text{ — objekti võrrand,} \\ &T_r^2 \ddot{\eta} + T_k \dot{\eta} + \delta\eta = \varphi \text{ — tajuri võrrand,} \\ &T_s \dot{\mu} + k_l \mu = \eta \text{ — jäiga tagasisidega hüdraulilise teenuri võrrand.} \end{aligned}\right\} \tag{51}$$

Siin on kolm võrrandit ja kolm tundmatut. Järelikult on süsteem lahendatav.

Isodroomse regulaatori puhul tulevad vaatluse alla võrrandid (23, 36, 45 ja 50):

$$\left.\begin{aligned} &T_a \dot{\varphi} + k_s \varphi = \mu \text{ — objekti võrrand,} \\ &T_r^2 \ddot{\eta} + T_k \dot{\eta} + \delta\eta = \varphi \text{ — tajuri võrrand,} \\ &T_i \dot{\xi} + \xi = k_i T_i \dot{\mu} \text{ — isodroomi võrrand,} \\ &T_s \dot{\mu} = \eta - \xi \text{ — teenuri võrrand.} \end{aligned}\right\} \tag{52}$$

Saame neli võrrandit nelja tundmatuga. Süsteem on jällegi lahendatav.

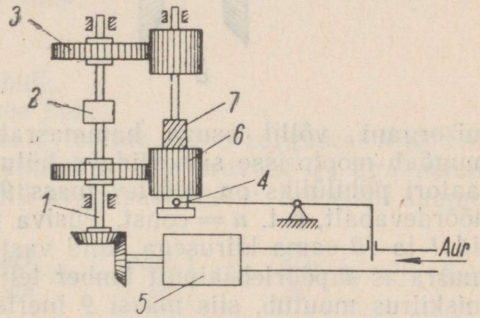
4. Reguleerimise printsiibid

Automaatreguleerimise ülesanne formuleeritakse suhteliselt lihtsalt, sest ta tuleneb automatiseeritud agregaadi või protsessi normaalse ekspluatatsiooni nõudeist, nimelt viia reguleeritav protsess soovitud olukorda inimese vahenduseta.

Selle ülesande lahendamiseks püstitatakse küsimus, milliste tehniliste vahenditega seda ülesannet täita, milliseid reguleerimise printsiipe kasutada regulaatori töötamise alusena. See on otseselt seotud automaatsüsteemi stabiilsuse küsimusega.

Automaatreguleerimise praktikas kasutatakse kolme põhilist reguleerimise printsiipi: 1) reguleerimine parameetri muutuse järgi, 2) reguleerimine koormuse muutuse järgi ja 3) reguleerimine parameetri muutumise kiiruse järgi.

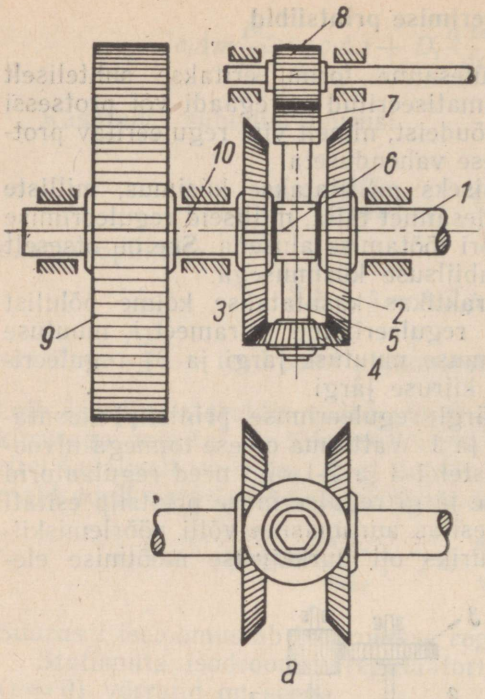
Parameetri muutumise järgi reguleerimise printsiipi kasutasid esimestena I. I. Polzunov ja J. Watt oma otsese toimega nivooja kiirusregulaatorites. Joonistel 1-3 ja 2-1 olid need regulaatorid kujutatud. Koormuse muutuse järgi reguleerimise printsiip esitati 1829. a. Poncelet' poolt. Ta esitas aurumasina võlli pöörlemiskiiruse regulaatori, milles tajuriks oli nurkkiiruse mõõtmise elemendi asemel häiringu — koormusmomendi — mõõtja elastse siduri näol (joon. 3-18).



Joon. 3-18. Regulaator koormuse muutuse järgi

Koormusmomendi suurenemisel aurumasinas *5* suureneb elastse siduri *2* väändenurk, mistõttu ülemine hammasratas *3* jääb pöörlemisel veidi maha alumisest hammasrattast *1*. Seetõttu pöördub hammasrattas *6* olev sisemine tigu *7* veidi selle hammasratta suhtes ning muhv *4* liigub alla, suurendades auru juurdevoolu masinasse ning takistades sellega pöörlemiskiiruse vähenemist.

1845. a. esitati vendade Siemensite poolt regulaatori konstruktsioon, milles reguleerimisorgani ümberasetamiseks kasutati reguleeritava parameetri muutumise kiirust (joon. 3-19, *a*). Ajami võlliga, mille pöörlemiskiirust reguleeritakse, on jäigalt ühendatud võll *1* ja sellega samuti jäigalt kooniline hammasratas *2*. Suure massiga hooratta *9* võlliga *10* on jäigalt ühendatud kooniline hammasratas *3*. Mõlemad koonilised hammasrattad *2* ja *3* on ühendatud koonilise hammasrattaga *4*, mis võib pöörelda nii ümber oma telje *5* kui ka ümber telje *6*. Hammasratta *4* telg *5* moodustab ühise terviku hammassektoriga *7*, mis on hambumuses reguleeri-

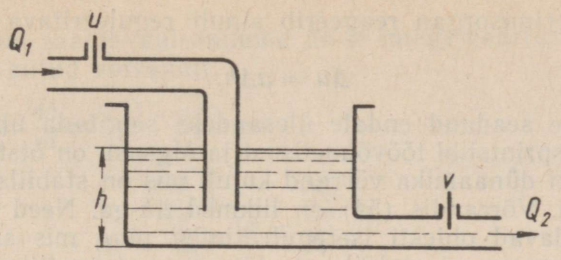


Joon. 3-19. Regulaator reguleeritava parameetri muutumise kiiruse järgi: *a* — ainult parameetri muutumise kiiruse järgi, *b* — parameetri muutumise ja parameetri muutumise kiiruse järgi (*1* — vihid, *2* — ekstsentrik)

misorgani võllil asuva hammasrattaga *8*. Reguleerimisorgan muudab mootorisse sisseviidava kütuse või energia hulka. Regulaatori põhiliüliks on pöörlev mass *9*, mida eeldatakse pöörlevat hõõrdevabalt, s. t. $n = \text{const}$. Püsiva režiimi puhul pöörlevad võllid *1* ja *10* sama kiirusega, kuid vastassuunaliselt, mistõttu hammasratas *4* pöörleb ainult ümber telje *E*. Kui aga ajami pöörlemiskiirus muutub, siis massi *9* inertsi tõttu pöörduvad hammasratas *4* ja temaga koos ka hammassektor *7* ümber telje *6* ning hammasratas *8* muudab reguleerimisorgani asendit.

Selle regulaatori teise näitena, milles esineb ülalnimetatud printsiip koos esimese printsiibiga, on joonisel 3-19, *b* esitatud nn. lame kiirusregulaator, millel vihid *1* asuvad pöörlemistasapinnas. Seoses sellega, et vihtidele mõjuvad peale tsentrifugaaljõudude (mis sõltuvad nurkkiirusest) veel ka tangensiaalsed inertsjõud (mis on võrdelised nurkkiirendusega), määrab niisuguses regulaatoris ekstsentrikuga *2* jäigalt ühendatud muhvi hetkelise nurkasendi, järelikult ka reguleerimisorgani asendi mitte ainult reguleeritav parameeter, s. o. võlli nurkkiirus, vaid ka ta nurkkiirendus, s. t. reguleeritav parameeter ja ta esimene tuletis aja järgi.

Vaatamata mitmesuguste reguleeritavate objektide füüsikaliste protsesside erinevusele, on samade dünaamiliste omadustega objektide võrrandid, nagu nägime eespool, ühesuguse struktuuriga.



Joon. 3-20. Vee nivoo reguleerimise süsteem

Seepärast võtame reguleerimise printsiipide käsitlemisel lihtsa näite. Vaatleme vee nivoo reguleerimist paagis. Seejuures on aga saadud tulemus üldkehtiv (joon. 3-20).

Paagi dünaamika võrrand

$$S\gamma \frac{dh}{dt} = Q_1 - Q_2, \tag{53}$$

kus S — paagi ristlõige = const,
γ — vee erikaal,
h — nivoo kõrgus,
Q_1 — paaki tuleva vee hulk,
Q_2 — paagist väljuva vee hulk.

Eeldame, et vee juurdevool Q_1 sõltub nivoo kõrgusest h ja vee juurdevoolu ventiili avamisastmest u, vee äravool Q_2 aga nivoo kõrgusest h ja äravoolu ventiili avamisastmest v. Sel viisil saame eeltoodud võrrandist

$$S\gamma \frac{dh}{dt} = \left(\frac{\partial Q_1}{\partial h}\right)\Delta h + \frac{\partial Q_1}{\partial u}\Delta u - \left(\frac{\partial Q_2}{\partial h}\right)\Delta h - \frac{\partial Q_2}{\partial v}\Delta v. \tag{54}$$

Antud juhul on automaatreguleerimine suuruste Δh, Δu ja Δv niisugune omavaheline sidestamine, mis hoiaks reguleeritava parameetri konstantsena.

Otsese toimega ideaalse regulaatori jaoks kirjeldab seda seost võrrand

$$\Delta u = a\Delta h + b\frac{dh}{dt} + c\Delta v. \tag{55}$$

Vaatleme kolme reguleerimise printsiipi puhtal kujul. Nad realiseerivad vee juurdevoolu (reguleerimisorgani asendi) sõltuvuse reguleeritava parameetri h väärtusest, selle muutumise kiirusest ehk esimesest tuletisest aja järgi $\frac{dh}{dt}$ ja koormusest v.

Reguleerimise esimene printsiip vastab juhule, kus võrrandis (55)

$$a \neq 0;\ b = 0;\ c = 0,$$

s. o. reguleerimisorgan reageerib ainult reguleeritava parameetri muutusele:

$$\Delta u = a\Delta h. \tag{56}$$

Et oleme seadnud endale ülesandeks selgitada ühe või teise reguleerimisprintsiibi töövõimelisust ja õigsust, on otstarbekohane võtta objekti dünaamika võrrand kujul, mis on stabiilsusele kõige ebasoodsam. Võrrandis (54) on liikmed Δh-ga. Need on liikmed, mis väljendavad objekti isereguleerimist ning mis suurendavad reguleerimisprotsessi stabiilsust. Jätame nad teadlikult olukorda halvendades tähele panemata ning eeldame, et objektil puudub isereguleerimine.

Seepärast kirjutame võrrandi (54) asemel

$$S\gamma \frac{dh}{dt} = \frac{\partial Q_1}{\partial u}\Delta u - \frac{\partial Q_2}{\partial v}\Delta v. \tag{57}$$

Elimineerime sellest võrrandist Δu seose (56) abil.

$$S\gamma \frac{dh}{dt} = \frac{\partial Q_1}{\partial u} a\Delta h - \frac{\partial Q_2}{\partial v}\Delta v. \tag{58}$$

Jagame võrrandi mõlemad pooled suurusega $S\gamma$. Saame:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}{S\gamma}\Delta h - \frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v}}{S\gamma}\Delta v.$$

Lahendame selle diferentsiaalvõrrandi.

Eeldame, et võrrandi vabaliige võrdub nulliga, s. o.

$$\frac{dh}{dt} - \frac{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}{S\gamma}\Delta h = -\frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v}}{S\gamma}\Delta v = 0,$$

millest

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}{S\gamma}\Delta h.$$

Jagame mõlemad võrrandi pooled Δh-ga:

$$\frac{dh}{\Delta h} = \frac{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}{S\gamma} dt,$$

millest

$$\Delta h = c \cdot \exp \frac{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}{S\gamma} t,$$

kus integreerisime piirides 0-st kuni h-ni ning 0-st kuni t-ni, ent $dh = d\Delta h$, sest $\Delta h = h - h_0$ ($h_0 = \text{const}$).

Erilahendi saame, kui anname Δh-le mingi väärtuse, mis peab rahuldama antud võrrandit.

Alghetkel $\frac{dh}{dt} = 0$. Saame:

$$\frac{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}{S\gamma} \Delta h = \frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v}}{S\gamma} \Delta v,$$

millest $\Delta h = \frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v} \Delta v}{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}$.

Kogu lahend on seega

$$\Delta h = c \cdot \exp \frac{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}{S\gamma} t + \frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v}}{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a} \Delta v. \tag{59}$$

Toiteventiili avamisastme u suurenemisel vee kulu suureneb, seega

$$\frac{\partial Q_1}{\partial u} > 0.$$

Et regulaator peab tagama toiteventiili avamisastme u suurenemise nivoo h langemisel, siis, nagu see selgub võrrandist (56), peab $a < 0$. Seepärast, kui $t \to \infty$, siis võrrandi (59) esimene liige läheneb nullile ning

$$\underset{t \to \infty}{\Delta h} = \frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v} \Delta v}{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a}. \tag{60}$$

Selgitame, millega võrdub tegur Δv ees.

Tasakaaluoleku puhul $Q_1 = Q_2$ ja $dh = 0$ ning võrrandist (57) saame:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial u} u_{max} = \frac{\partial Q_2}{\partial v} v_{max}. \tag{61}$$

Seosest (56)

$$u_{max} = a(h_{min} - h_{max}), \tag{62}$$

sest

$$u_{min} = 0 \text{ ja } a < 0.$$

Asetades u_{max} avaldise võrrandisse (61), saame:

$$\frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v}}{\frac{\partial Q_1}{\partial u} a} = \frac{h_{min} - h_{max}}{v_{max}}. \tag{63}$$

Lahendanud võrrandid (60) ja (63), saame:

$$\Delta h = -(h_{max} - h_{min}) \cdot \frac{\Delta v}{v_{max}}. \tag{64}$$

Tähistades koormuse suhtelise muutuse tähega λ, s. o.

$$\lambda = \frac{\Delta v}{v_{max}}$$

ja ebaühtlusteguri tähega δ, s. o.

$$\delta = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_0},$$

saame võrrandi (64) asemel avaldise nivoo suhtelise muutuse kohta, kui $t \to \infty$:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = -\delta\lambda. \tag{65}$$

Niisiis moodustab parameetri muutuse järgi reguleerimise printsiip stabiilse reguleerimisprotsessi, kusjuures koormuse muutumine nullist maksimumini, mis vastab λ muutusele nullist kuni üheni, põhjustab parameetri suhtelise muutuse nullist kuni $-\delta$-ni, s. o. ebaühtlusteguri piirides.

Teine printsiip, s. o. reguleerimine koormuse muutuse järgi vastab juhule, kui võrrandis (55)

$$a = 0;\ b = 0;\ c \neq 0,$$

s. o. reguleerimisorgan reageerib ainult koormuse muutusele.

Regulaatori võrrandi (55) alusel

$$\Delta u = c \cdot \Delta v. \tag{66}$$

Asetades Δu avaldise võrrandisse (57), saame:

$$S\gamma \frac{dh}{dt} = \left(\frac{\partial Q_1}{\partial u} c - \frac{\partial Q_2}{\partial v}\right) \Delta v. \tag{67}$$

Nivoo kõrguse konstantsena hoidmiseks on vaja valida regulaatori karakteristik c nii, et oleks rahuldatud tingimus

$\frac{\partial Q_1}{\partial u} c = \frac{\partial Q_2}{\partial v}$, s. t. kui $dh = 0$, siis peab ka $\left(\frac{\partial Q_1}{\partial u} c - \frac{\partial Q_2}{\partial v}\right) \Delta v = 0$.

Kuid praktiliselt võib see võrdus kehtida mitte päris täpselt, vaid mingisuguse veaga. Peale selle muutuvad suurused

$$\frac{\partial Q_1}{\partial u} \text{ ja } \frac{\partial Q_2}{\partial v}$$

ise aja jooksul ventiilide kulumisel, paaki mineva vee surve muutumisel ning takistuse tõttu, mis on juurde- ja äravoolutorustikus,

s. t. ventiilide antud avamisastme korral võib vee kulu muutuda paljude põhjuste tagajärjel.

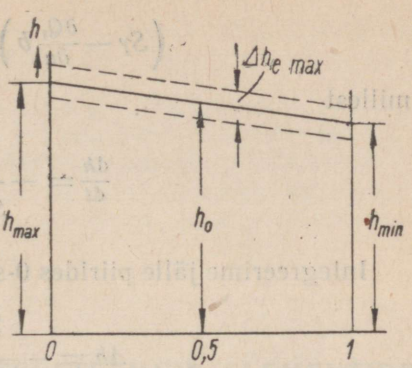
Seepärast on tegelikult maksev võrrand

$$\frac{\partial Q_1}{\partial u}c - \frac{\partial Q_2}{\partial v} = \pm\frac{1}{2}\varepsilon, \quad (68)$$

kus ε — regulaatori ebatundlikkustegur (joon. 3-21):

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_{e\,max}}{h_0}, \quad (69)$$

ja $\Delta h_{e\,max}$ on maksimaalne ebatundlikkus.



Joon. 3-21. Reaalse regulaatori karakterkõver

Nivoo muutumisele suuruse võrra, mis ei ületa $\pm\Delta h_{e\,max}$ sellest väärtusest, mis on talle määratud ideaalse regulaatori staatilise karakteristikuga, reaalne regulaator ei reageeri ning seepärast ei muuda ka reguleerimisventiili asendit.

Asetades võrduse (68) võrrandisse (67), saame:

$$S\gamma\frac{dh}{dt} = \pm\frac{1}{2}\varepsilon\Delta v,$$

millest

$$\frac{dh}{dt} = \pm\frac{\Delta v\cdot\varepsilon}{2S\gamma}; \qquad dh = \pm\frac{\Delta v\cdot\varepsilon}{2S\gamma}dt$$

ja pärast integreerimist $\Delta h = \pm\frac{\Delta v\cdot\varepsilon}{2S\gamma}t.$ (70)

Siit on näha, et aja jooksul kasvab suurus Δh piiramatult ja reguleerimisprotsess on ebastabiilne. Seepärast ei saa isereguleerimiseta objektide reguleerimisel koormuse järgi reguleerimise printsiipi kasutada iseseisvalt.

Vaatleme nüüd reguleerimise kolmandat printsiipi, s. t. reguleerimist parameetri muutumise kiiruse järgi.

See vastab juhule, kus võrrandis (55)

$$a = 0;\ b \neq 0;\ c = 0 \quad (71)$$

Regulaatori võrrand on seega

$$\Delta u = b\frac{dh}{dt}. \quad (72)$$

Elimineerides Δu võrrandist (57) võrrandi (72) kaudu, leiame, et

$$\left(S\gamma - \frac{\partial Q_1}{\partial u} b\right) \frac{dh}{dt} = -\frac{\partial Q_2}{\partial v} \Delta v, \tag{73}$$

millest

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v} \Delta v}{S\gamma - \frac{\partial Q_1}{\partial u} b}. \tag{74}$$

Integreerime jälle piirides 0-st h-ni ja 0-st t-ni. Saame:

$$\Delta h = -\frac{\frac{\partial Q_2}{\partial v} \Delta v}{S\gamma - \frac{\partial Q_1}{\partial v} b} t. \tag{75}$$

Et aeg kasvab lõpmatult, siis selleks, et vee nivoo ei muutuks, s. t. $\Delta h = 0$, on tarvis, et $b = \infty$. (76)

Võrrandi (72) põhjal tähendaks see seda, et regulaator peaks olema lõpmatult tundlik, sest nivoo muutumise lõpmatu väikese kiiruse korral peab ta tekitama reguleerimisventiili lõpliku asendimuutuse. Tegelikult on aga igal regulaatoril mingi lõplik ebatundlikkus, kas või ainult alati eksisteeriva mehaanilise hõõrdumise tõttu. Seepärast ei saa tingimust (76) praktiliselt täita ja protsessi reguleerimine parameetri muutumise kiiruse järgi on ebastabiilne. Iseseisvalt kasutada ei ole teda võimalik.

Ülaltoodut arvesse võttes peab reguleerimissüsteemides olema üheks printsiibiks alati reguleerimine parameetri muutuse järgi. Kuigi ülejäänud kaht printsiipi ei saa iseseisvalt kasutada, parandavad nad koos esimese printsiibiga siiski mitte ainult regulaatori dünaamikat, vaid ka staatikat (reguleerimise printsiip koormuse järgi) ning on tööstuses laialdaselt kasutusel (mitmeimpulsilised regulaatorid).

IV. AUTOMAATREGULEERIMISSÜSTEEMIDE ELEMENTIDE DÜNAAMILISED OMADUSED JA NENDE EKSPERIMENTAALNE MÄÄRAMINE

1. Üldjooni operaatorarvutusest

Käesoleval ajal kasutatakse mitmesuguste küsimuste teoreetilisel uurimisel ja lahendamisel, kaasa arvatud ka automaatreguleerimise tehnika, laialdaselt operaatorarvutust. See meetod võimaldab tunduvalt lihtsamini ja kergemalt üles kirjutada ja lahendada diferentsiaalvõrrandeid, eriti keeruliste struktuurskeemide puhul, kus nende analüüs sealjuures tunduvalt kergeneb. Diferentseerimis- ja integreerimistehted asendatakse algebraliste tehetega mingi kompleksarvuga p.

Mõiste operaator on üldistatud mõiste funktsioonist. Funktsiooni võib määratleda kui kahe arvude hulga vahelise vastavuse seadust.

Vaadeldes näiteks funktsiooni $y = \sin x$ vahemikus $-1 < x < 1$, näeme, et ta annab seaduse, millega kooskõlas iga arvu jaoks $x = x_1$ arvude hulgast -1-st kuni $+1$-ni võib näidata temale vastava arvu $y_1 = \sin x_1$. Funktsioon võib olla antud kas üheselt või mitmeselt, võib olla antud kas valemina, graafikuna või tabelina; igal juhul on ta vastavuse seadus. Üldistatud mõiste funktsioonist-operaatorist — on vastavuse seadus funktsioonide kahe hulga vahel. See seadus võib olla antud näiteks tabelina, kus igale kindlast klassist funktsioonile $f(t)$ vastab mingi, üldiselt öeldud, teine funktsioon $F(p)$. Osutub, et kindlatel tingimustel võib sümbolit $p \equiv \frac{d}{dt}$ vaadelda mitte ainult kui diferentseerimisoperatsiooni tinglikku kujutust, vaid ka kui algebralist suurust. Seda võib põhjendada, kasutades diferentsiaalvõrrandite juures funktsiooni Laplace'i teisendust. Sel juhul saavad kõik algebralised tehted operaatoravaldiste jaoks täiesti seaduspäraseks.

Vastavuse seadus märgitakse järgmisel viisil:

$$f(t) \div F(p) \qquad (1)$$

või ka nii:

$$L[f(t)] = F(p), \tag{2}$$

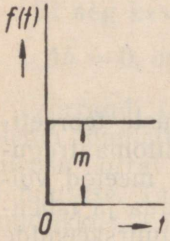
s. o. funktsiooni $f(t)$ Laplace'i teisend on funktsioon $F(p)$.

Nool tähendab «vastab».

Operaatorarvutuses vaadeldakse operaatoreid, mis on antud teisenduse mõninga erivalemiga. Kasutatakse näiteks Laplace'i operaatorit, mis on antud valemiga

$$F(p) = \int_0^\infty e^{-pt} f(t)\,dt. \tag{3}$$

See valem tähendab, et antud funktsiooni $f(t)$ järgi võib leida temale vastava $F(p)$ järgmiselt: on vaja panna funktsioon $f(t)$ integraalialusesse avaldisse (3) ning siis integreerida märgitud piirides. Pärast integreerimist saame otsitava funktsiooni $F(p)$. Funktsiooni $f(t)$ nimetatakse originaaliks, funktsiooni $F(p)$ aga tema kujutiseks. Tõepoolest, pärast integreerimist märgitud piirides saame avaldise, mis ei sisalda suurust t ja sõltub suurusest p. Allpool kasutatakse operaatorit, mis veidi erineb Laplace'i teisendist ja mida nimetatakse Laplace'i-Carson'i teisendiks



Joon. 4-1. Hüppeline funktsioon

$$F(p) = p\int_0^\infty e^{-pt} f(t)\,dt,$$

s. t.

$$\frac{F(p)}{p} = \int_0^\infty e^{-pt} f(t)\,dt. \tag{4}$$

Vaatleme ainult neid funktsioone $f(t)$, mis vastavad tingimusele

$$f(t) = 0, \text{ kui } t < 0, \tag{5}$$

ja

$$e^{-pt} f(t) \to 0, \text{ kui } t \to \infty, \tag{6}$$

s. t. integraal peab olema koonduv.

Järelikult, arvutades valemit $F(p)$ jaoks, võib teda kasutada ainult arvude p intervallis, mis rahuldab tingimust (6).

Vaatleme mõningaid näiteid. Olgu $f(t)$ hüppeline funktsioon (joon. 4-1):

$$\begin{aligned} f(t) &= 0, \text{ kui } t < 0, \\ f(t) &= m, \text{ kui } t \geqslant 0. \end{aligned} \tag{7}$$

Pannes funktsiooni väärtuse $f(t) = m$ integraali all olevasse avaldisse (3), leiame:

$$F(p) = p\int_0^\infty e^{-pt} m\,dt = -mp\,\frac{1}{p}\left|e^{-pt}\right|_0^\infty = m. \tag{8}$$

Kui näiteks $m = 1$, siis $F(p) = 1$. Funktsiooni $f(t)$ (7), kui $m = 1$, s. t. $f(t) = 1$ nimetatakse **ühikfunktsiooniks**. Järelikult ühikfunktsiooni **kujutis** on **üks**.

Olgu $f(t) = e^{-\alpha t}$, kus $\alpha > 0$.

Pannes $e^{-\alpha t}$ valemisse (4), leiame:

$$F(p) = p \int_0^\infty e^{-pt} e^{-\alpha t}\, dt = -\frac{p}{p+\alpha} e^{-(p+\alpha)t}\Big|_0^\infty = \frac{p}{p+\alpha},$$

$$\text{s. t. } e^{-\alpha t} \div \frac{p}{p+\alpha}. \tag{9}$$

On vaja arvesse võtta, et see valem on õige ainult niisuguste p-de jaoks, mis rahuldavad tingimust (6).

See tingimus võtab käesoleval juhul kuju

$$e^{-(p+\alpha)t} \to 0,$$

kui $t \to \infty$.

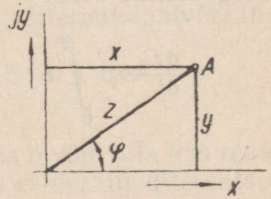
Samasugune tingimus võib olla rahuldatud ka p kompleksse väärtuste puhul, kui ainult nende reaalosa $Re(p)$ oma suuruse poolest on suurem kui $-\alpha$, s. t.

$$Re(p) > -\alpha.$$

Tuletame meelde kompleksarvu olemust.

Kompleksarvuks nimetatakse arvu $z = x + jy$, kus x ja y on reaalsed muutujad ja $j = +\sqrt{-1}$ (joon. 4-2).

Kompleksarvu kujutatakse komplekstasapinnas punktina. Kaugus koordinaatide alguspunktist kuni punkti projektsioonini reaalteljel on kompleksarvu reaalosa x ning kaugus koordinaatide alguspunktist kuni punkti projektsioonini imaginaarteljel kompleksarvu imaginaarosa y. Kompleksarvu võib kujutada ka vektorina OA, mis on tõmmatud koordinaatide algusest kuni punktini A. Kompleksarvu kujutava vektori pikkust nimetatakse vektori mooduliks ja tähistatakse mod z. Pythagorase teoreemist saame, et mod $z = \sqrt{x^2 + y^2}$.



Joon. 4-2. Kompleksarv

Nurka φ, mida loetakse positiivsest reaalpoolteljest kuni vektorini kellaosuti liikumisele vastupidises suunas, nimetatakse vektori argumendiks ja tähistatakse arg z.

Ilmselt $\varphi = \arg z = \operatorname{arc\,tan} \frac{y}{x}$.

Vektori pikkuse ja tema projektsioonide vahel on seosed

$$Re\,|z| = x = \mathrm{mod}\, z \cos \varphi$$

ja

$$Im\,|z| = y = \mathrm{mod}\, z \sin \varphi,$$

kus sümbolid *Re* ja *Im* tähendavad vastavalt kompleksarvu reaal- ja imaginaarosa.

Kasutades Euleri valemit

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$$

ja

$$e^{-j\varphi} = \cos \varphi - j \sin \varphi,$$

võib kompleksarvu väljendada polaarkoordinaadistikus veel järgmisel kujul:

$$z = He^{j\varphi},$$

kus $\mathrm{mod}\, z = H = \sqrt{x^2 + y^2}$ on vektori moodul,
φ — tema argument.

Tõepoolest,

$$z = x + jy;\ x = H \cos \varphi;\ y = H \sin \varphi,$$

$$z = H(\cos \varphi + j \sin \varphi) = He^{j\varphi}.$$

Edaspidi eeldame, et p on kompleksarv, t aga reaalarv. Operaatori (4) suurepärane omadus seisab selles, et funktsiooni $f(t)$ tuletise kujutis on väga lihtsalt seotud funktsiooni endaga $F(p)$.

Olgu funktsiooni $f(t)$ kujutis mingi funktsioon $F(p)$. Leiame tuletise $\frac{df(t)}{dt}$ kujutise.

Paneme funktsiooni $\frac{df(t)}{dt}$ integraalialusesse avaldisse (4) ja integreerime ositi:

$$\frac{df}{dt} \div p \int_0^\infty e^{-pt} \frac{df(t)}{dt}\, dt = p \int_0^\infty e^{-pt} df(t) = p \int_0^\infty u\, dv = \cdot$$

$$= puv \Big|_0^\infty - p \int_0^\infty v\, du,$$

kus $u = e^{-pt}$; $v = f(t)$ ning $du = -pe^{-pt} dt$.

Järelikult

$$p \int_0^\infty e^{-pt} df(t) = p\, |e^{-pt} f(t)\, \Big|_0^\infty + p \cdot p \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt.$$

Selle võrrandi parema poole esimene liige võrdub — $pf(0)$-ga, sest $e^{-pt} f(t) \to 0$, kui $t \to \infty$. Siin $f(0) = \lim f(t)$, kui $t \to 0$.

Võrrandi parema poole teine liige pole midagi muud kui

$$p[p\int_0^\infty e^{pt}f(t)] = pF(p).$$

Seega saime, et mittenullilistel algtingimustel kehtib vastavus

$$\frac{df(t)}{dt} \div\!\!\to pF(p) - pf(0). \tag{10}$$

Kui funktsiooni algtingimused on võrdsed nulliga, siis saadakse tuletise kujutis väga lihtsalt funktsiooni kujutise korrutamise teel suurusega p:

$$\frac{df(t)}{dt} \div\!\!\to pF(p). \tag{11}$$

Sel viisil pole tuletise kujutise leidmiseks vajadust otsida originaali $f(t)$, vaid on küllaldane ainult teada funktsiooni $f(t)$ kujutist ja ta algväärtust, kui $t = 0$, mida märkisimegi $f(0)$-ga.

Samal viisil võime leida teise tuletise kujutise esimese tuletise kujutise ja tema algväärtuse $\dot{f}(0)$ järgi, s. t.

$$\ddot{f}(t) \div\!\!\to p[pF(p) - pf(0)] - p[\dot{f}(0)] = \tag{12}$$
$$= p^2F(p) - p^2f(0) - p\dot{f}(0)$$

jne.

Seega on n-järku tuletiste kujutiste leidmiseks vaja teada kõiki algtingimusi:

$$f(0),\ \dot{f}(0) \text{ jne. kuni } f^{(n-1)}(0).$$

Kui need kõik on nullid, kaasa arvatud $n - 1$ tuletis, siis

$$\frac{d^nf(t)}{dt^n} \div\!\!\to p^nF(p). \tag{13}$$

Nagu teada, on lineaarse homogeense diferentsiaalvõrrandi

$$\sum_{\alpha=0}^{n} a_\alpha \frac{d^\alpha x}{dt^\alpha} = 0$$

lahend eksponentfunktsioonide e^{pt} summa, kus p võib olla kas reaal- või kompleksarv, kuna eksponentfunktsioon ei muutu diferentseerimisel ja sel viisil muundab selle võrrandi eksponentsiaalse koefitsiendi p suhtes algebraliseks võrrandiks.

Võrrandist

$$a_n\frac{d^nx}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1}x}{dt^{n-1}} + \ldots + a_1\frac{dx_1}{dt} + a_0x = 0$$

saame seega:

$$a_np^ne^{pt} + a_{n-1}p^{n-1}e^{pt} + \ldots + a_1pe^{pt} + a_0e^{pt} = 0,$$

millest

$$e^{pt}(a_n p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \ldots + a_1 p + x_0) = 0.$$

Et $e^{pt} \neq 0$, siis

$$a_n p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0 = 0. \qquad (14)$$

Seda võrrandit nimetataksegi diferentsiaalvõrrandi karakteristlikuks ehk karaktervõrrandiks. Olles seotud diferentsiaalvõrrandiga, määrab ta selle võrrandi kõigi n lahendi p_n väärtused. Et võrrandi (14) lahendid on üldkujul kompleksarvud, siis nullilistel algtingimustel, asendades $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \equiv p$, saamegi diferentsiaalvõrrandi karaktervõrrandi. Selle lahendamisel üldjuhul eeldamegi, et

$$p = x + \mathrm{j}\, y.$$

Vaatleme nüüd integraali

$$\psi(t) = \int_0^t f(t)\,\mathrm{d}t \div F(p).$$

Integraali määratlusest järeldub, et

$$\frac{\mathrm{d}\psi(t)}{\mathrm{d}t} = f(t); \quad \psi(0) = 0.$$

Seepärast võib tingimuse (11) põhjal kirjutada:

$$F(p) = p\Phi(p),$$

millest

$$\Phi(p) = \frac{F(p)}{p}.$$

Võrrandite lahendamiseks operaatorimeetodil on vaja teha järgmist:

1) võrrandi asemel on vaja kirjutada tema operaatorlik kujutis;

2) leida saadud algebralisest võrrandist otsitava funktsiooni kujutis $F(p)$;

3) saadud kujutise $F(p)$ järgi leida originaal $x(t)$.

Selleks et antud kujutise järgi oleks kerge leida originaali, on tihti esinevad funktsioonid ning nende kujutised koondatud tabelitesse.

Operaatorimeetodi mugavamaks kasutamiseks omavad suurt tähtsust rida teoreeme. Neid kasutatakse diferentsiaalvõrrandite lahendamisel üldkujul. Vaatleme neist olulisemaid.

a) Teguriteks lahutamise teoreem.

Oletame, et funktsiooni kujutis on

$$F(p) = p\,\frac{A(p)}{B(p)}, \qquad (15)$$

kus $A(p)$ ja $B(p)$ on hulkliikmed suurusest p.

On vaja leida selle kujutise originaal $f(t)$.

Nõutava lahendi leidmiseks eeldame, et 1) hulkliikme $A(p)$ aste on väiksem kui hulkliikmel $B(p)$; 2) võrrandi $B(p)$ lahendid on kõik erinevad, s. t. nende hulgas pole kaht ega rohkem omavahel võrdset lahendit. Oletame veel, et tegur võrrandi $B(p)$ kõrgeima astme p ees võrdub ühega. Kui ta seda algul ei ole, siis on seda lihtne teha, jagades võrrandi mõlemaid pooli tema ees asetseva teguriga.

Kui hulkliikme $B(p)$ lahendid on $p_1, p_2 \ldots p_n$ (staatiline süsteem), siis, lahutanud selle teguriteks, saame:

$$B(p) = (p - p_1)(p - p_2) \ldots (p - p_n). \tag{16}$$

Järelikult võrrandi (15) nimetaja on korrutis (16).

Nüüd kirjutame seose (15) kujul

$$\frac{F(p)}{p} = \frac{A(p)}{B(p)} = \frac{A_1}{p - p_1} + \frac{A_2}{p - p_2} + \ldots + \frac{A_n}{p - p_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i}{p - p_i}, \tag{17}$$

kus $A_1, A_2 \ldots A_n$ on senini veel tundmatud tegurid. Neid võib aga leida, korrutades mõlemaid võrrandi (17) pooli suurusega $p - p_i$. Siis saame:

$$\frac{A(p)(p - p_1)}{B(p)} = A_1 + \frac{A_2(p - p_1)}{p - p_2} + \ldots + \frac{A_n(p - p_1)}{p - p_n}. \tag{18}$$

Kui selles avaldises väärtus p läheneb p_1-le, siis langevad kõik võrrandi paremal poolel olevad liikmed peale A_1 välja ja me saame:

$$A_1 = \lim \frac{A(p)(p - p_1)}{B(p)} = \frac{\lim\limits_{p \to p_1} [A(p)]}{\lim\limits_{p \to p_1} \left[\frac{B(p)}{p - p_1}\right]} = \frac{[A(p)]_{p=p_1}}{[B'(p)]_{p=p_1}}. \tag{19}$$

Siin on nimetajas kasutatud G. F. A. l'Hôpital'i tuntud reeglit, sest

$$\lim_{p \to p_1} \frac{B(p)}{p - p_1} = \frac{0}{0}$$

ja seepärast

$$\lim_{p \to p_1} \frac{B(p)}{p - p_1} = \frac{\lim\limits_{p \to p_1} \frac{d}{dp} [B(p)]}{\lim\limits_{p \to p_1} \frac{d}{dp}(p - p_1)} = [B'(p)]_{p=p_1}.$$

Analoogiliselt leiame ka teised tegurid A_i:

$$A_i = \left[\frac{A(p)}{B'(p)}\right]_{p=p_i}. \tag{20}$$

Valemist (17) saame, et

$$F(p) = \sum_{i=1}^{n} \frac{pA_i}{p - p_i},$$

ning selle kujutise originaal on

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i e^{p_i t} = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{A(p)}{B'(p)}\right]_{p=p_i} e^{p_i t}, \tag{21}$$

mis väljendabki teguriteks lahutamise teoreemi. Originaali $f(t)$ leidmiseks on vaja teada p_i, s. o. leida võrrandi $B(p) = 0$ lahendid.

Kui võrrandi $B(p) = 0$ (diferentsiaalvõrrandi karaktervõrrandi) üks lahendeist võrdub nulliga (astaatiline süsteem), s. t. $p_1 = 0$, siis $B(p) = pB_1(p)$ ja hulkliige B_1 juba ei sisalda nullilist lahendit.

Siis $$\frac{F(p)}{p} = \frac{A(p)}{pB_1(p)} = \frac{A_1}{p} + \frac{A_2}{p - p_2} + \ldots + \frac{A_n}{p - p_n}. \tag{22}$$

Nagu eespoolgi, korrutame jälle võrrandi mõlemaid pooli suurusega p ja tema lähenemisel nullile saame piirväärtusena

$$A_1 = \lim \frac{A(p)}{B_1(p)} = \frac{A(0)}{B_1(0)}. \tag{23}$$

Ülejäänud A_i leiame eeltoodud viisil valemi (20) abil. Valemist (22) leiame teguriteks lahutatud võrrandi kujutise

$$F(p) = A_1 + \frac{A_2 p}{p - p_2} + \ldots + \frac{A_n p}{p - p_n},$$

millest originaali võrrand, võttes arvesse, et konstandi originaal on sama konstant, võrdub

$$f(t) = A_1 + \sum_{i=2}^{n} A_i e^{p_i t} = \frac{A(0)}{B_1(0)} + \sum_{i=2}^{n} \left[\frac{A(p)}{B'(p)}\right]_{p=p_i} e^{p_i t}. \tag{24}$$

b) Funktsiooni $f(t)$ lõppväärtuse teoreem.

Olgu $f(t) \div\!\!\!> F(p)$.

Eespool oli mainitud, et tuletise kujutis on

$$\frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} \div\!\!\!> pF(p) - pf(0), \tag{25}$$

millest järeldub, et

$$\int_0^\infty \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} e^{-pt} \mathrm{d}t = F(p) - f(0). \tag{26}$$

Kui võrrandi mõlemas osas p läheneb nullile, saame piirväärtusena:

$$\int_0^\infty \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t = \int_0^\infty \mathrm{d}f(t) = \lim_{p\to 0} F(p) - f(0), \tag{27}$$

sest

$$\lim_{p\to 0} \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} e^{-pt}\,\mathrm{d}t = \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t.$$

Siit tuleneb, et

$$\lim_{t\to\infty} f(t) - f(0) = \lim_{p\to 0} F(p) - f(0) \tag{28}$$

ja lõplikult

$$\lim_{t\to\infty} f(t) = \lim_{p\to 0} F(p). \tag{29}$$

Seda teoreemi võib formuleerida nii: funktsiooni $f(t)$ lõppväärtus ($t = \infty$) võrdub tema kujutise algväärtusega ($p = 0$). Selle teoreemi abil on kerge leida funktsiooni ja tema tuletiste püsimajäänud väärtusi.

Algtingimused määravad parameetri ja tema tuletiste väärtused, alates esimesest kuni $(n-1)$-ni (incl.) vabalt valitud hetkel t.

Algtingimused võivad olla igasugused. See tähendab, et alati võib kujutleda niisugust liikumist, mis eelnes hetkele t_0 ja mille tagajärjel hetkel t_0 suurused $x_0, \dot{x}_0 \ldots x_0^{(n-1)}$ võisid võtta ükskõik millise väärtuse. Kuid praktika jaoks huvitab meid palju rohkem teine juht. Tavaliselt vaatleme süsteemi, mis mingi hetkeni t_0 on liikumatu (või püsimajäänud olekus); see tähendab seda, et kuni hetkeni t_0 on parameetri kõrvalekalle tema antud väärtusest konstantne (või võrdne nulliga), kõik tuletised aga võrdsed nulliga.

Eeldatakse samuti, et kuni hetkeni $t = t_0$ oli süsteem püsiva häiringu all (või häiring puudus üldse).

Hetkel t_0 rakendatakse süsteemile häiring $f(t)$ (s. t. ühikfunktsioon). Hetk t_0 võetakse arvestuse alguseks.

Süsteemi algtingimusi, mis vastavad ülalkirjeldatud liikumatule süsteemile äkilise (hüppelise) häiringu rakendamise juhule, nimetatakse süsteemi loomulikeks algtingimusteks.

Reaalsetel elementaarsetel lülidel on loomulikud algtingimused nullid.

See tähendab, et kõik tuletised, — peale kõige kõrgemat järku tuletiste, võrduvad nulliga, x_v enda loomulik algtingimus on aga võrdne selle väärtusega, mis süsteemil oli liikumatus olekus. Kui süsteemi võrrandi koostamisel on lähtutud mitte parameetritest, vaid nende kõrvalekalletest vanast püsimajäänud asendist, siis on x_v loomulik algtingimus võrdne nulliga.

c) Teoreem funktsiooni algväärtuse kohta.

Vaatleme uuesti valemit (26) ja kujutame tema vasakpoolse integraali kahe integraali summana

$$\int_0^\infty \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} e^{-pt}\mathrm{d}t = \int_0^N \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} e^{-pt}\mathrm{d}t + \int_N^\infty \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} e^{-pt}\mathrm{d}t, \qquad (30)$$

kus $N > 0$.

Keskväärtuse teoreemi alusel, kui $0 < \alpha < 1$, on õige võrdus

$$\int_0^N \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} e^{-pt}\mathrm{d}t = \left[\frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\right]_{t=\alpha N} \int_0^N e^{-pt}\mathrm{d}t = \left[\frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\right]_{t=\alpha N} \frac{1}{p}(1 - e^{-pN}). \qquad (31)$$

Olgu N kindel arv. Siis eelmisest avaldisest järeldub:

$$\lim_{p\to\infty} \int_0^N \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} e^{-pt}\mathrm{d}t = 0. \qquad (32)$$

Teine integraal annab samuti piiril nulli, sest

$$\left| \int_N^\infty \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t} e^{-pt}\mathrm{d}t \right| < e^{-pN} \left| \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \right| = e^{-pN}[f(\infty) - f(0)]. \qquad (33)$$

Kui $p \to \infty$, siis läheneb võrrandi vasak pool ilmselt nullile. Järelikult kehtib kogu integraali jaoks võrdus

$$\lim_{p\to\infty} \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} e^{-pt}\mathrm{d}t = 0. \qquad (34)$$

Valemite (26) ja (34) põhjal, kui $p \to \infty$, saame:

$$\lim_{t\to 0} f(t) = \lim_{p\to\infty} F(p) \quad \text{s. t. } f(0) = F(\infty). \qquad (35)$$

Funktsiooni algväärtus ($t = 0$) võrdub tema kujutise lõppväärtusega ($p = \infty$).

Selle teoreemi abil on kerge leida antud diferentsiaalvõrrandi kõiki algtingimusi tema kujutise järgi.

2. Lüli või süsteemi amplituudi ja faasi karakteristikud

Kõiki reguleerimissüsteemi koostiselemente võib vaadelda kahest vaatepunktist: 1) nende funktsioneerimise iseloomu järgi — sel juhul eristatakse mõõtmis-, võimendus-, jõu- või teisi elemente — ja 2) nendes toimuvaid siirdeprotsesse, mis tekivad süsteemi ühes või teises elemendis samadel tingimustel, kirjeldavate võrrandite kuju järgi. Niisugune küsimusele lähenemine lihtsustab ükskõik millise reguleerimissüsteemi dünaamiliste omaduste kindlaksmääramist.

Süsteemi elementaarlülide kui ühe vabadusastmega materiaalsete süsteemide võrranditel on mitte kõrgem kui teine aste. Seepärast kirjeldatakse lüli nullilise, esimese või maksimaalselt teise järgu diferentsiaalvõrrandiga. Sel viisil on erinevate elementaarlülide arv väike ja kõiki väga mitmesuguste elementide konstruktsioone on võimalik taandada väga väikestele, neile ekvivalentsetele, kuid üksteisest dünaamiliselt erinevatele lülidele.

Lüli liikumise võrrand määrab ära sisenemis- ja väljumissuuruste väärtused sõltuvalt ajast:

$$x_v = f(x_s,\ t). \tag{36}$$

Edaspidi kasutatakse võrrandite üleskirjutamise lihtsustamiseks operaatorkuju. Selle olemus seisab selles, et diferentseerimisoperatsioon märgitakse

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \equiv p; \quad \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2} \equiv p^2; \ldots \frac{\mathrm{d}^n}{\mathrm{d}t^n} \equiv p^n \tag{37}$$

ja integreerimisoperatsioon

$$\int_0^t \mathrm{d}t \equiv \frac{1}{p}; \quad \int_0^{t_1}\int_0^{t_2} \mathrm{d}t_1\mathrm{d}t_2 \equiv \frac{1}{p^2}, \tag{38}$$

ning suurust p käsitleme üldjuhul kui kompleksarvu.

Lülide ja süsteemide diferentsiaalvõrrandid esitame üldiselt operaatorvormis:

$$n(p)x_v = m(p)x_s \text{ (lüli) ja } N(p)x_v = M(p)x_s \text{ (süsteem)}, \tag{39}$$

$$n(p)x_v = kx_s \text{ (lüli) ja } N(p)x_v = kx_s \text{ (süsteem)}, \tag{40}$$

kus $n(p)$ ja $m(p)$ ning $N(p)$ ja $M(p)$ on operaatorpolünoomid arvust p. Siin k — võrdelisuse tegur, x_s ja x_v — lülisse (süsteemi) sisenev ja sealt väljuv suurus.

Olgu süsteemi lineaarsel diferentsiaalvõrrandil, mis on saadud üksikute lülide diferentsiaalvõrrandeist, järgmine kuju:

$N(p)x_v = M(p)f(t)$, kus p on diferentseerimissümbol, $N(p)$ ja $M(p)$ polünoomid arvust p, $f(t)$ — häiring. (Avatud süsteemi puhul $f(t) = x_s$.)

Avatud lüli (süsteemi) koordinaadi x_v kujutise ja häiringu $f(t)$ kujutise suhet nimetatakse avatud süsteemi (lülide grupi, lüli) ülekandefunktsiooniks $W(p)$:

$$W(p) = \frac{L[x_v(t)]}{L[f(t)]} = \frac{M(p)}{N(p)}, \tag{41}$$

kus $L[x_v(t)]$ on koordinaadi x_v Laplace'i teisend, $L[f(t)]$ on häiringu Laplace'i teisend.

Reguleerimissüsteemi tundmaõppimisel dünaamika vaatepunktist ei vaadelda reguleeritavate suuruste konkreetseid füüsikalisi omadusi, reguleeritavate objektide ega reguleerimisaparatuuri füüsikalist olemust, vaid tuntakse huvi ainult reguleerimisprotsessi iseloomu vastu.

Kui vaadelda automaatreguleerimissüsteemi lüli sellest vaatepunktist (vaadeldakse ainult neid lülisid ja süsteeme, mida kirjeldatakse konstantsete kordajatega lineaarsete diferentsiaalvõrranditega), siis võib märkida, et sõltumatult nende füüsikalistest omadustest võib kõiki lülisid liigitada neis toimuvate protsesside iseloomu järgi põhitüüpideks, mida vaatleme allpool.

Eeldame, et iga lüli sisendisse antakse tõukekujuline ühikfunktsioon, s. t.

$$f(t) = 1, \text{ kui } t > 0, \text{ ja } f(t) = 0, \text{ kui } t < 0,$$

ning et lülil on nullilised algtingimused.

Tüüplülid valitakse nii, et nad ühes või teises kombinatsioonis iseloomustavad ükskõik millise konkreetse reguleerimissüsteemi dünaamilist struktuuri.

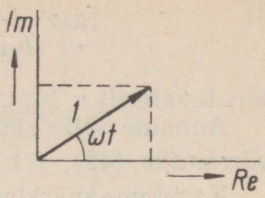
Lüli enda dünaamilisi omadusi, s. t. tema käitumist, kui välised häiringud on kõrvaldatud (lüli vabavõnkumine) kirjeldatakse matemaatiliselt lüli (või süsteemi) homogeense diferentsiaalvõrrandiga (võrrandi parem pool võrdub nulliga). Lüli (süsteemi) dünaamilist karakteristikut vabavõnkumise puhul nimetatakse tema siirde- ehk ajakarakteristikuks.

Lüli (süsteemi) dünaamilist karakteristikut sunnitud võnkumiste puhul nimetatakse tema sageduskarakteristikuks. Kui lineaarse lüli või avatud lineaarse dünaamilise süsteemi sisendisse anda häiring pideva harmoonilise võnkumise kujul, siis mõninga aja möödumisel pärast niisuguse häiringu tekitamist, kui on sumbunud kõik liikumised, mida iseloomustab siirdeprotsess, s. t. lüli dünaamilised omadused, jääb elementaarlüli või süsteemi väljundis püsima samuti väljumissuuruse harmooniline võnkumine niisama suure sagedusega, mis oli sisenemissuurusel, kuid teistsuguse amplituudi ja faasiga. Väljumissuuruse amplituud ja faas sõltuvad nii lüli (süsteemi) dünaamilistest omadustest kui ka võnkesagedusest. Nende järgi, nagu selgub allpool, osutub võimalikuks kindlaks määrata mitte ainult üksikute avatud lülide, vaid, mis veel tähtsam, keeruliste suletud automaatreguleerimissüsteemide dünaamilisi omadusi.

Oletame, et lüli või lineaarse dünaamilise reguleerimissüsteemi sisendisse antakse perioodiline häiring, mis sümboolsel kujul kirjutatakse üles võrrandiga

$$x_s = X_s e^{j\omega t}, \qquad (42)$$

kus ω on sisendisse antud häiringu sagedus.



Joon. 4-3. Ühikvektor

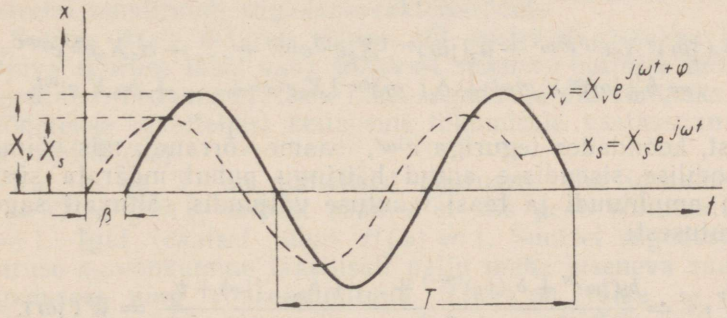
Märgime, et $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$. See väljendab kompleks-tasapinnas ühikvektorit, mille $\cos \omega t$ kujutab tema reaalosa, $\sin \omega t$ aga tema imaginaarosa (joon. 4-3).

Väljundis tekib seega perioodiline võnkumine

$$x_v = X_v e^{j(\omega t+\beta)} = X_v e^{j\omega t} e^{j\beta}, \qquad (43)$$

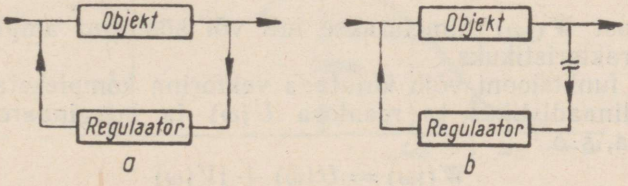
kus β — faasinurk.

Selle protsessi graafik on toodud joonisel 4-4.



Joon. 4-4. Siinuselise häiringu graafik lüli sisendis ja väljundis

Avatud reguleerimissüsteemi (lüli) (joon. 4-5, *a*) kirjeldatakse üldjuhul võrrandiga



Joon. 4-5. Avatud (*a*) ja suletud (*b*) reguleerimissüsteemi struktuurskeem

$$(a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_{n-1}p + a_n)x_v = \\ = (b_0p^m + b_1p^{m-1} + \ldots + b_{m-1}p + b_m)x_s \qquad (44)$$

kus tavaliselt $n \geqslant m$.

Anname selle süsteemi (lüli) sisendisse häiringu, mis vastab võrrandile (42), s. t. eeldame, et $x_s = X_s e^{j\omega t}$.

Kasutame märkimisviisi (37) ja diferentseerime võrrandi (42). Saame:

$$\left.\begin{aligned} p(X_s e^{j\omega t}) &= \frac{d}{dt}(X_s e^{j\omega t}) = j\omega X e^{j\omega t} \\ p^2(X_s e^{j\omega t}) &= \frac{d^2}{dt^2}(X_s e^{j\omega t}) = (j\omega)^2 X_s e^{j\omega t} \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ p^n(X_s e^{j\omega t}) &= \frac{d^n}{dt^n}(X_s e^{j\omega t}) = (j\omega)^n X_s e^{j\omega t} \end{aligned}\right\} \qquad (45)$$

Lahendades koos võrrandid (42), (43) ja (44) ning võttes arvesse võrrandid (45), saame:

$$a_0(j\omega)^n X_v e^{j\beta} e^{j\omega t} + a_1(j\omega)^{n-1} X_v e^{j\beta} e^{j\omega t} + \ldots + a_n X_v e^{j\beta} e^{j\omega t} = \\ = b_0(j\omega)^m X_s e^{j\omega t} + b_1(j\omega)^{m-1} X_s e^{j\omega t} + \ldots + b_m X_s e^{j\omega t}, \qquad (46)$$

millest, koondades teguriga $e^{j\omega t}$, saame võrrandi, mis võimaldab perioodilise sisendisse antud häiringu puhul määrata süsteemi (lüli) amplituudi ja faasi muutuse väljundis sõltuvalt sageduse ω muutusest:

$$\frac{X_v}{X_s} e^{j\beta} = \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \ldots + b_{m-1}(j\omega) + b_m}{a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \ldots + a_{n-1}(j\omega) + a_n} = W(j\omega). \qquad (47)$$

Suhe (47) on avatud süsteemi ülekandefunktsioon $W(p)$, milles on tehtud asendus $p = j\omega$. Seepärast, võttes arvesse seose (41), saame:

$$W(j\omega) = \pm \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)}. \qquad (48)$$

Suurust $W(j\omega)$ nimetatakse lüli või süsteemi amplituudi ja faasi karakteristikuks.

Seda funktsiooni võib kujutada vektorina komplekstasapinnas ristkoordinaadistikus ta reaalosa $U(\omega)$ ja imaginaarosa $V(\omega)$ summana, s. o.

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) \qquad (49)$$

või samas tasapinnas polaarkoordinaadistikus

$$W(j\omega) = H(\omega)e^{j\beta(\omega)}. \tag{50}$$

Viimasest saame, et

$$\left.\begin{aligned} |W| = H(\omega) &= \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} \\ \text{ja} \\ \beta(\omega) &= \arctan \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \end{aligned}\right\} \tag{51}$$

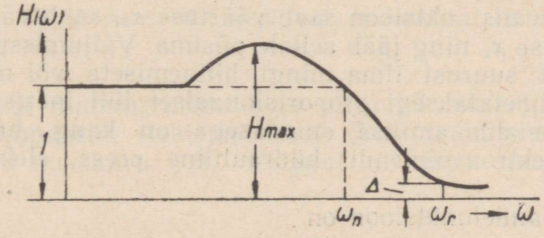
Suurust $|W| = H(\omega)$ nimetatakse vektori mooduliks, suurust $\beta(\omega)$ vektori argumendiks.

Kujutades suurust $W(j\omega)$ polaarkoordinaadistikus vektorina, mis iseloomustab süsteemi püsimajäänud liikumist sagedusega ω toimuva perioodilise häiringu puhul, võib, muutes teda 0-st kuni $+\infty$-ni, näha, et vektori ots joonestab komplekstasapinnas mingi kõvera, mida nimetatakse avatud lüli või süsteemi amplituudi ja faasi karakterkõveraks ehk karakteristiku hodograafiks.

Suurus $H(\omega)$ (võrrand 50) määrab lülisse või süsteemi siseneva ja sealt väljuva suuruse amplituudide suhte sõltuvalt sisenemissuuruse muutumise sagedusest ω. Teda nimetatakse lüli või süsteemi amplituudi sageduskarakteristikuks.

Suurus $\beta(\omega)$ määrab lülisse või süsteemi siseneva ja sealt väljuva suuruse faasi vahe sõltuvalt siseneva suuruse muutumise sagedusest. Teda nimetatakse faasi sageduskarakteristikuks. Nurk β mõõdetakse reaalteljest kellaosuti liikumisele vastassuunas kuni vektorini $W(j\omega)$.

Kui X_v ja X_s on suhtelised suurused, siis ideaalsel juhul $X_v = X_s$ ja $\beta = 0$, millest saame, et siis peab sõltumatult ω-st $H = 1$. Igal reaalsel juhul $H(\omega) \neq 1$. Suurtel sagedustel jääb suuruse x_v võnkumine faasiliselt palju maha siseneva suuruse x_s sagedusest ning võnkeamplituud $H(\omega)$ on väike — süsteem ei jõua reageerida sisseantava suuruse x_s suurtele kõikumistele. Resultaadina saadakse väljumissuuruse x_v faasilise hilinemisega nn. väikene «värisemine». Real tavalistel jälgivsüsteemidel on suurusel $H(\omega)$ järgmine kuju (joon. 4-6).



Joon. 4-6. Jälgivsüsteemi väljumissuuruse sagedusgraafik

Väikeste sageduste puhul on küllaldaselt täpselt õige võrdus $H(\omega) = 1$. Kuid sageduse lähenemisel mingi sageduseni $\omega = \omega_m$ kasvab suhteline amplituud $H(\omega)$ mingi suuruseni $H(\omega) > 1$, siis aga kahaneb järsku. $\omega > \omega_m$ korral suurus $H(\omega) < 1$. Sagedust ω_m loetakse tihti selle sagedusriba mõõduks, mida süsteem läbi laseb, kuna $\omega > \omega_m$ puhul $H(\omega)$ väärtus langeb kiiresti. Mõnikord võetakse sageduseks, mida süsteem läbi laseb, vahemik $0 < \omega < \omega_r$, kusjuures sageduste korral, mis on suuremad kui ω_r, $H(\omega) < \Delta$ ($\Delta < 1$ — mingi väike suurus).

Lüli või süsteemi sageduskarakteristikut võib määrata mitte ainult diferentsiaalvõrrandeist, vaid ka eksperimentaalselt. Kui süsteemi sisendisse rakendada harmooniline häiring X_s sagedusega ω, siis ilmneb väljundis pärast siirdeprotsessi sumbumist võnkumine, mis on sellest $H(\omega)$ korda suurem ja faasi poolest nihutatud suuruse $\beta(\omega)$ võrra. Mõõtes ära võnkesageduse, amplituudide suhte $H(\omega)$ ja faasinihke $\beta(\omega)$ ning muutes sagedust ω nullist kuni selle sageduseni, mil $H(\omega)$ osutub väiksemaks mõnest etteantud suurusest, võib eksperimentaalselt saada karakteristiku $W(j\omega)$.

Amplituudi sageduskarakteristiku maksimum $H_{max}(\omega)$ ja süsteemi poolt läbilastav sagedusriba on tähtsad kaudsed kriteeriumid, millede järgi võib otsustada süsteemi siirdeprotsessi üle. See funktsioon on ka süsteemi reaktsioon ühikfunktsioonile $x_s(t) = [1]$, mis temale mõjub hetkel $t = 0$ (kusjuures süsteem on tasakaaluolekus, kui $t < 0$).

3. Tüüplülid

Proportsionaalne (inertsitu) lüli. Lüli nimetatakse proportsionaalseks ehk inertsituks, kui seost lülisse siseneva ja sealt väljuva suuruse vahel väljendatakse algebralise võrrandiga

$$x_v = kx_s, \tag{52}$$

kus k on lüli võimendustegur, mille mõõtühikuks on väljumissuuruse mõõtühiku ja sisenemissuuruse mõõtühiku suhe. Kui need on suhtelised suurused, siis on k nimetu arv.

Graafiliselt on see sõltuvus kujutatud joonisel 4-7.

Väljumisfunktsioon on samuti hüppeline funktsioon. Samal hetkel kui sisenemisfunktsioon saab väärtuse x_s, saab väljumisfunktsioon väärtuse x_v ning jääb sellele püsima. Väljumissuurus kopeerib sisenevat suurust ilma mingi hilinemiseta või moonutuseta. Seepärast nimetataksegi proportsionaalset lüli inertsituks lüliks.

Niisuguse dünaamilise omadusega on kang, hammasratas, reduktor, elektronvõimendi, hüdrauliline press, elektrimasinvõimendi jt.

Lüli ülekandefunktsioon on

$$W(p) = \frac{x_v}{x_s} = k, \tag{53}$$

tema amplituudi ja faasi karakteristik

$$W(j\omega) = k, \qquad (54)$$

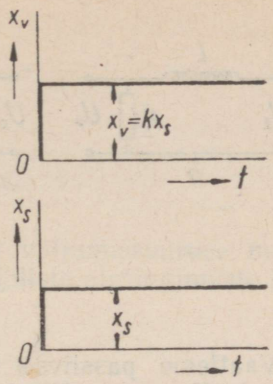
moodul

$$|W| = k \qquad (55)$$

ja faasinurk

$$\beta = \text{arc tan } 0, \text{ s. t. } \beta = 0. \qquad (56)$$

Võrrandi (54) alusel tehtud proportsionaalse lüli amplituudi ja faasi karakteristiku (*a*) ja sama lüli amplituudi sageduskarakteristiku ning faasi sageduskarakteristiku hodograafid (*b*) on toodud joonisel 4-8.



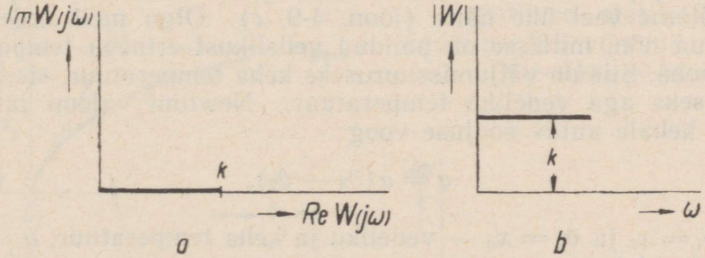
Joon. 4-7. Võimenduslüli siirdeprotsessi graafik

Aperioodiline ehk inertne lüli. Lüli nimetatakse aperioodiliseks, kui seost lülisse siseneva ja sealt väljuva suuruse vahel väljendatakse diferentsiaalvõrrandiga

$$(Tp + 1)x_v = kx_s, \qquad (57)$$

kus T — lüli ajakonstant,
k — lüli võimendustegur.

Aperioodiliste lülide hulka kuuluvad positiivse isereguleerimisega objektid, elektriahelad, mis koosnevad induktiiv- ja aktiiv-

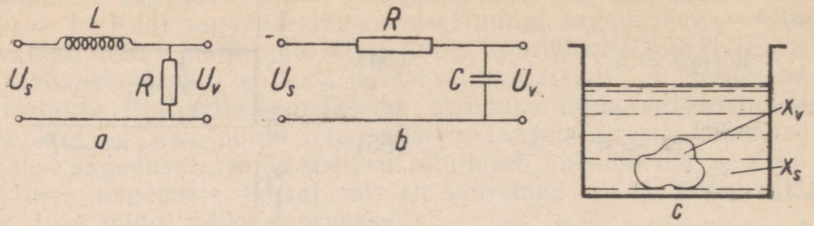


Joon. 4-8. Võimenduslüli amplituudi ja faasi karakterkõver

takistusest või mahutuvuslikust ja aktiivtakistusest, magnetvõimendid, termopaarid, elektrimootorid (kus x_s on sisenemispinge ja x_v — võlli nurkkiirus) jt. Eespool oli juba toodud masina võrrand

$$T\dot{\varphi} + \varphi = k\mu \text{ ehk } (Tp + 1)\varphi = k\mu.$$

Kui $\varphi = x_v$ ja $\mu = x_s$, siis saamegi võrrandi (57).



Joon. 4-9. Inertne lüli

Vaatleme passiivse neljapooluselise ahela võrrandit (joon. 4-9, *a*). Kasutame Kirchhoffi II seadust. Siin

$$U_s = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + Ri, \quad U_v = Ri$$

ja

$$\frac{U_v}{U_s} = \frac{Ri}{L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + Ri} = \frac{i}{\frac{L}{R}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + i} = \frac{i}{\left(\frac{L}{R}p + 1\right)i} = \frac{1}{Tp+1}.$$

Tähistame $U_s = x_s$ ja $U_v = x_v$, saame: $(Tp + 1)x_v = x_s$, kus $\frac{L}{R} = T$ — ahela ajakonstant ja on eeldatud, et võimendustegur $k = 1$.

Sama kujuga on ka aktiiv- ja mahtuvuslikust takistusest koosneva neljapooluselise ahela võrrand (joon. 4-9, *b*).

Võtame veel ühe näite (joon. 4-9, *c*). Olgu meil vedelikuga täidetud nõu, millesse on pandud vedelikust erineva temperatuuriga keha. Siis on väljumissuuruseks keha temperatuur, sisenemissuuruseks aga vedeliku temperatuur. Newtoni valemi järgi on ühele kehale antav soojuse voog

$$q = \alpha(\vartheta_1 - \vartheta_2),$$

kus $\vartheta_1 = x_s$ ja $\vartheta_2 = x_v$ — vedeliku ja keha temperatuur, α — soojusülekandetegur.

Keha temperatuuri muutumise kiirus on eeldusel, et tema soojusjuhtivustegur on lõpmatu suur, võrdeline temasse mineva soojushulgaga ja pöördvõrdeline tema summaarse soojusmahtuvusega C, s. t.

$$\frac{\mathrm{d}\vartheta_2}{\mathrm{d}t} = \frac{q}{C},$$

millest

$$\frac{C\,\mathrm{d}\vartheta_2}{\alpha\,\mathrm{d}t} + \vartheta_2 = \vartheta_1$$

või, kui arvestada, et

$$\frac{C}{\alpha} = T,$$

siis

$$T\frac{dx_v}{dt} + x_v = x_s.$$

Lahendades võrrandi (57), leiame väljumissuuruse muutuse iseloomu ülalnimetatud häiringu ja nulliliste algtingimuste korral.

Oletades, et $x_s = \text{const}$, saame:

$$x_v = kx_s\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \tag{58}$$

mille graafik on eksponentkõver (joon. 4-10, *a*, vt. ka joon. 3-11, *a*), s. t. reguleeritav parameeter läheneb aja jooksul piiramatult suurusele kx_s, s. o. tema uuele väärtusele.

Arvestust võime teha ka alates uuest tasakaaluasendist. Sel juhul toimub siirdeprotsess tingimusel, et puudub häiring, kui $t > 0$. Süsteemi vabaliikumine, mis vastab võrrandile $(Tp + 1)x_v = 0$, kulgeb eksponenti mööda

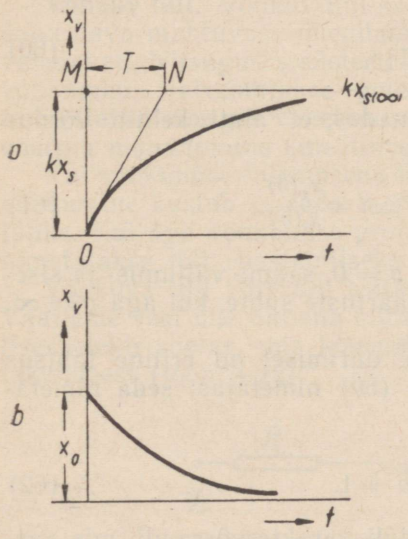
$$x_v = x_0 e^{-\frac{t}{T}}, \tag{59}$$

kus x_0 on algväärtus.

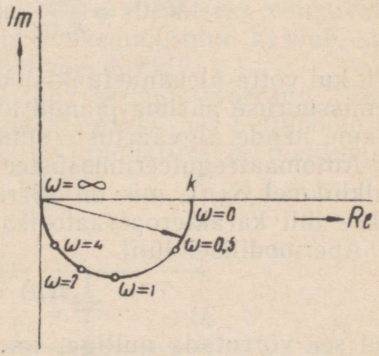
Aja jooksul $x_v \to 0$ (joon. 4-10, *b*).

Negatiivse statismiga aperioodilise lüli võrrand

$$(Tp - 1)x_v = kx_s.$$



Joon. 4-10. Inertse lüli siirdeprotsessi graafik



Joon. 4-11. Inertse lüli amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf

Lüli on ebastabiilne. Diferentsiaalvõrrandi lahend sisaldab liiget kujul $Ae^{\frac{t}{T}}$, kus astmenäitaja on positiivne arv. Teoreetiliselt vastab see parameetri lõpmatule kõrvalekaldele (joon. 3-11, *b*).

Väljumissuurus, nagu näha jooniselt 4-10, ei kopeeri sisenemissuuruse muutust silmapilkselt, mistõttu seda lüli nimetataksegi inertseks lüliks. Püsimajäänud suurus $kx_s(\infty)$ aga on sama mis proportsionaalsegi lüli puhul. Seega pole pärast siirdeprotsessi lõppemist mingit vahet aperioodilise ja proportsionaalse lüli vahel.

Kui $t = 0$, siis $x_v = 0$ ning võrrandi (57) tuletis võrdub $\frac{kx_s}{T}$. Järelikult lõikab puutuja *ON*, mis on tõmmatud punktist 0, asümptoodist ajakonstandiga T võrdse lõigu *MN* (joon. 4-10, *a*). Kui T väheneb, toimub ka siirdeprotsess kiiremini, ning kui $T \to 0$, läheneb lüli reaktsioon proportsionaalse lüli reaktsioonile. Kui $T = 0$, siis aperioodiline lüli taandub proportsionaalsele lülile, mis on näha ka võrrandist (58).

Aperioodilise lüli võrrand on esimest järku diferentsiaalvõrrand. Järelikult on tema integreerimisel vaja ette teada üht algtingimust, s. t. väljumissuuruse x_v algväärtust hetkel $t = 0$. Oletame nagu eespoolgi, et süsteem on enne häiringu tekitamist tasakaaluolekus, seega

$$x(0) = 0.$$

Aperioodilise lüli ülekandefunktsioon

$$W(p) = \frac{x_v}{x_s} = \frac{k}{Tp+1}. \tag{60}$$

Ülekandefunktsioonil on see omadus, et alati kehtib võrdus (vt. p. 1).

$$W(0) = \frac{x_v(\infty)}{x_s(\infty)} \text{ ja } W(\infty) = \frac{x_v(0)}{x_s(0)}, \tag{61}$$

s. t. kui võtta ülekandefunktsioonis $p = 0$, saame väljumis- ja sisenemissuuruse püsima jäänud lõppväärtuste suhte, kui aga $p = \infty$, saame nende algväärtuste suhte.

Automaatreguleerimissüsteemide uurimisel on eriline tähtsus hulkliikmel $S(p)$, mis on võrrandi (60) nimetajas; seda nimetatakse lüli karakteroperaatoriks.

Aperioodilisel lülil

$$S(p) = Tp + 1. \tag{62}$$

Kui see võrrutada nulliga, saame lüli karaktervõrrandi, mis vastab lüli diferentsiaalvõrrandile. Nagu allpool näeme, on see maksev ka süsteemi kohta.

Lüli amplituudi ja faasi karakteristik

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega + 1} = \frac{k}{\sqrt{(T\omega)^2 + 1}} e^{-j \arctan T\omega} \tag{63}$$

Selle funktsiooni moodul on lüli amplituudi sageduskarakteristik:

$$H(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(T\omega)^2 + 1}}. \tag{64}$$

Funktsiooni (63) argument on lüli faasi sageduskarakteristik:

$$\beta(\omega) = -\arctan T\omega. \tag{65}$$

Aperioodilise lüli amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf on komplekstasapinnas poolring, mille diameeter asub reaalteljel ning võrdub võimendusteguriga k (joon. 4-11).

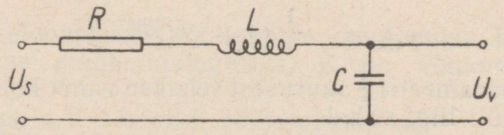
Rõhtteljele kantakse $W(j\omega)$ reaalosa ja püstteljele tema imaginaarosa. Hodograaf algab punktist k, millele vastab $\omega = 0$, ning lõpeb koordinaatide alguspunktis, millele vastab $\omega = \infty$. Sageduse ω väärtuste asukoht poolringil sõltub ajakonstandist T.

Amplituudi ja faasi karakteristikust tuleneb, et sageduste korral, mis on lähedased nullile, lüli väljumissuuruse faas ei nihku sisenemissuuruse faasiga võrreldes; sageduste puhul, mis lähenevad lõpmatusele, erineb väljumissuuruse faas sisenemissuuruse faasist 90° võrra.

Võnkuv lüli. Võnkuv lüli saadakse kahe energiat või mateeriat salvestava mahtuvuse ühendamisel, mis omavahel neid salvestusi vahetavad. Niisuguses süsteemis kutsub tasakaalu rikkumine esile võnkumisi. Salvestatakse potentsiaalset ja kineetilist energiat. Salvestatud energia vahetamise protsessiga kaasub potentsiaalse energia muundumine kineetiliseks ja vastupidi.

Kui võnkumise tulemusena lülis energia tagavara kahaneb, siis võnkumine kustub ja seda lüli nimetatakse stabiilseks võnkuvaks lüliks. Kui aga võnkumise protsessis võnkeamplituud kasvab, siis nimetatakse lüli ebastabiilseks võnkuvaks lüliks.

Võnkuva lüli võrrandi esitasime juba eespool (võrrand 3-36). Vaatleme veel ühe näitena siirdeprotsessi passiivses neljapooluselises elektriahelas, mis koosneb aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistusest (joon. 4-12).



Joon. 4-12. Neljapooluseline võnkuv lüli

Kirchhoffi II seaduse põhjal

$$U_s = Ri + L\frac{di}{dt} + U_C, \tag{a}$$

$$U_v = U_C. \tag{b}$$

Nagu teada, $\frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C}i$, millest $i = C\frac{dU_C}{dt}$. (c)

Diferentseerides võrrandi (*c*), saame:

$$\frac{di}{dt} = C\frac{d^2U_C}{dt^2}. \tag{d}$$

Asetame võrrandid (b), (c) ja (d) võrrandisse (a), saame:

$$U_s = RC\frac{dU_v}{dt} + LC\frac{d^2U_v}{dt^2} + U_v.$$

Tähistades $\sqrt{LC} = T$ ja $\frac{1}{2}R\sqrt{\frac{C}{L}} = \xi$, saame:

$$T^2\frac{d^2U_v}{dt^2} + 2\xi T\frac{dU_v}{dt} + U_v = kU_s, \tag{66}$$

kus üldistuse mõttes on võrrandisse sisse toodud lüli võimendustegur k, mis, nagu eelmistegi lülide puhul, on võrdne sisenemis- ja väljumissuuruse püsimajäänud ($t = \infty$) väärtuste suhtega. Käesoleva näite puhul $k = 1$.

Eespool (3-36) tuletasime tsentrifugaalregulaatori võrrandi

$$(T_r^2p^2 + T_kp + 1)\eta = \varphi.$$

Eeldades, et $\varphi = x_s = U_s$ ja $\eta = x_v = U_v$ ning $T_k = 2\xi T$, saamegi, et võrrandid (66) ja (3-36) on identsed.

Kõik võnkuva lüli omadused ja iseloomustused on määratud kolme parameetriga T, ξ ja k.

Sealjuures T iseloomustab lüli inertsi mõju, põhjustades süsteemi võnkumise suurenemist, ξ iseloomustab katarakti mõju, põhjustades võnkumiste sumbumist, ja k on võimendustegur.

Võrrand (66) on teist järku lineaarne diferentsiaalvõrrand. Tema karaktervõrrandil

$$T^2p^2 + 2\xi Tp + 1 = 0 \tag{67}$$

on lahendid

$$p_{1,2} = -\frac{1}{T}(\xi \pm \sqrt{(\xi^2 - 1)}). \tag{68}$$

Sõltuvalt parameetri ξ suurusest tehakse vahet kolme teist järku aperioodilise lüli liigi vahel.

Kui $\xi > 1$, siis on lahendid reaalsed ning seda lüli nimetatakse teist järku aperioodiliseks lüliks. Seda lüli võib saada kahe esimest

järku aperioodilise lüli järjestikusel ühendamisel. Võrrandi (67) lahendid üldjuhul

$$p_1 = -\frac{1}{T_1} \text{ ja } p_2 = -\frac{1}{T_2}, \tag{69}$$

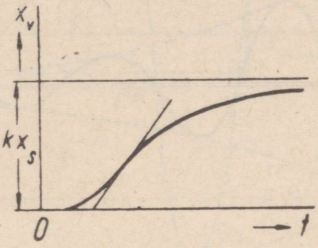
kus

$$T_1 = \frac{T}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}, \quad T_2 = \frac{T}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}},$$

ning lüli siirdeprotsess (joon. 4-13)

$$x_v = kx_s + C_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + C_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \tag{70}$$

on stabiilne. Kõveruste ülemineku kohale tõmmatud puutuja kaldenurk sõltub võrrandi lahendeist, s. t. ajakonstantidest.



Joon. 4-13. Teist järku aperioodilise lüli siirdeprotsessi graafik

Tegurid C_1 ja C_2 määratakse algtingimustest.

Kui $\xi = 1$, siis $p_{1,2} = -\frac{1}{T}$, s. t. lahendid on mõlemad reaalsed ja võrdsed. See on piiriline juht aperioodilise ja võnkuva oleku vahel.

Kui $\xi < 1$, siis on karaktervõrrandi lahendid komplekssed. Seda võib esitada üldkujul järgmiselt:

$$p_1 = -\alpha + j\beta \tag{71}$$
$$p_2 = -\alpha - j\beta, \tag{72}$$

kus $\alpha = \frac{\xi}{T}$ ja $\beta = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}$. (72)

Suurus α iseloomustab võnkumiste sumbumise kiirust ning teda nimetatakse sumbumisteguriks, β on võnkumiste nurksagedus.

Siirdeprotsess, s. t. võrrandi (67) lahend on

$$x_v = kx_s + Ce^{-\alpha t}\sin(\beta t + \varphi). \tag{73}$$

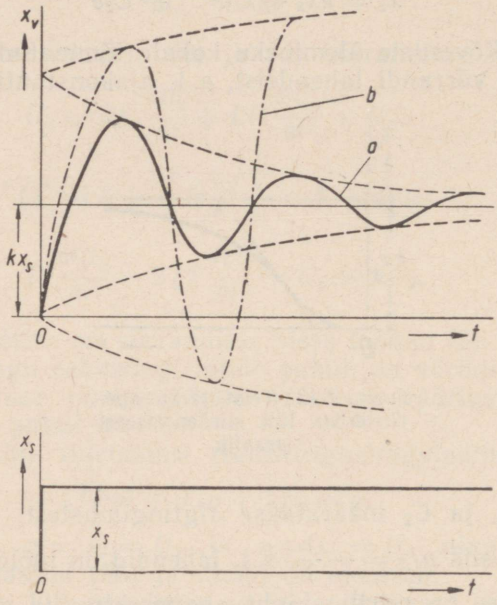
Siin on C ja φ integreerimiskonstandid, mis leitakse algtingimustest.

Nullilistel algtingimustel on integreerimiskonstandid:

$$C = -\frac{\beta_0}{\beta}; \quad \varphi = \operatorname{arc\,tan}\frac{\beta}{\alpha}, \text{ kus } \beta_0 = \frac{1}{T},$$

ning siirdeprotsess (joon. 4-14)

$$x_v = kx_s\left[1 - \frac{\beta_0}{\beta}e^{-\alpha t}\sin\left(\beta t + \operatorname{arc\,tan}\frac{\beta}{\alpha}\right)\right] \tag{74}$$



Joon. 4-14. Võnkuva lüli siirdeprotsess:
a — stabiilne, b — ebastabiilne

on aja jooksul kahaneva amplituudiga võnkumine.

Joonisel 4-14, b on esitatud sisenemissuuruse hüppeline muutus.

Aja lõpmatul kasvamisel ($t \to \infty$) protsess tasakaalustub ning

$$x_v = kx_s. \tag{75}$$

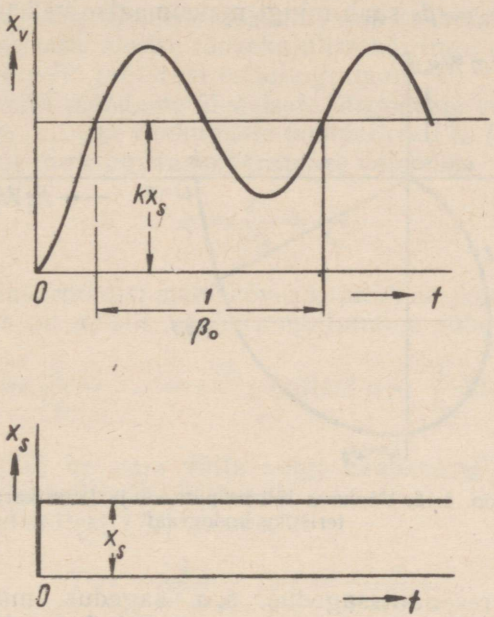
Kui $\xi = 0$, siis ka $\alpha = 0$ ning karaktervõrrandi lahendid on puhtimaginaarsed:

$$p_{1,2} = \pm j\beta, \text{ kus } \beta = \frac{1}{T} = \beta_0. \tag{76}$$

Diferentsiaalvõrrandi üldkuju on sel puhul

$$T^2 \frac{d^2 x_v}{dt^2} + x_v = k x_s. \tag{77}$$

Selle lahendiks on sumbumatud harmoonilised võnkumised, mille sagedus on β_0 ning mille amplituud sõltub esimese tõuke suurusest. Seda sagedust β_0 nimetatakse lüli omavõnkumise sage-



Joon. 4-15. Konservatiivse lüli siirdeprotsess

duseks. Niisugust lüli nimetatakse veel konservatiivseks lüliks (joon. 4-15).

Võnkuva lüli ülekandefunktsioon

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \tag{78}$$

ning karakteroperaator

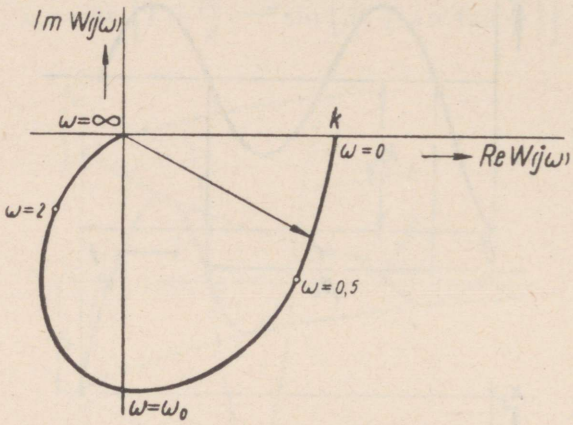
$$S(p) = T^2 p^2 + 2\xi T p + 1. \tag{79}$$

Võnkuva lüli amplituudi ja faasi karakteristik

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 - T^2\omega^2 + j2\xi T\omega} = \frac{k}{\sqrt{(1 - T^2\omega^2)^2 + 4\xi^2 T^2 \omega^2}} \cdot e^{-j \arctan \frac{2\xi T\omega}{1 - T^2\omega^2}} \tag{80}$$

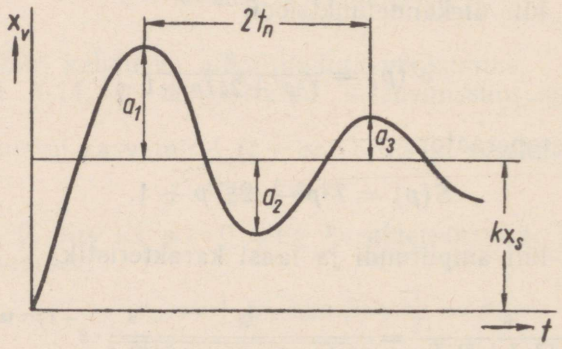
Selle moodul määrab jällegi võnkuva lüli amplituudi sageduskarakteristiku, argument aga faasi sageduskarakteristiku. Amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf on vektori $W(j\omega)$ otsa geomeetriline koht sageduse ω muutmisel nullist kuni lõpmatuseni (joon. 4-16).

Kõvera algus on reaalteljel kaugusega k alguspunktist ($\omega = 0$); ω edasisel suurenemisel $W(j\omega)$ moodul kasvab, kuni ta mingil sagedusel $\omega < \omega_0 = \beta_0$ saab mingi maksimaalse väärtuse. See sage-



Joon. 4-16. Võnkuva lüli amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf

dus on lüli resonantssagedus, s. o. sagedus, mis vastab lüli omasagedusele. Sagedusel $\omega = \omega_0 = \beta_0$ lõikab amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf imaginaartelge. Sellel sagedusel jääb väljumissuurus sisenemissuurusest maha 90°. ω suurenemisel lõpmatuseni läheneb hodograaf koordinaatide alguspunktile. Sagedusel $\omega = \infty$ jääb väljumissuurus sisenemissuurusest maha 180°.



Joon. 4-17. Võnkuva lüli parameetrite määramine

Võnkuvad lülid on näiteks regulaatorite mõõteelemendid, milles võetakse arvesse massi, vedrude elastsust ja hõõrdumist kataraktis, võnkering, mis sisaldab induktiiv-, mahtuvus- ja aktiivtakistust, diferentseeriv güroskoop, milles võetakse arvesse inertsimomenti pretsessioonitelje suhtes jt.

Võnkuva lüli parameetreid T, ξ ja k on võimalik määrata reaalsel objektil ka eksperimentaalselt. Selleks

1) ootame, kuni süsteem tasakaalustub (rahuneb),
2) anname talle äkilise tõukekujulise häiringu ning
3) võtame selle protsessi ostsillogrammi.

Ostsillogrammilt mõõdame üksteisele järgnevate võnkumiste amplituudid a_1, a_2 ..... ja võnkumiste poolperioodi t_n (joon. 4-17).

Võnkumiste nurksagedus määratakse valemist

$$\omega = \frac{2\pi}{2t_n} = \frac{\pi}{t_n}. \tag{81}$$

Et võnkumisprotsessi mähiskõver kujutab eksponenti, mille sumbumisteguriks on α, siis naaberamplituudide suhe

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{a_2}{a_3} = \ldots = e^{\alpha t_n}, \text{ millest } \alpha = \frac{1}{t_n} \ln \frac{a_i}{a_{i-1}}. \tag{82}$$

Valemis (46) on vaja võtta kõigi naaberamplituudide suhete keskmised aritmeetilised väärtused.

Lõpuks valemitest (72) saame, et

$$T = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 + \alpha^2}} \text{ ja } \xi = \frac{\alpha}{\sqrt{\omega^2 + \alpha^2}}. \tag{83}$$

Integreeriv (astaatiline, neutraalne) lüli. Lüli nimetatakse integreerivaks, kui väljumissuurus on võrdeline integraaliga sisenemissuurusest aja järgi, s. t.

$$x_v = k \int_0^t x_s \mathrm{d}t \tag{84}$$

ehk, mis on sama, kui väljumissuuruse muutumise kiirus on võrdeline sisenemissuurusega, s. o.

$$\frac{\mathrm{d}x_v}{\mathrm{d}t} = kx_s. \tag{85}$$

Niisugused lülid on näiteks elektrimootorid, mille pöörlemise nurkkiirus ω on võrdeline ankru ahela pingega, s. t. $\omega = kU$ ehk, väljendades võlli pöördenurga järgi,

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = kU, \tag{86}$$

kus

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Samuti on integreerivateks lülideks isereguleerimiseta masinad, hüdraulilised teenurid, elektriarvestid, veereservuaarid, kus sisenemissuuruseks on vee hulk, väljumissuuruseks aga nivoo, integreeriv *RC*-võnkering jm.

Üldkujul on integreeriva lüli võrrand (vt. võrrand 3-41), eeldades, et $k = \frac{1}{T_s}$ ($\mu = x_v$ ja $\sigma = x_s$)

$$px_v = kx_s, \tag{87}$$

mis on ka võrrandi (86) teisend.

Eeldades, et $\varphi = x_v$ ja $U = x_s$, saame võrrandite (86) ja (87) integreerimisel:

$$x_v = k\int_0^t x_s dt. \tag{88}$$

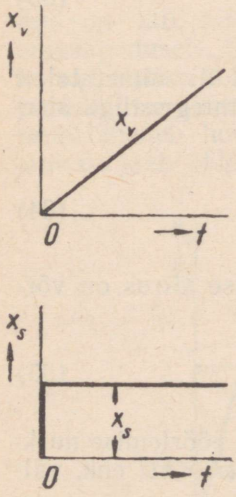
Kui $x_s = \text{const}$, siis saame võrrandi, mis iseloomustab siirdeprotsessi:

$$x_v = kx_s t. \tag{89}$$

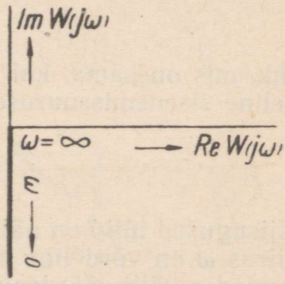
Kui $x_s = 1$, siis $x_v = kt$ (joon. 4-18).

Võrrand (89) näitab, et kui sisendisse antakse konstantne häiring, kasvab väljumissuurus lineaarselt.

Erinevalt aperioodilisest või võnkuvast lülist ei saa seepärast integreeriva lüli puhul rääkida kindlast püsimajäänud väljumis- ja sisenemissuuruse suhtest.



Joon. 4-18. Integreeriva lüli siirdeprotsessi graafik



Joon. 4-19. Integreeriva lüli amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf

Siin kehtib kindel vahekord ainult sisenemissuuruse ja väljumissuuruse muutumise kiiruse vahel. Seda iseloomustab ainult üks tegur — k.

Integreeriva lüli ülekandefunktsiooni saame võrrandeist (86) ja (87):

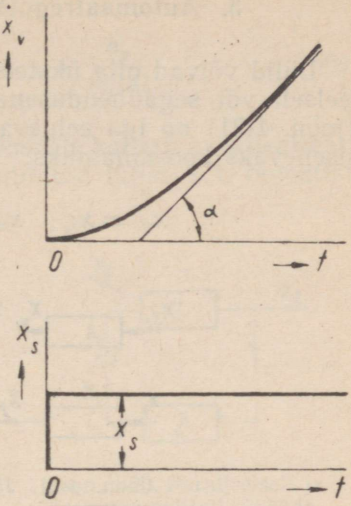
$$W(p) = \frac{x_v}{x_s} = \frac{k}{p}. \qquad (90)$$

Integreeriva lüli karakteroperaator taandub suurusele p:

$$S(p) = p.$$

Integreeriva lüli amplituudi ja faasi karakteristiku saame võrrandist (90), asendades $p = j\omega$.

$$W(j\omega) = \frac{k}{j\omega} = \frac{k}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}}, \qquad (91)$$



Joon. 4-20. Inertse integreeriva lüli siirdeprotsessi graafik

mille moodul $H(j\omega) = \frac{k}{\omega}$ ja argument $\varphi = \text{arc tan}(-\infty)$, s. t. ω muutumisel nullist kuni lõpmatuseni liigub vektori $W(j\omega)$ (joon. 4-19) ots imaginaartelje negatiivsel osal $-\infty$-st kuni 0-ni. Integreeriv lüli tekitab väljumissuuruse mahajäämise sisenevast suurusest igal sagedusel 90°. Väljumissuuruse amplituud on seda väiksem, mida suurem on sagedus.

Täienduseks olgu mainitud, et eespool nimetatud ideaalse integreeriva lüli eriliigi moodustab inertne integreeriv lüli, mis ei kuulu küll tüüplülide hulka. Ta esineb väga sageli reaalsete objektide juures juhtudel, kui võtame arvesse liikuvate osade inertsi. Näiteks ülaltoodud elektrimootori võrrand on siis (86) asemel

$$T\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = kU \qquad (92)$$

ehk

$$(Tp^2 + p)x_v = kx_s, \qquad (93)$$

mille siirdeprotsessi iseloomustav võrrand (joon. 4-20)

$$x_v = kx_s t - kx_s T\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \qquad (94)$$

Siin sirge tõusunurga α tangens

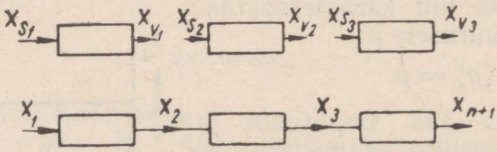
$$\tan\alpha = kx_s.$$

Diferentseeriv lüli. Diferentseeriv lüli esineb iseseisvana harva. Teda kasutatakse koos teiste lülidega. Temast räägime allpool.

3. Automaatreguleerimissüsteemide koostamine

Lülid võivad olla üksteisega ühendatud kas järjestikku, paralleelselt või segaühendusena. Lülide järjestikuse ühenduse puhul (joon. 4-21) on iga eelneva lüli väljumiskoordinaat järgmise lüli sisenevaks koordinaadiks:

$$x_{v_1} = x_{s_2}; \quad x_{v_2} = x_{s_3} \ldots x_{v_{n-1}} = x_{s_n}.$$



Joon. 4-21. Järjestikku ühendatud lülid

Näiteks reguleerimissüsteem — kiirusregulaator-tüürkolb-hüdrauliline teenur — koosneb kolmest järjestikku ühendatud lülist. Kui iga lüli ülekandefunktsioon on

$$W_1(p) = \frac{k_1}{n_1(p)}; \quad W_2(p) = \frac{k_2}{n_2(p)} \ldots W_n(p) = \frac{k_n}{n_n(p)},$$

siis on järjestikku ühendatud suunalise toimega lülide avatud ahela ülekandefunktsioon

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \ldots . W_n(p). \qquad (95)$$

Suunalise toimega lülid on ühendatud paralleelselt, kui ühendatavate lülide sisenemissuuruseks on üks ja sama suurus ning väljumissuurused summeeruvad (joon. 4-22).

Kui üksikute lülide ülekandefunktsioonid on

$$W_1(p) = \frac{k_1}{n_1(p)}$$

$$W_2(p) = \frac{k_2}{n_2(p)}$$

. . . . . .

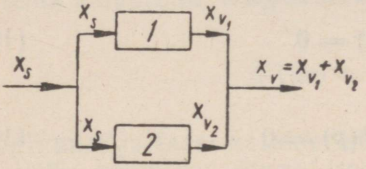
. . . . . .

$$W_n(p) = \frac{k_n}{n_n(p)},$$

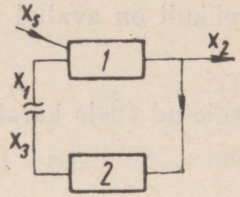
siis süsteemi ülekandefunktsioon

$$W(p) = \frac{k_1}{n_1(p)} + \frac{k_2}{n_2(p)} + \ldots + \frac{k_n}{n_n(p)}. \qquad (96)$$

Oletame, et reguleerimissüsteem koosneb kahest paralleelsest, kuid teineteisega vastassuunaliselt ühendatud lülist, s. t. objektist *1* ja regulaatorist *2* (joon. 4-23).



Joon. 4-22. Paralleelselt ühendatud lülid



Joon. 4-23. Paralleelselt ja vastassuunaliselt ühendatud lülid

Olgu mõlema lüli ülekandefunktsioonid vastavalt $W_1(p)$ ja $W_2(p)$. Objektile mõjub väljastpoolt häiring x_s. Reguleeritavaks suuruseks on $x_2 = x_v$. Katkestame ahela näiteks enne objekti *1*. Avatud ahela järjestikku ühendatud lülide süsteemi ülekandefunktsioon on

$$W(p) = W_1(p)\,W_2(p). \qquad (97)$$

Avatud ahelas on x_3 ja x_s omavahel seotud:

$$x_3 = W(p)\,x_s. \qquad (98)$$

Suletud ahelas on objekti sisenevaks häiringuks x_s ja x_3 vahe. Seepärast saame:

$$x_2 = W_1(p)\,(x_s - x_3)$$

ja

$$x_3 = W_2(p)\,x_2.$$

Elimineerime x_3, siis saame:

$$x_2 = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)\,W_2(p)}\,x_s \text{ või } W_s(p) = \frac{x_2}{x_s} = \frac{W_1(p)}{1 + W(p)},$$

kus $W_s(p)$ — suletud süsteemi ülekandefunktsioon.

Eeldusel, et $x_s = 0$, on suletud ahela vabavõnkumise võrrand

$$[1 + W(p)]\,x_2 = 0, \qquad (99)$$

mille karaktervõrrand on $1 + W(p) = 0$. (100)

Olgu avatud ahela ülekandefunktsioon murd

$$W(p) = \frac{M(p)}{N(p)},$$

kus $M(p)$ ja $N(p)$ on polünoomid suurusest p.

Siis on suletud ahela ülekandefunktsioon

$$W_s(p) = 1 + W(p) = \frac{M(p)+N(p)}{N(p)}. \tag{101}$$

Järelikult on avatud ahela karaktervõrrand

$$N(p) = 0 \tag{102}$$

ja suletud ahela karaktervõrrand

$$M(p) + N(p) = 0. \tag{103}$$

Seega võib kahest lülist koosnevat suletud ahelat vaadelda ka kui nende omavahelist paralleelset, kuid vastassuunalist ühendust.

Segalülitus tehakse gruppide viisi, kus iga ühenduse juures jääb kehtima ülaltoodud reegel ja kogu ahela ülekandefunktsiooni määrab nende üksikute gruppide ühendamisviis.

Kui lülile lisatakse teine lüli paralleelselt juurde, saadakse lõppkokkuvõttes uute dünaamiliste omadustega lüli. Abilülisid, mis liidetakse pealülidele nende dünaamiliste omaduste parendamiseks, nimetatakse stabiliseerivateks lülideks.

Lülide omavaheline ühendamine võib toimuda kas otseselt või mitmesuguste ülekannete kaudu.

Nii kasutatakse jõudude ja asendimuutuste üleandmiseks kange, vedrusid, kinemaatilisi seadmeid jm.; elektrisignaalide edasiandmiseks kasutatakse juhtmeid, transformaatoreid jne.; hüdraulilisi ja pneumaatilisi signaale antakse edasi torustiku kaudu jm.

Sidestusi automaatreguleerimissüsteemis toimivate häiringute toime suunas eelmise lüli väljumissuuruse ja järgmise lüli sisenemissuuruse vahel võib jagada staatilisteks, kiiruslikeks ja nende kombinatsioonideks.

Staatiline sidestus on niisugune sidestus lülide vahel, mis annab igal hetkel siseneva ja väljuva suuruse suhte kindla muutuse. Sellele tingimusele vastab esimesena vaadeldud elementaarne tüüplüli — proportsionaalne lüli.

Kiiruslik sidestus on niisugune sidestus, milles väljumissuurus on võrdeline sisenemissuuruse muutumise kiirusega (sisenemissuuruse esimese tuletisega aja järgi):

$$x_v = k \frac{\mathrm{d}x_s}{\mathrm{d}t}. \tag{104}$$

Süsteemides teostatakse lülidevahelist kiiruslikku sidestust mitmesuguste diferentseerivate lülide abil. Sisenemissuuruse hüp-

pelisel muutumisel saame väljundis silmapilkse impulsi lõpmatu suure amplituudiga, mis vastab sisenemissuuruse lõpmatu suurele muutumise kiirusele häiringulise tõuke hetkel. Ideaalse diferentseeriva lüli (resp. kiirusliku sidestuse) ülekandefunktsioon on impulssfunktsioon (deltafunktsioon) (joon. 4-24).

Ideaalse diferentseeriva lüli ülekandefunktsioon on

$$W(p) = kp \tag{105}$$

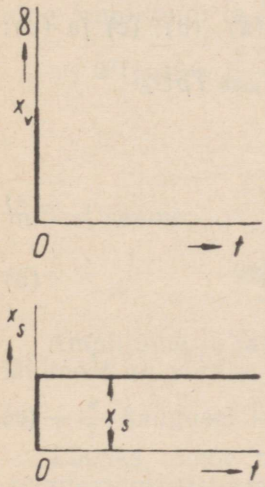
ja tema amplituudi ning faasi karakteristik

$$W(j\omega) = kj\omega = k\omega e^{j\frac{\pi}{2}}. \tag{106}$$

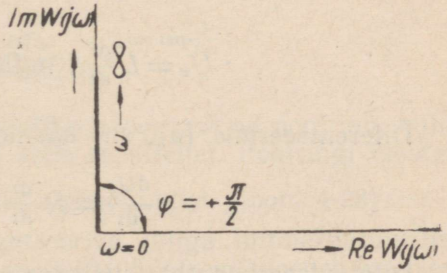
Amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf langeb kokku imaginaartelje positiivse osaga (joon. 4-25).

Ideaalne diferentseeriv lüli tekitab kõikide sageduste puhul väljumissuuruse ettetõttamise sisenemissuurusest 90° võrra. Väljumissuuruse amplituud on seda suurem, mida suurem on sagedus. Kui diferentseeriva lüli mõju suund ühtib tema järeloleva lüli mõjumissuunaga, nimetatakse teda mõjuks tuletise järgi (positiivseks tagasisideks), kui aga mitte, siis kiiruslikuks tagasisideks (negatiivseks tagasisideks). Diferentseerivat lüli kasutatakse väga tihti reguleerimisprotsessi kvaliteedi parendamiseks.

Praktikas on ideaalse diferentseeriva lüli realiseerimine võimatu. Seda võib teostada ainult enam või vähem ligikaudselt. Näiteks võib valmistada juba eespool kirjeldatud lameda kiirusliku regulaatori või elastse tagasisideseadme isodroomi näol. Veel võiks näidetena nimetada transformaatorit, passiivset neljapooluselist elektriahelat, mis koosneb mahtuvus- ja



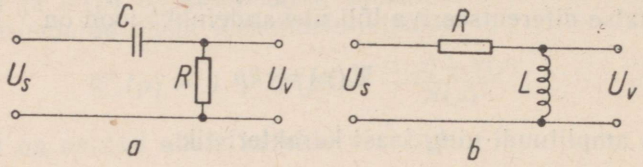
Joon. 4-24. Ideaalse diferentseeriva lüli siirdeprotsessi graafik



Joon. 4-25. Ideaalse diferentseeriva lüli amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf

aktiivtakistusest või aktiiv- ja induktiivtakistusest (joon. 4-26).

Tuletame passiivse neljapooluselise elektriahela, mis koosneb mahtuvus- ja aktiivtakistusest (joon. 4-26, *a*) ning aktiiv- ja induktiivtakistusest (joon. 4-26, *b*).



Joon. 4-26. Diferentseerivad neljapooluselised elektriahelad

Kasutame jällegi Kirchhoffi II seadust. Esimesel juhul saame (joon. 4-26, *a*):

$$U_s = U_C + Ri, \tag{a}$$

$$U_v = Ri, \text{ millest } i = \frac{U_v}{R}. \tag{b}$$

Diferentseerime (a), saame:

$$\frac{dU_s}{dt} = \frac{dU_C}{dt} + R\frac{di}{dt}. \tag{c}$$

Kuid

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C}i, \text{ seega } \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C}\frac{U_v}{R} + \frac{dU_v}{dt}. \tag{d}$$

Tähistame $CR = T$, siis saame võrrandist (a), (b), (c) ja (d):

$$TpU_s = U_v + TpU_v \text{ ehk } (Tp + 1)U_v = TpU_s.$$

Teisel juhul saame (joon. 4-26, *b*):

$$U_s = Ri + L, \tag{a}$$

$$U_v = L\frac{di}{dt}, \text{ millest } \frac{di}{dt} = \frac{U_v}{L} \tag{b}$$

Diferentseerime (a), siis saame:

$$\frac{dU_s}{dt} = R\frac{di}{dt} + L\frac{d^2i}{dt^2}. \tag{c}$$

Diferentseerime (b), siis saame:

$$\frac{d^2i}{dt^2} = \frac{dU_v}{L}. \tag{d}$$

Lahendades koos võrrandid (a), (b), (c) ja (d), saame

$$\frac{dU_s}{dt} = R\frac{U_v}{L} + \frac{dU_v}{dt}.$$

Et $\frac{R}{L} = \frac{1}{T}$, siis järelikult

$$(Tp + 1)U_v = TpU_s.$$

Neis võrrandeis võimendustegur $k = 1$.
Kõigil neil diferentsiaalvõrrandeil on sama kuju, nimelt:

$$(Tp + 1)x_v = kTpx_s, \tag{107}$$

kus $x_v = U_v$ ja $x_s = U_s$.

Võrrandist (107) on näha, et kui $T \to 0$, kuid korrutise kT väärtus on lõplik ($T \neq 0$), läheneb ta võrrandile (104), s. o. ideaalse diferentseeriva lüli võrrandile seda rohkem, mida väiksem on T. Ent väikese ajakonstandi puhul on vaja suurendada võimendustegurit k. Selleks on vaja skeemis ette näha inertsita võimendeid, eriti kui soovitakse diferentseerida küllalt täpselt.

Reaalse diferentseeriva lüli siirdeprotsessi võrrand saadakse võrrandi (107) integreerimisel. Joonisel 27 on toodud selle graafik nulliliste algtingimuste puhul, kui lüli sisendisse on antud tõukekujuline häiring (joon. 4-27).

Reaalse diferentseeriva lüli ülekandefunktsioon on

$$W(p) = \frac{kTp}{Tp+1} \tag{108}$$

ning amplituudi ja faasi karakteristik

$$W(j\omega) = \frac{kTj\omega}{Tj\omega+1} = \frac{kTj\omega(-Tj\omega+1)}{T^2\omega^2+1} = \frac{kT^2\omega^2 + jkT\omega}{T^2\omega^2+1} =$$

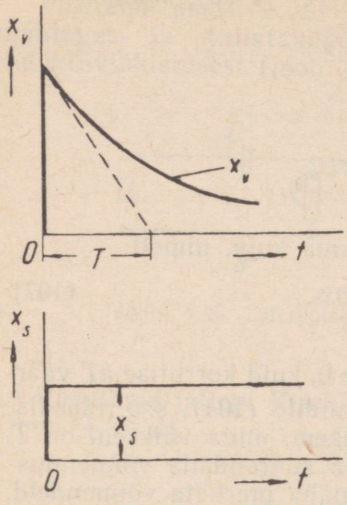
$$= \frac{kT^2\omega^2}{T^2\omega^2+1} + j\frac{kT\omega}{T^2\omega^2+1}, \tag{109}$$

millest saame:

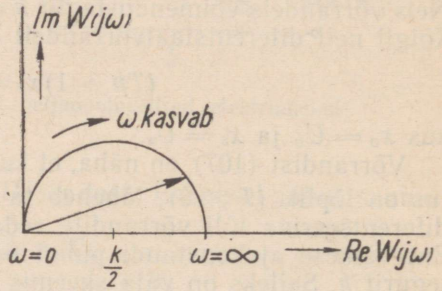
$$W(j\omega) = \frac{kT\omega}{\sqrt{T^2\omega^2+1}} e^{j \arctan \frac{1}{T\omega}}.$$

Amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf on poolring, mille läbimõõt on võrdne k-ga, ning asub reaalteljel. Poolringi tsenter on $+\frac{k}{2}$ kaugusel koordinaatide alguspunktist (joon. 4-28).

Lõpuks toome näite diferentseeriva lüliga mitmekontuurilise reguleerimissüsteemi kohta (joon. 3-10). Süsteem koosneb inertsest reguleerimisobjektist (turbiin või masin), võnkuvast lülist (tsentrifugaalregulaator), võimendavast lülist (tüürkolb), integreerivast lülist (hüdrauliline täitur) ja võimendavast lülist (reguleeri-

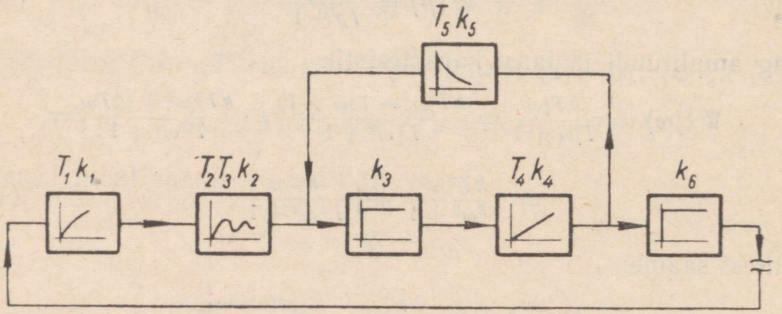


Joon. 4-27. Reaalse diferentseeriva lüli siirdeprotsessi graafik



Joon. 4-28. Reaalse diferentseeriva lüli amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf

misorgan). Kaks eelviimast lüli on haaratud inertse elastse tagasisidega, mis on diferentseerivaks lüliks. Niisuguse süsteemi struktuurskeem on toodud joonisel 4-29. Igale lülile on märgitud siir-



Joon. 4-29. Diferentseeriva lüliga reguleerimissüsteemi struktuurskeem

deprotsessi iseloom, mis temas tekib tõukekujulise häiringu puhul. Selle süsteemi avatud oleku ülekandefunktsioon on

$$W(p) = W_1(p)\,W_2(p)\left[\frac{W_3(p)\,W_4(p)}{1+W_3(p)\,W_4(p)\,W_5(p)}\right]W_6(p) =$$

$$= \frac{k_1}{T_1 p+1}\cdot\frac{k_2}{T_2^2 p^2+T_3 p+1}\left[\frac{k_3\dfrac{k_4}{T_4 p}}{1+k_3\dfrac{k_4}{T_4 p}\cdot\dfrac{k_5 T_5 p}{T_5 p+1}}\right]\cdot k_6 =$$

$$= \frac{k_1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{k_2 k_6}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1} \cdot \frac{k_3 k_4 (T_5 p + 1)}{T_4 p (T_5 p + 1) + k_3 k_4 k_5 T_5 p}.$$

Suletud oleku ülekandefunktsioon on seega

$$W_s(p) = (T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + T_3 p + 1)[T_4 p (T_5 p + 1) + \\ + k_3 k_4 k_5 T_5 p] + k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 (T_5 p + 1).$$

Lõpetame peatüki näitega automaatreguleerimissüsteemi võrrandi lahendamise kohta operaatorimeetodil.

Olgu meil eespoolnimetatud reguleerimissüsteem, mis koosneb objektist, ideaalsest tajurist (tsentrifugaalregulaator, mille tajuri massi ja hõõrdumist arvesse ei võeta) ja inertse elastse tagasisidega hüdraulilisest teenurist (joon. 3-10):

$$T_a \dot{\varphi} + k_s \varphi = -\mu + \lambda \quad \text{— objekti võrrand,}$$
$$\delta \eta = \varphi \quad \text{— tajuri võrrand,}$$
$$T_i \dot{\xi} + \xi = k_i T_i \dot{\mu} \quad \text{— isodroomi võrrand,}$$
$$T_s \dot{\mu} = \eta - \xi \quad \text{— teenuri võrrand.}$$

Süsteem koosneb neljast võrrandist viie tundmatuga, s. t. ta on lahendatav ühe tundmatu suhtes. Lahendame ta koormuse muutuse λ suhtes. Väljumissuuruseks on parameetri suhteline muutus φ, mis tekib koormuse muutuse λ tagajärjel. Pärast mõningaid elementaarseid tehteid, kui oleme asendanud ja elimineerinud ühe tundmatu, saame 3 võrrandit:

$$(T_a p + k_s)\varphi + \mu = \lambda$$
$$(T_i p + 1)\xi - k_i T_i p \mu = 0$$
$$T_s p \mu - \frac{1}{\delta}\varphi + \xi = 0.$$

Kasutame $\varphi(p)$ leidmiseks Crameri valemit

$$\varphi(\mathrm{p}) = \frac{\Delta\varphi}{\Delta},$$

kus Δ — süsteemi determinant,

$\Delta\varphi$ — determinant, kus püstrida, mis vastab φ-le, on asendatud võrrandite paremate pooltega, s. o.

$$\Delta = \begin{vmatrix} \varphi & \mu & \xi \\ T_a p + k_s & 1 & 0 \\ 0 & -k_i T_i p & T_i p + 1 \\ -\frac{1}{\delta} & T_s p & 1 \end{vmatrix}$$

ja

$$\Delta\varphi = \begin{vmatrix} \lambda & 1 & 0 \\ 0 & -k_i T_i p & T_i p + 1 \\ 0 & T_s p & 1 \end{vmatrix}$$

Olgu toodud suurustel järgmised arvulised väärtused:

$$T_a = 2 \text{ min}; \quad T_s = 1 \text{ min}; \quad \delta = 0{,}05;$$

$$k_s = 3; \quad T_i = 0{,}5 \text{ min}; \quad k_i = 1.$$

Süsteemi karaktervõrrandi leiame, lahendades determinandi

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2p + 3 & 1 & 0 \\ 0 & -0{,}5p & 0{,}5p + 1 \\ -20 & p & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Siit saame:

$$-(2p + 3)0{,}5p - 20(0{,}5p + 1) - p(0{,}5p + 1)(2p + 3) = 0.$$

Pärast sulgude avamist ning teisendust

$$-p^3 - 4{,}5p^2 - 14{,}5p - 20 = 0.$$

$$\Delta\varphi = \begin{vmatrix} \lambda & 1 & 0 \\ 0 & -0{,}5p & 0{,}5p + 1 \\ 0 & p & 1 \end{vmatrix} = \lambda \begin{vmatrix} -0{,}5p & 0{,}5p + 1 \\ p & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= -\lambda(0{,}5p^2 + 1{,}5p).$$

Seega saame, et otsitava suuruse φ kujutis on nullilistel algtingimustel

$$\varphi(p) = \lambda \frac{0{,}5p^2 + 1{,}5p}{p^3 + 4{,}5p^2 + 14{,}5p + 20}.$$

Saadud kujutise järgi originaali leidmiseks kasutame eespool toodud teoreemi (vt. p. 1) võttes arvesse, et konstandi λ originaal võrdub ta kujutisega. Tähistame

$M(p) = 0{,}5p^2 + 1{,}5p$ ja $N(p) = p^3 + 4{,}5p^2 + 14{,}5p + 20$.

Siis originaal

$$\varphi(t) = \lambda \sum_{k=1}^{n} \frac{M(p_k)}{N'(p_k)},$$

kus p_k — süsteemi karaktervõrrandi $N(p) = 0$, s. o. determinandi Δ lahendamisel saadud võrrandi lahendid.

Lähendamismeetodit kasutades leiame, et need lahendid on

$$p_1 = -2{,}12; \quad p_2 = -1{,}19 - \mathrm{j}2{,}84 \quad \text{ja}$$

$$p_3 = -1{,}19 + \mathrm{j}2{,}84.$$

Kasutades valemit (20) leiame, et otsitavad tegurid on

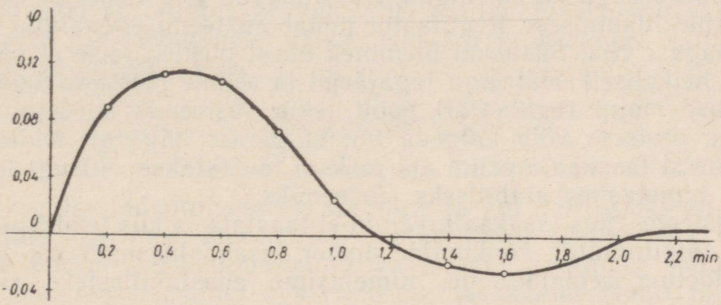
$$A_1 = 0{,}049; \quad A_2 = -0{,}0245 - \mathrm{j}0{,}096 \quad \text{ja}$$

$$A_3 = -0{,}245 + \mathrm{j}0{,}096.$$

Kui $\lambda = 1$, on otsitav siirdeprotsess

$$\varphi(t) = 0{,}049e^{-2{,}12t} - e^{-1{,}19t}\,(0{,}0488 \cos 2{,}84t - 0{,}192 \sin 2{,}84t),$$

mille graafik on toodud joonisel 4-30.



Joon. 4-30. Siirdeprotsessi graafik

V. LINEAARSETE DÜNAAMILISTE SÜSTEEMIDE STABIILSUS

1. Üldised mõisted ja tingimused

Regulaatori poolt juhitud dünaamilisele süsteemile mõjuvad väga mitmesugused häiringud, mis püüavad viia süsteemi kõrvale etteantud liikumisest. Regulaator püüab süsteemi ettenähtud režiimile tagasi viia. Süsteemi üleminek ühest olekust teise ei või toimuda hetkeliselt. Häiringu tagajärjel ja sellele järgneva taastava tegevuse mõjul regulaatori poolt tekib süsteemis siirdeprotsess. See protsess võib kulgeda nii, et pärast häiringu tekitamise lõpetamist tasakaalurežiim aja jooksul taastatakse. Niisugust süsteemi nimetasime stabiilseks süsteemiks.

Süsteeme, kus tasakaalurežiimi ei taastata ja kus tekib kas kasvava amplituudiga võnkumine ümber tasakaaluasendi või sellest monotoonne eemaldumine, nimetasime ebastabiilseteks süsteemideks.

Automaatreguleerimissüsteemide väljatöötamisel võivad tekkida järgmised stabiilsuse uurimisega seotud ülesanded.

1. On vaja määrata, kas antud struktuuriga ja parameetritega süsteem on stabiilne või mitte. Süsteemi elementide parameetrid võivad töötamise ajal muutuda antud piirides. Arvutus peab näitama, kas see muutumine mõjub süsteemi kui terviku stabiilsusele või mitte.

2. On vaja määrata, kas süsteemi tasakaalu saab garanteerida regulaatorite justeerimisega piirides, mis on ette nähtud nende regulaatorite konstruktsiooniga.

3. On vaja leida süsteemi parameetrite väärtuste piirkond, millele vastab reguleerimisprotsessi stabiilne seisund. See arvutus aitab selgitada, missugustes piirides võib süsteemi kindlaksmääratud parameetreid varieerida vajalike omaduste, nagu staatilise täpsuse, reguleerimiskiiruse jne. tagamiseks, mitte rikkudes süsteemi stabiilsust.

Nende ülesannete lahendamine automaatreguleerimissüsteemide puhul, mis üldiselt on ebalineaarsed ning sisaldavad palju nii koondatud kui ka hajutatud parameetritega elemente, on kül-

lalt raske. Seepärast tuleb neid ülesandeid tunduvalt lihtsustada, kusjuures see lihtsustus ei tohi aga oluliselt muuta lahenduse resultaati. Põhilisemateks lihtsustusteks on süsteemi elementide lineariseerimine, oletus elementide koordinaatide äkilise (hüppelise) muutuse kohta ning oletus, et siirdeprotsess toimub vaadeldavas lülis (võrreldes süsteemi teiste lülidega) küllalt kiiresti. Niisuguse idealiseerimise tulemusena õnnestub automaatreguleerimissüsteemide liikumisi enamasti kirjeldada harilike lineaarsete diferentsiaalvõrranditega, millede koostamise metoodikat kirjeldasime eespool.

Tekib küsimus, kas saavutatavad tulemused kehtivad ka reaalsete süsteemide kohta. Oma töös «Liikumise stabiilsuse üldine ülesanne», mis ilmus 1892. a., näitas A. M. Ljapunov, et süsteemi stabiilsuse ülesande lahendamisel on küllaldane kasutada täpsete võrrandite asemel lineariseeritud võrrandeid.

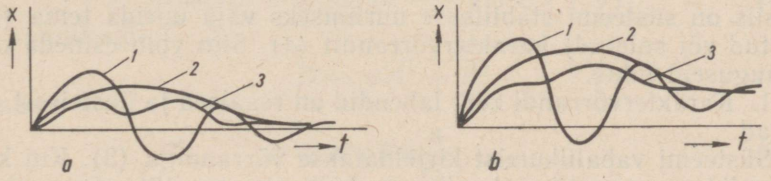
Stabiilsuse tingimuse analüütilise avaldise järgi peetakse süsteemi stabiilseks, kui häiringu tagajärjel tekkinud reguleeritava parameetri absoluutne kõrvalekalle nominaalväärtusest jääb küllalt pika aja möödumisel väiksemaks varem etteantud küllalt väikesest suurusest ε, s. o.

$$\lim_{t \to \infty} [\Delta x(t)] \leqslant \varepsilon.$$

Kui reguleerimisprotsess on stabiilne ja kui häiringuks on tõukekujuline koormuse muutus, siis astaatilistes süsteemides taastatakse endine tasakaaluseisund vaatamata koormuse muutusele, staatilistes süsteemides aga tekib uus tasakaaluseisund, mis seda rohkem erineb vanast, mida suurem oli koormuse muutus. Sagedamini esinevad protsessid on toodud joonisel 5-1.

Töös «Otsese toimega regulaatoritest» (1876. a.) ja teistes hilisemates töödes tõestas Võšnegradski, et reguleerimine võib olla ebastabiilne, kuigi kõik elemendid iseseisvalt on stabiilsed, ja vastupidi, võib teha stabiilseid reguleerimissüsteeme ebastabiilseist elementidest.

Stabiilsuse definitsioonist järeldub, et viimane iseloomustub süsteemi vabaliikumisega pärast tõukelise häiringu tekitamise



Joon. 5-1. Astaatiliste (*a*) ja staatiliste (*b*) reguleerimissüsteemide siirdeprotsessid:
1 — võnkuv, *2* — monotoonne, *3* — võnkuv-monotoonne

lõppu (s. t. häiring tekib ning jääb siis konstantseks). See aga tähendab, et süsteemi diferentsiaalvõrrandis võrdub võrrandi parem pool nulliga. Järelikult on süsteemi stabiilsuse uurimiseks vaja vaadelda võrrandist (1), mis kirjeldab üldkujul lineaarset automaatreguleerimissüsteemi, tema vasakut poolt:

$$a_0 \frac{d^n x_v}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_v}{dt^{n-1}} + \ldots + a_{n-1} \frac{dx_v}{dt} + a_n x_v = \tag{1}$$
$$= b_0 \frac{d^m x_s}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x_s}{dt^{m-1}} + \ldots + b_{m-1} \frac{dx_s}{dt} + b_m x_v,$$

kus x_v — reguleeritava parameetri kõrvalekalle nominaalväärtusest,
x_s — häiring,
$a_0, a_1 \ldots a_n$ ja $b_0, b_1 \ldots b_m$ — konstantsed tegurid, millede arvulise väärtuse määravad süsteemi elementide parameetrid.

Süsteemi vabavõnkumine määratakse seega homogeense võrrandiga

$$a_0 \frac{d^n x_v}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_v}{dt^{n-1}} + \ldots + a_{n-1} \frac{dx_v}{dt} + a_n x_v = 0, \tag{2}$$

mille lahendiks on

$$x_v = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + \ldots + C_n e^{p_n t}, \tag{3}$$

kus $C_1, C_2 \ldots C_n$ — integreerimiskonstandid, mis määratakse algtingimustest,
$p_1, p_2 \ldots p_n$ — karaktervõrrandi

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \ldots + a_{n-1} p + a_n = 0 \tag{4}$$

lahendid.

Karaktervõrrandi lahendid ei sõltu ei häiringu iseloomust ega ka algtingimustest, vaid ainult tegureist $a_0, a_1 \ldots a_n$, s. t. ainult süsteemi parameetritest.

Vabaliikumise iseloomu (3) määravad lahendid $p_1, p_2 \ldots p_n$. Niisiis on süsteemi stabiilsuse uurimiseks vaja uurida tema (kas avatud või suletud) karaktervõrrandit (4). Siin võib esineda mitmesuguseid juhte.

1. Karaktervõrrandi kõik lahendid on reaalsed ja üksteisest erinevad.

Süsteemi vabaliikumist kirjeldatakse võrrandiga (3). Kui kõik lahendid on negatiivsed, siis on kõik summa (3) eksponendid kahanevad ning järelikult püüab kogu protsess aja jooksul aperioodiliselt läheneda nullile.

Kui aga kas või ükski karaktervõrrandi lahendeist on posi-

tiivne, s. t. $p_k > 0$, siis on liige $C_k e^{p_k t}$ kasvav eksponent ja kogu protsess, kuigi teised lahendid lähenevad nullile, on kasvav, s. t. süsteem on ebastabiilne.

Konstandid C_1, $C_2 \ldots C_n$ peavad olema valitud nii, et nad on kooskõlas algtingimustega, s. t. x_v, $\frac{dx_v}{dt} \ldots$ jne. väärtustega siirdeprotsessi algul, s. o. hetkel $t = 0$.

Kui me aga uurime ainult stabiilsust, siis sel juhul ei oma konstandid C_1, $C_2 \ldots C_n$ mingit tähtsust.

2. Karaktervõrrandil on imaginaarlahendite paar

$$p_{i,\ i+1} = \pm j\beta, \tag{5}$$

teised on aga reaalsed ja negatiivsed. Sel juhul väljendatakse summa (3) ülejäänud $n - 2$ liiget eksponendina, mille kuju on $C_k e^{p_k t}$, kuid imaginaarsete lahendite paarile vastab kaks liiget

$$C_i e^{j\beta t} \text{ ja } C_{i+1} e^{-j\beta t}. \tag{6}$$

Euleri valemit kasutades saame:

$$\begin{aligned} e^{j\beta t} &= \cos \beta t + j \sin \beta t \quad \text{ja} \\ e^{-j\beta t} &= \cos \beta t - j \sin \beta t. \end{aligned} \tag{7}$$

Järelikult

$$C_i e^{j\beta t} + C_{i+1} e^{-j\beta t} = (C_i + C_{i+1}) \cos \beta t + j(C_i - C_{i+1}) \sin \beta t. \tag{8}$$

Konstandid C_i ja C_{i+1} on kaaskompleksarvud, seepärast on tegurid

$$C_i + C_{i+1} = A \text{ ja } j(C_i - C_{i+1}) = B \tag{9}$$

reaalarvud.

Võrrandi (3) võime sel juhul esitada kujul

$$x_v = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + \ldots + (A \cos \beta t + B \sin \beta t) + \ldots + C_n e^{p_n t}. \tag{10}$$

Sulgudes olevat summat võib kujutada veel teisiti, nimelt:

$$A \cos \beta t + B \sin \beta t = D \sin (\beta t + \varphi), \tag{11}$$

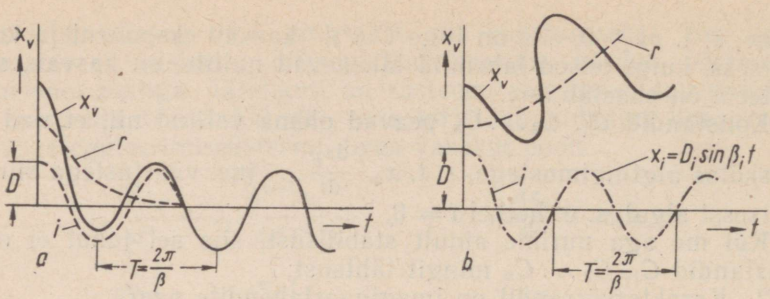
kus amplituud

$$D = \sqrt{A^2 + B^2} \tag{12}$$

ja faas

$$\varphi = \arctan \frac{A}{B}. \tag{13}$$

Imaginaarsete lahendite paar annab siirdeprotsessis komponendi sumbumatu harmoonilise võnkumise näol nurksagedusega β ja amplituudiga D, millede suurus sõltub algtingimustest.



Joon. 5-2. Võnkuv protsess: *a* — negatiivse reaalosaga (*r*) ja puhtimaginaarlahendid (*i*), *b* — positiivse reaalosaga (*r*) ja puhtimaginaarlahendid (*i*)

Reguleeritav suurus muutub teiste negatiivsete lahendite puhul nii, nagu näidatud joonisel 5-2, *a*. Kui aga kas või ükski reaallahendeist on positiivne, siis on siirdeprotsessil joonisel 5-2, *b* toodud kuju (kriips-punktjoonega on toodud võnkuva lüli siirdeprotsess sumbumatu harmoonilise võnkumise näol).

Kui karaktervõrrandis on veel mõned muud imaginaarlahendite paarid, siis kõik erineva amplituudi ja sagedusega siinuselised võnkumised liituvad ning saame juba mittesiinuselise liikumise.

3. Karaktervõrrandil on üks paar komplekslahendeid:

$$p_i = \alpha + j\beta \text{ ja } p_{i+1} = \alpha - j\beta, \tag{14}$$

ülejäänud lahendid on reaalsed ja negatiivsed.

Komplekslahenditele vastab võrrandis (3) kaks komponenti:

$$C_i e^{(\alpha+j\beta)t} \text{ ja } C_{i+1} e^{(\alpha-j\beta)t}. \tag{15}$$

Tegurid C_i ja C_{i+1} on kaaskompleksarvud, seepärast

$$\begin{aligned} C_i e^{(\alpha+j\beta)t} + C_{i+1} e^{(\alpha-j\beta)t} &= e^{\alpha t}(C_i e^{j\beta t} + C_{i+1} e^{-j\beta t}) = \\ &= e^{\alpha t}(A \cos \beta t + B \sin \beta t) = e^{\alpha t} D \sin (\beta t + \varphi). \end{aligned} \tag{16}$$

Vaadeldav juht erineb eelmisest selle poolest, et võngete amplituud ei jää konstantseks, vaid muutub aja jooksul teguri $e^{\alpha t}$ tõttu. Järelikult, kui kõik reaallahendid ja komplekslahendite reaalosad on negatiivsed, on võnkumisprotsess sumbuv ja süsteem seega stabiilne (joon. 5-3, *a*), kui aga ükski reaallahendeist või komplekslahendi reaalosa α on positiivne, on protsess ebastabiilne (joon. 5-3, *b*).

4. Karaktervõrrandil on nulliline lahend

$$p_i = 0. \tag{17}$$

Sel juhul on summas (3) komponent, mis vastab nullilisele lahendile, konstantne suurus:

$$C_i e^{p_i t} = C_i, \text{ sest kui } p_i = 0, \text{ siis } e^{p_i t} = 1. \quad (18)$$

Kui kõik ülejäänud karaktervõrrandi lahendid on negatiivsed ja reaalsed, siis aja jooksul protsess läheneb mitte nullile, vaid konstantsele suurusele, s. o.

$$x(t) \to C_i, \quad \text{kui } t \to 0. \quad (19)$$

5. Karaktervõrrandil on kordsed lahendid. Oletame, et on m kordset lahendit p_1. Siis on homogeense diferentsiaalvõrrandi lahendiks

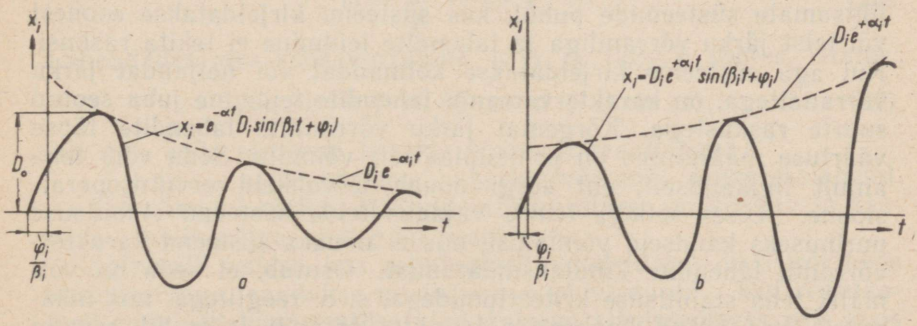
$$x_v = (C_{11} + C_{12}t + C_{13}t^2 + \ldots + C_{1m}t^{m-1}) e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + \ldots \quad (20)$$

Hulkliige $C_{11} + C_{12}t + C_{13}t^2 \ldots$ kasvab piiramatult, kui $t \to \infty$. Kui p_1 on negatiivne, on tegur $e^{p_1 t}$ kahanev funktsioon, mis läheneb nullile kiiremini kui hulkliige $C_{11} + C_{12}t + C_{13}t^2 \ldots$ lõpmatusele. Seepärast läheneb nende korrutis alati nullile, kui $t \to \infty$. Ka siin otsustab stabiilsuse lahendi p_1 märk, mis peab olema negatiivne.

Järelikult on vajalikuks ja küllaldaseks reguleerimissüsteemi stabiilsuse tingimuseks see, et süsteemi karaktervõrrandil oleksid kas negatiivsed reaallahendid või negatiivsete reaalosadega komplekslahendid. Kui aga üksainuski lahendeist ei vasta sellele tingimusele, on süsteem ebastabiilne.

Kui aga kõik reaallahendid ja kompleksiahendite reaalosad on negatiivsed, kuid sealjuures üks lahendeist on null, siis nimetatakse süsteemi neutraalseks (ka astaatiliseks), sest konstandile C_i vastab lõpmatu hulk väärtusi, mis kõik rahuldavad seda tingimust (siin on koordinaadi lõppväärtus, kui $t \to \infty$, ebamäärane).

Automaatreguleerimise teoorias kasutatakse süsteemide stabiilsuse uurimisel komplekstasapinda. Rõhtteljele kantakse tema karaktervõrrandi lahendite reaalosad, püstteljele imaginaarosad. Kui süsteem on stabiilne, siis järelikult peavad kõik lahendid asuma vasakul pool imaginaartelge. Kui aga üks paar lahendeid

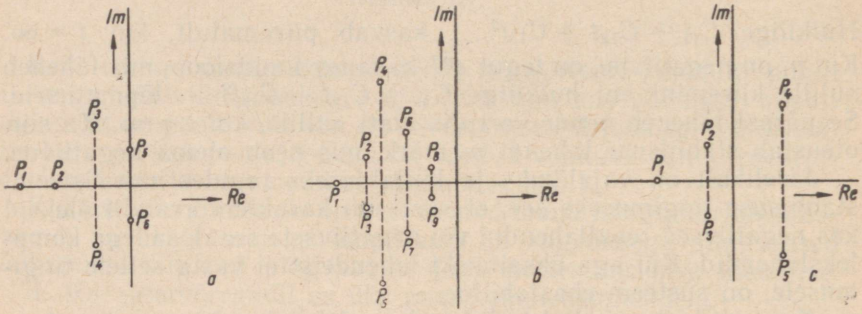


Joon. 5-3. Süsteemi siirdeprotsess, mille karaktervõrrandil on negatiivse reaalosaga kompleksiahend (*a*) ja positiivse reaalosaga kompleksiahend (*b*)

asub imaginaarteljel, siis on süsteem neutraalne ning asub stabiilsuse piiril. Lahendite tasapinna imaginaartelg vastab stabiilsuse piirile (joon. 5-4).

Sel juhul, kui süsteemile rakendatud häiring ei muutu hüppeliselt mingi kindla väärtuseni, vaid muutub aja jooksul, kujutab liikumist diferentsiaalvõrrandi erilahend. Kui ta karaktervõrrandil on ainult negatiivsete reaalosadega lahendid, siis on see erilahend stabiilne.

Süsteemi parameetrite muutumisel muutuvad ka karaktervõrrandi tegurid C_i ja järelikult ka lahendite asetus komplekstasapinnas. Kui selle muutuse käigus ükski lahendite paaridest osu-



Joon. 5-4. Neutraalse (*a*), stabiilse (*b*) ja ebastabiilse (*c*) süsteemi lahendite asetus komplekstasapinnas

tub puhtimaginaarseks või ükski lahend nulliks, siis see tähendab, et süsteem asub stabiilsuse piiril. Stabiilsuse piir jagab karaktervõrrandi tegurite väärtused kahte piirkonda. Üks neist vastab stabiilsele süsteemile, teine — ebastabiilsele.

Nii on lineaarsete süsteemide stabiilsust võimalik uurida ainult lihtsamate süsteemide puhul, kus süsteemi kirjeldatakse esimest või teist järku võrrandiga ja lahendite leidmine ei tekita raskusi. Kui aga süsteeme kirjeldatakse kolmandat või neljandat järku võrranditega, on karaktervõrrandi lahendite leidmine juba seotud suurte raskustega. Kõrgemat järku võrrandite lahendite täpse väärtuse määramine on printsipiaalselt võimatu. Seda võib teha ainult ligikaudselt, ent seegi nõuab töörohkeid arvutusoperatsioone. Seoses sellega tekkis vajadus leida süsteemi stabiilsuse uurimiseks kaudseid võimalusi, mis ei nõuaks süsteemi karaktervõrrandi lahendite kindlaksmääramist. Osutub, et seda on võimalik teha stabiilsuse kriteeriumidega, s. o. reeglitega, mis määravad, kas antud konkreetse karaktervõrrandi lahendid asuvad komplekstasapinna vasakul poolel.

2. Stabiilsuse algebralised kriteeriumid

Võšnegradski kriteerium. Stabiilsuse algebralised kriteeriumid võimaldavad karaktervõrrandi teguritega teostatavate algebraliste tehete abil otsustada süsteemi stabiilsuse üle.

Esimesena esitas ja tõestas Routh stabiilsuse kriteeriumi 1873. a. neljanda ja viienda astme võrrandite ja 1877. a. kõigi astmetega võrrandite kohta. Samal ajal, s. o. 1877. a., avaldas I. A. Võšnegradski stabiilsuse kriteeriumi kolmanda astme võrrandite kohta, mida automaatreguleerimise teoorias nimetatakse Võšnegradski diagrammiks. Peale selle võib sellel diagrammil piltlikult näha süsteemi dünaamiliste omaduste muutumist sõltuvalt tema parameetrite muutumisest.

Võšnegradski vaatles isereguleerimiseta aurumasinat, mille võrrand on

$$T_a \frac{d\varphi}{dt} = -\eta, \tag{21}$$

koos reaalse regulaatoriga, kusjuures ta ei võtnud arvesse hõõrdumist, mida me eespool väljendasime katarakti olemasoluga. Regulaatori võrrand on seega

$$T_r^2 \frac{d^2\eta}{dt^2} + \delta\eta = \varphi. \tag{22}$$

Kui integreerida võrrand

$$T_r^2\ddot{\eta} + \delta\eta = 0 \tag{23}$$

saame, et

$$\eta = A_1 \cos \beta t + A_2 \sin \beta t, \tag{24}$$

kus

$$\beta = \sqrt{\frac{\delta}{T_r^2}}. \tag{25}$$

Siit järeldub, et regulaator, olles viidud tasakaalust välja, hakkab harmooniliselt võnkuma sagedusega

$$\omega = \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi \sqrt{\frac{T_r^2}{\delta}}. \tag{26}$$

Lahendades aga koos võrrandid (21) ja (22) η suhtes, leiame:

$$\eta = Be^{-2\xi t} + e^{\xi t}(C \cos \varkappa t + D \sin \varkappa t), \tag{27}$$

kus ξ — selle süsteemi karaktervõrrandi reaallahend,

$\xi \pm j\varkappa$ — selle süsteemi karaktervõrrandi kompleksiahend.

See võrrand näitab, et reguleerimisprotsess on võnkuv ja kasvava amplituudiga, sest ξ on positiivne.

Sõltuvalt sellest, kas regulaatorit vaadeldakse üksi või koos aurumasinaga, saadakse niisiis erinevad vastused. Kui regulaatoril endal oli harmoonilise võnkumisega siirdeprotsess, siis koos masinaga on tal kasvava amplituudiga võnkuv siirdeprotsess. Et

stabiilsus on iga reguleerimissüsteemi esimeseks nõudeks, siis pole absoluutselt tundlik massiga regulaator (võrrand 22) praktiliselt kasutamiskõlblik.

Varustades nüüd regulaatori õlikataraktiga, uuris Võšnegradski võrrandisüsteemi

$$\left.\begin{aligned} T_a \frac{d\varphi}{dt} &= -\eta \\ T_r^2 \frac{d^2\eta}{dt} + T_k \frac{d\eta}{dt} + \delta\eta &= \lambda. \end{aligned}\right\} \tag{28}$$

Sellel süsteemil on kolmanda astme karaktervõrrand

$$T_r^2 T_a p^3 + T_k T_a p^2 + \delta T_a p + 1 = 0. \tag{29}$$

Vaatleme kolmanda astme võrrandit üldkujul:

$$A_0 \frac{d^3x}{dt^3} + A_1 \frac{d^2x}{dt^2} + A_2 \frac{dx}{dt} + A_3 x = 0, \tag{30}$$

kus A_0, A_1, A_2 ja A_3 on tegurid, mille määravad süsteemi lülide ajakonstandid ja tema võimendustegurid.

Asendame $\frac{d}{dt} \equiv p$ ja jagame võrrandi p^3 ees oleva teguriga. Saame uue võrrandi, kus on kolm tegurit:

$$p^3 + C_1 p^2 + C_2 p + C_3 = 0. \tag{31}$$

Vähendame tegurite arvu p ees veel ühe võrra. Selleks võtame

$$p = z\sqrt[3]{C_3};\quad C_1 = X\sqrt[3]{C_3};\quad C_2 = Y\sqrt[3]{C_3^2}, \tag{32}$$

millest saame:

$$z = \frac{p}{\sqrt[3]{C_3}};\quad X = \frac{C_1}{\sqrt[3]{C_3}};\quad Y = \frac{C_2}{\sqrt[3]{C_3^2}}. \tag{33}$$

Asetades võrdused (32) võrrandisse (31), saame karaktervõrrandi nn. Võšnegradski kujul:

$$z^3 + Xz^2 + Yz + 1 = 0, \tag{34}$$

kus X ja Y nimetatakse Võšnegradski teguriteks.

Vaatleme piirjuhtu, kus kolmanda astme karaktervõrrandil (31) on üks reaalne negatiivne ja kaks kompleksset lahendit, millede reaalosa võrdub nulliga, s. t.

$$p_1 = -\alpha;\quad p_2 = +\mathrm{j}\beta;\quad p_3 = -\mathrm{j}\beta. \tag{35}$$

Leiame tegurite omavahelise suhte, mille puhul niisugune lahendite väärtus oleks võimalik:

$$p^3 + C_1 p^2 + C_2 p + C_3 = (p+\alpha)(p-\mathrm{j}\beta)(p+\mathrm{j}\beta) = \\ = (p+\alpha)(p^2+\beta^2) = p^3 + \alpha p^2 + \beta^2 p + \alpha\beta^2.$$

Kõrvutades tegurid võrrandi mõlema poole sama astmega p ees, saame:

$$C_1 = \alpha;\ C_2 = \beta^2;\ C_3 = \alpha\beta^2. \tag{36}$$

Kõrvaldades nendest võrdustest β^2, leiame, et antud piirjuhul peab kehtima võrdus

$$C_1C_2 - C_3 = 0. \tag{37}$$

Mittepiirjuhu jaoks vaatleme selle saadud vahe (37) iseloomustuseks järgmist näidet. Oletame, et $C_3 = 0$. Siis saame võrrandist (31):

$$p = 0;\ p^2 + C_1p + C_2 = 0. \tag{38}$$

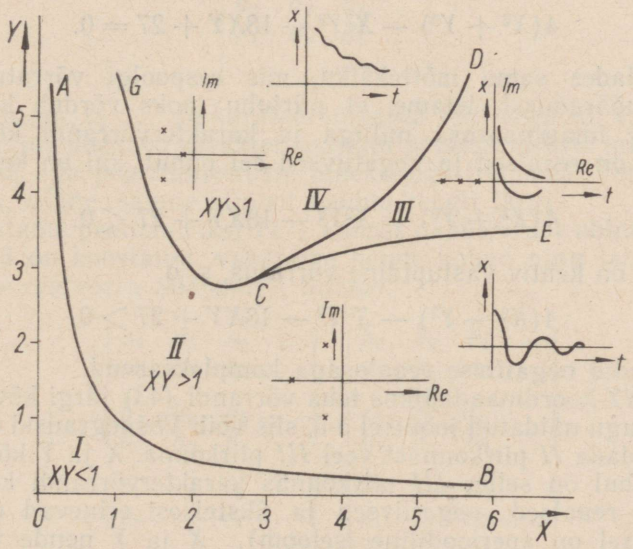
Teise astme võrrandi lahendid on negatiivsed, kui tema tegurid on positiivsed, s. t. $C_1 > 0$ ja $C_2 > 0$. Sel erijuhul ($C_3 = 0$) kehtib võrratus

$$C_1C_2 - C_3 > 0. \tag{39}$$

On selge, et see võrratus peab olema kehtiv ka üldjuhul. Järelikult on võrratus (39) koos vajadusega, et võrrandi kõik tegurid oleksid sama märgiga (positiivsed), kolmanda astme karaktervõrrandi lahendite reaalosade negatiivsuse vajalikuks ja küllaldaseks tingimuseks.

Saadud võrratus (39), mis määrab süsteemi stabiilsuse, võtab pärast Võšnegradski tegurite (33) sisseasetamist kuju

$$XY - 1 > 0. \tag{40}$$



Joon. 5-5. Võšnegradski diagramm

Kui X ja Y kanda ristkoordinaadistikku, siis võib ehitada hüperbooli AB (joon. 5-5), mille määrab võrrand $XY = 1$. See on saadud kui võrratuse (39) piirväärtus, s. o. võrrandist (37), mis jagab pinna $X—Y$ stabiilseks ($XY > 1$) ja ebastabiilseks ($XY < 1$) piirkonnaks, s. t. piirkondadeks *I* ja *II*. Piirkonnas *I* on reguleerimissüsteemil kasvava amplituudiga võnkumine, piiril $XY = 0$ on sumbumatu harmooniline võnkumine ja piirkonnas *II* kahaneva amplituudiga võnkumine.

Vaatleme piirjuhtu, kus kolmanda astme karaktervõrrandi komplekslahendid muutuvad reaalseiks ja negatiivseiks. Siis jaguneb võrrand (31) tegureiks

$$p^3 + C_1p^2 + C_2p + C_3 = (p + \alpha)^2(p + p_1), \qquad (41)$$

kus α — komplekslahendite reaalosa,

p_1 — reaalne lahend.

Avame sulud ja kõrvutame võrrandi mõlema poole p sama astme ees olevad tegurid, saame:

$$(p^2 + 2p\alpha + \alpha^2)(p + p_1) = p^3 + (2\alpha + p_1)p^2 + (2\alpha p_1 + \alpha^2)p + \alpha^2 p_1 = p^3 + C_1p^2 + C_2p + C_3,$$

millest

$$C_1 = 2\alpha + p_1;\quad C_2 = 2\alpha p_1 + \alpha^2;\quad C_3 = \alpha^2 p_1. \qquad (42)$$

Elimineerime neist võrdustest α ja p_1. Saame piirjuhu jaoks:

$$4(C_2^3 + C_3C_1^3) - C_1^2C_2^2 - 18C_1C_2C_3 + 27C_3^2 = 0$$

või pärast asendamist Võšnegradski teguritega

$$4(X^3 + Y^3) - X^2Y^2 - 18XY + 27 = 0. \qquad (43)$$

Kasutades sama mõttekäiku, mis eespoolgi võrratuse (40) märgi määramisel, leiame, et piirjuhu jaoks võrdub komplekslahendite imaginaarosa nulliga ja karaktervõrrandi kõik kolm lahendit on reaalsed ja negatiivsed sel puhul, kui on kehtiv võrratus

$$4(X^3 + Y^3) - X^2Y^2 - 18XY + 27 < 0. \qquad (44)$$

Kui aga on kehtiv vastupidine võrratus, s. o.

$$4(X^3 + Y^3) - X^2Y^2 - 18XY + 27 > 0, \qquad (45)$$

on lahendid negatiivse reaalosaga kompleksarvud.

Kui XY-koordinaadistikus teha võrrandi (43) järgi kõverad CD ja CE, nagu näidatud joonisel 5-5, siis võib Võšnegradski diagrammis eraldada *II* piirkonnast veel *III* piirkonna. X ja Y kõigi väärtuste puhul on selles *III* piirkonnas karaktervõrrandi kõik kolm lahendit reaalsed, negatiivsed ja üksteisest erinevad (süsteemi stabiilsusel on aperioodiline iseloom). X ja Y nende väärtuste puhul, mis asuvad kõveral DCE, on kaks lahendit võrdsed ja kol-

mas neist erinev, kuid punktis C, kus $X = Y = 3$, on kõik kolm lahendit võrdsed.

Kui ehitada kõver GC võrrandi järgi $2x^3 - 9XY + 27 = 0$, siis võib II piirkonnast eraldada veel IV piirkonna, kus absoluutväärtuse poolest suurim lahend on reaalne ja negatiivne, ülejäänud kaks aga on komplekssed, kusjuures nende reaalosad on negatiivsed, kuid absoluutväärtuse poolest suuremad kui reaallahend. Aja kulgemisel kahanevad viimased kiiremini ning siirdeprotsess on võnkuvmonotoonne.

Routh'i kriteerium. Routh püstitas tingimused, millele peaksid vastama karaktervõrrandi tegurid, selleks et tema lahenditel oleksid negatiivsed reaalosad. Esimeseks tingimuseks on see, et kogu võrrandi tegurid oleksid sama märgiga (positiivsed). See tingimus on küll vajalik, ent mitteküllaldane.

Allpool on Routh'i kriteerium toodud reeglitena, mis määravad vajalike tehete kindla järjekorra.

Olgu antud süsteemi karaktervõrrand, kus $a_0 > 0$.

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \ldots + a_{n-1} p + a_n = 0. \tag{46}$$

Koostame tabeli (maatriksi)

$$\begin{vmatrix} a_0 & a_2 & a_4 & \ldots \\ a_1 & a_3 & a_5 & \ldots \\ b_0 & b_2 & b_4 & \ldots \\ b_1 & b_3 & b_5 & \ldots \\ c_0 & c_2 & c_4 & \ldots \\ c_1 & c_3 & c_5 & \ldots \\ d_0 & d_2 & d_4 & \ldots \\ d_1 & d_3 & d_5 & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \end{vmatrix} \tag{47}$$

Siin $a_0, a_1, a_2 \ldots$ on karaktervõrrandi (46) tegurid. Tabeli (47) esimene rida koosneb karaktervõrrandi paarisarvuliste indeksitega, teine rida aga paarituarvuliste indeksitega liikmeist. Teised tegurid b_i, c_i, d_i jne. saame allpool toodud reegli järgi.

Koostame peamaatriksi (47) kahest naaberreast abimaatriksid. Kui read on koostatud, vahetame nende kohad ning laskume iga kord ühe rea võrra allapoole. Saame:

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \ldots \\ a_0 & a_2 & a_4 & \ldots \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} b_0 & b_2 & b_4 & \ldots \\ a_1 & a_3 & a_5 & \ldots \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} b_1 & b_3 & b_5 & \ldots \\ b_0 & b_2 & b_4 & \ldots \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} c_0 & c_2 & c_4 & \ldots \\ b_1 & b_3 & b_5 & \ldots \end{vmatrix} \tag{48}$$

$$\begin{vmatrix} c_1 & c_3 & c_5 & \ldots \\ c_0 & c_2 & c_4 & \ldots \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} d_0 & d_2 & d_4 & \ldots \\ c_1 & c_3 & c_5 & \ldots \end{vmatrix}$$

jne.

Tegurid $b_n \ldots c_n \ldots d_n$ jne. leitakse järgmiselt

$$\begin{aligned}
b_0 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}; \quad b_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_5 \\ a_0 & a_4 \end{vmatrix}; \quad b_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_7 \\ a_0 & a_6 \end{vmatrix} \ldots \\
b_1 &= \begin{vmatrix} b_0 & b_2 \\ a_1 & a_3 \end{vmatrix}; \quad b_3 = \begin{vmatrix} b_0 & b_4 \\ a_1 & a_5 \end{vmatrix}; \quad b_5 = \begin{vmatrix} b_0 & b_6 \\ a_1 & a_7 \end{vmatrix} \ldots \\
c_0 &= \begin{vmatrix} b_1 & b_3 \\ b_0 & b_2 \end{vmatrix}; \quad c_2 = \begin{vmatrix} b_1 & b_5 \\ b_0 & b_4 \end{vmatrix}; \quad c_4 = \begin{vmatrix} b_1 & b_7 \\ b_0 & b_6 \end{vmatrix} \ldots \\
c_1 &= \begin{vmatrix} c_0 & c_2 \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix}; \quad c_3 = \begin{vmatrix} c_0 & c_4 \\ b_1 & b_5 \end{vmatrix}; \quad c_5 = \begin{vmatrix} c_0 & c_6 \\ b_1 & b_7 \end{vmatrix} \ldots
\end{aligned} \tag{49}$$

jne.

Stabiilsuse tunnuseks on peamaatriksi kõigi esimeses püstreas olevate tegurite positiivsus, s. t.

$$a_0 > 0; \quad a_1 > 0; \quad b_0 > 0; \quad b_1 > 0; \quad c_0 > 0; \quad c_1 > 0; \quad d_0 > 0; \quad d_1 > 0 \text{ jne.} \tag{50}$$

Nende reeglite rikkumiste arv võrdub karaktervõrrandi nende lahendite arvuga, mis on paremal pool imaginaartelge.

Vaatleme näitena võrrandit

$$p^4 + 2p^3 + 6p^2 + 4p + 3 = 0.$$

On vaja määrata $n + 1$ teguri (s. o. a_1, b_0, b_1, b_2 ja c_0) märgid.

$$a_0 = 1 > 0; \quad a_1 = 2 > 0.$$

Koostame ja lahendame determinandid:

$$b_0 = \begin{vmatrix} 2 & 4 \\ 1 & 6 \end{vmatrix} = 12 - 4 = 8 > 0; \quad b_1 = \begin{vmatrix} 8 & 6 \\ 2 & 4 \end{vmatrix} = 32 - 12 = 20 > 0;$$

$$b_2 = \begin{vmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 3 \end{vmatrix} = 6 > 0; \quad c_0 = \begin{vmatrix} 20 & 0 \\ 8 & 6 \end{vmatrix} = 120 > 0.$$

Süsteem on stabiilne, sest kõik tegurid on positiivsed.

Võtame veel ühe näite.

$$p^4 + 2p^3 + 3p^2 + 5p + 3 = 0.$$

$$a_0 = 1 > 0; \quad a_1 = 2 > 0;$$

$$b_0 = \begin{vmatrix} 2 & 5 \\ 1 & 3 \end{vmatrix} = 6 - 5 = 1 > 0;$$

$$b_2 = \begin{vmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 3 \end{vmatrix} = 6 > 0;$$

$$b_1 = \begin{vmatrix} 1 & 6 \\ 2 & 5 \end{vmatrix} = 5 - 12 = -7 < 0.$$

Et tegur b_1 on negatiivne, pole süsteem stabiilne.

Hurwitzi kriteerium. Hurwitz esitas 1895. a. kriteeriumi veidi teistsugusel kujul kui Routh, kuid see annab samuti võimaluse määrata vajalikud ja küllaldased tingimused selleks, et karaktervõrrandi lahendid oleksid negatiivsete reaalosadega. Tingimus antakse determinantide kujul. Selleks et kõigil karaktervõrrandi (46) lahendeil oleksid negatiivsed reaalosad, on vajalik ja küllaldane, et determinant

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_{n-2}a_n \end{vmatrix} \tag{51}$$

ja tema diagonaalmiinorid oleksid sama märgiga mis a_0. Et selle teguri märgi võib alati esitada positiivsena, siis peavad nimetatud determinant ja tema diagonaalmiinorid olema positiivsed. Siit tuleneb jällegi järeldus, et stabiilse süsteemi karaktervõrrandi tegurid on kõik positiivsed.

n-järku karaktervõrrandi determinandi koostamine toimub nii, et kirjutatakse kõik tegurid $a_0 \dots a_n$ determinandi diagonaali mööda alates teisest tegurist a_1 kuni viimase tegurini a_n suurenemise järjekorras. Siis täiendatakse seda determinanti püstridade viisi, pannes ülespoole tegurid indeksite suurenemise järjekorras ning allapoole indeksite vähenemise järjekorras. Nendele kohtadele, kus teguri indeks peaks olema suurem kui n või väiksem kui 0, pannakse nullid. Miinorid moodustatakse väga lihtsalt: alatakse ülevalt vasakust nurgast ning võetakse kogu aeg arvesse ühepalju püst- ja horisontaalridu (punktiir determinandis 51).

Stabiilsuse tingimuseks on seega:

$$\Delta_1 = a_1 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1a_2 - a_0a_3 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1a_2a_3 - a_1^2a_4 - a_0a_3^2 + a_0a_1a_5 > 0 \tag{52}$$

jne.

Peadeterminandi viimane püstrida (51) sisaldab ainult ühe

nullist erineva elemendi — a_n. See determinant võrdub $\Delta_n = a_n\Delta_{n-1}$. Niisiis on determinant Δ_n positiivne, kui $\Delta_{n-1} > 0$.

Vaadeldes Hurwitzi kriteeriumi erijuhtudel, võime veenduda, et mitte kõiki peadeterminandi diagonaalmiinoreid pole vaja arvutada, sest mõned neist on positiivsed juba teiste determinantide positiivse oleku puhul.

Näiteks on neljanda astme võrrandi

$$a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + a_4 = 0$$

stabiilsuse esimene tingimus:

$$a_0 > 0;\ a_1 > 0;\ a_2 > 0;\ a_3 > 0;\ a_4 > 0.$$

Vaatleme teisi tingimusi.

Peadeterminant on

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}.$$

Esimene diagonaalmiinor, mille märk tuleb määrata, on

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1a_2 - a_0a_3$$

ja teine miinor

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3(a_1a_2 - a_0a_3) - a_1^2a_4 = a_3\Delta_2 - a_1^2a_4.$$

Et Δ_2 kuulub Δ_3 positiivse osategurite hulka, siis võib viimane olla positiivne ainult siis, kui $\Delta_2 > 0$. Järelikult, kui täidetakse tingimus $\Delta_3 > 0$, siis on tingimuse $\Delta_2 > 0$ kontrollimine liigne. Arutades analoogiliselt edasi, leiame, et esimese ja teise astme võrrandite puhul piisab ainult tegurite positiivsusest, kolmanda astme võrrandil peab olema täiendavalt $\Delta_2 > 0$, neljanda astme võrrandil $\Delta_3 > 0$; viienda astme võrrandil $\Delta_4 > 0$ ja $\Delta_2 > 0$ jne.

Nagu eeltoodust näha, suureneb arvutuste maht karaktervõrrandi astme suurenemisel järsult, eriti kui kasutatakse Hurwitzi kriteeriumi. Selle arvutuse lihtsustamiseks on tehtud mitu ettepanekut. Parimaid tulemusi annab ettepanek, mille järgi peadeterminanti muudetakse nii, et kõik elemendid, mis asuvad vasakul pool peadiagonaali, teisendatakse nullideks. Siis see teisendatud determinant võrdub diagonaalil olevate tegurite korrutisega ning saadud determinandi ja tema miinorite positiivsuse tingimuseks on kõigi diagonaalil olevate liikmete positiivsus. Olgu märgitud,

et tegelikult on determinandile diagonaalse kuju andmine sama, mida oleks vaja teha võrrandi teguritega, et koostada Routh'i maatrikseid.

Üldiselt on kõrgema astme karaktervõrrandite puhul mugavam kasutada Routh'i kriteeriumi, madalamate astmete puhul (kuni 5 . . . 6 astmeni) Hurwitzi kriteeriumi.

Olgu näiteks antud võrrand

$$p^4 + 2p^3 + 6p^2 + 4p + 3 = 0.$$

Arvutame Δ_3:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 2 & 4 & 0 \\ 1 & 6 & 3 \\ 0 & 2 & 4 \end{vmatrix} = 48 - 16 - 12 = 20 > 0.$$

Süsteem on stabiilne, sest kõik tegurid on positiivsed ja ükski neist ei võrdu nulliga ning ka determinant Δ_3 on positiivne.

Uurime Hurwitzi kriteeriumi abil suletud reguleerimissüsteemi, mis koosneb aperioodilisest objektist ja võnkuva karakteristikuga regulaatorist. Selle karaktervõrrand on

$$(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + T_3 p + 1) + k_1 k_2 = 0. \tag{53}$$

Sulgude avamisel saame

$$T_1 T_2^2 p^3 + (T_1 T_3 + T_2^2) p^2 + (T_1 + T_3) p + (k_1 k_2 + 1) = 0. \tag{54}$$

Routh'i-Hurwitzi stabiilsuskriteerium on

$$(T_1 T_3 + T_2^2)(T_1 + T_3) - T_1 T_2^2 (k_1 k_2 + 1) > 0. \tag{55}$$

Sellest võrratusest tuleneb tähtis järeldus: stabiilses süsteemis ei tohi võimendustegur $k = k_1 k_2$ ületada ega isegi võrduda mingi piirväärtusega k_p, mis määratakse eelmisest võrrandist, kui võrratus muuta võrduseks:

$$(T_1 T_3 + T_2)^2 (T_1 + T_3) - T_1 T_2^2 (k_p + 1) = 0. \tag{56}$$

Lahendades selle võrrandi k_p suhtes, saame:

$$k_p = \frac{T_1 T_3}{T_2^2} + \frac{T_3^2}{T_2^2} + \frac{T_3}{T_1}, \tag{57}$$

mille arvulist väärtust on lihtne määrata, kui me teame valemis esinevate suuruste arvulisi väärtusi.

Stabiilsuse tingimuseks on

$$k < k_p. \tag{58}$$

Kuid piirilise võimendusteguri olemasolu piirab reguleerimise täpsust. Staatilises reguleerimissüsteemis on staatiline viga $x_{st} = \frac{\text{const}}{1+k}$ ja statismitegur $s = \frac{1}{1+k}$. Siit on näha, et viga on seda suurem, mida väiksem on k. Seega tekib konflikt meie nõudmistes: stabiilsuse suurendamisel väheneb k ja seega ka reguleerimise täpsus. Olgu märgitud, et k_p sõltub süsteemi elementide ajakonstantide suhtest (57). Tegurit k_p võib suurendada ajakonstantide T_1 ja T_3 suurendamisega, kuid see pole mitte alati võimalik. Väljapääs on siin, nagu näidatakse allpool, uute täiendavate lülide sissetoomises süsteemi. See võimaldab saavutada stabiilsust ka suurte võimendustegurite puhul.

3. Stabiilsuse sageduskriteeriumid

Automaatreguleerimissüsteemide stabiilsuse määramine ülaltoodud algebraliste kriteeriumide järgi on töömahukas, eriti kõrgemat järku diferentsiaalvõrrandite korral. Süsteemide puhul, mida kirjeldatakse neljandat ja kõrgemat järku võrranditega, on võimalik ainult määrata, kas süsteem on võrrandite antud tegurite korral stabiilne või mitte. Kui süsteem on ebastabiilne, ei saa me aga nii lihtsalt vastust, mida teha tema stabiliseerimiseks. Kuid praktikas on palju tähtsam selgitada, kuidas mõjub stabiilsusele üks või teine parameeter. Niisugustel juhtudel osutub palju mugavamaks kasutada stabiilsuse uurimiseks sageduskriteeriume, mis on palju piltlikumad. Ülesanne taandub siin tasapinnalise kõvera uurimiseks. Ta eeliseks on eespoolnimetatud kriteeriumidega võrreldes kogu süsteemi kui ka üksikute lülide sageduskarakteristikute eksperimentaalne määramine. See annab võimaluse uurida ka niisuguseid süsteeme, mille mõnede elementide diferentsiaalvõrrandeid pole teada. Sageduskarakteristikud on rakendatavad ka hajutatud parameetritega ja hilineva lüliga (lülidega) süsteemide uurimisel, kusjuures uurimiskäik sellega ei muutu.

Sageduskriteeriume võib jagada kahte rühma. Esimese grupi moodustavad kriteeriumid, kus vahetult uuritakse suletud süsteemi, teise grupi, kus süsteemi suletud oleku stabiilsuse üle otsustatakse tema avatud oleku stabiilsuse järgi. Esimesest grupist vaatleme Mihhailovi kriteeriumi, teisest grupist amplituudi ja faasi kriteeriumi, amplituudi ja faasi pöördkriteeriumi ja logaritmilist kriteeriumi.

Paljudel juhtudel võimaldavad sageduskriteeriumid hinnata mitte ainult reguleerimisprotsessi stabiilsust, vaid ka kvaliteeti, kusjuures see on võimalik ainult siis, kui sageduskarakteristiku koostamisel on arvestatud mitte ainult süsteemi diferentsiaalvõrrandi vasakut, vaid ka paremat poolt. Karakteristikuid, mis on tehtud avatud süsteemide jaoks ega sisalda otseselt võrrandi paremat poolt, võib kasutada reguleerimisprotsessi kvaliteedi uurimiseks,

kuid kui karakteristikud on koostatud ainult süsteemi diferentsiaalvõrrandi karaktervõrrandi alusel, siis nad selleks üldiselt ei kõlba.

Kui stabiilsuse algebraliste kriteeriumide uurimisel süsteemile tekitati äkiline häiring ning see häiring jäi pärast tekitamist muutmatuks, siis sageduskriteeriumide puhul antakse süsteemile häiring, mis on aja funktsioon, s. o. muutuv suurus. Tavaliselt on selleks mitmesuguste sagedustega siinuseline võnkumine (vt. joon. 4-4).

Mihhailovi kriteeriumi puhul (esitatud 1938. a.) on uurimise aluseks suletud süsteemi karaktervõrrand, mille üldkuju on

$$S(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \ldots + a_n = 0. \qquad (59)$$

Nagu teada, võib seda lahutada tegureiks. Kui oletame, et puuduvad nullilised, puhtimaginaarsed ja kordsed tegurid, siis

$$S(p) = a_0 (p - p_1)(p - p_2) \ldots (p - p_n), \qquad (60)$$

kus p_1, $p_2 \ldots p_n$ on võrrandi lahendid.

Nagu teada, vastab komplekstasapinnas igale lahendile oma kindel punkt.

Stabiilse süsteemi reaallahendid võivad asetseda ainult vasakul reaalpoolteljel, komplekslahendid aga vasakul pooltasapinnal. Nad peavad olema paariviisi tingimata kaaskompleksarvud. Igal paaril on sama reaalosa, kuid erineva märgiga imaginaarosad, s. t. komplekslahendid on komplekstasapinnas sümmeetrilised reaaltelje suhtes. Võrrandist (60) järeldub, et antud lahendite hulgale vastab lõpmatu hulk võrrandeid, mis üksteisest erinevad teguri a_0 poolest. Kuid meie võime alati anda võrrandile kuju, kus $a_0 = 1$. Lahendite arvuline väärtus sellest ei muutu. Sel puhul vaatleme võrrandit

$$S_1(p) = (p - p_1)(p - p_2) \ldots (p - p_n) = 0. \qquad (61)$$

Võrrandi lahendid on, võttes arvesse eespool stabiilsuse kohta toodud oletust, reaalsed ($-p_1$, $-p_2 \ldots$) ja kompleksed ($-\alpha_1 + j\beta$; $-\alpha_1 - j\beta \ldots$), kusjuures kõigi lahendite reaalosad on negatiivsed.

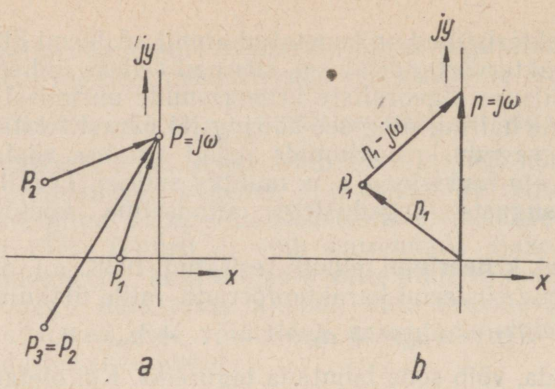
Pannes need lahendid võrrandisse (60) saame:

$$S(p) = a_0 (p + p_1)(p + p_2) \ldots (p + \alpha_1 - j\beta_1)(p + \alpha_1 + j\beta_1) \ldots = a_0 (p + p_1)(p + p_2) \ldots [(p + \alpha_1)^2 + \beta_1^2] = 0. \qquad (62)$$

Avades sulud saame polünoomi p-st, mille kõik tegurid on positiivsed. Et see polünoom peab vastama karaktervõrrandile, siis selgub siit jällegi, et karaktervõrrandil peavad kõik tegurid olema sama märgiga, mis teguril a_0.

See on stabiilsuseks vajalik, kuid mitteküllaldane tingimus. Samale järeldusele tulime juba eespool, kui vaatlesime algebralisi kriteeriume.

Asendame $p = j\omega$. Siin $p + p_n = j\omega + p_n$ tähendab vektorit, mille üks ots on komplekstasapinnas lahendi väärtusel p_n, teine



Joon. 5-6. Lahendite asetus komplekstasapinnas

ots aga imaginaarteljel (joon. 5-6, *b*). Siis võtab võrrand (59) kuju

$$S(j\omega) = a_n + j\omega a_{n-1} + \omega^2 a_{n-2} - j\omega^3 a_{n-3} + \ldots =$$
$$= a_0(j\omega - p_1)(j\omega - p_2) \ldots (j\omega - p_n), \qquad (63)$$

kus $p_1, p_2 \ldots p_n$ on võrrandi lahendid.

Summaarse vektori moodul võrdub teda moodustavate elementaarvektorite korrutisega, faas aga elementaarvektorite faaside summaga. Sageduse muutumisel libiseb iga elementaarvektor piki imaginaartelge (joon. 5-6, *a*).

Kui $\omega = 0$, siis $S(j0) = a_n$. Nagu eespool mainitud, on stabiilses süsteemis kõik võrrandi tegurid positiivsed. Kui me kujutame süsteemi muutust sõltuvalt temale rakendatud häiringute sageduse muutusest komplekstasapinnas vektorina, mille ots kujutab kõverat, mida nimetasime karakterkõveraks (hodograafiks), siis sagedusel $\omega = 0$ lõikab stabiilse süsteemi hodograaf reaaltelge koordinaatide algusest kaugusel a_n, mis arvuliselt võrdub astaatilistes süsteemides võimendusteguriga k, staatilistes süsteemides aga $1 + k$-ga (joon. 5-7).

Võrrandit (63) võib vaadelda summarse vektorina, mis võrdub elementaarvektorite $(j\omega - p_k)$ korrutisega (joon. 5-6). Kui $\omega = 0$, on kõikide vektorite lõpptipud koordinaatide alguspunktis. Kui ω muutub $-\infty$-st kuni $+\infty$-ni, siis libisevad kõigi vektorite lõppunktid piki imaginaartelge $-j\infty$-st kuni $+j\infty$-ni ja iga vektori argument muutub $-\frac{\pi}{2}$-st kuni $+\frac{\pi}{2}$-ni, s. t. nurga $+\pi$ võrra. Järelikult peab kogu summaarne vektor muutuma $n\pi$ võrra, kus n — karaktervõrrandi aste.

Et Mihhailovi hodograaf on reaaltelje suhtes sümmeetriline, siis on küllaldane vaadelda ainult tema üht poolt, mis vastab sage-

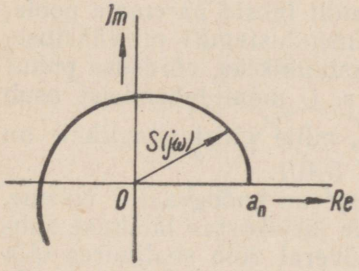
duse muutumisele 0-st kuni $+\infty$-ni (sellel on ka oma füüsikaline mõiste), ning vektori täispööre peab võrduma $\frac{n\pi}{2}$-ga.

Stabiilse süsteemi kõik lahendid on vasakul pool imaginaartelge ning ω muutumisel 0-st kuni $+\infty$-ni pöörduvad nad kellaosutile vastupidises (s. t. positiivses) suunas. Kui mõni lahend on aga paremal pool, s. t. süsteem on ebastabiilne, siis need pöörduvad kellaosuti liikumise (s. t. negatiivses) suunas. Stabiilses süsteemis on iga vektori faasi tuletis sageduse järgi $\frac{d\varphi_1}{dt}$, $\frac{d\varphi_2}{dt}$ jne. positiivne ning kogu vektori pöördumise suund on seega samuti ainult positiivne.

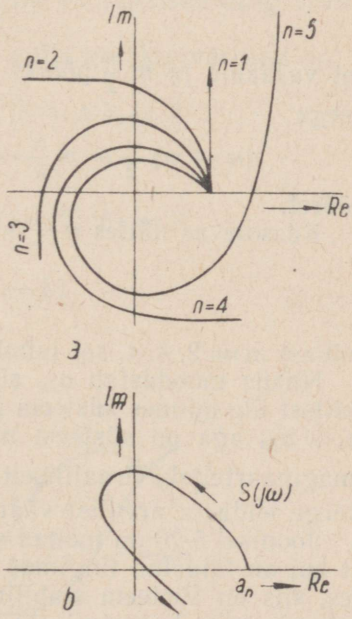
Selleks et süsteem oleks stabiilne, on vajalik ja küllaldane, et Mihhailovi hodograafi vektor sageduse muutumisel 0-st kuni $+\infty$-ni, alates liikumist komplekstasapinna paremal reaalpoolteljel asuvast punktist, mille kaugus koordinaatide alguspunktist võrdub karaktervõrrandi vabaliikmega, ja pöördudes ainult kellaosutile vastupidises suunas, mitte kusagil muutudes nulliks, läbib kõik tasapinna n kvadrandid ja pöördub sealjuures nurga $\frac{n\pi}{2}$ võrra, kus n on karaktervõrrandi aste. Siit järeldub, et hodograaf peab reaal- ja imaginaartelgi lõikama vaheldumisi (joon. 5-8, *a*). Joonisel 5-8, *b* on toodud ebastabiilse süsteemi hodograaf.

Olgu meil näiteks kolmanda astme karaktervõrrand. Vaatleme, kuidas muutub kõver, kui muutub süsteemi võimendustegur, s. o. a_3.

Valemist (63) selgub, et vektori $S(j\omega)$ imaginaarosa ei muutu $a_n = a_3$ suurenemisel, reaalosa aga suureneb koos a_3 suurenemisega.

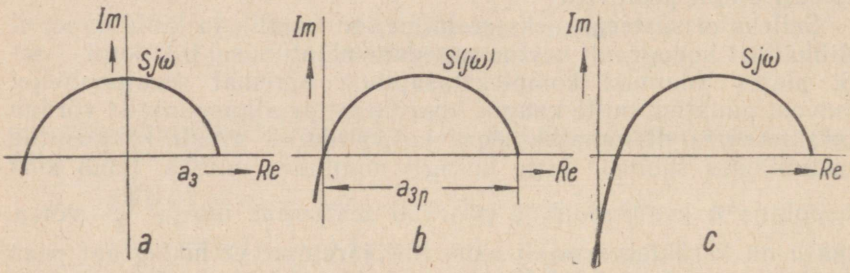


Joon. 5-7. Stabiilse süsteemi karakterkõver



Joon. 5-8. Mihhailovi hodograaf stabiilse (*a*) ja ebastabiilse (*b*) süsteemi kohta

Järelikult liiguvad kõik hodograafi punktid paremale, s. t. kogu kõver liigub paremale oma kuju muutmata. Kui a_3 pidevalt suureneb, siis lõikab ta mõnel a_3 piirväärtusel $a_3 = a_{3p}$ koordinaatide alguspunkti ning, kui $a_3 > a_{3p}$, möödub sellest (joon. 5-9). Sel juhul võrdub vektori $S(j\omega)$ pöördenurk sageduse muutumisel $0 < \omega < \infty$ mitte $3\frac{\pi}{2}$ vaid $-\frac{\pi}{2}$-ga, s. t. süsteem muutub ebastabiilseks. Kui n-astmelisel karaktervõrrandil on m lahendit paremal pooltasapinnal, siis vasakul on seega $n - m$ lahendit. ω muutumisel 0-st kuni $+\infty$-ni pöördub summaarne vektor $(n - m)\frac{\pi}{2}$ pööret vasakule ja $m\frac{\pi}{2}$ pööret paremale, s. t. kogu pöörete arv on seega



Joon. 5-9. Stabiilse (*a*), stabiilsuse piiril oleva (*b*) ja ebastabiilse suletud süsteemi (*c*) karakterkõver

$$(n - m)\frac{\pi}{2} - m\frac{\pi}{2} = \frac{n\pi}{2} - \frac{m\pi}{2} - \frac{m\pi}{2} = (n - 2m)\frac{\pi}{2}$$

pööret.

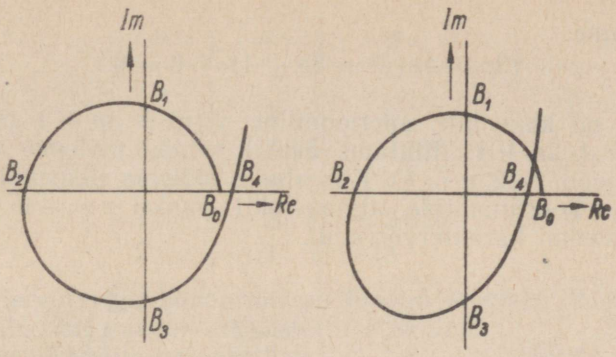
Käesolevas näites $n = 3$. Saame:

$$(3 - 2m)\frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{2},$$

millest $m = 2$, s. t. sel juhul kaks lahendit läksid paremale poole.

Niisiis moodustab a_{3p} süsteemi võimendusteguri piirväärtuse, millest üle minnes süsteem muutub ebastabiilseks, võrdsuse puhul $a_3 = a_{3p}$ aga on süsteem neutraalne, s. t. mõni lahendeist asub imaginaarteljel. Graafiliselt $a_3 = \overline{B_0 B_2}$, mille järgi graafikult on kerge leida ta arvulist väärtust (joon. 5-10).

Joonisel 5-10 on toodud stabiilse süsteemi hodograafid. Näeme, et kui on täidetud tingimus kvadrantide järjekorras läbimise suhtes, siis on süsteem stabiilne, kuigi kõveral võib sealjuures olla mitmesugune kuju (*a* ja *b*). Kõver läbib punktid B_0, B_1, B_2, B_3, B_4 jne., s. t. karakterkõveral muutuvad nulliks reaalne ja imaginaarne komponent vaheldumisi. Olgu $S(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$. Kui kuju-



Joon. 5-10. Stabiilse süsteemi karakterkõverad

tada eraldi graafikuid $U(\omega)$ ja $V(\omega)$, siis saame kujutise, nagu see on toodud joonisel 5-11.

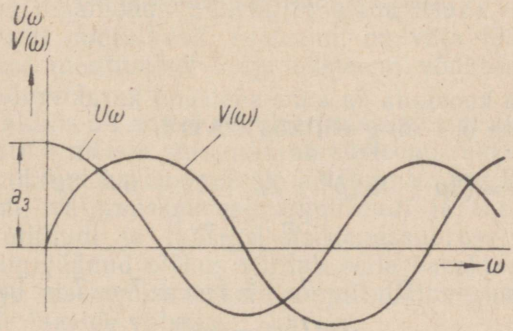
On selge, et funktsiooni $U(\omega)$ nullkohad on funktsiooni $V(\omega)$ kahe nullkoha vahel ja iga $V(\omega)$ nullkoht, peale esimese, kahe $U(\omega)$ nullkoha vahel jne., s. t. funktsioonide $U(\omega)$ ja $V(\omega)$ lahendid vahelduvad. Peale selle on need lahendid reaalsed. Siit saame Mihhailovi kriteeriumist veel ühe järelduse: süsteem on stabiilne, kui polünoomide $U(\omega)$ ja $V(\omega)$ lahendid on reaalsed ning arvulise väärtuse poolest vahelduvad.

Olgu meil näiteks suletud süsteem, mille karaktervõrrand on

$$(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + T_3 p + 1) + k_1 k_2 = 0.$$

Tegurite arvulised väärtused:

$$T_1 = 3;\ T_2 = 1;\ T_3 = 2;\ K_1 = 2;\ K_2 = 3.$$

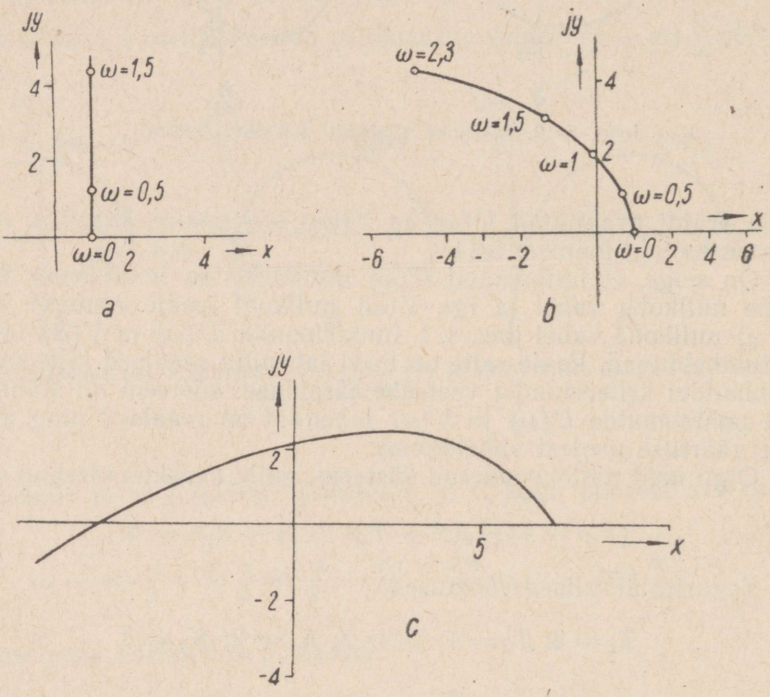


Joon. 5-11. Funktsioonide $U(\omega)$ ja $V(\omega)$ graafikud

Seega saame:

$$(3p + 1)(p^2 + 2p + 1) + 6 = 0.$$

Süsteemil on kaks lüli: aperioodiline $n_1(p) = 3p + 1$ ja võnkuv $n_2(p) = p^2 + 2p + 1$. Ehitame eraldi nende mõlema karakterkõverad (joon. 5-12, *a* ja *b*). Korrutades mõlema elemendi vektorid ning viies koordinaatide alguspunkti punkti $x = -6$ ja $y = 0$, saame süsteemi karaktervõrrandi.



Joon. 5-12. Süsteemi karakterkõverad

Võime aga koostada ka kohe süsteemi karaktervõrrandi reaalse ja imaginaarse osa ning ehitada kõvera.

$$S(p) = (3p + 1)(p^2 + 2p + 1) + 6 = 3p^2 + 7p^2 + 5p + 7 = 0$$

$$S(j\omega) = -3j\omega^3 - 7\omega^2 + 5j\omega + 7 = 7 - 7\omega^2 + j(5\omega - 3\omega^2).$$

Tähistame: $x = 7 - 7\omega^2$ ja $y = 5\omega - 3\omega^3$ ja koostame tabeli:

ω	x	y
0	7	0
0,5	5,25	2,125
1	0	2
1,5	−8,75	−2 625
2	−21	−14

Selle karaktervõrrandi hodograaf on toodud joonisel 12, *c*. Nagu jooniselt näha, on vaadeldav süsteem stabiilne.

Vaatleme lahendite vahelduvust.

$$x = 7 - 7\omega^2 = 0; \quad 1 - \omega^2 = 0; \quad \omega^2 = 1;$$

$$y = 5\omega - 3\omega^2 = 0; \quad \omega(5 - 3\omega^2) = 0; \quad \omega_1 = 0; \quad 5 - 3\omega^2 = 0;$$

$$\omega_2^2 = \frac{5}{3} = 1\frac{2}{3}.$$

Lahendite ruudud vahelduvad

y	x
0	
	1
$1\frac{2}{3}$	

ja on reaalsed. Stabiilsuse tingimus on täidetud.

Amplituudi ja faasi kriteerium. Mihhailovi kriteeriumi aluseks oli süsteemi karaktervõrrandi kujutamine parameetrilise võrrandina komplekstasapinna ristkoordinaadistikus. Kuid see meetod on väga töömahukas, eriti kõrgemat järku diferentsiaalvõrrandite puhul. Pealegi, kuigi ta annab piltliku ülevaate kogu süsteemi käitumisest, ei võimalda ta selgitada üksikute lülide mõju kogu süsteemile. Reguleerimissüsteemi suletud ahela iga lüli mõjutab süsteemi võnkumist omamoodi. Selleks et teada saada, kuidas kõik lülid summaarselt mõjutavad süsteemi, on vaja teada, kuidas muutub sageduse muutumisel kogu süsteemi võnkeamplituud ja faas.

Eelmises peatükis oli antud reguleerimissüsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku mõiste, mis määrab süsteemi reaktsiooni tema sisendisse rakendatud harmoonilisele häiringule. See karakteristik määrab süsteemi väljumissuuruse amplituudi ja faasi sõltuvalt konstantse amplituudi ja faasiga sisenemissuuruse sagedusest. Sealjuures püsimajäänud olekus võrdub selle karakteristiku moodul väljumis- ja sisenemissuuruste amplituudide suhtega, argument aga nende faaside vahega.

Avatud süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku alusel on võimalik otsustada sama süsteemi suletud oleku stabiilsuse üle.

Sellel omadusel on praktikas suur tähtsus, sest süsteemi avatud oleku omaduste uurimine on palju lihtsam kui suletud oleku uurimine. Seda kriteeriumi võib kasutada sel juhul, kui süsteemi või mõne tema lüli diferentsiaalvõrrand pole teada, kuid on teada nende eksperimentaalselt saadud karakteristikud.

Oletame, et suletud reguleerimissüsteemis toimub harmooniline võnkumine konstantse amplituudiga H_c ja sagedusega ω_c, s. t. kehtib võrdus

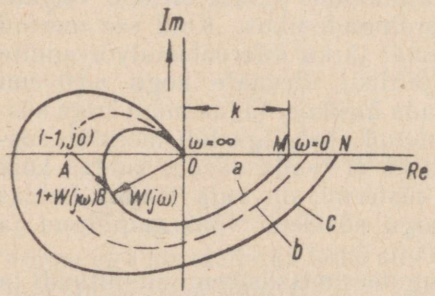
$$x_v = -x_s = H_c e^{j\omega_c t}. \tag{64}$$

See tähendab, et reguleerimissüsteem on stabiilsuse piiril. Avame süsteemi ükskõik missuguse suunalise toimega lüli ees ning anname saadud avatud süsteemile sama amplituudiga H_c ja sama sagedusega ω_c harmoonilise võnkumise. Süsteemis ei muutu seega midagi ja võrdus $x_v = -x_s$ jääb kehtima.

Järelikult, kui suletud reguleerimissüsteem osutub olevat stabiilsuse piiril, siis tema avatud oleku puhul võrdub väljumis- ja sisenemissuuruste suhe sagedusel ω_c miinus ühega, s. t.

$$\frac{x_v}{x_s} = -1. \tag{65}$$

Siit on selge, et avatud süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku hodograafi asetuse järgi punkti (—1, j0) suhtes võib otsustada, kas suletud süsteem on stabiilne või mitte. Seda kriteeriumi väljendatakse staatiliste süsteemide kohta järgmiselt: kui reguleerimissüsteem on avatud olekus stabiilne ja kui avatud süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf sageduse muutumisel 0-st kuni $+\infty$-ni ei haara punkti (—1, j0), siis on suletud süsteem stabiilne, vastasel korral mitte.



Joon. 5-13. Amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf

Väljendit «ei haara» tuleb mõista järgmiselt. Tõmbame punktist (—1, j0) karakterkõverale vektori AB (joon. 5-13).

Kui ω muutub 0-st kuni $+\infty$-ni, siis see vektor libiseb karakterkõveral mingi nurga võrra. Kui selle vektori summaarne pöörlemine võrdub sealjuures n u l l i g a, siis loeme, et karakterkõver ei haara punkti (—1, j0), kui mitte, siis haarab. Näiteks kõver *a* — ei haara, süsteem on stabiilne, *b* — süsteem on stabiilsuse piiril, *c* — vektor pöördub, kui ta algus-

punkt libiseb punktist N punktini 0, 360°, s. t. haarab punkti (—1, j0) ja seega on see süsteem ebastabiilne.

Oletame, et avatud reguleerimissüsteemi võrrand on

$$N(p)x_v = M(p)x_s, \tag{66}$$

kus $N(p)$ ja $M(p)$ on polünoomid p-st, ning eeldame, et polünoomi $N(p)$ järk on $M(p)$-st kõrgem või sellega võrdne.

Avatud süsteemi karaktervõrrand on

$$N(p) = 0. \tag{67}$$

Suleme süsteemi. Selleks eeldame, et

$$x_v = -x_s = x. \tag{68}$$

Suletud süsteemi võrrand on seega

$$[N(p) + M(p)]x = 0 \tag{69}$$

ja ta karaktervõrrand

$$N(p) + M(p) = 0. \tag{70}$$

Nagu oli öeldud eespool, on selleks, et suletud süsteem oleks stabiilne, vaja, et tema karaktervõrrandi lahendid oleksid komplekstasapinnas vasakul pool imaginaartelge.

Jagades reguleerimissüsteemi suletud ahela karaktervõrrandi (70) sama süsteemi avatud ahela karaktervõrrandiga (67), saame murrulise ratsionaalse funktsiooni suurusest p:

$$K(p) = \frac{N(p)+M(p)}{N(p)} \tag{71}$$

ehk

$$K(p) = 1 + \frac{M(p)}{N(p)} = 1 + W(p), \tag{72}$$

kus $W(p)$ on avatud ahela ülekandefunktsioon.

Võrrandi (71) lugeja lahendeid nimetatakse funktsiooni $K(p)$ nullideks ning nimetaja lahendeid poolusteks. Nende asukoht komplekstasapinnas meid huvitabki. Tähistame lugeja lahendid $p_{11}, p_{12} \ldots p_{1n}$ ja nimetaja lahendid $p_{21}, p_{22} \ldots p_{2n}$. Siis võime võrrandeid (71) või (72) väljendada kujul

$$K(p) = C\frac{(p+p_{11})(p-p_{12}) \ldots (p-p_{1n})}{(p-p_{21})(p-p_{22}) \ldots (p-p_{2n})}, \tag{73}$$

kus C on reaalne konstantne kordaja.

Teeme jälle asenduse $p = j\omega$. See tähendab seda, et kõigi vektorite lõppotsad asuvad imaginaarteljel, alguspunkt aga komplekstasapinnas, mille koordinaadid on p_{1i} ja p_{2i} (joon. 5-6, *b*).

Eespool tehtud märkuse alusel polünoomide $N(p)$ ja $M(p)$

järgu kohta võib öelda, et võrrandi (73) nimetaja ja lugeja lahendite arv on võrdne.

Kui suletud süsteem on stabiilne, siis peavad kõik lahendid p_{1n} olema imaginaarteljest vasakul. Vektori $K(j\omega)$ summaarne pöörete arv, kui ω muutub 0-st kuni $+\infty$-ni, on vektorite $(j\omega - p_{11})$, $(j\omega - p_{12}) \ldots (j\omega - p_{1n})$ pöörete arvu summa ja vektorite $(j\omega - p_{21}), (j\omega - p_{22}) \ldots (j\omega - p_{2n})$ pöörete arvu summa vahe.

Et aga vektorid on kõik vasakul pool imaginaartelge, siis võrdub vektori $N(j\omega) + M(j\omega)$ pöördenurk $+n\frac{\pi}{2}$-ga. Kui avatud süsteem on stabiilne, siis vektori $N(j\omega)$ pöördenurk on samuti $+n\frac{\pi}{2}$ ja kogusummas on $n\frac{\pi}{2} - n\frac{\pi}{2} = 0$.

Kui aga suletud süsteem on ebastabiilne, siis, nagu teada Mihhailovi kriteeriumist, vektori $N(j\omega) + M(j\omega)$ pöördenurk, kui ω muutub 0-st kuni $+\infty$-ni, ei võrdu enam $+n\frac{\pi}{2}$-ga ning ülalnimetatud pöörete summa ei võrdu enam nulliga.

Ilmselt on $G(j\omega) = 1 + W(j\omega)$ vektor, mille alguspunkt on reaalteljel -1 kaugusel koordinaatide alguspunktist, s. t. tema koordinaadid on $(-1, j0)$ (joon. 13). AO on vektor 1, OB — vektor $W(j\omega)$ ja AB — vektor $1 + W(j\omega)$ ning vektori AB pöördumine, millest eespool oli juttu, pole muud kui vektori $1 + W(j\omega)$ pöördumine. Siit järeldub, et kui avatud süsteemil on m lahendit paremal pool imaginaartelge, siis vektori $1 + W(j\omega)$ pöörete arv on vektorite $N(j\omega) + M(j\omega)$ ja $N(j\omega)$ pöörete arvude vahe. Saame:

$$n\frac{\pi}{2} - (n - m)\frac{\pi}{2} + m\frac{\pi}{2} = m\pi,$$

s. t. see vahe on nii suur, kui suur on paremal pool asuvate lahendite arv. Kokkuvõtlikult: suletud staatiline süsteem on stabiilne, kui a) stabiilse avatud süsteemi puhul karakteristik $W(j\omega)$ ei haara punkti $(-1, j0)$; b) ebastabiilse avatud süsteemi puhul (tal on m lahendit paremal pool imaginaartelge) karakteristik $W(j\omega)$ haarab punkti $(-1, j0)$ $+ m$ korda (positiivne haaramine tähendab, et see peab toimuma kellaosuti liikumisele vastupidises suunas).

Leiame võimendusteguri piirväärtuse, mille puhul stabiilne süsteem muutub ebastabiilseks (vt. näide lk. 175).

Kui amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf läbib punkti $(-1, j0)$ (joon. 5-13), siis sellele vastab $k = k_p$.

Järelikult kehtib mingil sagedusel $\omega = \omega_0$ võrdus

$$K(j\omega_0) = -1.$$

Võrrandist (53) saame seega:

$$\frac{k_p}{(1+T_1 j\omega)[1+T_3 j\omega+T_2^2(j\omega)^2]}=-1,$$

millest

$$k_p+1-(T_1T_3+T_2^2)\omega_0^2+j\omega_0(T_1+T_3-T_1T_2^2\omega_0^2)=0.$$

Võrrutades võrrandi reaal- ja imaginaarosa eraldi nulliga, saame:

$$k_p+1-(T_1T_3+T_2^2)\omega_0^2=0;\ T_1+T_3-T_1T_2^2\omega_0^2=0.$$

Elimineerime neist võrrandeist ω_0^2:

$$\omega_0^2=\frac{T_1+T_3}{T_1T_2^2},$$

seega

$$k_p+1-(T_1T_3+T_2^2)\frac{T_1+T_3}{T_1T_2^2}=0,$$

millest

$$k_p=\frac{T_1T_3}{T_2^2}+\frac{T_3^2}{T_2^2}+\frac{T_3}{T_1}.$$

Saime sama võrrandi (57) mis Hurwitzi kriteeriumistki.

Astaatilise avatud süsteemi ülekandefunktsioon on

$$W(p)=\frac{M(p)}{p^rD(p)}, \qquad (74)$$

kus $r=1, 2, 3\ldots$

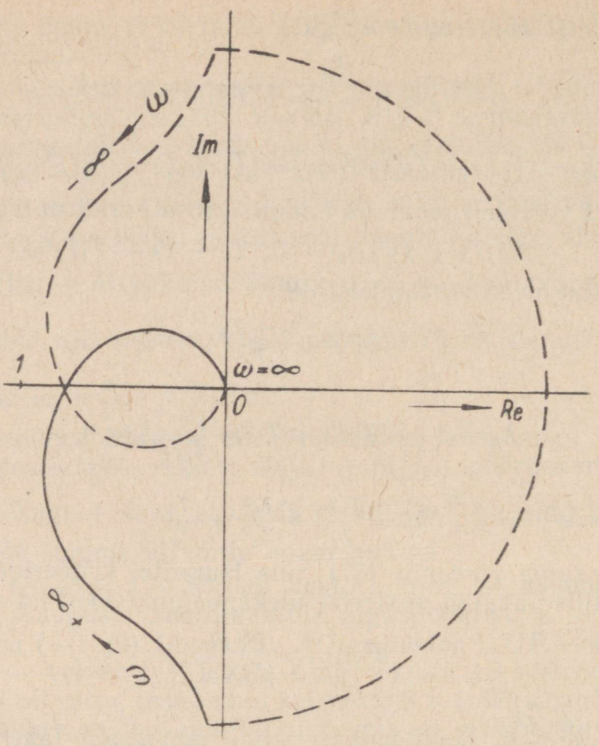
Amplituudi- ja faasi karakteristiku hodograaf läheneb lõpmatusele, kui $\omega\to 0$, kuid täiendades seda tinglikult lõpmatu suure raadiusega poolringiga, võime seda vaadelda kui suletud süsteemi ning kasutada selle jaoks samu, eespool toodud teoreeme (joon. 5-14).

Kriteeriumi praktilisel kasutamisel on soovitatav toimida järgmiselt. Vaatleme karakteristiku hodograafi seda haru, mis vastab ω positiivsetele väärtustele. Märgime nooltega karakteristiku hodograafi liikumise, mis vastab ω kasvamisele, ning vaatleme hodograafi üleminekuid läbi reaaltelje vasakult poolt $(-1, j0)$. Üleminekut sellest lõigust ülalt alla loeme positiivseks, alt üles aga negatiivseks. Kui $\omega=0$ puhul hodograaf algab lõigult, mis on vasakul pool punkti $(-1, j0)$, siis arvestame, et selles punktis ta sooritab $^1/_2$ üleminekut lõigust $(-\infty, -1)$.

Kui vahe positiivsete ja negatiivsete üleminekute vahel on $\frac{m}{2}$, kus m on avatud süsteemi nende lahendite arv, millel on positiivsed reaalosad, siis on suletud süsteem stabiilne.

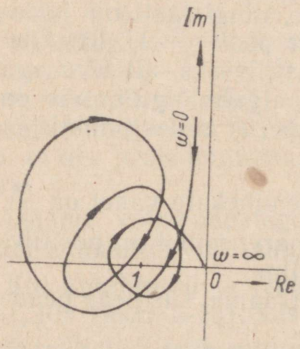
Kui avatud süsteem on stabiilne või neutraalne, siis peab nende üleminekute vahe võrduma nulliga.

Joonisel 5-15 toodud karakteristikul on positiivseid üleminekuid lõigust $(-\infty, -1)$ üks, negatiivseid aga kolm, vahe on seega $1-3=-2$; süsteem on ebastabiilne.



Joon. 5-14. Astaatilise süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf

Reguleerimissüsteemi või üksiku lüli amplituudi ja faasi karakteristikut võib eksperimentaalselt kergesti leida, kui tema sisendisse anda harmooniline konstantse amplituudiga võnkumine ning pärast aja möödumist, mis on küllaldane vabavõnkumise sumbumiseks, mõõta väljumissuuruse võngete amplituud ja faasinihe sisenemissuuruse võngete suhtes. Niisugust mõõtmist korratakse mitmesugustel teistel sagedustel, mida tuleks teoreetiliselt muuta 0-st kuni ∞-ni, praktiliselt aga on küllaldane mõnest sajandikust hertsist kuni mõnekümne hertsini, sõltuvalt uuritava lüli või süsteemi dünaamilistest omadustest. Saadud andmeil ehitatakse amplituudi ja faasi karakteristik. Kui on teada üksiku lüli amplituudi ja faasi karakteristik,



Joon. 5-15. Ebastabiilse süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku hodograaf

siis on ülaltoodud kriteeriumide põhjal kerge leida, missugune lüli ja kuidas (kas paralleelselt või järjestikku) ühendada süsteemi, et ebastabiilsest süsteemist saaks stabiilne süsteem.

Näiteks olgu meil ebastabiilne reguleerimissüsteem, mille karakterkõver haarab punkti (—1, j0) (joon. 5-16, *a*).

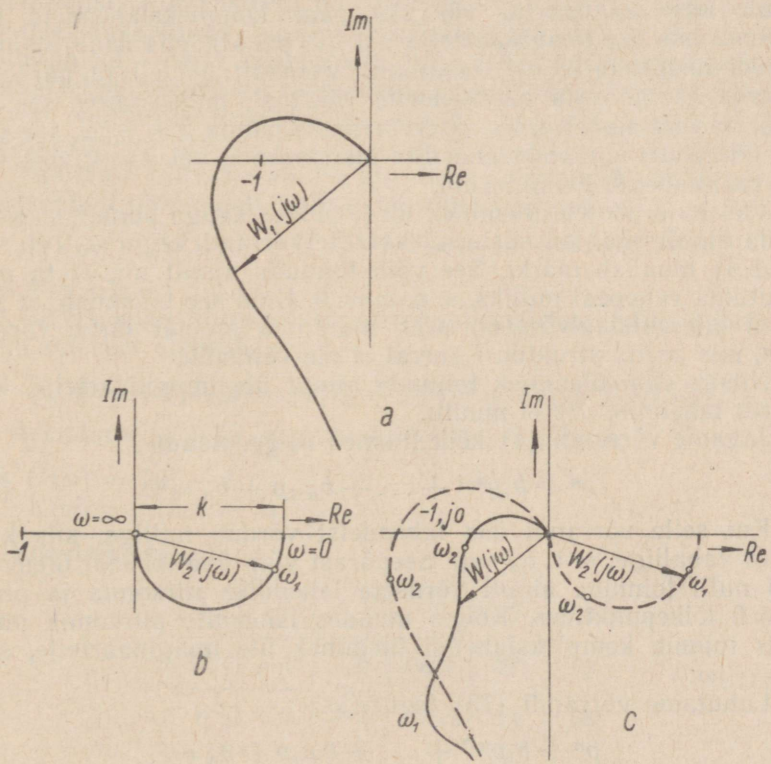
Ühendame reguleerimisskeemi sobivasse kohta aperioodilise lüli, mille ülekandefunktsioon (joon. 5-16, *b*) on

$$W(p) = \frac{k}{T_1 p + 1}$$

ja kompleksne sagedusfunktsioon

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega + 1}.$$

Leiame nüüd süsteemi summaarse amplituudi ja faasi karak-



Joon. 5-16. Ebastabiilse reguleerimissüsteemi (*a*), aperioodilise lüli (*b*) ja stabiilse reguleerimissüsteemi (*c*) amplituudi ning faasi karakteristiku hodograafid

teristiku hodograafi koos täiendava lüliga. Selleks liidame sama sageduse juures need kaks vektorit geomeetriliselt. Saame uue süsteemi. Kui oleme aperioodilise lüli parameetrid õigesti valinud, siis uus karakterkõver ei haara punkti (—1, j0) ning süsteem muutub stabiilseks (joon. 5-16, *c*).

Eespool vaatlesime stabiilsuse kriteeriume, mille abil oli võimalik selgitada, kas süsteem on stabiilne. Kuid süsteemis võivad tema töötamise ajal mõned parameetrid muutuda ning oleks vaja teada, kuidas käitub süsteem sel puhul. Eespool toodud Võšnegradski kriteeriumis olid välja eraldatud tegurid X ja Y, mille kaudu toimus süsteemi stabiilsuse uurimine. Meetodit eraldada stabiilsuse piirkondi sõltuvalt parameetri muutustest nimetatakse D-jaotuseks. See seisab järgmises. Eespool oli öeldud, et kui süsteem on stabiilne, siis on kõigi lahendite reaalosad negatiivsed ning lahendid asuvad komplekstasapinnas vasakul pool imaginaartelge. Lahendid aga on võrrandi tegurite, järelikult ka süsteemi parameetrite pidevad funktsioonid. Kui süsteem oli stabiilne ja muutus parameetrite muutuste tõttu ebastabiilseks, siis kas või ainult üks reaallahend või üks paar komplekslahendeid pidi minema kas üle imaginaartelje või üle punkti, mis asub lõpmatu kaugel imaginaarteljest, tasapinna vasakult poolelt ta paremale poolele. Et määrata parameetrite väärtust, mille juures see toimub, on vaja süsteemi karaktervõrrandis panna $p = \pm j\omega$, mis vastab ühe paari komplekslahendite üleminekule, või $p = 0$, mis vastab reaallahendi üleminekule.

Vasakule poolele üleminek üle lõpmatu kauge punkti võib toimuda ainult siis, kui süsteemi karaktervõrrandi tegur a_0 (vt. võrrand 4) muudab märki. See võib toimuda ainult nii, et ta peab muutuma vahepeal nulliks, s. o. $a_0 = 0$. Kuid see tähendab, et süsteemi diferentsiaalvõrrand peab muutuma alamat järku võrrandiks, mis antud struktuuri korral ei ole võimalik.

Niisiis võib üleminek toimuda ainult üle imaginaartelje, kusjuures lahendite arv ei muutu.

Jagame võrrandi (4) kõik liikmed a_0-ga. Saame:

$$p^n + b_1 p^{n-1} + \ldots + b_{n-1} p + b_n = 0. \qquad (75)$$

Kui selle võrrandi üks lahendeist võrdub nulliga, siis kaob selles vabaliige, s. t. $b_n = 0$. Seepärast võib ühe lahendi üleminek läbi nulli toimuda ainult võrdsete lahendite piirkonna ja pinna $a_n = 0$ lõikepunktides. Kõigis muudes lahendite piirkonna punktides toimub komplekslahendi üleminek üle imaginaartelje, s. t. $p = \pm j\omega$.

Lahutame võrrandi (75) tegureiks:

$$p^n + b_1 p^{n-1} + \ldots + b_{n-1} p + b_n =$$

$$= (p - p_1)(p - p_2) \ldots (p - p_n) = 0.$$

Kui $p_1 = 0$, siis $p(p - p_2) \ldots (p - p_n) = 0$. Järelikult vabaliiget

ei ole, sest viimaseks liikmeks on nüüd võrrandis liige, mis on korrutatud p-ga, s. o. $b_{n-1}p$.

Öeldust järeldub, et stabiilse piirkonna leidmiseks on vaja reguleerimissüsteemi võrrandis asendada $p = j\omega$, muuta ω $-\infty$-st kuni $+\infty$-ni ja iga ω jaoks leida kõigi tegurite (või parameetrite) võimalike väärtuste kogu, mis muudavad võrrandi vasaku poole nulliks. Pärast niisugust asendust võib saadud avaldisi lahendada, varieerides parameetrite arvulisi väärtusi. Kui neid varieeruvaid parameetreid on üks, siis on stabiilseks piirkonnaks mingi lõik. Kui neid parameetreid on kaks, siis kujutab D-jaotus tasapinda. Piirkõver jagab nende parameetrite tasapinna kaheks piirkonnaks — stabiilseks ja ebastabiilseks. Et süsteem oleks stabiilne, peavad nende parameetrite väärtused olema selle tasapinna stabiilses piirkonnas. D-jaotus kolme ja enam parameetri järgi kujutab juba ruumilisi pindu. Kõige rohkem kasutatakse praktikas stabiilse piirkonna leidmist kahe parameetri järgi (näiteks isodroomi aeg T_i ja statism δ). Pärast D-jaotuse teostamist on vaja veel määrata, missugune piirkond on stabiilne. Selleks kasutatakse viirutamist. Kui süsteem on stabiilne, siis asuvad kõik lahendid komplekstasapinnas vasakul pool imaginaartelge. Seega on ω muutumisel $-\infty$-st kuni $+\infty$-ni kõik lahendid vasakul pool imaginaartelge. Viirutame tasapinnas kõvera vasaku poole, mis vastab ω muutusele $-\infty$-st kuni $+\infty$-ni. See ongi stabiilseks piirkonnaks.

Vaatleme näiteks stabiilse piirkonna määramist ühe parameetri järgi. Olgu meil suletud süsteem, mille võrrand on

$$(T_1p + 1)(T_2^2p^2 + T_3p + 1) + k = 0,$$

kus $k = k_1k_2$.

On tarvis leida võimendusteguri k piirväärtus, mille puhul süsteem on veel stabiilne.

$$k = -T_1T_2^2p^3 - (T_1T_3 + T_2^2)p^2 - (T_1 + T_3)p - 1.$$

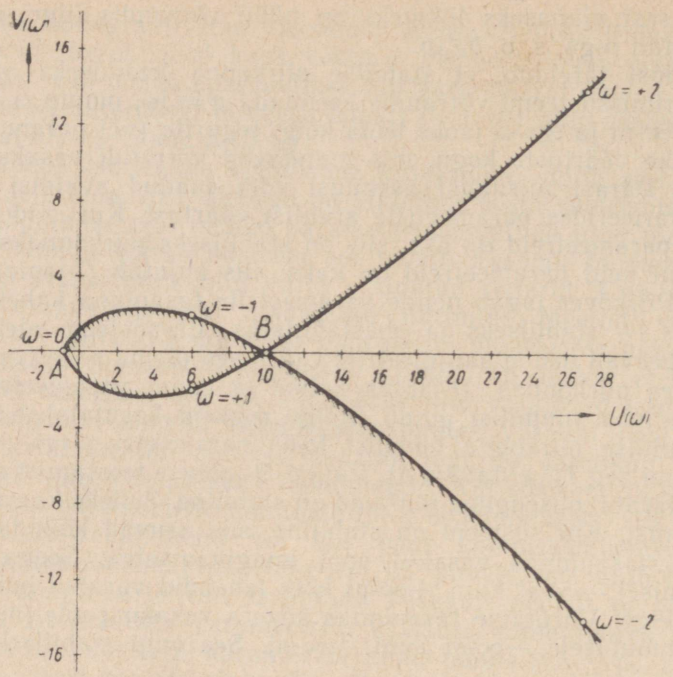
Asendame $p = j\omega$, saame: $k = U(\omega) + jV(\omega)$,

kus $U(\omega) = 7\omega^2 - 1$,
$V(\omega) = \omega(3\omega^2 - 5)$.

Koostame tabeli:

ω	0	1	1,5	2	3
U	−1	6	15,75	27	62
V	0	−2	2,625	14	66

ning leiame D-jaotuse k suhtes (joon. 5-17), kus k väärtus, mis vastab stabiilsele siirdeprotsessile, on viirutatud piirkonnas AB. Et k on reaalarv, siis on süsteem stabiilne, kui $-1 < k < 10{,}66$.



Joon. 5-17. Stabiilse piirkonna eraldamine

Amplituudi ja faasi pöördkriteerium. Tihti osutub automaatreguleerimissüsteemi uurimisel mugavaks kasutada amplituudi ja faasi pöördkarakteristikut.

$$\frac{1}{W(j\omega)} = \frac{N(j\omega)}{M(j\omega)}.$$

Et tavaliselt polünoomi $N(p)$ aste on suurem kui polünoomil $M(p)$, siis on amplituudi ja faasi pöördkarakteristiku ehitamine lihtsam kui amplituudi ja faasi karakteristiku $W(j\omega)$ ehitamine.

Amplituudi ja faasi pöördkarakteristiku hodograaf, olles sarnane Mihhailovi hodograafiga, kujutab süsteemi täiuslikumalt kui viimane, sest ta võtab arvesse süsteemi võrrandi nii vasakut kui ka paremat poolt. Mihhailovi hodograaf kujutab ainult võrrandi vasakut poolt.

Samal viisil nagu eespool amplituudi ja faasi karakteristiku puhul võib ka siin määrata avatud süsteemi punkti (—1, j0) haaramist, mis on vaja suletud süsteemi stabiilsuseks. Kuid lihtsam on uurida avatud süsteemi karakteristikut positiivse ω muutuse järgi ja lugeda selle üleminekuid läbi lõigu, mis asetseb negatiivsel reaalteljel koordinaatide alguspunkti ja punkti (1, —j0) vahel.

Kui vahe avatud süsteemi negatiivsete ja positiivsete ülemine-

kute vahel, mis vastavad ω muutusele 0-st kuni $+\infty$-ni võrdub $\frac{m}{2}$-ga, kus m on avatud süsteemi karaktervõrrandi $N(p)$ positiivsete reaalosadega lahendite arv, siis on suletud süsteem stabiilne.

Logaritmiline kriteerium. Paljudel juhtudel võib suletud automaatreguleerimissüsteemi stabiilsuse uurimisel võrdlemisi lihtsalt saavutada soovitud tulemusi avatud süsteemi amplituudi ja faasi sageduskarakteristikute omavahelise asetuse järgi, ükskõik kas tavalistes või logaritmilistes ühikutes.

On teada, et väga paljudel kõveratel väheneb logaritmilises mõõtühikus kujutamise puhul kõveruste arv. Seetõttu saame amplituudi ja faasi sageduskarakteristikuid logaritmilises mõõtühikus kujutades rea murtud sirgeid. Nii kahaneb arvutuste arv ja maht. Logaritmiliste sageduskarakteristikute ehitamisel kasutatakse sagedusühikuina rõhtteljel oktaavi või dekaadi ja püstteljel amplituudiühikuna detsibelli. Oktaav on ükskõik millise sageduse ω ja tema kahekordse sageduse logaritmide vahe, dekaad aga ω ja tema 10-kordse sageduse logaritmide vahe. Detsibell (dB) on logaritmiline ühik kahe suuruse või arvu suhte hindamiseks. Käesoleval juhul kasutame seda amplituudide võrdlemiseks. Kahe arvu suhet N loetakse võrdseks S detsibelliga, kui $S_{dB} = 20 \log N$, kus N on amplituudide suhe. Näiteks aperioodilisel lülil $W(p) = \frac{k}{Tp+1}$, mille moodul on

$$\frac{k}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}},$$

on ordinaat detsibellides

$$L(\omega) = 20 \log \frac{k}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}} = 20 \log k - 20 \log \sqrt{\omega^2 T^2 + 1}.$$

Kasutame ka siin eespool toodud reeglit suletud süsteemi stabiilsuse uurimiseks avatud süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku hodograafi üleminekute arvu järgi läbi lõigu $(-\infty, -1)$ negatiivsel reaalpoolteljel. Et sellel lõigul on amplituud suurem kui üks, siis vastavad sellele lõigule amplituudi sageduskarakteristiku need osad, mis asuvad kõrgemal joonest $H(\omega) = 1$ tavalise karakteristiku korral või kõrgemal joonest $Z(\omega) = 20 \log H(\omega) = 0$ logaritmilise karakteristiku puhul.

Amplituudi ja faasi karakteristiku hodograafi üleminekule läbi lõigu $(-\infty, -1)$ reaalteljel vastab argumendi väärtus $\varphi(\omega) = \pi$. Tõmbame joone $\varphi(\omega) = \pi$ ja vaatame, kuidas lõikab faasi sageduskarakteristik seda joont.

Vaatleme algul lihtsaimat juhtu, kus süsteemi amplituudi ja

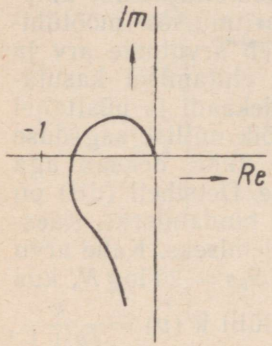
faasi karakteristikul, mis on stabiilne avatud olekus, ei ole lõikepunkte reaalteljega piirides $(-\infty, -1)$ (joon. 5-18):

$$W(j\omega) = H(\omega)e^{-j\varphi(\omega)},$$

millest

$$L(\omega) = \ln W(j\omega) = \ln H(\omega) - j\varphi(\omega).$$

Amplituudi logaritmilise sageduskarakteristiku joonestamiseks kanname püstteljele mooduli logaritmi, s. t. võimenduse detsibellides, ja rõhtteljele sageduse logaritmi. Faasi logaritmilise sageduskarakteristiku teeme aga nii, et püstteljele kanname faasi kraadides ja rõhtteljele sageduse logaritmi. Stabiilses süsteemis on sisenemis- ja väljumissuuruste suhe 1, faaside vahe aga 180°. Amplituudide suhte muutuse piiriks valime seega 20 log 1 = 0 detsibelli, faasi piiriks aga $-\pi$.



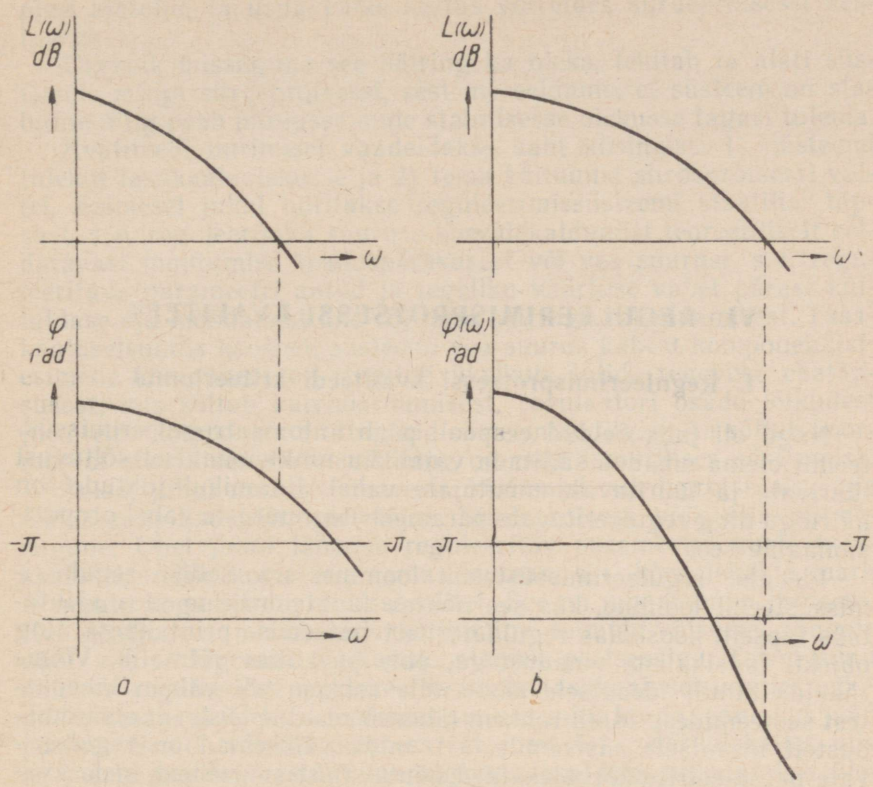
Joon. 5-18. Süsteemi amplituudi ja faasi karakterkõver

Selleks et süsteem, mis on stabiilne avatud olekus, oleks stabiilne ka suletud olekus, on vajalik, et kõigi sageduste puhul, mille korral amplituudi logaritmiline sageduskarakteristik on mittenegatiivne, s. t. $L(\omega) \geqslant 0$, faasi $\varphi(\omega)$ väärtus ei ületaks $-\pi$ (joon. 5-19).

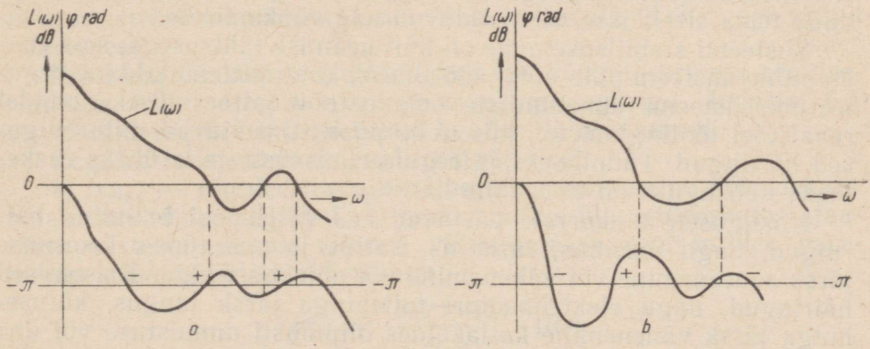
Vaatleme üldisemat juhtu, kus süsteem avatud olekus pole stabiilne ning tema karaktervõrrandil on m lahendit komplekstasapinna paremal pooltasapinnal.

Tavalise amplituudi ja faasi karakteristiku jaoks oli suletud süsteem stabiilne ainult sel juhul, kui amplituudi ja faasi karakteristiku hodograafi positiivsete ja negatiivsete üleminekute vahe läbi lõigu $(-\infty, -1)$ reaalteljel võrdus $\frac{m}{2}$-ga, kus m on avatud oleku positiivsete reaalosadega lahendite arv. Kui siin leppeliselt nimetada üleminekut, kus faasi karakteristik lõikab sirget $(-\pi)$ alt üles, positiivseks, üleminekut, kus ta lõikab seda sirget ülalt alla, aga negatiivseks, siis võib stabiilsuse kriteeriumi logaritmiliste sageduskarakteristikute jaoks väljendada järgmiselt.

Selleks et süsteem, mille avatud oleku karaktervõrrandil on m lahendit paremal pooltasapinnal, oleks stabiilne suletud olekus, on vajalik ja küllaldane, et faasi karakteristiku $\varphi(\omega)$ positiivsete üleminekute arv sirgest $(-\pi)$ oleks $\frac{m}{2}$ võrra suurem negatiivsetest üleminekutest nende sageduste ω puhul, mille juures amplituudi logaritmiline sageduskarakteristik pole negatiivne (joon. 5-20).



Joon. 5-19. Logaritmiline sageduskarakterkõver:
a — stabiilne, *b* — ebastabiilne



Joon. 5-20. Näited suletud stabiilse (*a*) ja ebastabiilse (*b*) süsteemi logaritmiliste sageduskarakterkõverate kohta

VI. REGULEERIMISPROTSESSI KVALITEET

1. Reguleerimisprotsessi kvaliteedi kriteeriumid

Nagu oli juba öeldud eespool, peab automaatreguleerimissüsteemil olema omadus säilitada vajalikku funktsionaalset sõltuvust tüürivate ja tüüritavate muutujate vahel. Enamikul juhtudel on häiringu ning reguleeritavate parameetrite muutuste vahel proportsionaalne seos.

Ideaalse reguleerimissüsteemi loomine, s. t. sellise reguleerimissüsteemi loomine, kus see nõutav funktsionaalne seos säilitataks täpselt, kooskõlas regulaatorite tegutsemise printsiibiga ning objekti füüsikaliste omadustega, pole praktikas võimalik. Võime rääkida ainult ideaalsele süsteemile rohkem või vähem lähedastest süsteemidest. Mida rohkem läheneb reaalne süsteem oma omadustelt ideaalsele süsteemile, s. t. mida väiksemad on reguleerivate parameetrite kõrvalekalded nõutavatest suurustest, seda kvaliteetsem on reguleerimisprotsess, kuid seda keerulisem on ka süsteem. Praktikas tuleb leida kompromisslahendus, s. t. leida reguleerimissüsteem, mis suhteliselt lihtsamate tehniliste vahenditega tagaks töö kõrge kvaliteedi.

Et reguleerimissüsteemid sisaldavad lülisid, mis akumuleerivad energiat, kusjuures pealegi osa väljumisenergiast võib tagasi pöörduda tema sisendisse, siis kalduvad nad võnkumisele.

Süsteemi stabiilsuse nõue on küll peamise tähtsusega, sest ebastabiilne süsteem pole üldse töökõlblik, kuid mitteküllaldane reguleerimissüsteemi dünaamiliste omaduste illustreerimiseks nendel reaalsetel töötingimustel, kus neile püsivalt mõjuvad mitmesugused häiringud. Tüüpiliseks ja reguleerimissüsteemile üheks raskemaks häiringuks on hüppeline häiring.

Niisugusele olukorrale vastavad kas väljaspool tekitatud häiringud, nagu masinas, turbiinis, katlas jms. seadmes koormuse järsk suurenemine või vähenemine või objektis tekkivad sisemised häiringud, nagu elektrimootori toitepinge järsk langus, kütusehulga järsk vähenemine katlakoldes õlipihusti ummistuse või ühe šahtveski kas täieliku rivist väljalangemise või ta karakteristiku järsu muutumise jne. tõttu.

Mõnikord võetakse tüüpiliseks häiringuks deltafunktsioonikujuline häiring, s. t. meelevaldse kujuga impulss, millel on kindel pind ajateljel ja üsna väike kestus võrreldes siirdeprotsessi kestusega.

Ükskõik missugune see häiring ka oleks, tekitab ta alati süsteemis mingi siirdeprotsessi, sest me eeldame, et süsteem on stabiilne ning peab mingisse uude stabiilsesse olekusse tagasi tulema.

Kvaliteedi uurimisel vaadeldakse kaht küsimust: 1) süsteemi tulekut tasakaaluolekusse ja 2) tema käitumist siirdeprotsessi vältel. Esimesel juhul uuritakse reguleerimissüsteemi staatilist täpsust, s. o. reguleeritava suuruse kõrvalekaldumist teoreetiliselt eeldatavast muutumise seaduspärasusest või vea suurust, s. t. reguleeritava parameetri antud ja tegeliku väärtuse vahet pärast küllaldase aja möödumist ühe või teise häiringu rakendamisest. Tasakaaluseisundis koosneb süsteemi vea suurus kahest komponendist: esimene komponent on tingitud üksikute lülide tegevuse ebatäpsusest, mis sõltub kuivhõõrdumisest, regulaatori osade lõtkudest jne., teine komponent on tingitud süsteemide liigist (ta sõltub koormusest staatilises süsteemis ning on null astaatilises süsteemis).

Teisel juhul uurime süsteemi käitumist siirdeprotsessis, mis tekkis tüüpilise häiringu mõjul. Siirdeprotsess võib olla mitmesugune. Ühel juhul läheneb reguleeritav parameeter uuele tasakaaluseisundile kogu aeg samas suunas, s. t. kõrvalekalde märk ei muutu kogu siirdeprotsessi vältel. See on monotoonne protsess. Kui sealjuures parameetri muutumine toimub väikeste võngete näol, siis on tegemist võnkuvmonotoonse protsessiga. Teisel juhul läheneb reguleeritav parameeter uuele tasakaaluseisundile, möödudes tasakaaluolekust mõlemas suunas mitu korda, enne kui jääb püsima. See on võnkuv protsess (vt. joon. 5-1). Kõrvalekallet, mis on märgi poolest vastupidine algkõrvalekaldele, nimetatakse ülereguleerimiseks.

Automaatreguleerimissüsteemi töötamiskiirust hinnatakse reguleerimisaja järgi.

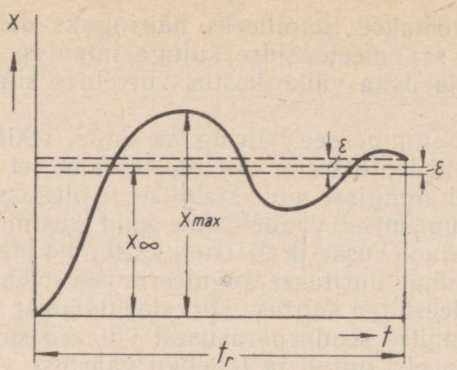
Reguleerimisajaks nimetatakse aega, mille vältel siirdeprotsessi tekkimisest alates reguleeritava parameetri kõrvalekalle tema tasakaaluasendile vastavast väärtusest muutub lõplikult väiksemaks mingist etteantud väikesest suurusest ε (tavaliselt 3 . . . 5% antud väärtusest).

Protsessi võnkuvust iseloomustatakse võngete arvuga reguleerimisaja vältel ning võnkumise sumbumisteguriga. Joonisel 6-1 on toodud reguleerimisprotsessi kvaliteedi hinnangud.

Reguleerimisprotsessi kvaliteedinäitajad:

1) x_{max} — reguleeritava parameetri maksimaalne kõrvalekalle astaatilise süsteemi puhul või maksimaalne ülereguleerimine staatilise süsteemi puhul; viimast väljendatakse protsentides parameetri püsimajäänud väärtusest:

$$\sigma\% = \frac{x_{max} - x_{(\infty)}}{x_{(\infty)}} \cdot 100;$$



Joon. 6-1. Reguleerimisprotsessi kvaliteedi hinnangud

2) $x_{(\infty)}$ — süsteemi statism (võrdub astaatilistes ja isodroomsetes süsteemides nulliga)

$$x_{(\infty)} = \lim_{t \to \infty} x(t);$$

3) t_r — reguleerimisaeg, s. t. aeg, mille jooksul

$$|x(t) - x_{(\infty)}| \leqslant \varepsilon,$$

kus ε on etteantud väike arv (on maksev ka sel juhul, kui $x_{(\infty)} \to 0$);

4) reguleeritava suuruse $x(t)$ võngete arv reguleerimisaja vältel; siin $x(t)$ on suhteline suurus.

Seejuures arvestatakse, et süsteemil on nõutav kvaliteet, kui ta statism $x_{(\infty)}$, maksimaalne kõrvalekalle x_{max} (või ülereguleerimine σ), reguleerimisaeg t_r ja võngete arv ei ületa varem etteantud väärtusi.

Kui aga välised häiringud on süsteemides vahetpidamatult ja väga sagedasti muutuvad funktsioonid ajast, nagu iga liiki segamised, mis on otsustava tähtsusega niisugusele reguleerimisprotsessile, nagu seda on näiteks raadiolokaatori antenni juhtimine, siis kaotavad niisugused kvaliteedinäitajad, nagu reguleerimisaeg, statism, võngete arv ja samuti ülereguleerimine oma mõtte ning vea hindamine muutub palju keerukamaks. Tavaliselt kasutatakse sel puhul hindamist keskmise ruutvea järgi.

Kõiki kaasaegseid reguleerimisprotsessi kvaliteedi analüüsimise meetodeid võib jagada kahte gruppi: otsesed ja kaudsed.

Otsese meetodiga analüüsimisel lahendatakse süsteemi diferentsiaalvõrrand. Saadud graafikult võime lugeda andmed kõigi eelmainitud kvaliteedinäitajate kohta. Vaatamata oma täpsusele ja pilt-

likkusele on sellel meetodil siiski rida puudusi. Esiteks on see meetod rakendatav ainult ühe kindla häiringutüübi korral. Teiseks võib kõrgema kui kolmanda astme võrrandi lahendamine toimuda ainult ligikaudselt. Kolmandaks on saadud võrrandist raske näha, kuidas mõjub reguleerimisprotsessi kvaliteedile üks või teine parameeter. Et seda mõju selgitada, tuleks parameetrite erinevate arvuliste väärtuste korral teha kordusarvutusi. Niisuguse meetodi keerukuse ja töömahukuse tõttu on reguleerimisprotsessi kvaliteedi uurimiseks välja töötatud rida kaudseid mooduseid, mis võimaldavad suhteliselt lihtsate meetodite abil teha vajalikke järeldusi.

Vaatluse alla tulevad järgmised kaudsed kriteeriumid: süsteemi karaktervõrrandi lahendite asetuse määramise kriteerium, integraalsed kriteeriumid ja sageduskriteeriumid. Levinuim on sagedusmeetod.

Karaktervõrrandi lahendite asetuse meetod annab juhul, kui on teada süsteemi võrrandi kujutise $F(p)$ nullide ja pooluste suurused komplekstasapinnas (nullid — lugeja lahendid, poolused aga nimetaja lahendid murrus $W(p) = \frac{M(p)}{N(p)}$), võimaluse määrata siirdeprotsessi mõningaid omadusi. Komplekstasapinnas võib lahendeid asetada nii, isegi mitte teades nende täpseid arvulisi väärtusi, et siirdeprotsess rahuldaks teatavaid nõudeid. Selleks on vaja leida ka ülekandefunktsiooni $W(p)$ nullide asetus. Seda operatsiooni on kerge teha, sest nullid on tavaliselt teada või kergesti määratavad. Näiteks olgu meil süsteem, mis koosneb ühest integreerivast, kolmest aperioodilisest ja ühest diferentseerivast lülist, mis on omavahel järjestikku ühendatud. Selle süsteemi avatud oleku ülekandefunktsioon on

$$W(p) = \frac{k(T_1p+1)}{p(T_2p+1)(T_3p+1)(T_4p+1)} \tag{1}$$

ja sama süsteemi suletud oleku ülekandefunktsioon

$$W_s(p) = \frac{k(T_1p+1)}{p(T_2p+1)(T_3p+1)(T_4p+1)+k(T_1p+1)}. \tag{2}$$

Kui sisenemissuuruse $x_s(t)$ on ühikfunktsioon (tema kujutis on ka üks), siis võrrand (2) on reguleeritava suuruse kujutis.

Võrrandi (2) nullid on teada. Käesoleval juhul on meil ainult üks null, s. o. $p_1 = -\frac{1}{T_1}$. Selle võrrandi pooluseid aga, s. t. nimetaja lahendeid, mis on ühtlasi ka süsteemi karaktervõrrandi lahendeiks, pole teada. Üldiselt on süsteemi suletud oleku karaktervõrrand hulkliikmete $M(p)$ ja $N(p)$ summa, kus $M(p)$ lahendid on teada, $N(p)$ lahendid aga mitte. Viimased tuleb leida.

Kui süsteem on stabiilne, siis kõik hulkliikme $N(p)$ lahendid on vasakul pool komplekstasapinnas.

Olgu meil süsteemi karaktervõrrand

$$a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_{n-1}p + a_n = 0. \quad (3)$$

Kui $-p_1$, $-p_2 \ldots -p_n$ on karaktervõrrandi mittevõrdsed lahendid, siis on vabavõnkumise üldintegraal (vt. valem 4-21)

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i e^{p_i t}. \quad (4)$$

Suurus A_i sõltub nii hulkliikmest $M(p)$ kui ka $N(p)$, p_i aga ainult hulkliikmest $M(p)$. Et A_i on kordajaks liikmete ees, p_i aga asub astmenäitajas, siis mõjub protsessi kujule rohkem p_i kui A_i muutus. Siirdeprotsessi iga liikme sumbumise kiiruse määrab suurus $T_i = -\frac{1}{p_i}$. Aeglasemalt kahanevad need liikmed, millel on suurem ajakonstant, s. t. karaktervõrrandi väiksemad tegurid. Järelikult võib öelda, et karaktervõrrandi väikseim liige iseloomustab mingil määral kogu protsessi sumbumist. Vahemaad kompleksstasapinnas imaginaartelje ja temale lähima lahendi vahel nimetatakse stabiilsusastmeks. Kui objekti ajakonstant on regulaatori ajakonstandist tunduvalt suurem, siis asuvad tihti karaktervõrrandi üks või kaks lahendit imaginaarteljele tunduvalt lähemal kui teised. Neil juhtudel võib siirdeprotsessi hinnata kõige väiksema lahendi, s. t. stabiilsusastme järgi.

Stabiilsusastet nimetatakse aperioodiliseks, kui imaginaarteljele lähim lahend on reaalarv, ning võnkuvaks, kui lähim lahend on kompleksne. Kui stabiilsusaste on aperioodiline, siis omab domineerivat tähtsust eksponent, mis on määratud selle lahendiga. Siirdeprotsessi võnkumise sumbumise kiiruse määrab üldjoontes see eksponent.

Kui lähim lahend kujutab võnkuvat liikumist, siis iseloomustab üldiselt protsessi sumbuv sinusoid, mille mähiskõvera võrrand on

$$x = Ce^{-\alpha_0 t}, \quad (5)$$

kus α_0 on imaginaarteljele lähima komplekslahendi reaalosa.

Määrame tingimuse, mille täitmise korral reguleeritav suurus aja T jooksul võrduks $\frac{1}{m}$ osaga oma endisest suurusest, s. t. nõuame, et väikseima lahendi reaalosa poleks väiksem kui mingi suurus η, s. o.

$$\frac{1}{m} = e^{-\eta T}. \quad (6)$$

Sel viisil anname kaudsel teel ette protsessi stabiliseerimise aja.

Logaritmides võrrandi (6) saame:

$$\eta = \frac{\ln m}{T}. \tag{7}$$

Kui lahendite reaalosad on absoluutväärtuse poolest suuremad kui η, siis sumbub iga liige $C_i e^{-p_i t}$ kiiremini kui $e^{-\eta T}$. Järelikult on selleks, et reguleeritav parameeter x väheneks aja T jooksul m korda, vaja, et kõik karaktervõrrandi lahendid oleksid vasakul pooltasapinnal niisugusel kaugusel imaginaarteljest, mis on võrdne või suurem kui $\frac{\ln m}{T}$.

Viime imaginaartelje vasakule suuruse η võrra: $p = z - \frac{\ln m}{T}$, siis saame võrrandist (3):

$$a_0\left(z - \frac{\ln m}{T}\right)^n + a_1\left(z - \frac{\ln m}{T}\right)^{n-1} + \ldots + a_n = 0. \tag{8}$$

Kui selle võrrandi jaoks on stabiilsuse kriteerium (Routh, Hurwitz) rahuldatud, siis on saavutatud ka protsessi soovitud sumbumise kiirus.

Olgu meil näiteks suletud süsteemi karaktervõrrand

$$p^3 + 7p^2 + 16p + k = 0.$$

Soovitakse süsteemi võimendustegur k valida nii, et kolme sekundi pärast poleks siirdeprotsessi kõige aeglasema sumbumisega liikme suurus suurem kui 5% ta algväärtusest. Seega

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{20}; \quad T = 5, \text{ ning } \eta = \frac{\ln m}{T} = \frac{\ln 20}{3} = 0{,}99 \approx 1.$$

Koostame võrrandi

$$(z-1)^3 + 7(z-1)^2 + 16(z-1) + k = 0,$$

millest

$$z^3 + 4z^2 + 5z - 10 + k = 0.$$

Kasutame Hurwitzi kriteeriumi kolmandat järku võrrandi jaoks:

$$k - 10 > 0 \text{ ja } 4 \cdot 5 - 1(k - 10) > 0,$$

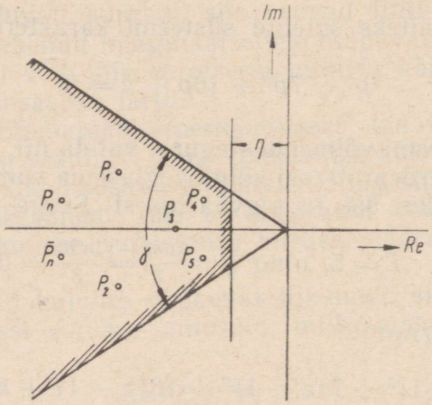
millest saame, et $10 < k < 30$, s. t. k väärtus peaks sel juhul olema kümne ja kolmekümne vahel.

Kuigi kogu protsessi sumbumise aeg ei sõltu ainult ühest liikmest, siiski see kriteerium, olles küll kaudne, on mõningal määral iseloomustav.

Üldist lahendite asetust komplekstasapinnas võib iseloomustada kahe suurusega: eespool nimetatud kaugusega η ja nurgaga γ, millesse mahuvad kõik reaalteljest mingil kaugusel asuvad komplekslahendid. Suurus γ iseloomustab kaudselt süsteemi võnkuvust. γ määratakse võrrandist

$$\frac{1}{2}\gamma = \operatorname{arc\,tan}\varphi, \text{ kus } \varphi = \frac{\beta}{\alpha}.$$

Siin β on süsteemi karaktervõrrandi imaginaarteljele kõige lähema lahendi imaginaarosa ja α — ta reaalosa. Alapiirkond, mis on piiratud võrdse stabiilsusastme sirgega $\eta = \text{const}$, vastab kõigi lahendite asetusele komplekstasapinnas vasakul pool sirget, mis on imaginaarteljega paralleelne ja asub temast kaugusel η. Alapiirkonnale, mida piirab võrdne sumbumise logaritmiline dekrement $\varphi = \text{const}$ (kui kõigi lahendite reaalosa arvulise väärtuse suhe ta enda imaginaarosaga on suurem kui φ), vastab kõigi lahendite asetus nurgas, mille moodustavad koordinaatide algusest tulevad ja reaalteljega nurga $\gamma = \operatorname{arc\,tan}\varphi$ moodustavad sirged (joon. 6-2). Järelikult selleks, et saavutada antud sumbumiskiirusega ja minimaalse võnkuvusega reguleerimisprotsess, on vaja, et kõik karaktervõrrandi lahendid oleksid seespool viirutatud pinda (joon. 6-2).



Joon. 6-2. Süsteemi kvaliteedi hinnang lahendite asetuse järgi komplekstasapinnas

Nimetatud meetod on kõlblik ainult nende siirdeprotsesside kvaliteedi hindamiseks, mida kujutatakse homogeensete diferentsiaalvõrranditega tüüpiliste algtingimuste korral. Teda võib seega kasutada ainult tõukekujulise (ühikfunktsioonikujulise) häiringu puhul ning süsteemi vabavõnkumiste uurimiseks, sest see meetod hindab ainult funktsiooni pooluseid ega võta arvesse nulle, s. t. võrrandi parema poole lahendeid. Meetod annab võimaluse uurida siirdeprotsessi aega ja võnkumise iseloomu, s. t. kaudsel teel ülereguleerimist. Siinjuures on aga vaja teada karaktervõrrandi

lahendite üldist asetust ning algtingimusi, mis nõuab suuremaid või vähemaid eelarvutusi. Viimaste maht sõltub karaktervõrrandi astmest. Praktiliselt on selle meetodi kasutamise ülemiseks piiriks neljanda astme võrrandid.

Integraalsete hinnangute meetod kuulub reguleerimisprotsessi kvaliteedi uurimise analüütiliste meetodite hulka. Analüütiliste uurimismeetodite rakendamisel iseloomustatakse protsessi kvaliteeti analüütilisel kujul süsteemi parameetrite kaudu. Suurusteks, mis iseloomustavad reguleerimisprotsessi integraalsete hinnangute meetodi kasutamisel, on integraalid aja järgi reguleeritava parameetri mingist funktsioonist või mõnest muust süsteemi koordinaadist. Käesoleval ajal leiavad laiemalt kasutamist kriteeriumid integraalide

$$I_0 = \int_0^\infty x\,dt, \quad I_1 = \int_0^\infty x^2\,dt \text{ ja } I_\tau = \int_0^\infty (x^2 + \tau^2 \dot{x}^2)\,dt$$

järgi.

Integraalsete hinnangute kuju, s. t. integraalialuste funktsioonide kuju valitakse arvestusega, et nad ühest küljest paremini hindaksid siirdeprotsessi kvaliteeti, teisest küljest aga võimalikult lihtsamini väljenduksid reguleerimissüsteemi võrrandite tegurite kaudu.

Need nõuded on teineteisele vastukäivad ja mõnikord on kasulik tarvitada hinnanguid, mis ei väljenda küll väga täpselt siirdeprotsessi kvaliteeti, kuid see-eest on võrdlemisi lihtsalt määratavad süsteemi võrrandi tegurite kaudu.

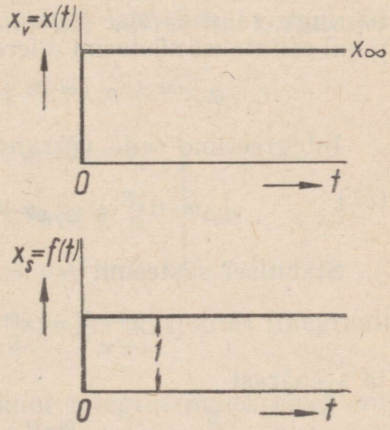
Siirdeprotsess oleks ideaalne, kui reguleeritav parameeter tõukelise häiringu tagajärjel saavutaks staatilise süsteemi puhul ka samal hetkel uue väärtuse (joon. 6-3).

Reaalsetes süsteemides on niisugune protsessi kulgemine võimatu, kuid loetakse, et reaalne protsess läheneb seda rohkem ideaalsele, mida väiksem on pind tõelise reguleerimisprotsessi ja ideaalse reguleerimisprotsessi kulgemise graafikute vahel (joon. 6-4).

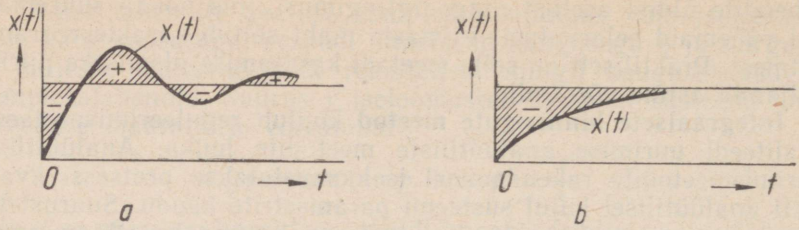
Juhul kui puudub ülereguleerimine (joon. 6-4, *b*), kasutatakse integraali

$$I_0 = \int_0^\infty x\,dt, \qquad (9)$$

kui aga ülereguleerimine esineb (joon. 6-4, *a*), siis integraali



Joon. 6-3. Ideaalse staatilise süsteemi siirdeprotsess



Joon. 6-4. Integraalne kvaliteedi hinnang pindade järgi

$$I_1 = \int_0^\infty x^2 \mathrm{d}t, \tag{10}$$

kus x on vahe reguleeritava suuruse ideaalse ja tegeliku väärtuse vahel. Ideaalsel juhul $x \to 0$, kui $t \to 0$, mis tähendab seda, et arvutame reguleeritava parameetri kõrvalekaldumist u u e s t tasakaaluasendist. Niisugune kriteeriumide praktiline valimine on raskendatud seetõttu, et ainult üksikutel juhtudel on võimalik varem öelda, kas ülereguleerimine esineb või mitte.

Kasutades integraalset meetodit, määratakse kõigepealt, kuidas antud hinnang on seotud protsessiga. Eeldatakse, et hinnangu ekstreemum, tavaliselt miinimum, vastab optimaalsele protsessile, kusjuures see hinnang väljendatakse nende reguleerimissüsteemi parameetrite kaudu, mida soovitakse valida. Nende valitud parameetrite kaudu määrataksegi hinnangu miinimum (või maksimum). Resultaadi kontrollimiseks tehakse lõpuks siirdeprotsessi graafik.

Lihtsaim hinnang on $I_0 = \int_0^\infty x \mathrm{d}t$. Tavaliselt valitakse esialgne, häiringu rakendamise hetkel tekkinud kõrvalekalle $x_0 = \pm 1$. Sel juhul esitatakse süsteemi diferentsiaalvõrrand ilma parema pooleta:

$$a_0 x^{(n)} + a_1 x^{(n-1)} + \ldots + a_{n-1} \dot{x} + a_n x = 0. \tag{11}$$

Integreerime seda võrrandit liikmete kaupa:

$$a_0 x^{(n-1)} \Big|_0^\infty + a_1 x^{(n-2)} \Big|_0^\infty + \ldots + a_n \int_0^\infty x \mathrm{d}t = 0. \tag{12}$$

Stabiilsel süsteemil

$$\underset{t \to \infty}{x^{(n-1)}} = \underset{t \to \infty}{x^{(n-2)}} = \ldots = \underset{t \to \infty}{\dot{x}} = 0 \tag{13}$$

ja seepärast

$$\int_0^\infty x \mathrm{d}t = \frac{a_0 x_0^{(n-1)} + a_1 x_0^{(n-2)} + \ldots + a_{n-1} x_0}{a_n}. \tag{14}$$

Operaatorimeetodit kasutades võime leida ülaltoodud integraali, ilma et tarvitseks välja arvutada algtingimusi $x_0^{(n-1)}$, $x_0^{(n-2)}$ jne. Meil oli

$$\frac{F(p)}{p} = \int_0^\infty x e^{-pt} \mathrm{d}t,$$

millest saame otsekohe, kui $p \to 0$,

$$\int_0^\infty x \mathrm{d}t = \lim_{p \to 0} \left| \frac{F(p)}{p} \right|. \tag{15}$$

Mida väiksem on I_0, seda kiiremini toimub reguleerimine ja seda väiksem on reguleerimisaeg. Kui aga reguleerimisprotsessis esineb ülereguleerimine (siirdeprotsess on võnkuv), siis ei ole see hinnang õige.

Kui siirdeprotsess on võnkuv, siis on ta ideaalsele seda lähedasem, mida väiksem on integraal

$$I_1 = \int_0^\infty x^2 \mathrm{d}t. \tag{16}$$

Et meil tavaliselt ei ole teada siirdeprotsessi iseloomu, siis on praktiliselt parem alati kasutada kriteeriumi (16).

Näiteks olgu antud süsteemi kolmanda järgu võrrand

$$a_0 \frac{\mathrm{d}^3 x}{\mathrm{d}t^3} + a_1 \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} + a_2 \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + a_3 x = 0. \tag{17}$$

Moodustame võrrandist (17) kolm uut võrrandit, korrutades teda teguritega $\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}$, $\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$ ja x:

$$\left.\begin{aligned} a_0 \dddot{x}\ddot{x} + a_1 \ddot{x}^2 + a_2 \dot{x}\ddot{x} + a_3 x \ddot{x} &= 0 \\ a_0 \dddot{x}\dot{x} + a_1 \ddot{x}\dot{x} + a_2 \dot{x}^2 + a_3 x \dot{x} &= 0 \\ a_0 \dddot{x} x + a_1 \ddot{x} x + a_2 \dot{x} x + a_3 x^2 &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

Integreerime neid võrrandeid liikmete kaupa, kusjuures integraali $\int_0^\infty x^{(m)} x^{(l)} \mathrm{d}t$ integreerime ositi seni, kuni integreerimine lõpeb või kuni jääb integraal $\int_0^\infty (x^{(n)})^2 \mathrm{d}t$.

Integraali $\int_0^\infty a_0 \dddot{x}\ddot{x}\,dt$ leidmiseks tähistame $u = \ddot{x}$ ja $dv = \dddot{x}\,dt$, millest saame, et $du = \dddot{x}\,dt$ ja $v = \int \dddot{x}\,dt = \ddot{x}$.

Siis leiame

$$a_0 \int_0^\infty \dddot{x}\ddot{x}\,dt = a_0 \ddot{x}^2 \Big|_0^\infty - a_0 \int_0^\infty \ddot{x}\dddot{x}\,dt,$$

millest

$$a_0 \int_0^\infty \dddot{x}\ddot{x}\,dt = a_0 \frac{\ddot{x}^2}{2}\Big|_0^\infty = -\frac{a_0}{2}\ddot{x}_0^2,$$

sest stabiilses süsteemis, kui $t \to \infty$, peavad kõik x-i tuletised ja ta ise muutuma nulliks. Kui $t = 0$, siis võrduvad nad oma algväärtusega. Analoogiliselt leiame, et

$$\left.\begin{aligned} &\int_0^\infty a_2 \dot{x}\ddot{x}\,dt = a_2 \frac{\dot{x}^2}{2}\Big|_0^\infty = -\frac{a_2}{2}\dot{x}_0^2; \\ &\int_0^\infty a_3 x\ddot{x}\,dt = a_3 x\dot{x}\Big|_0^\infty - a_3 \int_0^\infty \dot{x}^2\,dt = -a_3 x_0 \dot{x}_0 - a_3 \int_0^\infty \dot{x}^2\,dt \\ &\int_0^\infty a_0 \dddot{x}\dot{x}\,dt = a_0 \dot{x}\ddot{x}\Big|_0^\infty - \int_0^\infty \ddot{x}^2\,dt \end{aligned}\right\} \quad (19)$$

jne.

Tulemusena saame kolmest võrrandist koosneva süsteemi. Tähistades siin

$$I_1 = \int_0^\infty x^2\,dt; \quad I_2 = \int_0^\infty \dot{x}^2\,dt \text{ ja } I_3 = \int_0^\infty \ddot{x}^2\,dt, \quad (20)$$

saame esimesest võrrandist (18)

$$-\frac{a_0}{2}\ddot{x}_0^2 + a_1 \int_0^\infty \ddot{x}^2\,dt - \frac{a_2}{2}\dot{x}_0^2 - a_3 x_0 \dot{x}_0 - a_3 \int_0^\infty \dot{x}^2\,dt = 0,$$

ehk

$$a_1 \int_0^\infty \ddot{x}^2\,dt - a_3 \int_0^\infty \dot{x}^2\,dt = a_1 I_3 - a_3 I_2 = a_0 \frac{\ddot{x}_0^2}{2} + a_2 \frac{\dot{x}_0^2}{2} + a_3 x_0 \dot{x}_0 = C_1.$$

Analoogiliselt teisest ja kolmandast võrrandist (18) saame

$$-a_0\int_0^\infty \ddot{x}^2\mathrm{d}t + a_2\int_0^\infty \dot{x}^2\mathrm{d}t = -a_0 I_3 + a_2 I_2 =$$

$$= a_0\ddot{x}_0\dot{x}_0 + \frac{a_1}{2}\dot{x}_0^2 + \frac{a_3}{2}x_0^2 = C_2;$$

$$-a_1\int_0^\infty \dot{x}^2\mathrm{d}t + a_3\int_0^\infty x^2\mathrm{d}t = -a_1 I_3 + a_3 I_0 =$$

$$= a_0\ddot{x}_0 x_0 - a_0\frac{\dot{x}_0^2}{2} + a_1\dot{x}_0 x_0 + a_2\frac{x_0^2}{2} = C_3.$$

Siit leiame I_1:

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & -a_3 & C_1 \\ -a_0 & a_2 & C_2 \\ 0 & -a_1 & C_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & -a_3 & 0 \\ -a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & -a_1 & a_3 \end{vmatrix}}. \tag{21}$$

Kui võrrandisüsteemi üht või rohkemat tegurit võib varieerida, siis võib leida $I_{1\,min}$ sõltuvalt neist tegureist. Näiteks kui neiks tegureiks on a_1 ja a_2, siis on vastav miinimum

$$\frac{\partial I_1}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial I_1}{\partial a_2} = 0. \tag{22}$$

Lahendades need kaks võrrandit koos, võib leida *minimum minimorumi.*

Et käsitletud integraalne kriteerium (10) hindab protsessi ruutsõltuvuse järgi, siis võib tugevasti võnkuv protsess saada parema hinnangu kui monotoonne protsess: see aga pole alati õige. Kui võnkumise olemasolu pole määrava tähtsusega, siis annab see kriteerium rahuldavaid tulemusi.

Et pääseda tugevasti võnkuva protsessi saamisest, soovitatakse valida parameetrid nii, et integraal

$$I_\tau = \int_0^\infty [x^2 + \tau^2\dot{x}^2]\mathrm{d}t \tag{23}$$

oleks minimaalne.

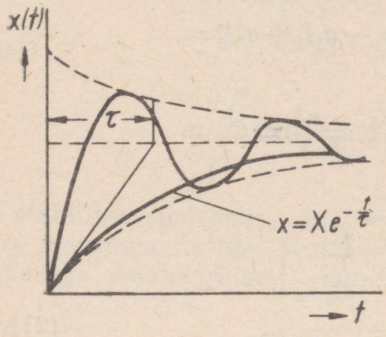
Siin on τ konstant, mille mõõtühikuks on ajaühik. τ antud väärtuse korral on sellel integraalil miinimum, kui x rahuldab võrrandit

$$\tau\dot{x} + x = 0, \tag{24}$$

millest saame parima siirdeprotsessi eksponendi kujul (joon. 6-5)

$$x = Xe^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{25}$$

Idealiseeritud protsessi ei kujuta sel juhul mitte hüppeline murtud joon nagu eespool, vaid eksponent, millele reaalne protsess peab püüdma läheneda (joon. 6-5).



Joon. 6-5. Integraalne kvaliteedi hinnang

τ suuruse valikuga määratakse integraalne hinnang. Pärast seda valitakse parameetrid nii, et integraalne hinnang oleks minimaalne.

Kui me valime regulaatori optimaalsed parameetrid nii, et reguleeritava parameetri kõrvalekalde ruut oleks minimaalne, s. t. et $I_1 = \int_0^\infty |x(t)|^2 dt$ oleks minimaalne, saame tihti siirdeprotsessid, mis tekivad süsteemis ühikfunktsioonikujulise häiringu tagajärjel tugevasti võnkuvaina (sumbumisaste on umbes 40%). Peale selle on süsteemi avatud oleku võimendustegur k_a, mis vastab integraalse kriteeriumi $I_1 = \int_0^\infty |x(t)|^2 dt$ miinimumile, väga lähedane kriitilisele võimendustegurile k_{ap}, mida määratakse süsteemi stabiilsuse tingimustest.

Kui valime regulaatori optimaalsed parameetrid lähtudes tingimusest, et integraal reguleeritava parameetri kõrvalekaldest ja tema esimese tuletise ruudust, s. t.

$$I = \int_0^\infty \{ |x(t)|^2 + |\dot{x}(t)|^2 \} dt \tag{26}$$

oleks minimaalne, saame kas aperioodilise või suure sumbumisteguriga võnkuva siirdeprotsessi.

Automaatreguleerimise teoorias kasutatakse mitmesuguseid muid integraalseid kriteeriume ja nende omavahelisi kombinatsioone. Kõiki neid on otstarbekohane kasutada süsteemide puhul, mille diferentsiaalvõrrandeil ei ole kõrgem kui viies järk, sest vastasel korral läheb algebraline arvutus liiga mahukaks ja ta praktiline väärtus kahaneb.

Integraalsete kriteeriumide arvutamisel pole vaja lahendada süsteemi diferentsiaalvõrrandeid. Nad arvutatakse võrrandist, kuhu kuuluvad süsteemi karaktervõrrandi tegurid. Integraalseid hinnanguid kasutatakse tavaliselt protsessi vabavõnkumise analüüsimiseks ning samuti nende siirdeprotsesside uurimiseks, mil-

lele rakendub ühikfunktsiooniline häiring. Kui aga süsteemile rakendatavad häiringud on kaootilise iseloomuga, siis annab parimaid tulemusi hindamine keskmise ruutvea järgi.

Siirdeprotsessi kvaliteedi uurimine sagedusmeetodil põhineb sellel, et reguleerimisprotsess on antud häiringu kuju ja algtingimuste juures üheselt, funktsionaalselt seotud suletud süsteemi sageduskarakteristikuga. Automaatreguleerimissüsteemi kvaliteedi uurimise sagedusmeetodi matemaatiliseks aluseks on Fourier' teisendus.

Fourier' teisendus võimaldab diferentsiaalvõrrandite alusel (kusjuures tuleb arvestada algtingimusi ja süsteemile rakendatud häiringut) või eksperimentaalsete andmete abil saada teatava reaalse funktsiooni, mida nimetatakse üldistatud sageduskarakteristikuks. Siirdeprotsessi üldistatud sageduskarakteristik, taandudes lihtsaimatel juhtudel süsteemi tavaliseks sageduskarakteristikuks, samuti nagu siirdeprotsessi Laplace'i teisenduski, määrab süsteemi täiesti.

Laplace'i pöördteisendil põhinevat kvaliteedi otsese analüüsi meetodit ja kvaliteedi analüüsi sagedusmeetodit eristab põhiliselt see, et esimene on analüütiline, nõudes süsteemi karaktervõrrandi lahendite väljaarvutamist, teine aga (nagu stabiilsuse analüüsimise sagedusmeetodki), olles graafilis-analüütiline, ei nõua nende arvutamist.

Kvaliteedi analüüsi sagedusmeetodi oluliseks erinevuseks, mis on samuti üheks tema eeliseks teiste meetodite ees, on asjaolu, et tema algmaterjaliks võivad olla needsamad sageduskarakteristikud, mida kasutati stabiilsuse analüüsimisel. See meetod on kasutatav nii koondatud kui ka hajutatud parameetritega süsteemide juures ning moodustab koos stabiilsuse uurimise meetodiga üldise süsteemide dünaamika uurimise meetodi.

Automaatreguleerimissüsteemi stabiilsuse uurimisel lähtutakse tavaliselt nende avatud oleku sageduskarakteristikust. Järelikult on ka kvaliteedi uurimisel vaja lähtuda süsteemi avatud oleku amplituudi ja faasi karakteristikust ning saadud tulemuse kontrollimiseks kasutada süsteemi suletud oleku reaalset sageduskarakteristikut. Lähteallikaks on sageduskarakteristik, millel on lihtsaim füüsikaline mõiste ning mida on kerge määrata eksperimentaalselt. Teisest küljest on sel puhul võimalik kasutada valemeid, mis seovad omavahel sageduskarakteristikuid ja siirdeprotsesse.

Kui süsteemile rakendatakse siinuseline harmoonilise võnkumise kujuline häiring $x_s = X_s e^{j\omega t}$, siis püsimajäänud seisundis reguleeritav parameeter x_v väljendatakse võrrandiga

$$x_v = W_s(j\omega) X_s e^{j\omega t}, \tag{27}$$

kus $W_s(j\omega)$ on suletud süsteemi kompleksne sagedusfunktsioon. Kuid tihti pole häiringud harmoonilised, vaid keerukad perioodilised või mitteperioodilised funktsioonid. Kõige sagedamini uuri-

takse süsteemi käitumist juba varem nimetatud tõukelise, ühikfunktsioonilise häiringu puhul.

Selleks et kasutada süsteemide kvaliteedi uurimisel sagedusmeetodit ning reguleerimisparameetrite leidmiseks võrrandit (27), on vaja iga perioodilist ja mitteperioodilist häiringulist funktsiooni kujutada harmooniliste võnkumiste kui komponentide summana või integraalina. Seda tehakse Fourier' rea või integraali abil.

Nagu teada, võib iga perioodilist funktsiooni $f(t)$ lahutada harmooniliste võnkumiste lõpmatuks reaks, kui see funktsioon on perioodi piirides üheselt määratav ja tal on piiratud arv katkemispunkte või lõplik arv ekstreemumeid. Niisugust harmooniliste võnkumiste rida, milleks funktsioon $f(t)$ lahutatakse, nimetatakse Fourier' reaks.

Vaatleme seost Fourier' integraali ja Laplace'i integraali vahel.

Olgu $f(t)$ perioodiline funktsioon perioodiga T ja rahuldagu ta nn. Dirichlet' tingimust (seda rahuldab enamik praktikas kasutatavaid funktsioone):

$$f(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi k}{T} t + b_k \sin \frac{2\pi k}{T} t \right), \tag{28}$$

kus

$$a_0 = \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t)\,\mathrm{d}t; \quad a_k = \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \cos \frac{2\pi k}{T} t\,\mathrm{d}t; \tag{29}$$

$$b_k = \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \sin \frac{2\pi k}{T} t\,\mathrm{d}t.$$

Kujutame Fourier' rida kompleksse kujul. Kasutame Euleri valemit

$$\cos x = \frac{e^{\mathrm{j}x} + e^{-\mathrm{j}x}}{2} \quad \text{ja} \quad \sin x = \frac{e^{\mathrm{j}x} - e^{-\mathrm{j}x}}{2\mathrm{j}};$$

siis võib kirjutada

$$a_k \cos \frac{2\pi k}{T} t + b_k \sin \frac{2\pi k}{T} t = \frac{a_k}{2} \left(e^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{T} t} + e^{-\mathrm{j}\frac{2\pi k}{T} t} \right) -$$

$$- \mathrm{j} \frac{b_k}{2} \left(e^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{T} t} - e^{-\mathrm{j}\frac{2\pi k}{T} t} \right) = e^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{T} t} \left(\frac{a_k \quad \mathrm{j}b_k}{2} \right) +$$

$$+ e^{-\mathrm{j}\frac{2\pi k}{T} t} \left(\frac{a_k + \mathrm{j}b_k}{2} \right). \tag{30}$$

Tähistades

$$F_k\left(\mathrm{j}\frac{2\pi k}{T}\right) = a_k - \mathrm{j}b_k = \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t)\cos\frac{2\pi k}{T}t\,\mathrm{d}t -$$

$$-\mathrm{j}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t)\sin\frac{2\pi k}{T}t\,\mathrm{d}t = \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t)e^{-\mathrm{j}\frac{2\pi k}{T}t}\,\mathrm{d}t, \qquad (31)$$

võib valemi (30) esitada kujul

$$a_k\cos\frac{2\pi k}{T}t + b_k\sin\frac{2\pi k}{T}t = e^{\mathrm{j}\omega_k t}\frac{F(\mathrm{j}\omega_k)}{2} + e^{-\mathrm{j}\omega_k t}\frac{F(-\mathrm{j}\omega_k)}{2}, \qquad (32)$$

$$\text{kus}\quad \frac{2\pi k}{T} = \omega_k \quad \text{ning} \quad k = 1, 2, 3\ldots \qquad (33)$$

Kui $k = 0$, siis $\omega = 0$ ning

$$a_0 = [F(\mathrm{j}\omega)]_{\omega=0} = \left[\frac{F(\mathrm{j}\omega)}{2}e^{\mathrm{j}\omega t} + \frac{F(-\mathrm{j}\omega)}{2}e^{-\mathrm{j}\omega t}\right]_{\omega=0}. \qquad (34)$$

Järelikult võib reale (28), võttes arvesse valemeid (32) ja (34), anda kuju

$$f(t) = \frac{1}{T}\sum_{\omega=-\infty}^{+\infty} F(\mathrm{j}\omega)e^{\mathrm{j}\omega t}, \qquad (35)$$

kus sagedusel ω on kõik väärtused $\ldots -\frac{2\pi}{T}k \ldots -\frac{2\pi}{T}\ldots -0,$

$+0, \quad +\frac{2\pi}{T}\ldots +\frac{2\pi k}{T}\ldots$

Valemist (31) järeldub, et

$$F(\mathrm{j}\omega) = \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t)e^{-\mathrm{j}\omega_k t}\,\mathrm{d}t. \qquad (36)$$

Fourier' integraal, milleks muutub Fourier' rida, kui periood lõpmatult kasvab, võimaldab lahutada iga mitteperioodilist funktsiooni antud piirides lõpmatuks hulgaks harmoonilisteks võnku-

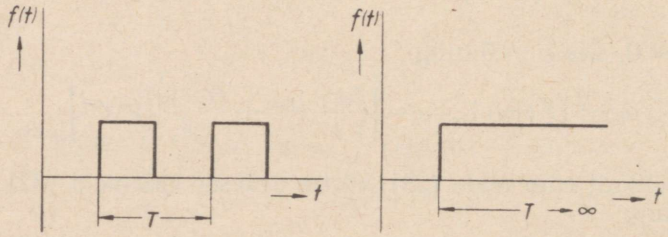
misteks, moodustades vahemikus $-\infty$-st kuni $+\infty$-ni sageduse pideva spektri lõpmatu väikese sageduste vahega naabruses olevate harmooniliste võnkumiste vahel (s. t. piiriliselt $\Delta\omega \to 0$).

Olgu meil mitteperioodiline funktsioon $f(t)$, millel on antud intervallis piiratud arv ekstreemumeid ja katkemispunkte ning mille jaoks kehtib (s. t. ei võrdu lõpmatusega) integraal

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|\,dt < \infty, \tag{37}$$

s. t. mis vastab Dirichlet' tingimustele.

Kui valida selle funktsiooni jaoks küllalt suur ajavahemik ja võtta selle perioodiks T, siis võib suurust $\omega = \frac{2\pi}{T}$ võtta põhisageduseks selle funktsiooni lahutamisel Fourier' ritta. Kui selles avaldises $T = \frac{2\pi}{\omega}$ lõpmatult kasvab, siis tähendab see seda, et ω peab lõpmatult kahanema, s. t. ta püüab $d\omega$ poole (joon. 6-6).



Joon. 6-6. Funktsiooni arendus Fourier' ritta

Ühikfunktsioon on seega funktsioon, mille $T \to \infty$ ning sagedus sisaldab kõik võnkesagedused $-\infty$-st $+\infty$-ni.

Niisiis võib mitteperioodilist funktsiooni vaadelda kui perioodilist, mille periood $T = \infty$. Lastes valemites (35) ja (36) perioodil T suureneda lõpmatuseni, võib saada avaldise mitteperioodilise funktsiooni kohta. Võtame $\frac{2\pi}{T} = \Delta\omega$, siis $\Delta\omega \to 0$, kui $T \to \infty$. Suurus $\Delta\omega$ on kahe naabruses oleva sageduse vahe

$$\omega_{n+1} - \omega_n = \frac{2\pi(n+1)}{T} - \frac{2\pi n}{T} = \frac{2\pi}{T} = \Delta\omega.$$

Järelikult lähenevad sagedusperioodi suurenemisel kõverate võnkesagedused üksteisele, moodustades piirile üleminekul pideva sagedusspektri. $T \to \infty$ korral saame avaldistest (35) ja (36):

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\lim_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty}\sum F(\mathrm{j}\omega)e^{\mathrm{j}\omega t}\Delta\omega=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}F(\mathrm{j}\omega)e^{\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}\omega \qquad (38)$$

ja

$$F(\mathrm{j}\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)e^{-\mathrm{j}\omega t}\,\mathrm{d}t. \qquad (39)$$

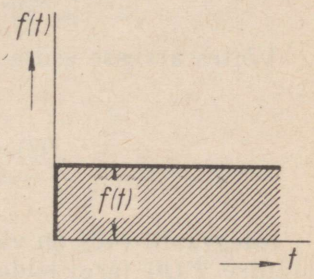
Valemiga (38) võib mitteperioodilist funktsiooni üldjuhul esitada integraalina, mida nimetatakse Fourier' integraaliks.

Integraali (39) võib vaadelda kui mingit operaatorit, mis seob funktsioone $f(t)$ ja $F(\omega)$. Integraal (38) määrab, kuidas antud «Fourier' kujutise» järgi leida originaal $f(t)$.

Fourier' integraali praktilist kasutamist takistab tihtipeale asjaolu, et paljud funktsioonid, ka need, mis esinevad automaatreguleerimise teoorias, ei rahulda tingimust (37). See kehtib ka hüppelise funktsiooni kohta (joon. 6-7).

Kui $t\to\infty$, läheneb viirutatud pindala ka lõpmatusele, mitte aga mõnele kindlale väärtusele.

Et kasutada Fourier' integraali, on vaja valida funktsioon, mis oleks küllalt lähedane uuritavale, näiteks hüppelisele funktsioonile t lõpliku väärtuse puhul, kuid samal ajal rahuldaks tingimust (37). Niisugust funktsiooni on võimalik saada, kui korrutada hüppelist funktsiooni e^{-ct}-ga, kus c on küllalt väike positiivne suurus. Sel viisil võib tunduvalt suurendada Fourier' integraali kasutamise piirkonda.



Joon. 6-7. Hüppelise funktsiooni pind

Niisiis kasutame Fourier' integraali mitte uuritava funktsiooni $f(t)$, vaid abifunktsiooni

$$f_1(t)=f(t)e^{-ct} \qquad (40)$$

juures, kus $c>0$. Piirame funktsiooni $f(t)$ sellega, et kui $t<0$, siis $f(t)=0$. Siis kehtib paljude funktsioonide kohta tingimus (37) ja me võime leida funktsiooni (40) sagedusspektri. Kirjutades valemis (39) $F(\omega)$ asemele $F(c, j\omega)$, sest see suurus sõltub nüüd ka tegurist c, leiame:

$$F(c,\mathrm{j}\omega)=\int_0^\infty f(t)e^{-ct}e^{-\mathrm{j}\omega t}=\int_0^\infty f(t)e^{-(c+\mathrm{j}\omega)t}\,\mathrm{d}t. \qquad (41)$$

Oletame nüüd, et $c+\mathrm{j}\omega=p$. Leiame, et

$$F(p)=\int_0^\infty f(t)e^{-pt}\mathrm{d}t. \qquad (42)$$

See langeb kokku Laplace'i teisendusega. Laplace'i-Carsoni teisendusest ilmneb, et

$$\frac{\Psi(p)}{p} = F(p). \tag{43}$$

Vaatleme nüüd, missugune kuju on integraalil (38) funktsiooni (40) jaoks:

$$f_1(t) = f(t)e^{-ct} = \frac{1}{2\pi}\int_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} Fe^{j\omega t}\,d\omega. \tag{44}$$

Eeldades, et $c = \text{const}$ ja $p = c + j\omega$, järelikult $dp = jd\omega$, leiame siit:

$$f(t) = f_1(t)e^{ct} = \frac{1}{2\pi}\int_{c-j\omega}^{c+j\omega} F(p)e^{(c+j\omega)t}\frac{dp}{j} = \frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\omega}^{c+j\omega} F(p)e^{pt}dp. \tag{45}$$

Võttes arvesse seose (43) saame:

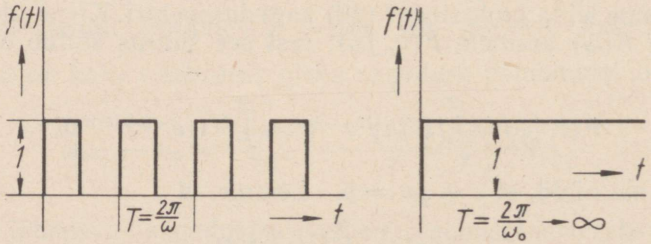
$$f(t) = \frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\omega}^{c+j\omega} \frac{\Psi(p)}{p}e^{pt}dp. \tag{46}$$

Integraalil (46) on väga suur tähtsus, sest ta võimaldab antud kujutise $\Psi(p)$ järgi leida originaali $f(t)$. Integreerimise teostame komplekstasapinnas, mille resultaat oli toodud juba IV peatükis.

Kasutame Fourier' rida (28) täisnurkse perioodilise funktsiooni $f(t)$ lahutamiseks.

Sel juhul on meil $f(t) = 1$, kui $0 < t < \frac{\pi}{\omega_0}$, ja $f(t) = 0$, kui

$$\frac{\pi}{\omega_0} < t < \frac{2\pi}{\omega_0} \quad \text{(joon. 6-8)}.$$



Joon. 6-8. Ühikfunktsiooni tõlgendus

Võrrandist (29) saame pärast asendamist $\frac{1}{T}=\frac{\omega_0}{2\pi}$ (kusjuures integreerimisvahemikuks valime perioodi pikkuse), et

$$a_0=\frac{\omega_0}{2\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega_0}} f(t)\,dt,\quad a_k=\frac{\omega_0}{\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega_0}} f(t)\cos k\omega_0 t\,dt$$

ja

$$b_2=\frac{\omega_0}{\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega_0}} f(t)\sin k\omega_0 t\,dt.$$

Asendame funktsiooni $f(t)$ ühikfunktsiooniga ning teisendame:

$$a_0=\frac{\omega_0}{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{\omega_0}}[1]\,dt+\int_{\frac{\pi}{\omega_0}}^{\frac{2\pi}{\omega_0}}[1]\,dt=\frac{\omega_0}{2\pi}\cdot\frac{\pi}{\omega_0}=\frac{1}{2};$$

$$a_k=\frac{\omega_0}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{\omega_0}}\cos k\omega_0 t\,dt+\frac{\omega_0}{\pi}\int_{\frac{\pi}{\omega_0}}^{\frac{2\pi}{\omega_0}}\cos k\omega_0 t\,dt=\frac{\omega_0}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{\omega_0}}\cos k\omega_0 t\,dt=$$

$$=\frac{\omega_0}{2\pi}\Big|\sin k\omega t\Big|_0^{\frac{\pi}{\omega_0}}=0; \qquad (47)$$

$$b_k=\frac{\omega_0}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{\omega_0}}\sin k\omega_0 t\,dt+\frac{\omega^0}{\pi}\int_{\frac{\pi}{\omega_0}}^{\frac{2\pi}{\omega_0}}\sin k\omega_0 t\,dt=\frac{\omega_0}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{\omega_0}}\sin k\omega_0 t\,dt=$$

$$=\frac{\omega_0}{\pi k}\Big|-\cos k\omega_0 t\Big|_0^{\frac{\pi}{\omega_0}}=\frac{2}{\pi k}.$$

Seega

$$f[1]=\frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2}{k\pi}\sin k\omega_0 t,\ \text{kus}\ k=1,\ 3,\ 5\ \ldots,$$

s. t. ühikfunktsiooni võib esitada harmooniliste võnkumiste summana.

Tõukekujulise funktsiooni $f(t) = [1(t)]$ võib saada ka täisnurksest funktsioonist, kui võtta, et $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \to \infty$, kui $\omega_0 \to 0$. Tähistame $\Delta\omega = \omega_0$; $\omega = k\omega_0 = k\Delta\omega$ ja järelikult $k = \frac{\omega}{\Delta\omega}$. Siis kirjutame võrrandi (47) kujul

$$f(t) = \frac{1}{2} + \sum_{\frac{\omega}{\Delta\omega}=1}^{\infty} \frac{2\,\Delta\omega \sin \omega t}{T\omega}, \quad \text{kus } \frac{\omega}{\Delta\omega} = 1, 3, 5 \cdots.$$

Kui $\Delta\omega \to 0$, siis muutub see summa integraaliks ning Fourier' rea asemel saame Fourier' integraali mitteperioodilise funktsiooni jaoks:

$$[1(t)] = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \omega t}{\omega}\, d\omega. \tag{48}$$

Seda integraali võib kujutada süsteemi sisenevate lõpmatute elementaarsete võnkumiste $\frac{d\omega}{\pi\omega} \sin \omega t$ summana. Igale sellele võnkumisele vastab väljumissuuruse võnkumine

$$\frac{d\omega}{\pi\omega} H(\omega) \sin [\omega t + \beta(\omega)], \tag{49}$$

mille tulemusena üldine protsess süsteemi väljundis, kui ta sisendisse anda häiring ühikfunktsioonina (48), on

$$x(t) = \frac{H(0)}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{H(\omega) \sin [\omega t + \beta(\omega)]}{\omega}\, d\omega, \quad \text{kui } t > 0. \tag{50}$$

Teisendamisel saame siit:

$$H(\omega) \sin [\omega t + \beta(\omega)] = H(\omega) \cos \beta(\omega) \sin \omega t + \\ + H(\omega) \sin \beta(\omega) \cos \omega t. \tag{51}$$

Kuid $H(\omega) \cos \beta(\omega)$ on komplekstasapinnas suletud süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku reaalosa, mida tähistasime sümboliga $U(\omega)$, ning $H(\omega) \sin \beta(\omega)$ selle imaginaarosa, mida tähistasime sümboliga $V(\omega)$.

Järelikult võib võrrandi (51) esitada kujul

$$H(\omega) \sin [\omega t + \beta(\omega)] = U(\omega) \sin \omega t + V(\omega) \cos \omega t, \tag{52}$$

kusjuures $H(0) = U(0)$.

Valem (50) saab sel puhul kuju

$$x(t)=\frac{U_0}{2}+\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{U(\omega)}{\omega}\sin\omega t\,d\omega+\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{V(\omega)}{\omega}\cos\omega t\,d\omega. \quad (53)$$

Loeme x-i muutust vanast tasakaaluasendist. Muudame võrrandis (53) t negatiivseks. Sel juhul muudab sin ωt märki, $x(t)$ aga muutub nulliks, sest kui $t<0$, siis kõrvalekalle puudub, s. t. $x=0$:

$$0=\frac{U(0)}{2}-\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{U(\omega)}{\omega}\sin\omega t\,d\omega+\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{V(\omega)}{\omega}\cos\omega t\,d\omega. \quad (54)$$

Siin $t<0$. Lahutame võrrandist (53) liikmete viisi võrrandi (54), saame:

$$x(t)=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{U(\omega)}{\omega}\sin\omega t\,d\omega. \quad (55)$$

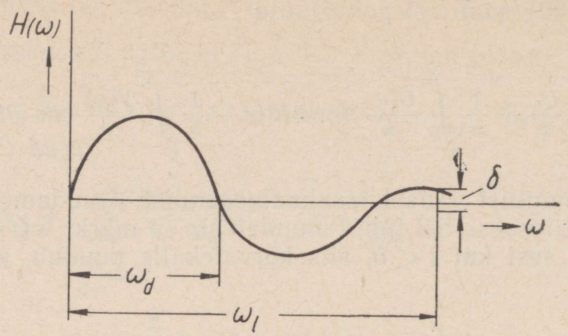
Saime valemi, mis seob suletud süsteemi siirdeprotsessi $x(t)$ selle süsteemi sageduskarakteristiku reaalosaga $U(\omega)$.

Selle valemi kasutamisele ongi rajatud protsessi $x(t)$ kvaliteedi hinnangud sageduskaraktertistiku reaalosa $U(\omega)$ kuju järgi. See valem annab ka võimaluse ligikaudselt, kuid küllalt täpselt ehitada siirdeprotsessi kõverat.

Valemist (55) on näha, et mitmesugustel süsteemidel on üksteisest väga vähe erinevad siirdeprotsessid, kui nende sageduskarakteristikute reaalosad on üksteisele lähedased. Siit saame teha mõningaid järeldusi. Märgime neist olulisemaid.

1. Üksteisele küllalt lähedastele siirdeprotsessidele vastavad lähedased sageduskarakteristikud. See omadus lubab antud sageduskarakteristiku reaalosa asemel kasutada teist, temale küllalt lähedast tüüpilist karakteristikut, mille jaoks siirdeprotsess kas on juba teada või on võrdlemisi lihtsalt leitav.

2. Süsteemide uurimisel pole vajadust uurida süsteemi käitumist sageduse muutumisel 0-st kuni $+\infty$-ni, vaid võib piirduda ainult nn. oluliste sagedustega, s. t. nende sagedustega, milledele süsteem veel reageerib, sest alates mingist sagedusest ω_l jääb reaalkomponent $U(\omega)$ väiksemaks kui mingi varem etteantud suurus ning nende sageduste ärajätmine peegeldub ainult siirdeprotsessi alghetkel (joon. 6-9).

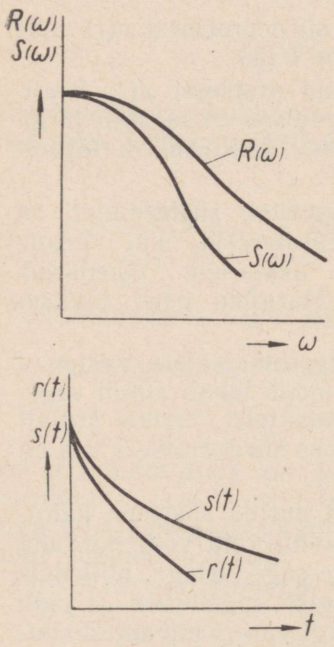


Joon. 6-9. Mooduli $H(\omega)$ karakterkõver

Kui on kehtiv võrratus

$$\left|\frac{U(\omega)}{U(\omega_l)}\right| < 0{,}1 \ldots 0{,}2, \qquad (56)$$

siis võib juhul, kui $\omega > \omega_l$, protsessi kvaliteedi hindamisel funktsiooni $U(\omega)$ jätta tähele panemata.



Joon. 6-10. Sõltuvuste $R(\omega)$ ja $r(t)$ ning $S(\omega)$ ja $s(t)$ võrdlus

3. Kui on kaks kuju poolest sarnast sageduskarakteristiku reaalosa $R(\omega)$ ja $S(\omega)$, mis erinevad ainult mõõtühiku poolest ω-teljel $[R(n\omega) = S(\omega)]$ ja selle poolest, et $R(\omega)$ on kõigis punkides lamedam kui $S(\omega)$ (amplituudi muutused on sama ω puhul väiksemad), siis sumbub siirdeprotsess $r(t)$, mis vastab reaalosale $R(\omega)$, protsessist $s(t)$, mis vastab reaalosale $S(\omega)$, nii mitu korda kiiremini, kui palju $R(\omega)$ mõõtühik on suurem $S(\omega)$ mõõtühikust ω sama väärtuse puhul.

Kui $R(\omega)$ sumbub n korda aeglasemalt kui $S(\omega)$, siis $r(t)$ sumbub n korda kiiremini kui $s(t)$ (joon. 6-10).

4. Siirdeprotsessi kestus on seda väiksem, mida lamedam on sageduskarakteristiku reaalosa, s. t., mida väiksemad on ekstreemumid ja nende tuletised kõvera kõigis punktides.

5. Püsimajäänud seisundis võrdub siirdeprotsessi lõppväärtus sageduskarakteristiku reaalosa algväärtusega, s. t.

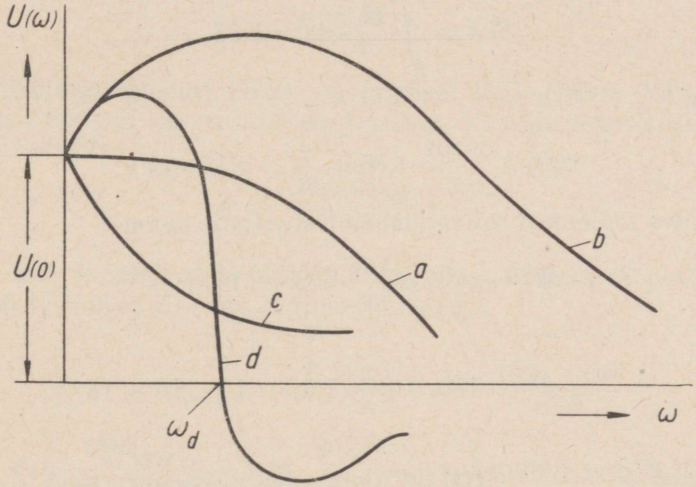
$$\lim_{t\to\infty} x(t) = \lim_{\omega\to 0} U(\omega) \tag{57}$$

(vt. IV peatükis teoreemi alg- ja lõppväärtuste kohta).

6. Kui karakteristik $U(\omega)$ on positiivne ja on mittekasvav funktsioon sagedusest, s. t. $U(\omega) > 0$ ja $\frac{dU(\omega)}{d\omega} \leqslant 0$ kõigi ω väärtuste juures (joon. 6-11, kõver a), siis ei ületa ülereguleerimine 18%.

Kujutame integraali (55) summana

$$x(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{t}} \frac{U(\omega)}{\omega}\sin\omega t d\omega + \frac{2}{\pi}\int_{\frac{\pi}{t}}^{\frac{2\pi}{t}} \frac{U(\omega)}{\omega}\sin\omega t d\omega + \ldots \tag{58}$$



Joon. 6-11. Funktsiooni $U(\omega)$ karakterkõverad

Kui funktsioon $U(\omega)$ on kogu aeg positiivne ja mittekasvav, siis kahaneb rea liikmete absoluutväärtus ning nende märk sõltub $\sin\omega t$ märgist antud integreerimisvahemikus.

Ridade teooriast on teada, et märki muutvate kahanevate suuruste summa ei saa olla suurem kui selle rea esimene liige, s. t.

$$x(t) \leqslant \frac{2}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{t}} \frac{U(\omega)}{\omega}\sin\omega t d\omega. \tag{59}$$

Võrratus suureneb veelgi, kui $U(\omega)$ asemele panna $U(0)$. Siis võib $U(0)$ tuua integraalimärgi ette, s. t.

$$x(t) \leqslant \frac{2}{\pi} U(0) \int_0^{\frac{\pi}{t}} \frac{\sin \omega t}{\omega} \mathrm{d}\omega. \tag{60}$$

Asendame $\omega t = z$, millest $\mathrm{d}\omega = \frac{\mathrm{d}z}{t}$, ning saame:

$$x(t) \leqslant \frac{2U(0)}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sin z}{z} \mathrm{d}z.$$

Kuid integraalne siinus π-st

$$Si\,\pi = \int_0^{\pi} \frac{\sin z}{z} \mathrm{d}z = 1{,}85,$$

järelikult

$$x(t) \leqslant \frac{2U(0)}{\pi} \cdot 1{,}85 = \frac{2}{\pi} \cdot 1{,}85 x(\infty). \tag{61}$$

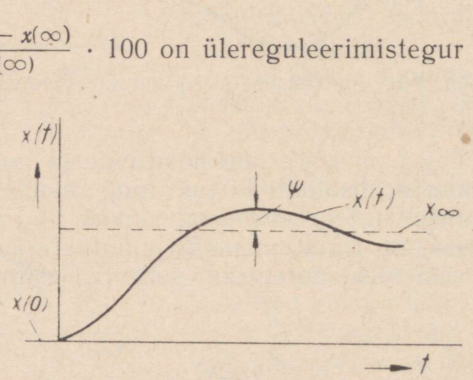
Lahutades mõlemast võrrandi poolest $x(\infty)$, saame:

$$x(t) - x(\infty) \leqslant \left[\frac{2}{\pi} \cdot 1{,}85 - 1\right] x(\infty),$$

millest

$$\psi = \frac{x(t) - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100 \leqslant \left(\frac{2}{\pi} \cdot 1{,}85 - 1\right) \cdot 100 \approx 18\,\%, \tag{62}$$

kus $\psi = \frac{x(t) - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100$ on ülereguleerimistegur (joon. 6-12).



Joon. 6-12. Ülereguleerimisega ψ siirdeprotsessi graafik

7. Kui ei rahuldata võrratust

$$|U(\omega)| < U(0)\,G(\omega),$$

kus

$$G(\omega) = \cos \frac{\pi}{1+\frac{\omega_l}{\omega}} \tag{63}$$

on süsteemil ülereguleerimine, s. t. protsess pole monotoonne.

8. Selleks et siirdeprotsess $x(t)$ oleks monotoonselt kasvav, on küllaldane, et tuletis $\frac{dU(\omega)}{d\omega}$ (kui $U(0) \neq 0$ ja $U(\infty) = 0$) on negatiivne ja mittekahanev ω funktsioon (joon. 6-11, kõver *c*) ning reguleerimisaeg t_r, s. t. aeg, mille jooksul reguleeritav suurus saavutab 95% suurusest $x(\infty)$, on suurem kui $\frac{4\pi}{\omega_l}$,s. t.

$$t_r > \frac{4\pi}{\omega_l}. \tag{64}$$

9. Kui funktsioonil $U(\omega)$ on joonisel 6-11 (kõver *b*) toodud kuju, kus kõveral on maksimum $U(\omega)_{max}$, siis siirdeprotsessi $x(t)$ ülereguleerimine

$$\psi < \frac{1{,}18\,U(\omega)_{max} - U(0)}{U(0)}. \tag{65}$$

10. Kui funktsioon $U(\omega)$ on vahemikus 0-st ω_a-ni positiivne (joon. 6-11, kõver *d*), siis reguleerimisaeg

$$t_r > \frac{\pi}{\omega_0}. \tag{66}$$

11. Kui $\frac{U(\omega)_{max}}{U_0} < 1{,}3$ ja $\frac{U(\omega)}{U(0)} \approx 1$ vahemikus $\omega < 0{,}1\omega_l$, siis ülereguleerimine ψ ei ületa 30%, reguleerimisaeg aga on piirides

$$\frac{\pi}{\omega_l} < t_r < \frac{8\pi}{\omega_l}. \tag{67}$$

12. Kui sageduskarakteristik $U(\omega)$ muutub mingi sageduse ω_1 puhul lõpmatu suureks, s. t. $U(\omega_1) = \infty$, siis on süsteem stabiilsuse piiril. See on tingitud puhtimaginaarsest lahendist. Süsteem võngub sumbumatute võngetega sagedusega ω_1. Järelikult on siirdeprotsess seda kvaliteetsem, mida lamedam on süsteemi sageduskarakteristiku reaalosa ja mida väiksemad on selle ordinaadid ning mida vähem teravad on ekstreemumid.

Sagedusmeetodit on otstarbekohane kasutada süsteemide uurimiseks, mille võrrandite järk on neljas või suurem. Erinevalt

kahest eeltoodud meetodist võimaldab sagedusmeetod arvesse võtta mitte ainult süsteemi võrrandi vasakut, vaid ka paremat poolt. Seetõttu on seda meetodit hea kasutada siis, kui on vaja uurida süsteemile rakendatud tüüpilisi häiringuid ning kui on vaja arvesse võtta algtingimusi. Ta võimaldab samaaegselt saada ettekujutust reguleerimisprotsessi kvaliteedi tüüpilistest näitajatest, nagu monotoonsusest, reguleerimisajast ja ülereguleerimisest, graafilis-analüütiline meetod aga tagab sealjuures piltliku ülevaate protsessi käigust.

Olgu lõpuks märgitud, et eespool kirjeldatud meetodid ei ammenda kõiki süsteemi uurimise võimalusi. Esitatud on ainult osa neist, nimelt kõige tüüpilisemad ning praktikas kõige rohkem esinevad meetodid.

2. Abinõud reguleerimisprotsessi kvaliteedi tõstmiseks

Iga automaatreguleerimissüsteem koosneb reguleeritavast objektist ja ühest või mitmest regulaatorist, mis on ühendatud nii objektiga kui ka omavahel.

Automaatreguleerimissüsteemi projekteerimisel on vaja valida regulaatorite ja objekti parameetrid, karakteristikud ja nende omavahelised sidestused nii, et kogu süsteemi vajalikud dünaamilised ja ekspluatatsioonilised omadused tervikuna oleksid tagatud võimalikult lihtsaimate tehniliste vahenditega.

Süsteemile vajaliku dünaamilise omaduse andmisel on suur tähtsus korrigeerivail seadmeil, milleks on elemendid kergesti muudetavate parameetrite ja karakteristikutega. Neid võib jagada kahte põhiliiki: a) järjestikku ja b) paralleelselt ühendatavad korrigeerivad seadmed.

Esimesse liiki kuuluvad seadmed toovad reguleerimissüsteemi sisse tuletisi ja integraale (joon. 6-13, *a*). Teist liiki seadmed aga seovad süsteemi ühe lüli väljundi mingi eelmise lüli sisendiga (kohalikud tagasisided, näit. reguleerimisorganist tema ajami võimendisse) (joon. 6-13, *b*).

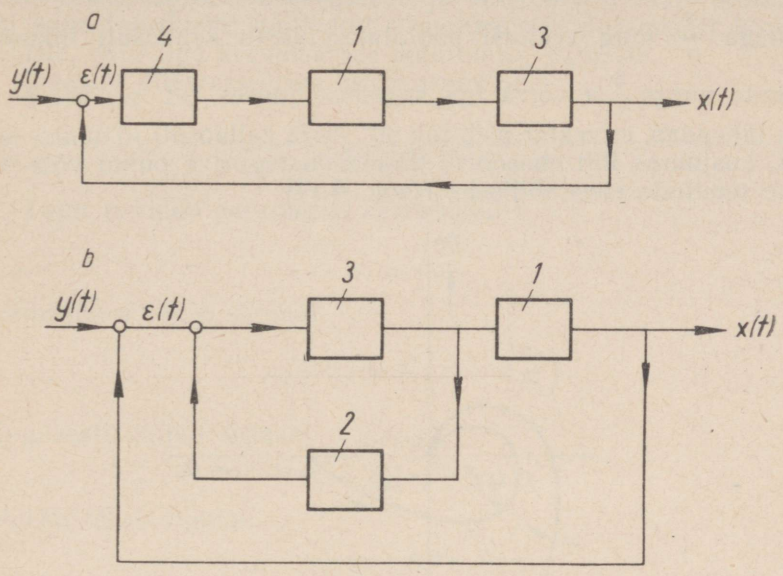
Nagu eespool märgitud, võib iga automaatreguleerimissüsteemi vaadelda koosnevana tüüpilistest lülidest, mis on omavahel ühendatud mitmesugustes kombinatsioonides. Osutub, et on võimalik ligikaudselt hinnata süsteemi dünaamilisi omadusi, kui on teada ainult lülide siirdeprotsessi kuju ja lülide ühendamise viis, s. t. reguleerimissüsteemi struktuurskeemi järgi.

Esimeseks sammuks on selgitada antud skeemi struktuuri stabiilsus.

Reguleerimissüsteemi, mida võib teha stabiilseks tema parameetrite arvuliste väärtuste (ajakonstantide ja võimendustegurite) muutmisega, kusjuures struktuur jääb muutmata, nimetatakse struktuurilt stabiilseiks. Süsteeme aga, mida parameetrite arvuliste väärtuste ükskõik millise muutmisega ei saa teha stabiilseks, nime-

tatakse struktuurilt ebastabiilseiks. Näiteks suletud süsteemi, mis koosneb ühest aperioodilisest ja kahest integreerivast lülist, mille karaktervõrrand on

$$(T_1p + 1)T_2pT_3p + k_1k_2k_3 = 0, \tag{68}$$



Joon. 6-13. Korrigeerivate elementidega reguleerimissüsteemid järjestik- (*a*) ja paralleellülituses (*b*):
1 — objekt, *2* — paralleelselt ühendatud korrigeeriv element, *3* — võimenduselement, *4* — järjestikku ühendatud korrigeeriv element

pole võimalik teha struktuurilt stabiilseks, sest avades selles võrrandis sulud, s. o.

$$T_1T_2T_3p^3 + T_2T_3p^2 + k_1k_2k_3 = 0$$

näeme, et tegur p ees puudub (võrdub nulliga) ning süsteem on seega struktuurilt ebastabiilne, ükskõik kuidas ka valitaks suurused T_i ja k_i. Kui aga suletud süsteem koosneb kahest aperioodilisest ja ühest integreerivast lülist, mille karaktervõrrand on

$$(T_1p + 1)(T_2p + 1)T_3p + k_1k_2k_3 = 0 \tag{69}$$

ehk

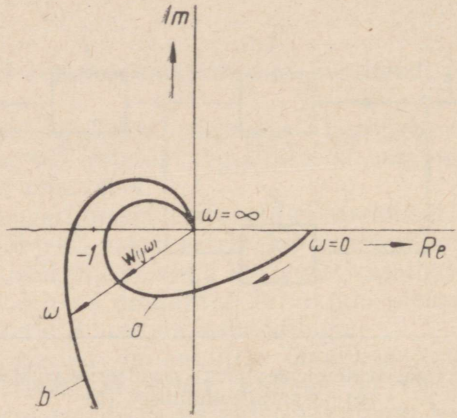
$$T_1T_2T_3p^3 + (T_1 + T_2)T_3p^2 + T_3p + k_1k_2k_3 = 0,$$

siis see süsteem on struktuurilt stabiilne, sest sobivate T_i ja k_i valikuga on stabiilsus garanteeritud.

Nagu näitavad vastavad uurimused, on süsteemid, mis koosnevad ükskõik kui paljudest võnkuvatest ja aperioodilistest lülidest

ning ühest integreerivast lülist, struktuurilt stabiilsed. Kui aga süsteemi moodustavad kaks integreerivat lüli, on süsteem struktuurilt ebastabiilne.

Ühe integreeriva lüli ühendamisel teiste lülidega järjestikku korrutatakse süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku moodulit suhtega $\frac{k}{\omega}$ ning vektorit pööratakse vastu kellaosuti liikumise suunda nurga $\frac{3}{2}\pi$ võrra iga sageduse juures (vt. pt. IV, p. 3). See tähendab, et vektor pöördub 90° võrra kellaosuti liikumise suunas, kusjuures lüli ebasobiva võimendusteguri k puhul võib süsteem muutuda ebastabiilseks (joon. 6-14).



Joon. 6-14. Stabiilse (*a*) ja ebastabiilse (*b*) süsteemi amplituudi ja faasi karakterkõver

Kahe integreeriva lüli puhul aga pöördub vektor 180° kellaosuti liikumise suunas. Siis haaravad kõik vektorid möödapääsematult punkti (— 1, j0). Süsteem on struktuurilt ebastabiilne.

Tsentrifugaalregulaatori kirjeldamisel mainisime õlikatarakti (dempferit). See lüli tuuakse tavaliselt sisse nende lülide korral, millel on tunduv mass või elastsus. Dempferi kasutamine muudab regulaatori võrrandi kuju. Dempferita tsentrifugaalregulaatori võrrand on $(T_r^2p^2 + \delta)x_v = X_s$. Tema karaktervõrrandi $T_r^2p^2 + \delta = 0$ poolt kirjeldatud vabaliikumine on sumbumatu võnkumine, seega on regulaator struktuurilt ebastabiilne. Katarakt aga muudab võrrandi kuju järgmiseks:

$$(T_r^2p^2 + T_kp + \delta)x_v = x_s. \qquad (71)$$

Selle regulaatori vabavõnkumine võib olla tegurite sobivate arvuliste väärtuste puhul sumbuv. Regulaator on struktuurilt stabiilne.

Reguleerimissüsteemi reguleeritava parameetri tuletise (seda

nimetatakse mõnikord ka «kaduvaks impulsiks», sest ta mõjub ainult dünaamikas) sissetoomise eesmärgiks on võnkumiste summutamine ja reguleerimisorgani tegutsemiskiiruse suurendamine. Tuletise sissetoomine võib toimuda kas tavalisel viisil, nagu näidatud eespool regulaatori skeemi vaatlemisel, mis koosneb tajurist, võimendist, reguleerimisorganist ja diferentseerivast seadmest, või kahe tajuri abil, milledest üks reageerib parameetri kõrvalekaldele, teine aga kõrvalekalde muutumise kiirusele.

Ideaalse diferentseeriva lüli võrrand on

$$x_2 = k_t \frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t}. \tag{72}$$

Tajur mõõdab parameetri kõrvalekallet

$$x_1 = k_1 x.$$

Võimendisse läheb signaal

$$x_1 + x_2 = k_1 \left(x + k \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \right)$$

ning sealt väljub signaal

$$x_3 = k_2 (x_1 + x_2).$$

Objekti läheb signaal

$$y = k_3 x_3.$$

Seega saame võrrandi üldkujul

$$y = k_1 k_2 k_3 \left(x + k_t \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \right) = k \left(x + k_t \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \right). \tag{73}$$

Reguleeriv mõju objektile y on võrdeline nii reguleeritava parameetri kõrvalekaldega kui ka selle kõrvalekaldumise kiirusega. Tuletise olemasolu reguleerimisseaduses forsseerib regulaatori tegevust, sest ta ei oota, kuni kõrvalekalle on aset leidnud, vaid mõjub reguleerimisorganile juba varem, sõltuvalt kõrvalekalde muutumise kiiruse suurusest ja märgist. Kui aga võnkuva siirdeprotsessi puhul reguleeritava parameetri kõrvalekalle muudab märki, siis seiskab regulaator juba varem reguleerimisorgani, s. t. tuletise sissetoomine sel puhul pidurdab regulaatori tegevust, vähendades ülereguleerimist ning regulaatori inertsi. Regulaator nagu aimab juba ette reguleeritava parameetri muutust ning, tegutsedes vajalikus suunas võrdeliselt muutumise kiirusega, parandab reguleerimisprotsessi kvaliteeti.

Tuues reguleerimissüsteemi lisaks veel teise tuletise, võib siirdeprotsessi kvaliteeti veel rohkem parandada.

Esimese tuletise sissetoomisel tuleb süsteemi amplituudi ja faasi karakteristiku moodulit korrutada $k_t\omega$-ga ja vektorit ennast

pöörata 90° kellaosutile vastupidises suunas. See viib teda eemale punktist (—1, j0) ja seega suurendab stabiilsusastet; k_t vastava valiku puhul on võimalik ebastabiilne süsteem teha stabiilseks.

Reaalse diferentseeriva lüli sissetoomine võib hästi mõjuda reguleerimisprotsessile veel sel teel, et tema abil on võimalik süsteemis mõne lüli suurt inertsi, s. t. ajakonstanti kompenseerida.

Olgu meil näiteks süsteem, mille ülekandefunktsioon on

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

kus T_1 ja T_2 on suured ajakonstandid. Kui ühendame reguleerimisahelasse järjestikku reaalse diferentseeriva elemendi, mille ülekandefunktsioon on

$$W_d(p) = \frac{k_1(T_1 p + 1)}{T_3 p + 1}$$

(vt. pt. III, võrrand 48, kus $i = 1$) ning valime näiteks $T_1 = T_4$ ning $T_3 \ll T_1$, saame süsteemi, mille ülekandefunktsioon on

$$W_{süst}(p) = W(p) W_d(p) = \frac{kk_1}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}.$$

Seega on üks suur ajakonstant likvideeritud, ülejäänud lülide ajakonstantide omavahelist vahet aga suurendatud. See parendab teatavasti süsteemi dünaamilisi omadusi, sest mida suurem on lahendite arvulise väärtuse (antud näite puhul ajakonstantide) vahe, seda rohkem mõjub reguleerimisprotsessile väikseim lahend.

Integraali sissetoomine reguleerimissüsteemi võib toimuda sel teel, et reguleerimisorgani ajamiks valitakse integreeriv lüli (eespool oli selleks hüdrauliline teenur) või kasutatakse elektrilistes skeemides integreerivaid kontuure. Nende ülesandeks on tavaliselt kaotada staatiline sõltuvus reguleeritava parameetri ja välise häiringu vahel, s. t. likvideerida siirdeprotsessi lõppemisel süsteemi statism. Kuid nagu oli juba nimetatud eespool, halvendab integreeriv lüli alati süsteemi stabiilsust. Seepärast tuleb astaatilise lüli sisseviimisel süsteemi hoolega uurida saadud süsteemi dünaamilisi omadusi.

Eespooltoodud abinõud reguleerimissüsteemi tuletiste ja integraalide sisseviimise kohta on kõik erijuhud.

Üldjuht on niisugune, kus reguleerimissüsteemi lülitatakse järjestikku korrigeeriv seade, mille võrrand on

$$a_0 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + a_1 \frac{dx_2}{dt} + a_2 x_2 = b_0 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \frac{dx_1}{dt} + b_2 x_1, \qquad (74)$$

kusjuures iga võrrandis olev tegur võib võrduda nulliga.

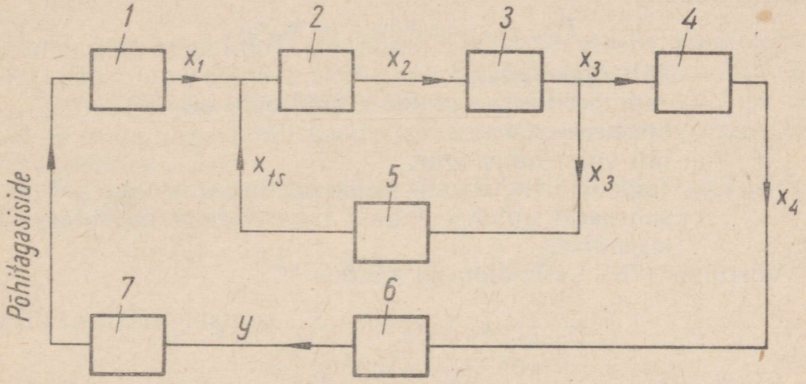
Kui $a_2 = 0$, viiakse sisse integraal; kui aga $a_1 = a_2 = 0$, siis kahekordne integraal (teist järku astaatiline süsteem); võrrandi (74) parem pool aga viib sisse tuletised (võib esineda ka kõrgemat kui teist järku tuletist, kuigi praktiliselt piirdutakse ainult maksimaalselt kuni teise järgu tuletisega).

Automaatreguleerimissüsteemi dünaamiliste omaduste parendamiseks osutub praktikas tihti palju otstarbekohasemaks kasutada paralleelselt ühendatavaid korrigeerivaid seadmeid.

Üheks olulisemaks eeliseks on viimastel teiste korrigeeritavate seadmetega võrreldes see, et nad võimaldavad vähendada üksikute automaatreguleerimissüsteemi elementide, näiteks võimendite, elektrimootorite jne. ebastabiilsuse ja ebalineaarsuse mõju süsteemi kui terviku dünaamilistele omadustele.

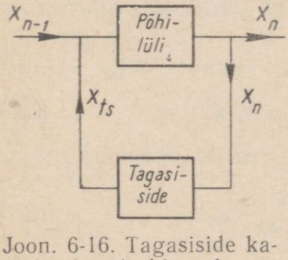
Nendeks korrigeerivateks seadmeteks on kohalik ehk täiendav tagasiside (jäik ja elastne).

Kohalik tagasiside haarab tavaliselt kaht lüli, kuid ta võib haarata ka ükskõik kui paljusid lülisid (joon. 6-15). Tagasisided võivad olla ka üksteisega ristuvad jm.



Joon. 6-15. Reguleerimissüsteemi struktuurskeem:
1 ... *4* — lülid, *5* — täiendav tagasiside, *6* — reguleerimisorgan, *7* — objekt

Kui allpool räägitakse tagasisidest, siis mõeldakse selle all täiendavat tagasisidet, sest nagu juba mainitud ülalpool, põhitagasiside on automaatreguleerimissüsteemis alati olemas. Allpool vaatleme, millist mõju avaldab elementaarlülide haaramine (šunteerimine) jäiga ja elastse tagasiside lülidega, millede võrrandid on allpool toodud: jäik tagasiside (75), elastne tagasiside (76) ja inertne elastne tagasiside, mida nimetasime ka isodroomiks (77) (joon. 6-16):



Joon. 6-16. Tagasiside kasutamise struktuurskeem

$$x_{ts} = k_{ts} x_n; \tag{75}$$

$$x_{ts} = k_{ts} T_{ts} \dot{x}_n; \tag{76}$$

$$T_{ts} \dot{x}_{ts} + x_{ts} = k_{ts} \dot{x}_n \tag{77}$$

Võivad esineda keerulisemadki seosed.

Tagasisidesid jagasime lülitusviisi järgi positiivseiks ja negatiivseiks.

Positiivseks nimetasime niisugust tagasisidet, kus lülist väljuv signaal (kas osaliselt või täielikult) viiakse lüli sisendisse tagasi sama märgiga, negatiivseks aga, kus see viiakse sisse vastupidise märgiga (vt. pt. IV, p. 4).

Positiivse tagasiside otstarbeks on suurendada lüli võimendustegurit, negatiivse otstarbeks aga vähendada lüli inertsi, suurendada stabiilsust, summutada võnkumisi ja muuta lüli dünaamilisi omadusi.

Positiivne tagasiside halvendab siirdeprotsessi stabiilsust ja võib isegi muuta süsteemi ebastabiilseks. Seepärast kasutatakse seda võimendi kui terviku ühe osana, iseseisvalt aga harva. Tähtsaimat kohta omab negatiivne tagasiside.

Vaatleme aperioodilise lüli haaramist negatiivse jäiga tagasisidega. Saame:

$$T_1\dot{x}_s + x_n = k(x_{n-1} - k_{ts}x_n), \tag{78}$$

kus T_1 — lüli ajakonstant,
x_n — reguleeritav parameeter (väljumissuurus),
x_{n-1} — sisenemissuurus,
k — lüli võimendustegur,
k_{ts} — tagasisidetegur, mis määrab, kui suur osa väljumissuurusest antakse tagasi tagasisidega haaratava lüli sisendisse.

Võrrandi (78) teisendamisel saame:

$$\frac{T_1}{1 + kk_{ts}}\dot{x}_n + x_n = \frac{k}{1 + kk_{ts}}x_{n-1} \tag{79}$$

Kombinatsioon aperioodilisest ja võimenduslülist aperioodilise lüli struktuuri ei muuda, ainult ta inerts ja võimendustegur väheneb $1 + kk_{ts}$ korda.

Aperioodilise lüli haaramisel negatiivse elastse tagasisidega saame:

$$T_1\dot{x}_n + x_n = k(x_{n-1} - k_{ts}T_{ts}\dot{x}_n). \tag{80}$$

Pärast teisendamist aga

$$(T_1 + kk_{ts}T_{ts})\dot{x}_n + x_n = k_{n-1}. \tag{81}$$

Lüli iseloom samuti ei muutu, ainult inerts suureneb $kk_{ts}T_{ts}$ võrra, s. t. šunteerimine halvendab lüli dünaamilist omadust, suurendades lüli inertsi.

Võnkuva lüli haaramisel negatiivse jäiga tagasisidega saame:

$$T^2\ddot{x}_n + 2\xi T\dot{x}_n + x_n = k(x_{n-1} - k_{ts}x_n). \tag{82}$$

Pärast teisendamist saame uue süsteemi, mille võrrand on

$$\frac{T^2}{1 + kk_{ts}}\ddot{x}_n + \frac{2\xi T}{1 + kk_{ts}}\dot{x}_n + x_n = \frac{k}{1 + kk_{ts}}x_{n-1}. \tag{83}$$

Ka siin ei muuda kahe lüli kombinatsioon pealüli iseloomu,

ainult haaratava lüli võimendustegur, ajakonstant T ning võnkumise sumbumistegur ξ vähenevad $1 + kk_{ts}$ korda. Võnkuva lüli haaramisel elastse negatiivse tagasisidega saame vastavalt

$$T^2\ddot{x}_n + (2T\xi + kk_{ts}T_{ts})\dot{x}_n + x_n = kx_{n-1}. \tag{84}$$

Ka sel puhul jääb lüli endisega ekvivalentseks. Ainult võngete sumbumistegur suureneb $kk_{ts}T_{ts}$ võrra.

Integreeriva lüli haaramine jäiga negatiivse tagasisidega

$$T\dot{x}_n = k(x_{n-1} - k_{ts}x_n) \tag{85}$$

või pärast teisendamist

$$\frac{T}{kk_{ts}}\dot{x}_n + x_n = \frac{1}{k_{ts}}x_{n-1} \tag{86}$$

muudab lüli struktuuri. Ta muutub ekvivalentseks aperioodilise lüliga, kusjuures tema ajakonstant ja võimendustegur vähenevad kk_{ts} korda. See on väga tähtis omadus, mida nägime ka juba eespool ja mida väga laialt kasutatakse selleks, et muuta astaatiline lüli stabiilseks.

Integreeriva lüli haaramisel negatiivse elastse tagasisidega saame:

$$T\dot{x}_n = k(x_{n-1} - k_{ts}T_{ts}\dot{x}_n). \tag{87}$$

Pärast teisendamist

$$(T + kk_{ts}T_{ts})\dot{x}_n = kx_{n-1}. \tag{88}$$

Siin lüli struktuur jällegi ei muutu, kuid tema ajakonstant suureneb $kk_{ts}T_s$ võrra; järelikult pole sellel haaramisel praktikas mingit mõtet.

Isodroomse tagasiside kasutamist astaatilise (integreeriva) lüli stabiliseerimiseks käsitlesime juba eespool.

VII. ARVUTUSLIKE ELEMENTIDE KASUTAMINE AUTOMAATREGULEERIMISSÜSTEEMIDES

1. Arvutusmehhanismid automaatreguleerimisskeemides

Tihti sõltub mingi seadme automatiseerimisel reguleeritav suurus mitmest sõltumatust parameetrist, mistõttu reguleeritavat suurust ei saa vahetult kindlaks määrata. Neid parameetreid võib mõõta üksikult, et siis nende omavahelise matemaatilise sõltuvuse taustal määrata reguleeritav suurus. Kuid paljudel juhtudel pole see meetod soovitatav oma keerukuse tõttu. Ta võib osutuda täiesti kõlbmatuks protsesside puhul, kus parameetrid muutuvad kiiresti ning matemaatilist arvutust ei suudeta teha vajaliku kiirusega. Eriti on see maksev neil juhtudel, kus lihtsamate matemaatiliste tehete, nagu liitmise, lahutamise, korrutamise ja jagamise kõrval tuleb tarvis keerukamaid tehteid, nagu diferentseerimist, integreerimist, astendamist jne.

Antud küsimust võib tunduvalt lihtsustada, kui vajalikke matemaatilisi tehteid ei tee mitte inimene, vaid see toimub automaatselt, kusjuures regulaatori väljundis saadakse juba signaal, mis on nende tehete resultaadiks. Niisuguseid seadmeid nimetatakse arvutusseadmeiks. Konstruktsioonilt võivad nad olla kas mehaanilised, pneumaatilised, elektrilised või kombineeritud. Et elektrilised seadmed on teistest palju painduvamad ning on ka rohkem levinud, siis käsitleme allpool ainult mõningaid tüüpilisemaid elektrilisi arvutusseadmeid.

Eristatakse mehaanilis-elektrilisi ja elektrilis-mehaanilisi meetodeid. Esimesel juhul on sisenemissuuruseks elektripinge või -vool, väljumissuuruseks, mis esitab arvutusoperatsiooni resultaati, on aga mehaaniline kõrvalekaldumine, tavaliselt osuti hälve, või ainult vool, mis võiks põhjustada mehaanilist liikumist. Teisel juhul on sisenemissuuruseks tavaliselt mehaaniliselt sisseantav takistus. Arvutuse resultaadiks on pinge, mis antakse reguleerimiskontuuri reguleerimispingena või juhtimiskontuuri tüüriva suurusena.

Summeerimine. Esimese meetodi näitena käsitleme liitmist magnetvõimendiga. Kui magnetvõimendi varustada mitme sama

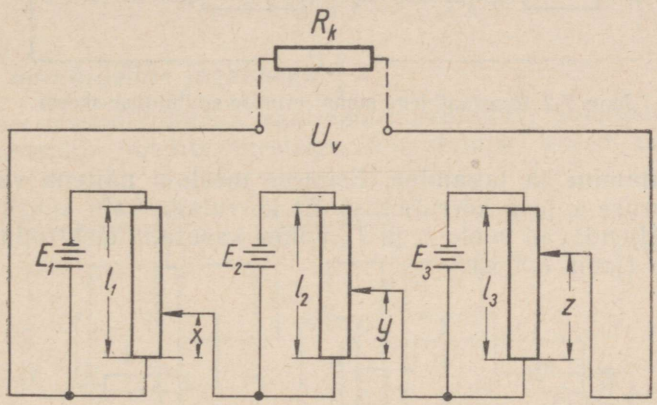
keerdude arvuga tüürmähisega, siis on summaarne vahelduvvool

$$I_{\sim} = k(I_{1=} + I_{2=} + \ldots + I_{n=}), \qquad (1)$$

kus k on magnetvõimendi voolu võimendustegur. Sel puhul peavad mõõdetavad suurused olema enne muundatud nendega võrdelisteks alalisvooludeks

$$I_{1=}, \quad I_{2=} \ldots I_{n=}.$$

Teise meetodi näitena vaatleme summeerimist reostaatide ja potentsiomeetrite abil (joon. 7-1).



Joon. 7-1. Potentsiomeetritega summeerimise lihtsaim skeem

Siin on x, y ja z liidetavad suurused. Summaarne pinge väljundis

$$U_v = \frac{E_1}{l_1}x + \frac{E_2}{l_2}y + \frac{E_3}{l_3}z \text{ või, kui } E_1 = E_2 = E_3 = E \text{ ja } l_1 = l_2 = l_3 = l$$

$$\text{ning } \frac{E}{l} = k,$$

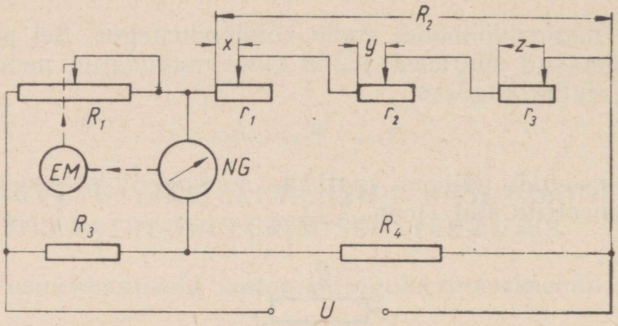
siis

$$U_v = k(x + y + z),$$

s. t. ta on võrdeline liidetavate suuruste summaga. See võrdus on seda õigem, mida suurem on koormustakistus R_k. Mõnikord toimub koormustakistuse mõju kõrvaldamiseks summeerimine elektronvõimendite abil.

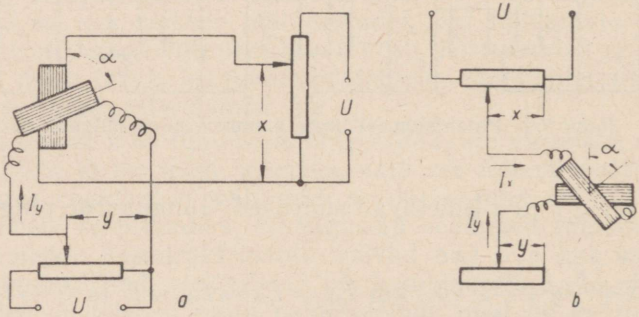
Summeerimine võib olla ka algebraline, kui liidetavate suuruste ja summa arvutuse alguspunktiks võtta mingi takistuste R_1, r_1, r_2 ja r_3 keskpunkt. Kui takisti R_1 liugkontakti ajamiks kasutada nullgalvanomeetri NG poolt tüüritavat elektrimootorit EM, siis võib saada automaatse süsteemi, kus toimub suuruste x, y ja z

pidev summeerimine. Vastuse loeme sel juhtumil takisti R_1 skaalalt (joon. 72).



Joon. 7-2. Reostaatidega summeerimise siidlülituse skeem

Korrutamine ja jagamine. Esimese meetodi näitena vaatleme kahe suuruse x ja y korrutamist. Et korrutada kaht suurust x ja y, mis väljendavad voole I_x ja I_y, võime kasutada elektrodünaamilist riista (joon. 7-3, *a*).



Joon. 7-3. Korrutamine (*a*) ja jagamine (*b*) elektrimõõteriista abil

Elektrodünaamilise riista pöördemoment

$$M_p = k_1 I_x I_y.$$

Kui takistusmomendil on lineaarne karakteristik, siis on riista liikuva raami pöördenurk

$$\alpha = k_2 I_x I_y.$$

Kui $I_x = k_3 x$ ning $I_y = k_4 y$, siis on pöördenurk α võrdeline korrutisega xy, s. o.

$$\alpha = k_2 k_3 k_4 xy = kxy.$$

Et elektriliselt jagada kaht suurust x ja y, mis on antud nendega võrdeliste vooludega I_x ja I_y, võib kasutada magnetelektrilist logomeetrit (joon. 7-3, *b*). Logomeetri liikuva süsteemi pöördenurk on funktsioon tema raame läbivate voolude suhtest

$$\alpha = \varphi\left(\frac{I_x}{I_y}\right).$$

Kui

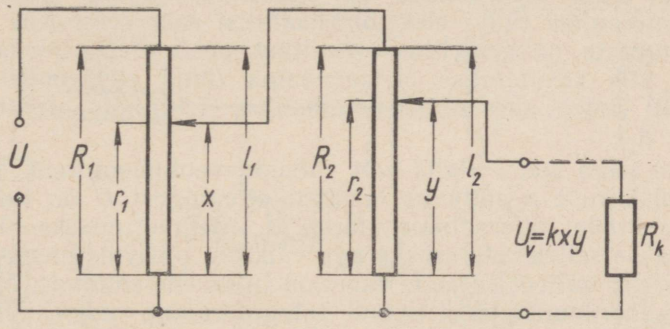
$$I_x = k_2 x \text{ ja } I_y = k_3 y,$$

siis

$$\alpha = \varphi\left(\frac{k_2}{k_3} \cdot \frac{x}{y}\right) = k\varphi\left(\frac{x}{y}\right),$$

s. t. ta on võrdeline jagatisega $\frac{x}{y}$.

Teise meetodi näitena vaatleme korrutamist potentsiomeetrite abil. Lihtsaim potentsiomeetriga korrutamise skeem on toodud joonisel 7-4.



Joon. 7-4. Korrutamine potentsiomeetriga

Siin valitakse suurus x potentsiomeetri R_1, suurus y aga potentsiomeetri R_2 liugkontakti asendi abil. Potentsiomeetri R_1 liugkontaktilt võetav pinge

$$U_1 = \frac{U}{R_1} r_1 = \frac{U}{R_1} \cdot \frac{R_1}{l_1} x = U \frac{x}{l_1}.$$

Pinge väljumisklemmidel

$$U_v \approx \frac{U_1}{R_2} r_2 = \frac{U_1}{R_2} \cdot \frac{R_2}{l_2} y = U \frac{x}{l_1} \cdot \frac{y}{R_2} = kxy,$$

s. t., ta on ligikaudu võrdeline korrutisega xy, kusjuures peab $R_2 \gg r_1$.

Olgu siiski märgitud, et potentsiomeetritega korrutamist võib kasutada ainult sel juhul, kui viga, mis korrutamisel tekib koor-

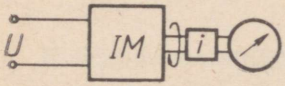
mustakistuse R_k mõjul, on küllalt väike. Suuremat täpsust võib korrutamisel ja jagamisel saada elektrilise silla abil, sest selles ei sõltu tehete tulemused koormustakistusest.

Kui soovitakse korrutada ja jagada elektrilisi suurusi, kus nii sisenemissuurusteks kui ka tehete resultaatideks on elektrilised suurused, siis selleks võib kasutada elektronlampidega süsteeme, magnetvõimendit (korrutamine) kui ka Hall'i efekti. Viimane seisab selles, et kui näiteks germaaniumplaadi kahele ristiolevale tahkudepaarile rakendada elektripinge, siis tekib kolmanda tahkudepaari vahel pinge, mis on võrdeline nende pingete korrutisega.

Diferentseerimine ja integreerimine. Elektrilist diferentseerimist ja integreerimist kasutatakse laialdaselt mitte ainult arvutusseadmeis, vaid ka reguleerimisprotsessi stabiliseerimiseks ja tema dünaamiliste näitajate parendamiseks. Diferentseerida ja integreerida võib nii elektrilisi kui ka mehaanilisi suurusi. Kui diferentseerimise või integreerimise tulemus peab olema elektriline suurus, siis on seda lihtsam teha neljapooluselise skeemi kasutamisega (vt. IV pt., p. 2). Mehaaniliste suuruste diferentseerimiseks, kui tehte resultaadiks on elektriline suurus, kasutatakse tahhogeneraatori tüüpi elektromehaanilisi seadmeid. Kui elektriliste suuruste integreerimise resultaat peab olema mehaaniline suurus, siis kasutatakse elektrimasina tüüpi elektromehaanilisi seadmeid (integreeriv alalisvoolumootor, elektrodünaamiline integraator jt.).

Mitte väga suuri alalis- või vahelduvvoolumootoreid, milledel pöörlemiskiiruse n sõltuvus masina toitepingest U on lineaarne, võib kasutada diferentseerimiseks ja integreerimiseks. Rohkem kasutatakse selleks otstarbeks aga väikseid püsivmagnetiga elektrimootoreid, milledel n ja U vahel on lineaarne sõltuvus. Mootoris esineva hõõrdumise tõttu toimub integreerimine veaga, mille suurus aga ei ulatu mootori hea konstruktsiooni puhul üle ühe protsendi.

Kui integreeriva mootori *IM* klemmidele rakendada pinge U, siis on tema võlli pöörlemiskiirus (joon. 7-5) $n = kU$, kus k on mootori konstant.



Joon. 7-5. Integreerimine elektrimootoriga

Mootori võlli nurkkiirus

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi n}{60},$$

kus α on pöördenurk.

Võlli pöördenurk (kui me ei võta arvesse hõõrdumist)

$$\alpha = \frac{2\pi k}{60} \int_0^t U dt$$

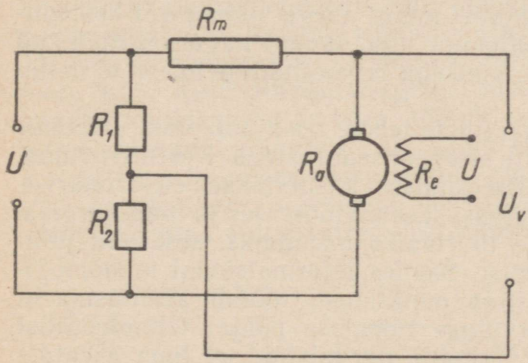
on võrdeline integraaliga tema klemmidele rakendatud pingest aja t järgi, mille lugemine algab sisselülitamise hetkest. Arvutuse tulemuse lugemise lihtsustamiseks kasutatakse reduktorit. Kui ta ülekandearv on i, siis näiteriista võlli pöördenurk

$$a_n = \frac{\pi k}{30i} \int_0^t U dt = k_1 \int_0^t U dt.$$

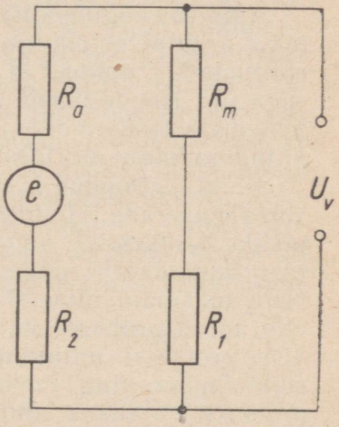
Kui sidestada võlliga tahhogeneraator, siis tekitatakse selle klemmidel pinge

$$U = \frac{n}{k} = \frac{60\omega}{2\pi k} = \frac{30}{\pi k} \frac{d\alpha}{dt} = k_2 \frac{d\alpha}{dt},$$

kus n — tahhomeetri võlli pöörete arv minutis. See pinge on võrdeline võlli pöördenurga esimese tuletisega. Seda omadust kasutataksegi diferentseerimisel. Tahhogeneraatorimeetodi puuduseks on mõõdetaval võllil koormusmomendi tekitamine. Et seda puudust kõrvaldada, võib tahhogeneraatorit kasutada sildlülituses (joon. 7-6).



Joon. 7-6. Diferentseerimine sildlülituses



Joon. 7-7. Diferentseerimise skeem

Kui liikumatu ankru puhul sildlülitus tasakaalustada, s. t. täita tingimus

$$R_1 R_a = R_2 R_m,$$

siis võrdub väljumispinge nulliga. Ankru pöörlemisel tekib tema mähistes indutseeritud emj.

$$e = c\omega = c \frac{d\alpha}{dt}.$$

Vaatleme joonisel 7-6 antud skeemiga identset skeemi (joon. 7-7).

Siit saame:

$$U_v = \frac{e}{R_1 + R_2 + R_a + R_m}(R_1 + R_m).$$

Võttes arvesse, et silla tasakaaluoleku puhul

$$R_m = R_1 \frac{R_a}{R_2},$$

saame lõplikult:

$$U_v = \frac{R_1 + R_1 \frac{R_a}{R_2}}{R_1 + R_2 + R_a + R_1 \frac{R_a}{R_2}} e = \frac{R_1\left(1 + \frac{R_a}{R_2}\right)}{R_1\left(1 + \frac{R_a}{R_2}\right) + R_2 + R_a \frac{R_2}{R_2}} e =$$

$$= \frac{R_1\left(1 + \frac{R_a}{R_2}\right)}{R_1\left(1 + \frac{R_a}{R_2}\right) + R_2\left(1 + \frac{R_a}{R_2}\right)} e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} c \frac{d\alpha}{dt} = k \frac{d\alpha}{dt}.$$

Automaatreguleerimissüsteemides kasutatakse veel keerukamaid arvutustehteid, nagu trigonomeetrilisi arvutusi, mõõdetavate suuruste korrutamisi ja jagamisi mingi nurga siinuse või koosinusega jne. Nende lähem käsitlemine aga, samuti nagu arvutuslikud tehted elektronlampide kasutamisega ja pooljuhtide baasil ei mahu antud raamatu piiridesse.

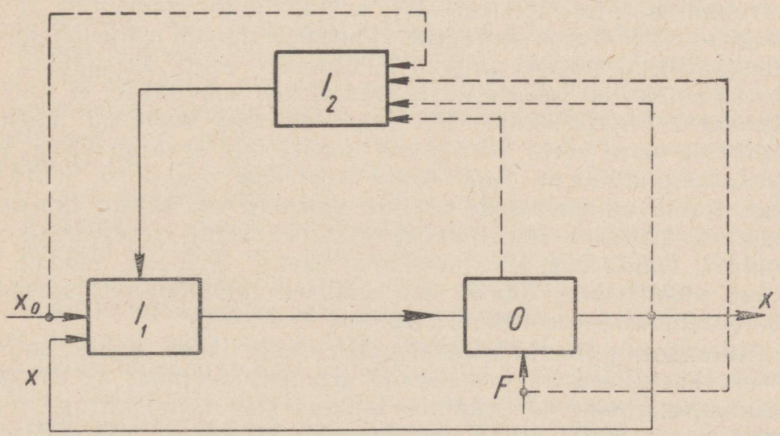
Kõiki ülaltoodud matemaatiliste tehete resultaate võib vajaduse korral kasutada regulaatorite sisenemissuurustena. Keeruliste tööstuslike protsesside automatiseerimisel kasutatakse elektronarvutusmasinaid, eriti masinaehituses, keemiatööstuses ja metallurgias. Neid masinaid nimetatakse tüürivaiks masinaiks, sest nad juhivad antud protsessi kulgemist. Saades informatsiooni tehnoloogilise protsessi mitmesugustest punktidest, töötab arvutusmasin selle ümber ning juhib arvutuse tulemuse põhjal tehnoloogilist protsessi vajalikus suunas. Tehakse uurimistöid, et luua arvutusmasinaid, mis oleksid võimelised juhtima mitte ainult mingit tehnoloogilist protsessi, vaid kogu tsehhi või tehase tööd.

2. Iseseaduvad süsteemid

Automaatsüsteemidest käsitlesime me seni automaatjuhtimis- ja automaatreguleerimissüsteeme. Automaatjuhtimissüsteemides ei avalda reguleerimisprotsessi kulgemine objektis mõju reguleerimisorgani asendi muutusele. Sel põhimõttel töötab suur hulk igasuguseid metallitöötlemis-automaatpinke, vooluliine jne. Neis süsteemides ei võeta arvesse kõrvalisi faktoreid, mis võivad esile kerkida ning tunduvalt mõjutada juhtimisprotsessi kulgemist.

Neid ongi mõnikord täiesti võimatu ette näha. Üheks olulisemaks veaks, mis esineb niisuguste tööprotsesside puhul, on objekti siseneva suuruse hoidmise ebatäpsus. Kui näiteks metallvarda keermetamisel regulaator valib veidi teistsuguse sammu kui on vajalik, siis võib sama keermete arvu juures keermetatud osa pikkus tunduvalt erineda vajalikust. Teiseks ei võeta siin arvesse häiringuid, mis on tingitud objekti karakteristiku muutumisest, näiteks pingi vibreerimist, elektripinge kõikumist, lennuki jäätumist jne. Need võivad mõjuda juhtiva protsessi tulemuste täpsusele. Kolmandaks ei võeta arvesse nn. parasiithäiringuid, mis esinevad reguleerimissüsteemis eneses regulaatori toiteallikate parameetrite, reguleerimisorgani karakteristiku (näiteks lõiketera kulumise) jne. muutuste tõttu. Seepärast on väga paljudel juhtudel niisugust tööprotsessi «pimedat» juhtimist, mis ei reageeri protsessi tegelikule kulgemisele, raske, mõnikord aga täiesti võimatu kasutada. Tuleb üle minna palju keerukamatele automaatsüsteemidele — automaatreguleerimissüsteemidele. Automaatreguleerimise puhul objektis toimuvat protsessi juhtivad signaalid pole varem määratud. Nende iseloomu määrab juhtiva protsessi tegelik kulg.

Reguleerimise ülesanne seisab sel puhul protsessi mingi näitaja hoidmises etteantud väärtuse juures. Sel puhul on automaatsüsteemis olemas element, mis mõõdab kogu aeg reguleeritava parameetri väärtust ning signaliseerib sellest tagasi regulaatorile. Mõlema automaatsüsteemi struktuurskeemi esitasime eespool (vt. joon. 1-2). Kuid automaatreguleerimissüsteem, millel on eespool käsitletud jäik karakteristik, töötab real juhtudel põhimõtteliselt palju halvemini inimesest, kes juhib seda protsessi käsitsi. Sellisel automaatreguleerimissüsteemil puudub inimese võime korrigeerida reguleerimisprotsessi, kui selleks tekib vajadus. Seepärast võib niisugune automaatreguleerimissüsteem osutuda kõlbmatuks,



Joon. 7-8. Iseseaduva automaatreguleerimissüsteemi põhimõtteskeem

kui reguleerimisorgani või teiste lülide karakteristik või reguleeriva aine füüsikalised omadused järsult muutuvad.

Käesoleval ajal on juba olemas niisuguseid automaatreguleerimissüsteeme, mis automaatselt kohanevad uute tingimustega. Niisuguseid süsteeme nimetatakse iseseaduvateks automaatreguleerimissüsteemideks.

Iseseaduvates süsteemides on peale tavalise tüürimisseadme I_1 veel teine tüürimisseade I_2 (joon. 7-8).

Tüürimisseade I_2 võtab andmed reguleerimissüsteemi osast O (reguleeritav parameeter x, süsteemi teised koordinaadid x_i, reguleeritava suuruse etteantud väärtus x_0, häiringud, parasiithäiringud F ja mõned teised näitajad) ning teeb kindlaks, kas protsess kulgeb vajalikul viisil või mitte. Kui protsess on vajalikust kõrvale kaldunud, siis mõjub seade I_2 (täiendav juhtimisseade) süsteemi põhilisele reguleerimisseadmele I_1, muutes näiteks selle karakteristikut, et pöörata protsess tagasi vajalikesse rööbastesse. Seega erineb iseseaduv süsteem tavalisest automaatreguleerimissüsteemist täiuslikuma tagasiside poolest. Muidugi võib süsteemi juhtimisseade koosneda ka mitte kahest osast, nagu toodud näites, vaid kolmest, neljast või rohkemastki osast, kusjuures iga osa reageerib ainult teatud liiki häiringutele.

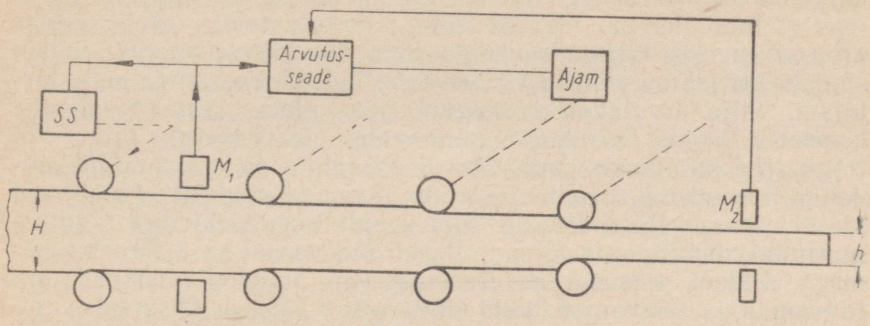
Tavalise automaatreguleerimissüsteemi puhul on alati teada, mis suunas tuleb muuta reguleeritava parameetri tegelikku väärtust x, et saada võrdust $x = x_0$ (x_0 on reguleeritava parameetri antud väärtus). Seepärast on automaatreguleerimissüsteemi suletud ahela väikese võimendusteguri ja x-i aeglase muutumise puhul alati teada, mis suunas peab tegutsema I_1 süsteemi osale O. Iseseaduvais automaatreguleerimissüsteemides aga pole varem teada, mis suunas muuta parameetreid, millele mõjub seade I_2. Mõjumise suund tuleb leida arvutuse ja plaanipärase otsimise teel.

Automaatjuhtimissüsteemides arvutuslikud elemendid tavaliselt puuduvad. Automaatreguleerimissüsteemides esinevad mõned matemaatilised tehted, näiteks lahutamine, alati. Eriti laialt esineb matemaatilisi tehteid süsteemides, kus soovitakse, et toimuks optimaalne reguleerimine. Sel juhul on vaja süsteemi juhtimisseadmesse sisse võtta korrigeeriv seade, mis arvutab välja, missugused signaalid on vaja saata süsteemi osasse O, selleks et temas toimuvad protsessid oleksid parimad või küllalt lähedased parimaile. Laiemalt esineb arvutuslikke elemente iseseaduvais süsteemides. Omakorda arvutustehnika areng, eriti see, mis on toimunud elektroonika baasil, lõi eeldused täiuslikumate iseseaduvate automaatreguleerimissüsteemide loomiseks.

Automaatreguleerimissüsteemide areng läheb kahes suunas: 1) üha keerulisemate protsesside automatiseerimise ja 2) reguleerimisprotsesside parendamise suunas (tegutsemiskiiruse, töötamise täpsuse, materjali ja elektrienergia kokkuhoiu suurendamine, inimtööjõu vähendamine, agregaatide täielikum kasutamine, töö-

seisakute ja tühikäikude vähendamine jne.). Protsessi juhtimine muutub seetõttu palju keerulisemaks. See aga nõuab arvutusseadmete kasutamist mitte ainult automaatreguleerimissüsteemides korrigeerivate seadmetena, vaid ka puhtjuhtimisseadmetena.

Üldiselt on käesoleval ajal veel vähe tehtud arvutusseadmete kasutamiseks automaatreguleerimissüsteemides. Esimese näitena selle kohta vaatleme metall-lehe paksuse reguleerimist. Reguleeritavaks objektiks on valtsimispink (joon. 7-9).



Joon. 7-9. Metalli valtsimise reguleerimine iseseaduva reguleerimissüsteemiga

Metall-latt paksusega H liigub läbi nelja paari valtside. Iga valtsipaari vahel muutub ta õhemaks. Lati paksus h pärast viimaste valtside vahelt väljumist kõigub sõltuvalt tööpingi töörežiimi muutumisest ja lati algpaksusest H.

Lati paksust võib reguleerida nii, et mõõdame mikromeetriga M_1 lati paksust pärast esimese valtsipaari vahelt väljumist. Kui paksus on suurem kui nõutud, siis mõjume surveseadme SS abil esimesele paarile valtsidele nii palju, et väljuva lati paksus vastaks nõutavale. Kui aga lati paksus on nominaalsest väiksem, suurendame valtside vahet. Ent niisuguse paksuse reguleerimise süsteem töötab väga aeglaselt selle tõttu, et mõõtmine hilineb, surveseadmel on olemas inerts ja valtsid muudavad omavahelist kaugust aeglaselt. Niisugune süsteem võib töötada enam-vähem rahuldavalt siis, kui sisenev lati paksus H ei muutu väga tihti. Kui see aga muutub tihti, siis võiks seda kompenseerida metalli teise valtsipaari vahelt läbitõmbamise pinge reguleerimisega. Mida suurem on jõud, mis kulub metalli valtside vahelt läbitõmbamiseks, seda väiksem on kõigi teiste võrdsete tingimuste puhul valtside alt väljuva lati paksus. Suurendades kolmanda valtsipaari pöörlemiskiirust võib suurendada tõmbepinget, nende pöörlemiskiirust vähendades võib aga vähendada ka tõmbepinget. Järelikult võib teise valtsipaari vahele mineva lati paksuse muutumist kompenseerida kolmanda valtsipaari ajami pöörlemiskiiruse muutmisega. Arvutusseade, saades signaali mikromeetrilt M_1, annab impul-

sid valtside ajamile edasi selleks, et seda kompensatsiooni teostada. Kuid pingi parameetrite (õlituse, pingi kuumenemise, elektripinge jne.) muutused võivad seda kompensatsiooni rikkuda. Viimase valtsipaari taha pandud teise mikromeetri M_2 ülesandeks on arvutusseadme töö automaatne korrigeerimine, kui lati lõplik paksus ei vasta nõutavale.

Teine näide. Rida elektrijaamu on ühendatud ringsüsteemi. Nende jaamade hulgas on vanu, vähem ökonoomseid ning uusi, kõrgema ökonoomsusega jaamu. Iga jaama iga generaatori koormus ei tohi ületada lubatud piiri. Arvutusseade peab, võttes arvesse energia tarbija asukohta ning kasutatava energia hulka, samuti iga jaama võimsust ja energia üleandmise hinda selle tarbijani, välja arvutama, missugune peab olema jaamadevaheline koormuse jaotus, mis tagab minimaalse elektrienergia hinna või tingkütuse minimaalse kulu. Arvutusseadmes on jaamade ülekandeliinide mudelid ning ta justeerib jaamade võimsusregulaatorid alati optimaalsele suurusele. Siin kasutatakse elektrilisi arvutusmasinaid, mis üldiselt võivad olla nii pideva kui ka diskreetse toimega. Pideva toimega arvutusseadmed (analoogiamasinad) on lihtsamad ja odavamad, kuid mitte väga täpsed. Diskreetse toimega (numbrilistel) arvutusseadmetel on suurem töötamistäpsus, neid võib kasutada väga mitmesugusteks arvutusteks, kuid nad on keerulisemad, suuremad ning kallimad.

3. Ekstreemreguleerimine

Automaatreguleerimise ülesandeks on reguleeritav parameeter küllalt suure täpsusega hoida vastavuses tema antud väärtusega, vaatamata igasugustele välistele häiringutele. Sealjuures võib reguleeritava parameetri antud väärtus olla kas konstantne suurus (automaatne stabiliseerimine), muutuda ajaliselt kindla seaduspärasusega (programmreguleerimine) või muutuda ajaliselt sõltuvalt igasugustest välistest teguritest, mille muutust pole varem ette näha (jälgivreguleerimine).

Väga paljudel juhtudel esineb reguleeritava parameetri tegelikul väärtusel mingi äärmine (ekstreemne) väärtus, s. t. reguleeritava aine hulga muutumisel ainult ühes suunas muutub reguleeritav parameeter algul ühes, siis aga ka teises suunas.

Ekstreemreguleerimissüsteemides reguleeritava suuruse ekstreemne väärtus pole varem teada ega anta ka ette. Selles suhtes läheneb ekstreemreguleerimine oma omaduste poolest jälgivreguleerimisele. Ekstreemreguleerimise ülesandeks on leida ja küllaldase täpsusega hoida reguleeritav parameeter selle ekstreemväärtuse juures, mida on praktiliselt võimalik saavutada ja mis muutub ajaliselt varem teadmata seaduspärasuse järgi. Seega on ekstreemreguleerimissüsteem iseseaduva reguleerimissüsteemi eriliik. Ekstreemreguleerimise teostamiseks pole vaja teada kõiki funkt-

sionaalseid sõltuvusi, mis määravad ekstreemumi suuruse ja oleku. On vaja ainult ekstreemumi olemasolu, s. t. on vaja, et reguleeritava parameetri esimene tuletis muudaks oma märki reguleerimiskeskkonna samasuunalise muutuse korral.

Esimeseks ekstreemreguleerimissüsteemiks oli süsteem tuulemootori labade atakknurga automaatseks muutmiseks sõltuvalt tuule tugevusest ja tuulemootori koormusest.

Propelleriteooriast selgub, et tuule igale kiirusele ja mootori igale koormusele vastab ainult üks õige labade atakknurk, mille puhul tuulemootoril on suurem võimsus.

Tuulemootori labade atakknurga vahetpidamatu automaatne muutumine sõltuvalt tuule kiirusest ja mootori koormusest on tüüpiliseks ekstreemreguleerimise ülesandeks.

Väga tihti sõltuvad ekstreemumi suurus ja objekti sisenevate suuruste vastavad optimaalsed väärtused reast raskesti arvesse võetavaist faktoritest, kusjuures nende omavaheline seos on keeruline. Kui tahaksime reguleerida objekti kõigi nende faktorite kaudu, peaksime koostama väga keerulise reguleerimissüsteemi, mida pole tihti aga üldse võimalik teha vajalike tajurite puudumise tõttu. Ekstreemreguleerimise puhul aga objekti ei reguleerita mitte nende faktorite kaudu, vaid nendest faktoritest tuleneva lõppresultaadi — reguleeritava parameetri järgi.

Aurukatla maksimaalse kasuteguri võime saavutada, kui saavutame täieliku vastavuse kütuse ja õhu kulu vahel. Nende omavaheline optimaalne suhe sõltub kütusesordist, katla koormusest, soojusülekande tingimustest, mis muutuvad täiesti teadmata seaduspärasuste järgi sõltuvalt seinte mustumisest, leegi iseloomust ja paljudest teistest faktoritest.

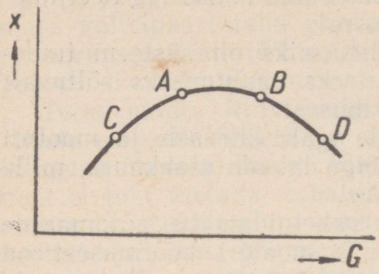
Kui õhu kulu saab mõõta praktiliseks vajaduseks küllalt suure täpsusega, siis kütuse, eriti tahkekütuse kulu mõõtmine võib toimuda ainult ligikaudselt. Tavalistes aurukateldes reguleeritakse õhku kas kütuse, auru või soojusliku koormuse järgi (vt. pt. VIII, p. 1). Regulaatorit, mis peab tagama katla maksimaalse kasuteguri ning arvesse võtma kõik eeltoodud faktorid, justeeritakse ning korrigeeritakse (sõltuvalt kütusesordi või katla koormuse muutusest) käsitsi. Et rida faktoreid pole eraldi üldse võimalik mõõta, veel vähem justeerimisel arvesse võtta, siis on selle reguleerimisviisi puhul raske objekti maksimaalse kasuteguriga töötamas hoida, eriti siis, kui need faktorid küllalt sagedasti muutuvad.

Niisuguseid näiteid võib tuua enamgi.

Püstitatud ülesande, antud näite puhul objekti töös hoidmise, nii et kasutegur oleks maksimaalne, võib lahendada tunduvalt hõlpsamini ekstreemreguleerimise abil. Et katla kasutegur sõltub väga suurel määral väljumiskaost, siis võib katelt lihtsamalt reguleerida ekstreemregulaatoriga, hoides mainitud kao minimaalse.

Ekstreemumi leidmine teostatakse sel juhul vahetpidamatu automaatse otsimise meetodil. Seejuures antakse kindlaksmäära-

tud häiringud objekti ja mõõdetakse sellest tingitud reguleeritava parameetri muudatused.

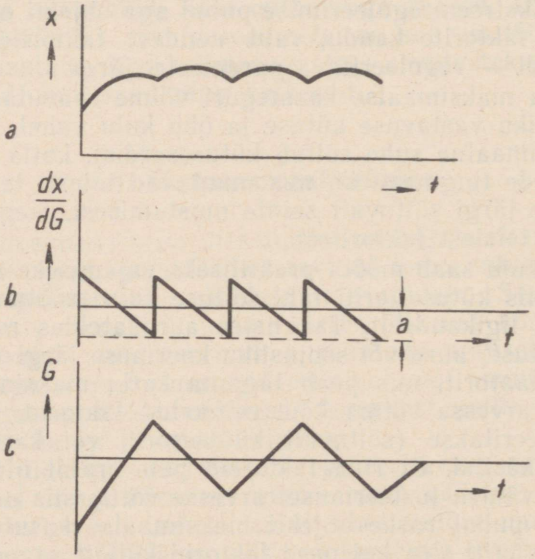


Joon. 7-10. Reguleeritava parameetri ekstremaalne karakterkõver

Joonisel 7-10 on näidatud tüüpiline ekstreemumiga sõltuvus reguleeritava parameetri x (väljumissuurus) ja reguleeriva keskkonna G (sisenemissuurus) vahel. Ekstreemumi otsimine toimub piirkonnas AB.

Ekstreemumi leidmise viisi järgi võib teadaolevaid ekstreemregulaatoreid jagada kolme põhigruppi:

1. Regulaatorid, mis reageerivad väljumiskoordinaadi tuletise märgile, kusjuures tuletis on võetud kas siseneva koordinaadi või aja järgi (joon. 7-11).



Joon. 7-11. Väljumiskoordinaadi tuletise märgile reageeriva ekstreemregulaatori töötamise graafikud

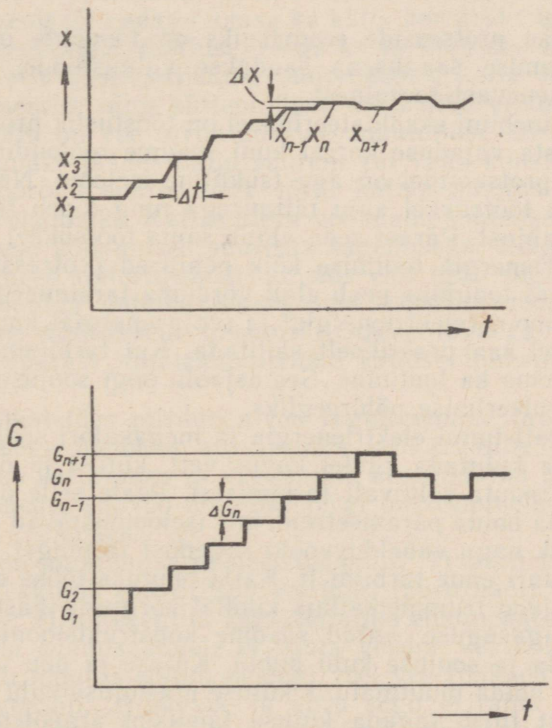
Sisenemiskoordinaati G muudetakse pidevalt ja konstantse kiirusega (joon. 7-11, *c*). Vastavalt sellele muutub väljumiskoordinaat x (joon. 7-11, *a*). Kui liikumine toimub maksimumi poole, siis on ekstreemumit läbides märki muutev tuletis $\frac{dx}{dG}$ positiivne (joon.

7-11, *b*). Kui see tuletis on negatiivne ning omandab mingi väärtuse *a*, siis sisenemiskoordinaat reverseerub. Sealjuures toimub jälle liikumine ekstreemumi suunas, tuletis muutub hüppeliselt positiivseks, ekstreemumi läbides aga jälle negatiivseks ja protsess kordub. Toimub isevõnkumine ekstreemumi ümber.

2. Regulaatorid, mis «peavad meeles» ekstreemumi. Ka sel puhul toimub sisenemiskoordinaadi sunduslik muutmine konstantse kiirusega (joon. 7-11, *c*).

Koordinaadi x maksimaalne väärtus fikseeritakse spetsiaalse mäluseadmega. Pärast ekstreemumi ületamist võrreldakse reguleeritava koordinaadi jooksvat väärtust tema ekstreemväärtusega. Kui vahe $\delta = x_{max} - x$ ületab mingi antud väärtuse δ_{max}, toimub reguleerimisorgani reverseerumine, kusjuures mäluseadmes koordinaadi x eelmine väärtus kustutatakse. Koordinaat x hakkab uuesti kasvama, lähenedes ekstreemumile teisest küljest. Ekstreemumi saavutamisel fikseeritakse see uuesti. Nii protsess kordub.

3. Regulaatorid, kus sisenemiskoordinaat on hüppelise muutumisega (joon. 7-12).



Joon. 7-12. Sisenevat koordinaati hüppeliselt muutva ekstreemregulaatori töötamise graafikud

Sisenemiskoordinaat muutub perioodiliselt diskreetse juurdekasvu $\pm\Delta G$ võrra. Pärast siirdeprotsessi lõppu mõõdetakse objektis väljumiskoordinaadi x keskmine väärtus aja Δt jooksul. Suurust x_n võrreldakse suurusega x_{n-1}, mis tal oli enne reguleerimiskeskkonna muutust ΔG_n ning fikseeriti mäluseadme poolt. Pärast seda antakse uus juurdekasv ΔG_{n+1}, mille märk määratakse sõltuvalt eelmisest juurdekasvust ΔG_n ja vahe $\Delta x_n = x_n - x_{n-1}$ märgist.

Olgu märgitud, et reguleeritava parameetri võnkumine ekstreemumi ümber võib toimuda kas sümmeetriliselt (joonisel 7-10 *AB*) või ebasümmeetriliselt (joonisel 7-10 *CB* või *AD*). Viimast moodust kasutatakse siis, kui reguleeritava parameetri minek üle ekstreemumi ühes suunas on palju ebasoovitavam kui teises suunas. Kui me näiteks reguleerime katla kolde temperatuuri ekstreemregulaatoriga, siis on kasulikum töötada ekstreemumi paremal harul, s. t. hoida liigõhutegur pigem üle ühe kui alla ühe.

VIII. TÖÖSTUSLIKE PROTSESSIDE AUTOMATISEERIMINE

1. Aurukatelde automaatreguleerimine

Tööstuslike protsesside eesmärgiks on töödelda mingit toorainet. Töötlemise saadusena saadakse valmistoode, mis erineb protsessi sisenevast toorainest.

Katla ja turbiini ekspluateerimisel on tööstuslik protsess pidev. See võib kesta vajaduse korral kuni seadme remondini. Paljudel tööstuslikel protsessidel on aga tsükliline iseloom. Näiteks algab martäänahju töötsükkel ahju täitmisega ning lõpeb terase väljalaskmisega ahjust. Pärast seda algab sama töötsükkel jälle otsast peale. Elektrienergia tootmise kõik põhilised protsessid on pidevad, kusjuures tootmine peab alati võrduma tarbimisega, sest valmisproduktsiooni (elektrienergiat ja soojusenergiat kuuma vee või auru näol) ei saa praktiliselt säilitada. Kui tarbimine suureneb, peab suurenema ka tootmine. See asjaolu ongi soojuselektrijaama automaatreguleerimise põhireegliks.

Iga kilovatt-tunni elektrienergia ja megakalori soojuse tootmiseks on vaja kulutada kindel kogus vett, kütust ja õhku. Nende hulka tuleb muuta sõltuvalt tarbimisest. Peale selle on veel vaja konstantseina hoida parameetreid, mis iseloomustavad soojuselektrijaama tööd, nagu vahelduvvoolu sagedust ja pinget, auru rõhku ja temperatuuri enne turbiini jt. Katla ohutuks tööks on vaja säilitada vee nivoo trummelkatlais kindlal kõrgusel igasuguse koormuse, s. o. igasuguse antud seadme konstruktsiooniga piiratud elektrienergia ja soojuse kulu puhul. Kütuse ja õhu vahekord on samuti vaja hoida muutmatuna kütuse igasuguse kulu korral, sest ühest küljest tuleb tagada kütuse täielikku ärapõlemist, teisest küljest ei tohi aga liigselt suurendada õhu kulu (see mõjub negatiivselt katla kasutegurile).

Regulaatorite põhiülesandeks on seega muuta vee, kütuse ja õhu hulka ja nende omavahelist vajalikku suhet, et tagada tarbija poolt soovitud elektri- ning soojusenergia saamist optimaalsete parameetrite juures.

Seega koosneb katla automaatreguleerimissüsteem: 1) katla toite automaatreguleerimissüsteemist ja 2) põlemisprotsessi automaatreguleerimissüsteemist.

Katla toiteautomaatika. Esimesteks automaatregulaatoriteks olid kateldel toiteregulaatorid. Nimelt oli vee nivoo kõrguse säilitamine trumlis katla igasuguse koormuse puhul tähtsaimaks küsimuseks nii turbiini töötamise kergendamiseks kui ka, mis oli veel tähtsam, avarii vältimiseks. Liiga kõrge nivoo puhul läheb vesi auruülekuumendisse ja turbiini, liiga madala nivoo puhul aga kuumenevad katla torud üle. Pealegi oli automaatreguleerimist siin lihtsam rakendada kui näiteks põlemisprotsessi juures.

Nivoo käsitsi reguleerimine nõuab kütjalt või vee järele valvajalt suurt tähelepanu ja on katla kõrge välistemperatuuri tõttu ka mõningal määral tervist kahjustav töö.

Aurukatla toitmine veega on üks tähtsaimaid operatsioone katla ekspluateerimisel. Selle operatsiooni automatiseerimise teostas esimesena vene soojustehnik I. I. Polzunov. Aurutootmise tehnika tormiline areng tõi endaga kaasa ka katla konstruktsiooni ja aurutootmise tehnoloogia muutuse, seega ka toitereguleerimise tehnika muutuse. Katla aurutootlikkuse suurenemise, katla suhtelise veemahu vähenemise ning küttepindade soojusliku erikoormuse suurenemise tõttu on vee nivoo kõrguse muutumise kiirus koormuse muutuse samaks jäädes palju suurem kui vana konstruktsiooniga kateldel. Töörõhu suurenemise tõttu katlas muutusid ka nivootajurid keerukamaiks. Katlas oleva vee mahu suhtelise vähenemise tõttu on nivoo kõikumised suurema sagedusega. Kõige selle tõttu ei andnud need toiteregulaatorid, mis end igati õigustasid vana konstruktsiooniga katelde juures, uue konstruktsiooniga katelde juures enam positiivseid tulemusi. Otsese toimega regulaatorid asendati seepärast mitmeimpulsiliste kaudse toimega regulaatoritega.

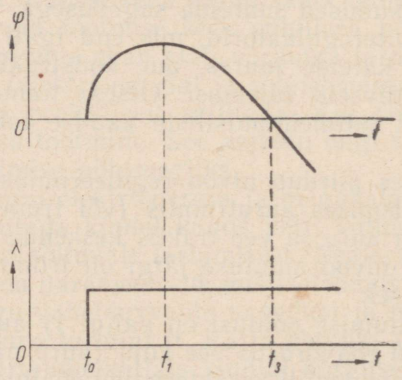
Trummelkateldes piirdub nivoo reguleerimine tavaliselt nivoo reguleerimisega ülemises aurutrumlis (või trumlites). See trummel võetakse katla auru ja vee traktis keskendatud mahtuvuseks. Katla ajakonstant nivoo muutuse järgi on trummelkateldes keskmiselt 100 . . . 250 sek.

Vee nivoo muutumise põhjusi on palju: 1) auru kulu muutuse tagajärjel tekkinud ebavõrdsus vee kulu (auru näol) ja vee sissetuleku vahel; 2) toiteventiili karakteristiku ebalineaarsus, s. o. ventiili võrdsele avamisastmele ei vasta võrdne vee kulu, kusjuures see vee kulu muutus sõltub pealegi veel vee rõhkude vahest enne ja pärast ventiili; 3) et vee ja auru segu ei täida mitte ainult trumlit, vaid kogu katelt, s. t. ka küttetorusid, siis tõmmatakse koormuse suurenemisel (auru kulu suurenemisel) osa vett toru-

dest auruga kaasa ning toimub nivoo näiv tõusmine (puhetis), koormuse vähenemisel aga nivoo näiv langemine; 4) rõhu tõusmisel katlas vee keemistemperatuur tõuseb, auru suhteline maht väheneb, s. t. aur surutakse kokku, veidi väheneb ka katla aurutootlikkus ja järelikult väheneb protsentuaalne aurusisaldus katla vees; seetõttu vee nivoo alaneb; 5) katla toitmine veega, mille temperatuur on madalam katlas oleva vee omast, tekitab nivoo esialgse alanemise, kuigi vett lisatakse.

Kõik need muutused toimuvad katla siirdeprotsessi ajal (nivoo taastamise ajal). Mida väiksem on vee suhteline maht, s. t. vee ja auru hulga suhe, seda suuremal määral toimuvad need muutused, tihtipeale koguni samaaegselt. Auru kulu muutumise tingib tarbija. Auru kulu muutusest tingitud auru rõhu muutus tasakaalustatakse kolde soojusliku koormuse muutusega suunas, mis tingiks auru rõhu taastamise tema nominaalväärtusele, nivoo muutus aga tasakaalustatakse vee kulu muutusega, kusjuures nivoo muutusele mõjuvad samaaegselt ka teised eespool nimetatud tegurid. Need tegurid mõjuvad nivoo muutusele erinevalt: sel ajal kui kolde soojuslik koormus, auru rõhu või toitevee temperatuuri muutus tingib nivoo muutuse mingi kindla piirini, tingib ebavõrdsus auru ja vee kulu vahel nivoo püsiva muutuse kas alanemise või tõusmise suunas, kusjuures seda muutust saab seisma panna ainult ebavõrdsuse kaotamisega. Seega katlal kui vee nivoo reguleerimise objektil puudub isereguleerimine.

Katla toitevee regulaatori lihtsaimaks tüübiks on üheimpulsiline regulaator. Vaatleme kõige ebasoodsamat reguleerimise juhtu, mis esineb praktikas kõige sagedamini. Koos auru kulu muutumisega muutub samas suunas ka kolde soojuslik koormus (joon. 8-1).



Joon. 8-1. Katla vee nivoo muutumise karakterkõver auru kulu järgi:
φ — nivoo suhteline muutus (väljumissuurus), λ — katla koormuse (auru kulu) suhteline muutus (sisenemissuurus)

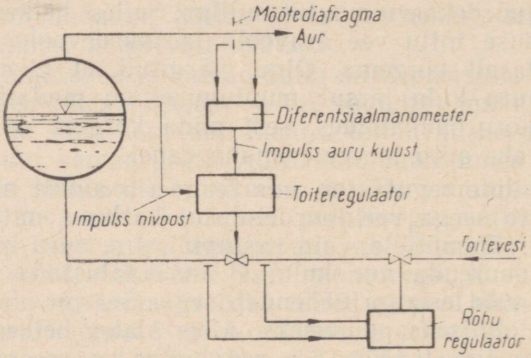
Hetkel t_0 toimub katla koormuse ja kolde soojusliku koormuse järsk suurenemine, mistõttu keemine katlas intensiivistub ja aurusisaldus vee ja auru segus suureneb. Nivoo tõuseb vaatamata sellele, et vett siseneb katlasse vähem kui teda auru näol katlast väljub. Sedamööda, kuidas aurusisaldus vee ja auru segus stabiliseerub, hakkab nivoo muutumise kiirus vähenema ning hetkel t_1 võrdub auru juurdekasvu muutus nulliga. Sellest hetkest peale hakkab ebavõrdsuse tõttu vee äravoolu ja juurdevoolu vahel nivoo peaaegu ühtlaselt langema. Olgu märgitud, et niisugune nivoo muutumine auru kulu järsul muutumisel on madalrõhukateldes suurem kui kõrgrõhukateldes, sest mida kõrgem on rõhk, seda väiksem on vahe auru ja vee erimahu vahel.

Üheimpulsiline regulaator, mis reageerib ainult nivoo muutusele, reguleerib seega vee juurdetulekut katlasse mitte vastavalt reguleerimise põhimõttele, vaid vastupidi, s. o. auru kulu suurenemisel ta ei suurenda vee kulu, et tasakaalustada ebavõrdsust nende vahel, vaid esialgu vähendab seda. See on üheimpulsiliste regulaatorite oluliseks puuduseks. Alles alates hetkest t_3 hakkab toiteregulaator õigesti tööle, s. o. regulaator reverseerub ning hakkab suurendama vee juurdevoolu katlasse. Kui nivooregulaator on staatiline, siis vastab maksimaalsele koormusele madalaim nivoo ning minimaalsele — kõrgeim. Niisugune nivoo asend ei ole katla tööle soodus, sest koormuste suurel ja sagedasel muutumisel kõigub vee nivoo katlas lubamatutes piirides, tekitades hädaohu, et katlas võib tekkida kas liiga madal või liiga kõrge veeseis. Eriti hädaohtlik on see leegi järsul katkemisel õli- või gaasiküttega katla juures. Üheimpulsilise otsese toimega regulaatori negatiivseks omaduseks on niisiis see, et ta staatiline karakteristik, mis on vajalik reguleerimissüsteemi stabiilseks tööks, vähendab katla töökindlust.

Vanemate, väikese võimsusega aurukatelde juures kasutatakse üheimpulsilist dilatomeetrilist nivooregulaatorit. Termostaattoruga dilatomeetriliste otsese toimega regulaatorite suur töökindlus ning suhteliselt suur jõud reguleerimisorgani asendi muutmiseks on põhjustanud nende laialdase leviku. Kuid neil on ka väga oluline puudus. Soojusliku inertsi tõttu hilinevad nad reguleerimisorgani asendi muutmisel väga palju, eriti sel puhul, kui katla vee nivoo langeb, s. t. termostaadi jahtumisel. Seepärast ei saa neid kasutada väikese ajakonstandiga katelde juures ning samuti katelde juures, milledes esineb suuri ning sagedasi koormuse muutusi, mis põhjustavad nivoo mittesumbuvaid kõikumisi. Seega on need üheimpulsilised termostaadiga nivooregulaatorid kasutamiskõlblikud ainult väikese võimsusega ja suure veemahuga katelde juures, mille ajakonstant vee kulu järgi on vähemalt 200 . . . 250 sek.

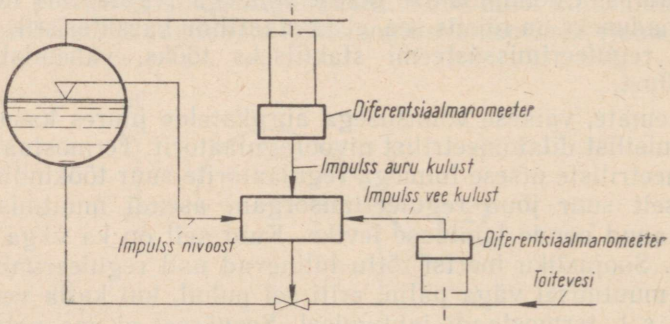
Kaheimpulsilise regulaatori juures on teiseks impulsiks auru kulu (koormuse muutuse järgi reguleerimise printsiip). Sel puhul määrab reguleerimisorgani asendit mitte ainult nivoo kõrgus, vaid

ka auru kulu. Selleks et kaheimpulsilises regulaatoris likvideerida läbi reguleerimisorgani mineva vee kulu sõltuvust rõhkude vahest enne ja pärast reguleerimisorganit, täiendatakse viimast regulaatoriga, mis hoiab selle vahe konstantsena (joon. 8-2).



Joon. 8-2. Katla vee nivoo kõrguse kaheimpulsilise regulaatori skeem

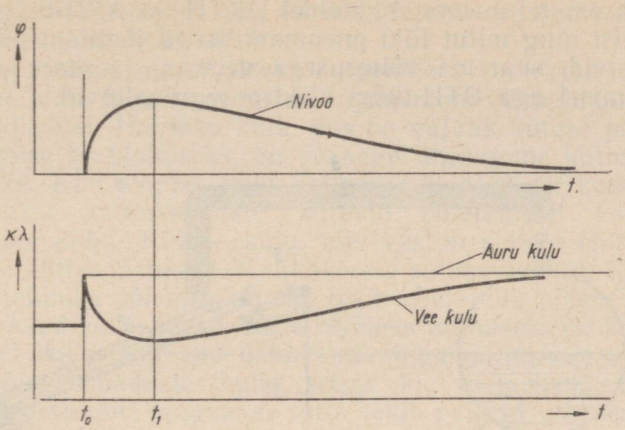
Seega on siin kaudselt kasutusel veel kolmas impulss, mis lähtub vee kulust (joon. 8-3).



Joon. 8-3. Katla vee nivoo kolmeimpulsilise regulaatori skeem

Katla koormuse järsul muutumisel põhjustab auru rõhu muutus hetkel t_0 põlemisregulaatori kaudu ka kolde koormuse muutuse (joon. 8-4).

Vee nivoo hakkab tõusma. Auru kulust saadud impulsi tõttu suurendab regulaator vee juurdevoolu ning kõrvaldab ebavõrdsuse auru kulu ja vee kulu vahel, vaatamata sellele, et nivoo tõusis. Vee juurdevoolu suurenemisest tekib ka impulss vee kulust. Het-



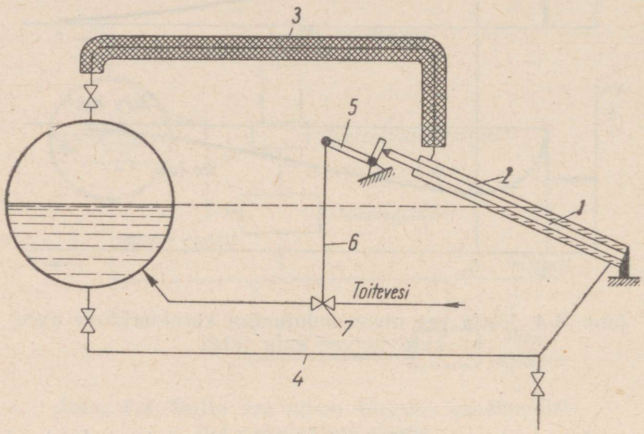
Joon. 8-4. Katla vee nivoo muutumise karakterkõver auru kulu ja vee kulu järgi

kel, mil need kulud on võrdsed, kaovad need impulsid ning edasi töötab regulaator nagu üheimpulsiline, s. o. nivoo kõrguse järgi. Veepinna puhetise tagajärjel vähendab regulaator vee juurdevoolu. Hetkel t_1 hakkab nivoo langema. Mida rohkem ta alaneb, seda rohkem avatakse reguleerimisventiil ja seda rohkem väheneb ka nivoo langemise kiirus, lähenedes ideaalse regulaatori puhul asümptootiliselt nullile.

Kolmeimpulsilisel regulaatoril on reguleerimisprotsess palju rahulikum kui üheimpulsilisel, sest siin ei saa tekkida suurt vahet auru kulu ja vee kulu vahel. Koormuse järsul muutumisel on nivoo maksimaalne muutus palju väiksem kui üheimpulsilisel, sest tema tajurid reageerivad kõigile nivoo muutusi põhjustavaile häiringuile, nagu auru kulule, vee kulule ning nivoo kõrgusele, kusjuures auru kulu muutus mõjub kaudselt ka kolde koormusele. Häiringud, mis tekivad auru ja vee kulu ebavõrdsusest, likvideeritakse regulaatori poolt veel enne, kui nad jõuavad tunduvalt mõjutada nivoo muutust.

Kaudse toimega elastse tagasisidega üheimpulsilisel regulaatoril puudub staatiline karakteristik ning ka sellega seoses olevad puudused nivoo reguleerimisel, kuid kas tuleb eelistada kolmeimpulsilist või elastse tagasisidega üheimpulsilist regulaatorit, pole veel täiesti selge. Praktikas kasutatakse siiski suuremate, väiksema veemahuga katelde toiteregulaatoreina kahe- või kolmeimpulsilisi nivooregulaatoreid, väiksemate katelde puhul aga üheimpulsilisi elastse tagasisidega nivooregulaatoreid. Väikese võimsusega vana tüüpi kateldel kasutatakse toiteregulaatoreina ühe- või kaheimpulsilisi termostaattoruga otsese toimega regulaatoreid (joon.

8-5), väiksematel uuematel kateldel ЦКТИ- ja АРП-tüüpi elektromehaanilisi ning mitut liiki pneumaatilisi ja joatüüpi hüdraulilisi regulaatoreid, suurema võimsusega veetoru- ja otsevoolukatelde reguleerimisel aga ВТИ-tüüpi elektronregulaatoreid.



Joon. 8-5. Üheimpulsilise otsese toimega dilatomeetrilise nivooregulaatori skeem

Joonisel 8-5 kujutatud nivooregulaatori põhiosaks on ca 2 m pikkune ja 19 mm jämedune toru *1*, mille alumine ots on jäigalt kinnitatud aluse külge, ülemine ots aga võib oma asendit muuta. See toru on asetatud torusse *2*, mille ülemine ots on ühendatud toruga *3* katla trumli aururuumiga, alumine ots aga toruga *4* katla trumli veeruumiga. Et aur torus *3* vähem jahtuks, siis selleks on ta hoolikalt isoleeritud. Torus *4* oleval veel peab aga olema küllaldane võimalus jahtumiseks, ning sellepärast ta pole isoleeritud. Mõnikord teda isegi jahutatakse. Toru *1* ülemise otsa liikumine antakse kangi *5* ja varda *6* abil reguleerimisventiilile *7*.

Katla normaalsel töötamisel on vee nivoo katla trumlis ja torus *2* ühesugusel kõrgusel. Toru *2* alumine ots on täidetud suhteliselt külma veega, ülemine ots aga küllastunud auruga. Aur, kondenseerudes vee pinnal, kuumutab teda, kuid vee halva soojusjuhtimise ning toru hea soojusjuhtimise tõttu mitte väga sügavalt. Termostaattoru *1* pikkus sõltub üheselt tema temperatuurist, see aga vee nivoo kõrgusest torus *2*.

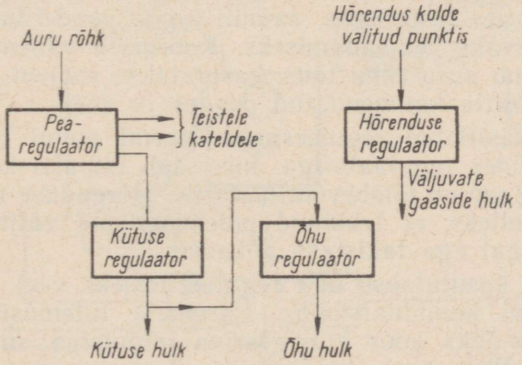
Põlemisprotsessi automaatreguleerimine peab tagama esiteks soojuslikku tasakaalu katlast auruna võetava soojushulga ja koldest kütuse põlemise tagajärjel tekkinud soojushulga vahel ja teiseks põlemisprotsessi ökonoomsust. Ebavõrdsust soojushulkade vahel iseloomustab auru rõhu ja temperatuuri muutus katlas, põle-

misprotsessi ökonoomsust aga süsihappegaasi ja vaba hapniku sisaldus väljuvates heitgaasides.

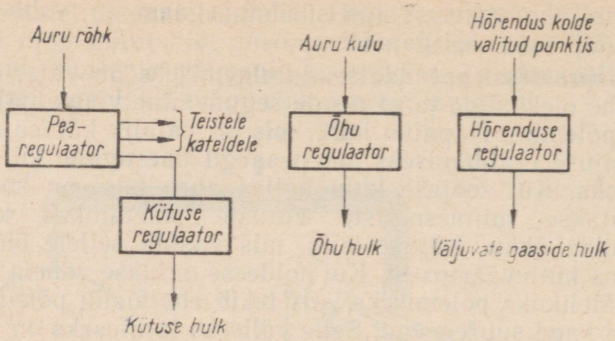
Põlemisprotsessi optimaalseks kulgemiseks on vaja, et kütuse ja õhu suhe oleks õige ja et nende segunemine võimaldaks kütuse täielikku põlemist. Hapniku hulk, mis on vajalik kütuse põlemisel 1 kcal soojuse eraldamiseks, on peaaegu ühesugune kütuse kõigi liikide jaoks. Kui soojuse kulu katlas auru näol on konstantne, siis vajatakse mitmesuguste kütuste põletamisel ka konstantset hulka õhku. Kütuse kulu, mis vastab sellele õhu kulule, sõltub tema küttevääruusest. Kui koldesse antakse vähem õhku, kui on vaja täielikuks põlemiseks, siis tekib ebatäielik põlemine ning keemilised kaod suurenevad. Selle väliseks tunnuseks on korstnast väljuv must suits. Kui aga õhku anda liiga palju, siis suureneb asjatult põlemissaaduste hulk, seega ka soojuskaod heitgaasidega. Temperatuuri langemise tõttu tekib pealegi veel ebatäielik põlemine, seega jällegi keemiliste kadude suurenemine. Optimaalne liigõhutegur α, s. o. suhe tegeliku õhukulu ja täielikuks põlemiseks vajaliku teoreetilise õhuhulga vahel sõltub kütuseliigist ja kütuse põletamise viisist. Gaasi- ja õlikütetega kateldel $\alpha \approx 1{,}05 \ldots 1{,}1$, tahkekütuse põletamisel restidel aga $\alpha \approx 1{,}4 \ldots 1{,}6$ ja enamgi.

Auru kulu muutusest tingitud auru rõhu muutus peab kajastuma kütuseregulaatori töös. Auru rõhu langemisel tuleb koldesse antava kütuse hulka suurendada ja vastupidi. Kohe tuleb ka vastavalt muuta õhu hulka.

Ülaltoodu põhjal võib õhuhulga ja kütusest põlemisega eraldatud soojushulga suhte kohta teha järelduse, et katlaautomaatikas on võimalik reguleerida kütust ja õhku kahel viisil: skeemi järgi «kütus-õhk» (joon. 8-6), kus rõhu muutusest tingituna muutub kütuse kulu ning õhku reguleeritakse vastavalt kütuse kulule, või skeemi järgi «aur-õhk» (joon. 8-7), kus auru kulust tingituna muutub õhu kulu, kütust aga reguleeritakse auru rõhu järgi.



Joon. 8-6. Põlemisprotsessi reguleerimine süsteemi «kütus-õhk» korral



Joon. 8-7. Põlemisprotsessi reguleerimine süsteemi «aur-õhk» korral

Esimese skeemi järgi võib nii kütust kui ka õhku reguleerida sõltuvalt auru rõhust katlas. Kuid seda skeemi saab kasutada siis, kui neid kulusid on võimalik küllalt täpselt mõõta, s. o. gaasilise ja õlikütte puhul. Tahkekütuse kulu mõõtmiseks puuduvad seni küllalt usaldusväärsed meetodid. Peale selle ei võeta antud skeemi puhul arvesse kütuse küttevääruse muutust, sest ka selle mõõtmiseks puuduvad mõõteriistad. Siit järeldub, et selle skeemi kasutamine võib tulla kõne alla ainult konstantse kalorsusega gaasi ja õli põletamisel. Kui varem seda skeemi kasutati ka tolmküttega katelde põlemisprotsessi reguleerimisel, siis viimasel ajal on sellest loobutud.

Teise skeemi järgi on õhu ja kütuse reguleerimine õige ainult katla statsionaarsel olekul (koormus, s. t. auru kulu on konstantne), sest ainult siis kajastab auru kulu katla soojuse kulu. Siirdeperioodil, pärast soojusliku tasakaalu rikkumist, ei vasta aga auru kulu enam soojuse kulule. Nii kulutatakse koormuse suurenemisel, millega kaasub auru rõhu langus, osa soojust katla vee soojusmahtuvuse tõstmiseks, samuti kolde vooderduse ning karkassi täiendavaks soojendamiseks. Koormuse vähendamisel aga, millega kaasub auru rõhu tõus, kasutatakse soojust, mis on akumuleerunud katla kuumendatud osades ja vees.

Mõlema käsitletud reguleerimissüsteemi puhul reguleeritakse hõrendust koldes regulaatoriga, mis saab impulsi koldes valitud punktist ning mõjub tõmbeventilaatorile. Hõrenduse reguleerimine on vajalik selleks, et tekkinud põlemisgaasid väljuksid koldest vajalikul hulgal ega takistaks põlemist.

Praktikas kasutatakse õhu reguleerimiseks veel ka eeltoodud kahe süsteemi kombinatsioone. Paremaid tulemusi on andnud skeem «kütus-õhk» koos korrigeeriva impulsiga auru kulust ja skeem «aur-õhk» koos korrigeeriva kaduva impulsiga kütuse kulust.

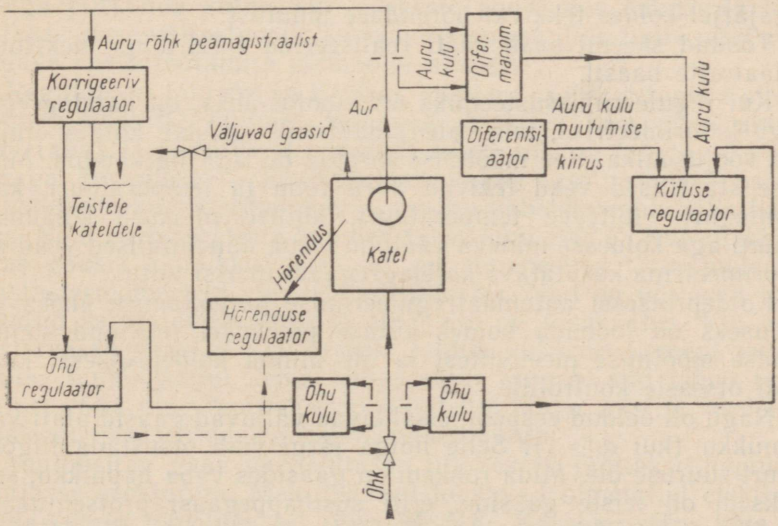
Süsteemis «kütus-õhk» mõjub korrektor õhuregulaatori seadu-

rile. Regulaatori töö stabiilsuse tõstmiseks lastakse auru kulust saadavat impulssi aeglaselt mõjuda ja siirdeperioodil toimub reguleerimine süsteemi järgi «kütus-õhk». Õhu tegeliku kulu kõrvalekaldumist tema optimaalsest kulust kütuse küttevääruse või kütuse sisseandmismehhanismi karakteristiku muutumisel parandatakse korrektoriga, mis saab impulsi auru kulust.

Süsteemis «aur-õhk» koos kaduva impulsiga kütuse kulust omab see impulss tekkimise (s. t. kütuseregulaatori asendimuutuse) hetkel maksimaalset väärtust, siis aga ta mõju väheneb ning lõpuks kaob, s. t. ta mõjub ainult dünaamiliselt, mitte staatiliselt. Kütuse kulust tuleva impulsi mõjumise aeg valitakse nii, et see impulss siirdeprotsessi lõpuks oleks kadunud ning õhu kulule mõjuks ainult impulss auru kulust. Nii on õhu kulu tasakaaluolekus võrdeline auru kuluga, siirdeprotsessi ajal aga kütuse kuluga.

Kütuseregulaator ja hõrendusregulaator on samad, mis eelmistel süsteemidelgi. Kui katlad töötavad ühisel aurumagistraalil ning süsteemis on pearõhuregulaator, siis muutub katla sisemiste häiringute puhul (mõnede šahtveskite või põletite seismajäämine, kütuse kvaliteedi muutumine jne.) mitte ainult liigõhutegur, vaid ka selle katla aurutootlikkus ja auru rõhk peamagistraalis. Kuid rõhu muutusele auru peamagistraalis reageerib pearegulaator, mis annab vastavalt signaali kõigile samal magistraalil töötavatele kateldele. Seega rikutakse kõigi katelde statsionaarset režiimi, see aga, nagu teada, halvendab katelde töötamise ökonoomsust ning suurendab katla mehhanismide kulumist.

Seepärast on kasulikum valida niisugune reguleerimissüsteem, mis juhul, kui ühel katlal tekib sisemine häiring, mõjub selle katla



Joon. 8-8. Põlemisprotsessi reguleerimine süsteemi «soojus-õhk» korral

kütuse ja õhu reguleerimisorganeile, taastades katla selle koormuse, mille talle ette andis pearegulaator, sealjuures mitte mõjutades teiste katelde tööd. See taastamine peab toimuma niivõrd kiiresti, et veel ei jõuaks tekkida auru rõhu muutus auru peamagistraalis turbiinide ees. Praktiliselt see peaks toimuma mõnekümne sekundi jooksul.

Süsteem «soojus-õhk» töötab selle põhimõtte järgi ning on praktikas andnud häid tulemusi (joon. 8-8).

Korrigeeriv pearegulaator saab impulsi auru rõhust peamagistraalis. Sellest regulaatorist saadetakse impulss kõigi automatiseeritud katelde õhuregulaatoritesse, mis saavad teise tagasiimpulsi õhu kulust. Korrigeeriv regulaator määrab seega kõigile kateldele õhu kulu vastavalt jaama koormusele, õhuregulaatorid hoiavad aga selle kulu seni konstantseina, kuni ei tule vastavat impulssi korrigeerivalt regulaatorilt. Kütuseregulaator saab impulsid auru kulust, õhu kulust ja auru rõhu muutumise kiirusest katla trumlis. Antud katlasse mineva soojushulga muutus, mis sõltub kütuse hulga muutusest, peegeldub kõigepealt selle katla aururõhu muutuses, kus rõhu muutumise kiirus on seda suurem, mida suurem oli sisemine häiring kütuse kulu muutumisest. Katla koormusest (auru kulust) ja rõhu muutumise kiirusest saadud impulsside summa iseloomustab sellest katlast väljuvat soojushulka. Sisemise häiringu tekkimisel tasakaalustab antud katla kütuseregulaator vajaliku soojuse kulu katlast, kusjuures teiste katelde koormus ei muutu. Hõrendusregulaator saab peale tavalise impulsi veel kiirusliku impulsi õhuregulaatorist (punktiirjoon), mille tõttu hõrendusregulaator saab sõltuvalt õhuregulaatori töötamisest impulsi juba varem, ära ootamata õhuhulga muutuse tagajärjel koldes tekkivat hõrenduse muutust.

Toodud skeemi saab hästi realiseerida ВТИ-tüüpi elektronregulaatorite baasil.

Kui reguleerimissüsteemiks on «soojus-õhk», on katelagregaat nagu kalorimeetriks, mis vahetpidamatult mõõdab koldes eraldunud soojushulka. See mõõtmise meetod on aga ligikaudne. Mõõtmise staatilised vead tekivad auru rõhu ja temperatuuri, katla kasuteguri, toitevee temperatuuri, kütuse niiskuse kõikumise, samuti aga koldesse mineva väärõhu tõttu, dünaamilised vead aga kalorimeetrina kasutatava katelagregaadi inertsi tõttu.

Koldeprotsessi automaatreguleerimise parendamise üheks võimaluseks on loobuda koldes kütuse põlemisel tekkinud soojuse kaudse mõõtmise meetoditest ja üle minna koldeprotsessi kvaliteedi otsesele kontrollile.

Nagu oli öeldud eespool, sisaldavad väljuvad gaasid alati vaba hapnikku (kui $\alpha > 1$). Selle hulga järgi võib otsustada liigõhuteguri suuruse üle. Mida rohkem on gaasides vaba hapnikku, seda väiksem on teiste gaaside, eriti süsihappegaasi protsentuaalne sisaldus väljuvates gaasides. Kui teame väljuvate gaaside CO_2- või O_2-sisaldust, siis võime selle järgi otsustada, kas koldesse

läheb õhku parajal määral. Kütuse täielikul põlemisel puuduvad väljuvates gaasides põlevad gaasilised komponendid (CO, H_2, CH_4 jne.) ning nad sisaldavad ainult põlemisprodukte ja vaba hapnikku. Kui näiteks kivisöe, antratsiidi jms. kütuse põlemisel võib põlemisgaaside CO_2-sisalduse kaudu otsustada põlemisprotsessi kulgemise üle, siis mitme kütuse korraga põletamisel ja ka põlevkivi põletamisel pole see vastuvõetav. Põlevkivi põlemisel tekib CO_2 mitte ainult põlemisel, vaid ka tema mittepõlevas osas sisalduvate karbonaatide (paekivi) lagunemisel kustutamata lubjaks ja süsihappegaasiks.

Seepärast tuleb põlevkivi põletamisel õigemaks lugeda reguleerimist väljuvate gaaside vaba hapniku sisalduse järgi, mis on praktiliselt üheselt sõltuv liigõhutegurist. Sel puhul tekkinud vead põlemisprotsessi kvaliteedi hindamisel on kümneid kordi väiksemad kui kontrollimisel CO_2 järgi. Tegelikult on siiski vead põlemisprotsessi hindamisel O_2 järgi olemas, sest liigõhu optimaalne suurus ise sõltub reast asjaoludest, nagu kütuse ja õhu segunemise astmest koldes, katla koormusest jm. Erilist tähelepanu tuleb põlemisprotsessi õigele organiseerimisele juhtida mitme kütuse samaaegse põletamise puhul. Ühe kütuse põletamine aga ei too endaga kaasa märgatavaid vigu, välja arvatud ainult sel lühikesel ajavahemikul, kui toimub kütusehulga järsk muutus, küttepindade ülepuhumine jms. Väljuvates gaasides sisalduva vaba hapniku hulka mõõdetakse magnetilise hapnikumõõtja abil, mille tegevus põhineb hapniku paramagnetiliste omaduste kasutamisel. Temperatuuri tõusmisel hapniku magnetiline vastuvõtlikkus väheneb. Kui kuumutada gaasi, mis sisaldab hapnikku ja on ebaühtlases magnetväljas, siis tõugatakse kuumutatud magnetvälja väiksema tugevusega piirkonda külmemate osakeste poolt, mis omakorda tõmmatakse sisse väljastpoolt. Tekkinud «magnetiline tuul» ongi vaadeldava riista töötamise põhimõtte aluseks.

Regulaatori tajuriks on kamber, kuhu on asetatud tugeva püsivmagneti pooluste kingad. Mõlemad poolused koosnevad aktiivsest (raud) ja passiivsest (pronks) osast, mis on lahutatud vaheseinaga. Mõlemasse — nii aktiivsesse kui ka passiivsesse — osasse on pandud takistustermomeetrid, mis on vahelduvvoolu silla harudeks. Neid termomeetreid kuumutatakse kuni 200° C. Kui analüüsitavas gaasis hapnikku pole, siis on sümmeetria tõttu mõlemad takistustermomeetrid võrdseis tingimustes. Nad on ühtlaselt kuumutatud sama temperatuurini ning sild on tasakaalus. Kui analüüsitavasse gaasi ilmub hapnik, jahtub aktiivne element «magnetilise tuule» mõjul, tema temperatuur langeb, sild läheb tasakaalust välja ning tema diagonaalis tekib pinge, mis on võrdeline gaasisegu protsentuaalse hapnikusisaldusega.

Analüüsitav gaas puhastatakse filtrites ja juhitakse hapnikumõõtjasse ežektoriga. Meie tehased toodavad nimetatud elektronregulaatoreid nimetuse all tüüp ЭР-МК. Karakteristiku tõus on gaasisegu hapnikusisalduse muutuse piirides 0-st kuni 21%-ni

suurem kui 15 mV, kui O_2-sisalduse muutus mahu järgi on 1%. Summaarne hilinemine on 1,0 ... 1,5 sek. impulstoru ühe meetri kohta. Ajakonstant on 10 ... 20 sek.

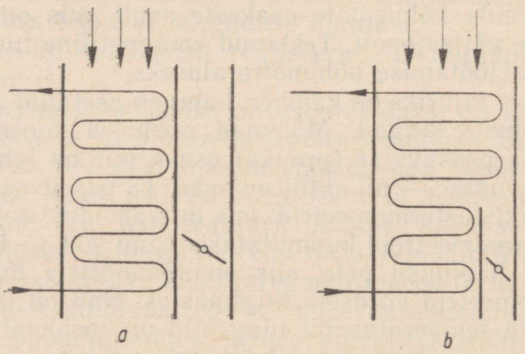
Üheks aurukatla reguleerimise viisiks võib olla ka tema reguleerimine ekstreemregulaatori abil maksimaalse kasuteguri järgi, nagu juba eespool mainitud.

Ülekuumendatud auru temperatuuri reguleerimine on vajalik nii turbiini ohutu töö kui ka talle vajaliku nominaalvõimsuse (adiabaatilise soojuslanguse konstantsuse) tagamiseks. Auru temperatuur kõigub nii sõltuvalt koormuse muutumisest kui ka teistest põhjustest, näiteks küttepindade šlakkumisest, liigõhutegurist, kütuse kütteväärtuse muutumisest jne.

Tavaliselt toimub ülekuumenduse reguleerimine auru jahutamisega pind-aurujahutis või vee pritsimisega aurusse.

Auru temperatuuri võib reguleerida ka auruülekuumendit ümbritsevate gaaside hulga või temperatuuri muutmise teel. Konstruktiivsed raskused, mis on seotud gaasijoa auruülekuumendist kõrvalejuhtimisega (eriti materjalide puuduse tõttu, mis võiksid pidevalt töötada üle 1000°-ses kuumuses), samuti aga gaaside temperatuuri reguleerimisega, takistavad selle meetodi laialdast kasutamist meie elektrijaamades, kuigi see meetod on auru temperatuuri reguleerimiseks palju kasulikum kui eelmine. Kasutatakse ka palju vähem efektiivset reguleerimisskeemi, milles gaasisiibrid kas pannakse madala temperatuuri tsooni või, kui siibrid on kõrge temperatuuriga tsoonis, jahutatakse neid õhuga.

Parimaid tulemusi annab katla gaasikäigu konstruktsioon, kus osa gaasikäigust on täidetud auruülekuumendi torudega, osa aga on ainult gaaside möödalaskmiseks ülekuumendist (joon. 8-9).



Joon. 8-9. Auru temperatuuri reguleerimine gaasijoa täieliku (*a*) ja osalise (*b*) möödalaskmisega ülekuumendist

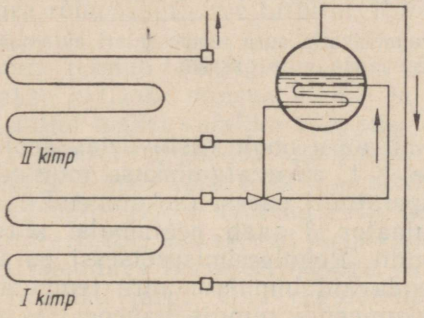
Auru temperatuuri reguleerimine gaaside temperatuuri muutmisega toimub kas abipõletitega, mis asuvad kolde ülemises osas, või leegi asendi muutmisega koldes. Viimasel juhul asetatakse

põletid kas ridade viisi rõduna, kasutatakse pööratavaid põleteid või muudetakse põlemisrežiimi liigõhutegurit. Samuti reguleeritakse auru temperatuuri primaar- ja sekundaarõhu suhete muutmisega. Kõik need ülekuumendatud auru temperatuuri reguleerimise abinõud pole küllalt ökonoomsed, välja arvatud pöörlevad põletid, mis võimaldavad muuta primaar- ja sekundaarõhu põletist väljumise suunda, seega ka leegi suunda ning juhtida aurutülekuumendile rohkem või vähem soojust.

Vee sissepritsimine aurusse selle temperatuuri reguleerimiseks toimub kas pärast täielikku või osalist ülekuumendamist. Selleks et auruga kokkupuutumisel veepiiskade pind oleks võimalikult suur, pihustatakse vesi sissepritsimisel ning auru temperatuuri reguleeritakse sissepritsitava veehulga muutmise teel.

Pind-aurujahutid võivad olla asetatud kas aurutrumlisse või väljapoole seda.

Trumlisisesed aurujahutid (joon. 8-10) on meie katlatööstuses väga laialt levinud.

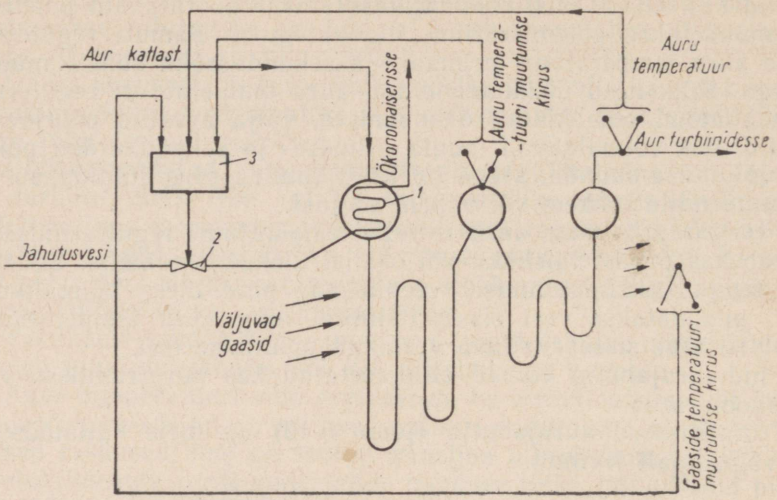


Joon. 8-10. Trumlisisese aurujahuti põhimõtteskeem

Osa ülekuumendatud aurust juhitakse aurujahutisse, kus aur annab oma soojuse ära katlaveele. Ülejäänud osa aurust läheb otse auru peamagistraali, kus mõlemad aurujoad segunevad. Auru temperatuuri reguleerimine toimub aurujahutisse mineva auru hulga muutmise teel.

Trumlisisese aurujahuti laia levikut soodustab asjaolu, et puudub täiendav aurujahuti korpus, mis on olemas väljaspoolsel aurujahutil. Kuid nende kasutamist piirab katla aurutrumli piiratud suurus.

Joonisel 8-11 on toodud niiske auru poolele pandud pindaurujahutiga ülekuumendatud auru temperatuuri automaatreguleerimise skeem. Niiske aur tuleb katlast ülekuumendatud auru trumlisse *1*, kus on ka aurujahuti torud. Jahutusvesi, läbinud reguleerimisklapi *2* ja aurujahuti, läheb katla ökonomaiserisse. Ülekuumendist väljuva auru temperatuur sõltub ta algniiskusest, sest



Joon. 8-11. Trummelkatla auru temperatuuri automaatreguleerimise skeem

konstantsel režiimil auru poolt vastuvõetav soojushulk ei muutu. Jahutusvee hulga, s. t. auru algniiskuse muutmisega võib reguleerida auru temperatuuri pärast ülekuumendit.

Automaatregulaator *3* saab peaimpulsi auru temperatuurist pärast ülekuumendit. Reguleerimisprotsessi parendamiseks kasutatakse veel täiendavaid impulsse auru temperatuuri muutumise kiirusest auruülekuumendi mingis vahepealses punktis ja auruülekuumendist väljuvate gaaside temperatuuri muutumise kiirusest.

Auru temperatuuri automaatreguleerimise skeem, kus auru temperatuuri reguleeritakse vee sissepritsimisega aurusse, on analoogiline ülaltooduga, ainult selle vahega, et sel juhul muudab regulaator sissepritsitava vee hulka.

Otsevoolukatelde ülekuumendatud auru temperatuuri reguleeritakse mitmeimpulsiliste elektronregulaatoritega, kus impulsid võetakse nii auru kui ka gaaside temperatuuridest.

Katla ja turbiini bloki automaatne reguleerimine. Blokksüsteemiks nimetatakse agregaati, mis koosneb turbiinist koos generaatoriga ja seda turbiini auruga toitvast katlast või kateldest. Katelde omavaheline sidestus ühise aurumagistraali ja toiteveemagistraali näol puudub. Blokksüsteemi soojusliku skeemi üheks iseloomustavaks jooneks on veel auru vahepealne kuumendamine gaasidega ja tugevasti väljaarendatud regeneratiivne toitevee eelsoojendamine. Kaasaegseis blokksüsteemides kasutatakse kuni kaheksat eelsoojenduse astet, kusjuures toiteveetrakti lõpus on eelsoojenduse aste võrdlemisi kõrge.

Blokis töötava katla põlemisprotsessi automaatreguleerimis-

süsteemi valik sõltub katla tüübist. Üldiselt ei erine see aga loomuliku veeringlusega trummelkatelde põlemisprotsessi automaatreguleerimissüsteemist.

Põhiimpulsiks võetakse auru rõhk aurumagistraalis. Enamikus blokksüsteemides hoitakse auru rõhk enne turbiini konstantne; rõhu muutusega muudetakse vajalikus suunas kütuse hulka. Mõnedes blokksüsteemides kasutatakse peale impulsi auru rõhust veel impulssi auru kulust. Viimasel ajal aga kaldutakse võtma põhiliseks impulsiks mitte auru rõhku, vaid elektrigeneraatori aktiivvõimsust. Loetakse, et generaatori koormus määrab üheselt katla tootlikkuse ja on seega täiesti vastuvõetav reguleerimiseks. Sealjuures on tehtud veel ettepanek liita katla ja turbiini automaatreguleerimissüsteemid kokku ühtseks katla ja turbiini bloki automaatreguleerimissüsteemiks.

Kokkuvõetult võib öelda, et katla ja turbiini bloki reguleerimiseks võib kasutada kaht meetodit.

1. Turbiini regulaator hoiab turbiini võimsuse püsivalt vastavuses elektrigeneraatori võimsusega. Katelagregaadi tootlikkust reguleeritakse auru rõhu järgi enne turbiini. Katla võimsus järgib turbiini võimsust.

2. Reguleerimine toimub elektrigeneraatori võimsuse järgi. Sel puhul reguleeritakse katlasse mineva kütuse ja õhu hulka sõltuvalt generaatori antud hetkel vajaliku võimsuse ja tegeliku võimsuse erinevusest. Turbiini regulaator aga määrab turbiinile niisuguse koormuse, mille juures auru rõhk magistraalis enne turbiini on konstantne. Sel juhul järgib turbiini võimsus katla võimsust.

Õhu hulka reguleeritakse kas skeemi järgi «aur-õhk» või skeemi järgi «kütus-õhk» täiendava korrigeerimisega väljuvates gaasides sisalduva vaba hapniku järgi. Õhu reguleerimist skeemi järgi «aur-õhk» kasutatakse tolmuküttega katelde puhul, kus kütuse kulu mõõtmine on raskendatud, skeemi «kütus-õhk» aga gaasiküttega katelde puhul.

Tõmbe reguleerimine on tavaline, hõrenduse järgi kolde valitud kohas.

Blokis töötava trummelkatla toite automaatreguleerimissüsteem baseerub tavaliselt kolmeimpulsilistel regulaatoritel (impulsid vee nivoost, auru kulust ja vee kulust), otsevoolukateldel aga kaheimpulsilistel regulaatoritel (impulsid auru kulust — põhiline impulss — ja auru temperatuurist — korrigeeriv impulss). Toitepumpade tootlikkuse ja staatilise rõhu reguleerimiseks kasutatakse laialdaselt hüdromuhve, kusjuures sel puhul muid täiendavaid reguleerimisventiile toiteliinidele ei asetata. Kui aga toitepumpadel on ajamid, millede pöörlemiskiirus pole reguleeritav, siis kasutatakse reguleerimisventiile ja nendel ventiilidel püsiva rõhu hoidmiseks eraldi regulaatorit.

Auru temperatuuri reguleerimiseks kasutatakse sissepritsimist, gaaside taasringlust, pöörlevaid põleteid, gaasi ülekuumendist möödajuhtimist ja nende mitmesuguseid kombinatsioone. Pindjahuta-

jatega auruülekuumendeid ei kasutata üldse. Auru temperatuuri regulaator on kolmeimpulsiline: impulsid võetakse katla koormusest, auru temperatuurist ja auru temperatuuri muutumise kiirusest.

Suurtes katla ja turbiini blokkides kasutatakse auru teistkordset, mõnikord aga isegi kolmekordset ülekuumendamist. Ka siin reguleeritakse auru temperatuuri sissepritsimisega, gaaside taasringlusega ja nende kombinatsioonidega, kusjuures viimasel juhul on sissepritsimine ka kaitseseadmeks sekundaarsele auruülekuumendile tema torude sissepõlemise vältimiseks katla ebanormaalse töötamise puhul.

Sekundaarsest auruülekuumendist väljuva auru temperatuuri regulaator on üheimpulsiline (impulss ainult auru temperatuurist).

Blokksüsteemi optimaalseks reguleerimisviisiks on sidestatud poolautonoomne reguleerimine. Auru kulust või auru rõhu muutumise kiirusest enne turbiini saadud täiendavate impulsside kasutamine võimaldab dünaamilisest seisukohast saavutada sidestamata reguleerimisskeemiga ekvivalentse skeemi. Sel juhul on blokkatelagregaadi ratsionaalseks reguleerimisviisiks isodroomne reguleerimine, kusjuures kasutatakse täiendavat impulssi auru kulust või auru rõhu muutumise kiirusest enne turbiini.

Katla juhtpuldil on riistad reguleeritavate parameetrite mõõtmiseks, ümberlülitid, signaaliseadmed jne. Tähtsaimate parameetrite kõrvalekaldumisest antakse teada nn. mnemoonilisel skeemil vilkuvate tuledega ja tugeva akustilise signaaliga. Nende parameetrite kõrvalekaldumisest aga, mis ei nõua operaatori silmapilkset vahelesegamist, antakse teada mittevilkuvate tuledega ja nõrga akustilise signaaliga.

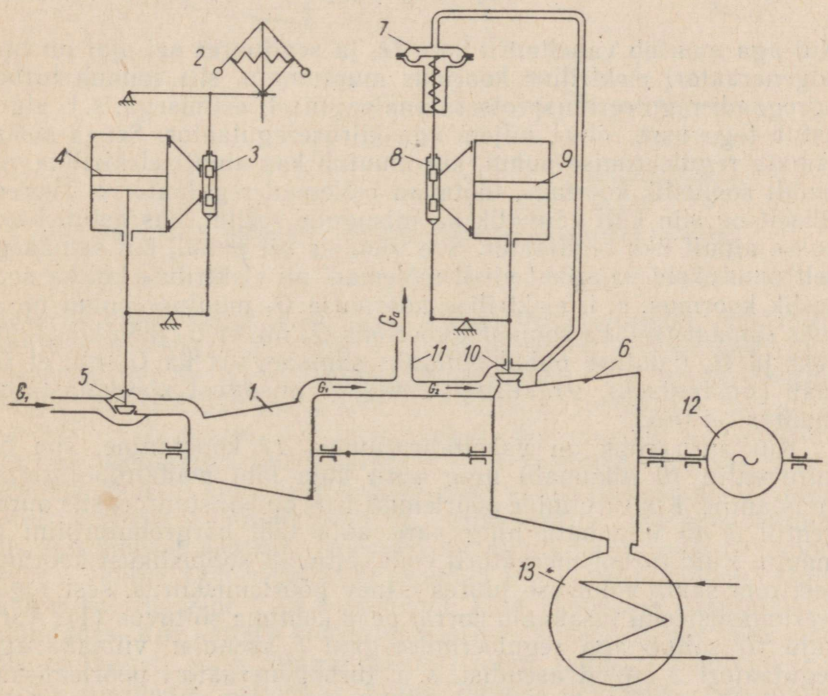
2. Auruturbiinide automaatreguleerimine

Auruturbiini võimsus sõltub peamiselt ajaühikus turbiini läbivast auruhulgast ja auru adiabaatilisest soojuslangust turbiinis. Auruhulga muutus toimub ventiili (ventiilide grupi) avamisastme, s. t. auru sisenemiskanali ristlõike pinna muutmisega, adiabaatilise soojuslangu aga tingib värske auru algparameetrid ja vasturõhk.

Turbiini reguleerimissüsteemi valik sõltub turbiini töörežiimist, s. t. sellest, kas ta on määratud ainult elektrienergia tootmiseks, või nii elektrienergia tootmiseks kui ka soojusenergia väljastamiseks. Esimesel juhul kasutatakse nn. kondensatsioonturbiine, kus värske auru kogu adiabaatiline soojuslang kuni vaakuumini kondensaatoris muundatakse elektrienergiaks, teisel juhul aga kas vaheltauruvõtmisega kondensatsiooniturbiine (vaheltauruturbiine) või halvendatud vaakuumiga turbiine (vasturõhuturbiine). Vaheltauruturbiinis lastakse algul värskel aurul paisuda mingi rõhuni ja siis võetakse osa aurust kas tööstuse vajaduseks (nahatööstus, paberitööstus, toiduainetetööstus jm.), ruumide kütteks või katla toitevee ettevalmistamiseks ja eelsoojendamiseks.

Turbiini koos elektrigeneraatoriga nimetatakse turboagregaadiks. Kondensatsioonturboagregaadi reguleerimissüsteemi ülesandeks on hoida turbiini pöörlemiskiirus peaaegu konstantsena (lubatud statism on 2 . . . 4%). Selleks kasutatakse tavaliselt kaudse toimega tsentrifugaalregulaatorit. Vaatamata isodroomse reguleerimissüsteemi suurtele paremustele kasutatakse teda auruturbiinide reguleerimisel harva. Vasturõhu- ja vaheltauruturbiini reguleerimissüsteem aga peab tagama nii turbiinide pöörlemiskiiruse (vajaliku statismiga) kui ka tarbijale mineva auru rõhu konstantsuse turboagregaadi igasuguste elektriliste ja soojuslike koormuste puhul, kusjuures need koormuste muutused võivad toimuda sõltumatult üksteisest.

Allpool vaatleme turboagregaadi automaatset reguleerimist, kus reguleeritavateks suurusteks on ühel ja samal võllil töötava kahekorpuselise turbogeneraatori pöörlemiskiirus ja auru rõhk kõrgrõhu- ja madalrõhuturbiinide vahel (s. t. auru rõhk enne madalrõhuturbiini). Siinjuures eeldame, et värske auru parameetrid (rõhk ja temperatuur) on konstantsed, sest katlad on tavaliselt varustatud vastavate automaatregulaatoritega. Turboagregaadil peab olema sel puhul ka kaks auruhulga reguleerimisorganit, üks kõrgrõhu- ja teine madalrõhuturbiini ees, kusjuures kõrgrõhuturbiini minevat auruhulka reguleerib pöörlemiskiiruse regulaator,



Joon. 8-12. Sidestamata automaatreguleerimissüsteemi skeem

madalrõhuturbiini minevat auruhulka rõhuregulaator. Pöörlemiskiiruse ja rõhu reguleerimine võib toimuda kas erinevate regulaatorite poolt iseseisvalt või nii, et neid reguleeritakse nimetatud regulaatorite poolt koos. Viimast olukorda saavutatakse mõlema regulaatori omavahelise kinemaatilise sidestusega. Esimesel juhul on tegemist sidestamata, teisel juhul sidestatud reguleerimissüsteemiga.

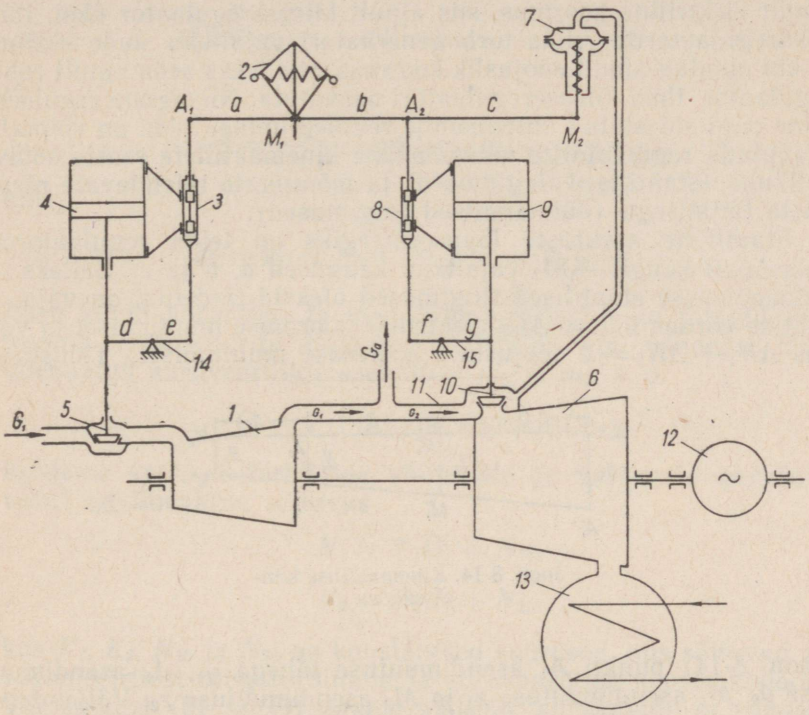
Sidestamata reguleerimissüsteemis (joon. 8-12) generaatori *12* elektrilise koormuse suurenemisel, millega kaasub tema pöörlemiskiiruse vähenemine, langeb kiiruseregulaatori *2* muhv allapoole, kolvipaar *3* ning regulaatori täituri kolb *4* koos reguleerimisorganiga *5* aga tõusevad ülespoole, mistõttu auru hulk G_1 kõrgrõhuturbiini *1* suureneb. Sealjuures aga madalrõhuturbiini *6* reguleerimisorgani *10* asend ning seega ka auru hulk sellesse turbiini ei muutunud. Kui vaheltauru kulu G_a sel ajal, kui toimus elektrilise koormuse muutus, jäi muutumatuks, siis auru hulga G_1 suurenemise tõttu auru rõhk enne madalrõhuturbiini tõuseb. Selle tagajärjel tõuseb rõhk ka membraanil *7*, mille tõttu kolvipaar *8* langeb allapoole, kolb *9* koos reguleerimisorganiga *10* aga tõuseb ülespoole, suurendades seega auru kulu G_2 madalrõhuturbiini. Viimasest läheb aur edasi kondensaatorisse *13*. Auru kulude tasakaal on siis, kui

$$G_1 = G_a + G_2. \qquad (1)$$

Kui aga muutub vaheltauru kulu G_a ja sealjuures sel ajal on turbogeneraatori elektriline koormus muutumatu, siis toimub turboagregaadi reguleerimisprotsess analoogiliselt eelmisega, s. t. algul astub tegevusse rõhu-, hiljem aga kiiruseregulaator. Seega sidestamata reguleerimise puhul, kui muutub kas ainult elektriline või ainult soojuslik koormus, töötavad mõlemad regulaatorid. Teoreetiliselt on siin küll võimalik ka niisugune režiim, kus astub tegevusse ainult üks regulaator. See toimuks sel puhul, kui samaaegselt muutuksid vajalikul viisil mõlemad, nii elektriline kui ka soojuslik koormus, s. t. elektrilise koormuse G_1 muutuse puhul muutuks samaaegselt ka soojuslik koormus G_a nii, et G_2 jääb konstantseks ja G_a muutuse puhul muutuks samaaegselt ka G_2 nii, et G_1 jääb konstantseks. Praktiliselt muidugi niisugust kooskõlastatud muutust ei teki.

Kui auru rõhk on vaheltauruumis *11* konstantne, siis on auruventiil *10* liikumatu ning auru kulu läbi madalrõhuturbiini konstantne. Kui turbiinide pöörlemiskiirus on konstantne, siis auruventiil *5* on liikumatu ning auru kulu läbi kõrgrõhuturbiini ei muutu. Kuid turbogeneraatoril võib sõltuvalt soojuslikust koormusest olla sama võimsuse juures erinev pöörlemiskiirus, sest reguleerimissüsteemi tasakaalu korral peab kehtima sõltuvus (1). Auru kulu G_1 sõltub aga reguleerimisorgani *5* asendist, viimane aga regulaatori *2* muhvi asendist, s. o. turbogeneraatori pöörlemiskiirusest. Järelikult sidestamata reguleerimissüsteem ei taga elektri-

võrgus konstantset sagedust isegi siis, kui elektriline koormus on konstantne, ega konstantset auru rõhku vaheltauruuumis, vaatamata sellele, et soojuslik koormus on konstantne. Sidestatud reguleerimissüsteemis (joon. 8-13) tehakse kinemaatiline seos regu-



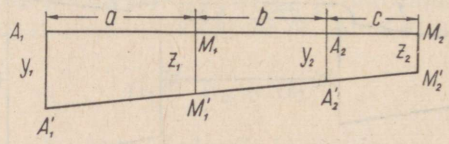
Joon. 8-13. Sidestatud automaatreguleerimissüsteemi skeem

laatorite vahel kangi A_1M_2 abil. Kui näiteks suureneb elektriline koormus $N = N_1 + N_2$, kus N — generaatori üldine elektriline koormus, N_1 ja N_2 — vastavalt kõrgrõhu- ja madalrõhuturbiinide elektrilised koormused muutumatu soojusliku koormuse $G_a = G_1 - G_2$ juures, siis kiiruseregulaator muudab samaaegselt mõlema regulaatori kolvipaaride *3* ja *8* asendeid. Kui sealjuures aga $\Delta G_1 \neq \Delta G_2$, siis muutub auru rõhk vaheltauruuumis *11* ning astub tegevusse rõhuregulaator. Analoogiline protsess toimub siis, kui muutub soojuslik koormus G_a muutumatu elektrilise koormuse N juures. Rõhuregulaator muudab samaaegselt mõlema regulaatori kolvipaaride *3* ja *8* asendeid, kuid üksteisele vastupidistes suundades. Kui näiteks soojuslik koormus suureneb, siis rõhk ruumis *11* langeb, ning rõhuregulaatori toime tagajärjel kolvipaar *8* tõuseb ülespoole, kolvipaar *3* aga langeb allapoole. Sealjuures kõrgrõhuturbiini võimsus suureneb ΔN_1 võrra, aga madalrõhutur-

biini võimsus väheneb N_2 võrra. Kui $\Delta N_1 \neq \Delta N_2$, siis turbogeneraatori üldine võimsus muutub, ta pöörlemiskiirus ka muutub ning astub tegevusse kiiruseregulaator *2*.

Sidestatud reguleerimissüsteem annab paremaid tagajärgi sel puhul, kui seosed regulaatorite vahel on valitud nii, et kui muutub ainult elektriline koormus, siis ainult kiiruseregulaator üksi, ilma rõhuregulaatorita, viiks turbogeneraatori vajalikku uude režiimi, ja kui muutub ainult soojuslik koormus, siis teeks seda ainult rõhuregulaator ilma kiiruseregulaatori osavõtuta. Niisugune reguleerimine ongi sidestatud autonoomne reguleerimine. Seda on võimalik saavutada regulaatorite omavaheliste kinemaatiliste seoste sobiva valikuga (staatilised tingimused) ja mõningate täiendavate nõudmiste täitmisega (dünaamilised tingimused).

Staatiliste arvutuste lõppeesmärgiks on leida regulaatoreid ühendaval kangil A_1M_2 vajalikud kaugused a, b ja c. Selleks et autonoomsuse staatilised tingimused oleksid täidetud, on vaja, et kehtiks võrdus $\Delta G_1 = \Delta G_2$ elektrilise koormuse muutumisel ja võrdus $\Delta N_1 + \Delta N_2 = 0$ soojusliku koormuse muutumisel. Tähistame



Joon. 8-14. Kinemaatilise kangi skeem

(joon. 8-14) punkti A_1 asendimuutuse tähega y_1, A_2 asendimuutuse y_2, M_1 asendimuutuse z_1 ja M_2 asendimuutuse z_2. Väljendame kolvipaaride asendimuutused sõltuvalt tajuvelementide *2* ja *7* asendimuutustest, eeldades, et kõik punktid A_1 ja A_2, M_1 ja M_2 liiguvad oma väikeste asendimuutuste tõttu sirgeid, mitte kaart mööda ning kangi pöördumised toimuvad punkti M_1 ümber, kui muutub rõhk, ja punkti M_2 ümber, kui muutub pöörlemiskiirus. Punktide A_1 ja A_2 asendimuutused koosnevad seega kahest osast: üks neist sõltub kiiruseregulaatori muhvi M_1 asendimuutusest, mida tähistame vastavalt y_{11} ja y_{21}, ja teine rõhuregulaatori membraani M_2 asendimuutusest, mida tähistame y_{12}-ga ja y_{22}-ga.

Vaatleme punkti A_1 summaarset asendimuutust. Kui muutub pöörlemiskiirus, pöördub kang ümber punkti M_2 ja saame:

$$\frac{y_{11}}{a+b+c} = \frac{z_1}{b+c}, \quad \text{millest} \quad y_{11} = z_1 \frac{a+b+c}{b+c}. \tag{2}$$

Rõhu muutumisel aga pöördub kang ümber punkti M_1 ning leiame:

$$\frac{y_{12}}{a} = -\frac{z_2}{b+c}, \quad \text{millest} \quad y_{12} = -z_2 \frac{a}{b+c}. \tag{3}$$

Seega

$$y_1 = y_{11} + y_{12} = z_1 \frac{a+b+c}{b+c} - z_2 \frac{a}{b+c}. \quad (4)$$

Analoogiliselt leiame punkti A_2 summaarse asendimuutuse:

$$\frac{y_{21}}{c} = \frac{z_1}{b+c}, \quad \text{millest} \quad y_{21} = z_1 \frac{c}{b+c}, \quad (5)$$

ja

$$\frac{y_{22}}{b} = \frac{z_2}{b+c}, \quad \text{millest} \quad y_{22} = z_2 \frac{b}{b+c}, \quad (6)$$

ning

$$y_2 = y_{21} + y_{22} = z_1 \frac{c}{b+c} + z_2 \frac{b}{b+c}. \quad (7)$$

Auru kulud kõrgrõhu- ja madalrõhuturbiinides on mingid funktsioonid regulaatorite täitevmehhanismide või nendega jäigalt ühendatud auruventiilide asenditest m_1 ja m_2, s. o.

$$G_1 = F_1(m_1) \quad \text{ja} \quad G_2 = F_2(m_2). \quad (8)$$

Eeldame veel, et turbiinide võimsuste ja vastavate aurukulude vahel on lineaarne sõltuvus

$$N_1 = K_1 G_1 + N_{10},$$

$$N_2 = K_2 G_2 + N_{20}, \quad (9)$$

kus K_1, K_2, N_{10} ja N_{20} on konstantsed suurused, mis sõltuvad auru parameetritest ning turbiinide ja auruventiilide konstruktsioonist. Võrrandeist (8) ja (9) saame väikeste aurukulude ja võimsuste muutuste jaoks

$$\Delta G_1 = \frac{\partial F_1}{\partial m_1} \Delta m_1, \quad \Delta G_2 = \frac{\partial F_2}{\partial m_2} \Delta m_2 \quad (10)$$

ja

$$\Delta N_1 = K_1 \Delta G_1 = K_1 \frac{\partial F_1}{\partial m_1} \Delta m_1; \quad \Delta N_2 = K_2 \Delta G_2 = K_2 \frac{\partial F_2}{\partial m_2} \Delta m_2. \quad (11)$$

Autonoomses reguleerimissüsteemis elektrilise koormuse muutumisel punkti M_2 asend ei muutu. Reguleerimisventiilide asendite muutuste vahel kehtib sel puhul suhe

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{a+b+c}{c}, \quad (12)$$

kus

$$n_1 = \frac{e}{d} \quad \text{ja} \quad n_2 = \frac{f}{g} \quad \text{(joon. 8-13)}. \quad (12a)$$

Kui tähistame tähega m_{max} täitevmehhanismi (reguleerimisorgani) maksimaalse käigu ja tähega s_{max} kolvipaari maksimaalse käigu, siis

$$n_1 = \frac{s_{1\,max}}{m_{1\,max}} \text{ ja } n_2 = \frac{s_{2\,max}}{m_{2\,max}}. \tag{13}$$

Võrrandeist (10) ja (12) saame, eeldusel et $\Delta G_1 = \Delta G_2$

$$\frac{\frac{\partial F_2}{\partial m_2}}{\frac{\partial F_1}{\partial m_1}} = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{a+b+c}{c}. \tag{14}$$

Soojusliku koormuse muutumisel pöördub kang punkti M_1 ümber ning kehtib suhe

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = -\frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{a}{b}. \tag{15}$$

Võrrandeist (11) ja (15) saame, eeldusel, et $\Delta N_1 = -\Delta N_2$

$$\frac{K_2 \frac{\partial F_2}{\partial m_2} \Delta m_2}{K_1 \frac{\partial F_1}{\partial m_1} \Delta m_1} = \frac{\Delta N_2}{\Delta N_1},$$

millest

$$\frac{\frac{\partial F_2}{\partial m_2}}{\frac{\partial F_1}{\partial m_1}} = \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{a}{b}. \tag{16}$$

Autonoomse reguleerimise puhul peavad võrrandid (14) ja (16) olema identsed. Siit saamegi autonoomsuse staatilise tingimuse:

$$\frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{a+b+c}{c} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{a}{b}, \quad \text{s. o.} \quad \frac{a+b+c}{c} \cdot \frac{b}{a} = \frac{K_1}{K_2}. \tag{17}$$

See tingimus võib olla rahuldatud ainult siis, kui on kehtiv suhte $\frac{K_1}{K_2}$ konstantsus, s. t. kui kehtivad võrrandid (11).

Konstruktiivselt on seda võimalik teha küllaltki täpselt. Kiiruse- ja rõhuregulaatorite reguleerimisorganite karakteristikute ehitamisel tuleb tingimata silmas pidada, et nii turbogeneraatori pöörlemiskiirus kui ka vaheltauru rõhk on kahe sõltumatu muutuja — elektrilise ja soojusliku koormuse — funktsioonid.

Kahe reguleeritava parameetriga autonoomse reguleerimissüs-

teemi (joon. 13) struktuurskeem on toodud joonisel 8-15. Nagu siit näha, on see mitmekontuuriline reguleerimissüsteem.

Vaatleme nüüd autonoomsuse dünaamilist tingimust. Selleks koostame reguleerimissüsteemi elementide võrrandid (vt. pt. III).

1. Rootori võrrand. Eeldame, et kõrgrõhu- ja madalrõhuturbiinide motoorsete jõudude momendid on vastavalt M_1 ja M_2 ning agregaadi takistusjõudude moment M_t.

Rootori staatika võrrand on

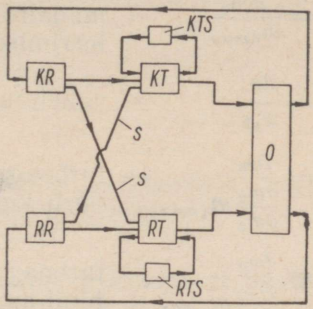
$$M_1 + M_2 - M_t = 0. \quad (18)$$

Moment M_1, eeldusel et auru algparameetrid on konstantsed, sõltub auru rõhust vaheltaururuumis p_a ja reguleerimisventiili avamisastmest m_1, s. o.

$$M_1 = M_1(p_a, m_1). \quad (19)$$

Analoogiliselt on moment M_2, eeldusel et auru rõhk kondensaatoris on konstantne, funktsioon vaheltauru rõhust ja ventiili m_2 avamisastmest, s. o.

$$M_2 = M_2(p_a, m_2). \quad (20)$$



Joon. 8-15. Kahe reguleeritava parameetriga autonoomse reguleerimissüsteemi struktuurskeem: *O* — reguleerimisobjekt (turbiinid *1* ja *6* joonisel 8-13 koos vaheltauruuumiga), *KR* — kiiruseregulaator (*2*), *RR* — rõhuregulaator (*7*), *KT* — kiiruseregulaatori teenur (*4*), *RT* — rõhuregulaatori teenur (*9*), *KTS* — kiiruseregulaatori tagasiside element (kang *14* ja kolvipaari *3* silinder), *RTS* — rõhuregulaatori tagasiside element (kang *15* ja kolvipaari *8* silinder), *S* — sidestus kiiruse- ja rõhuregulaatorite vahel (kinemaatiline kang A_1M_2)

Rootori dünaamika võrrand on momentide M_1 ja M_2 väikeste muutuste puhul ja eeldusel, et takistusjõudude moment M_t on konstantne,

$$I\frac{d\omega}{dt} = \Delta M_1 + \Delta M_2. \quad (21)$$

Arendades momentide väikesed muudatused Taylori ritta ning lahutades rootori dünaamika võrrandist ta staatika võrrandi ning pärast mõningaid elementaarseid tehteid saame:

$$\dot{\varphi} = \frac{\mu_1}{T_{11}} + \frac{\mu_2}{T_{12}} + \frac{\nu}{T_{13}},$$

kus

$\varphi = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ — turbogeneraatori pöörlemiskiiruse suhteline muutus,

$\mu_1 = \frac{\Delta m_1}{m_{1\,max}}$ — kõrgrõhuturbiini mineva auruhulga reguleerimisorgani suhteline asendimuutus,

$\mu_2 = \frac{\Delta m_2}{m_{2\,max}}$ — madalrõhuturbiini mineva auruhulga reguleerimisorgani suhteline asendimuutus,

$\nu = \frac{\Delta p_a}{p_{a0}}$ — vaheltauru rõhu suhteline muutus,

$T_{11} = \frac{I\omega_0}{\frac{\partial m_2}{\partial m_2} m_{1\,max}}$ — turboagregaadi ajakonstant kõrgrõhuturbiini auru kulu järgi,

$T_{12} = \frac{I\omega_0}{\frac{\partial m_2}{\partial m_2} m_{2\,max}}$ — turboagregaadi ajakonstant madalrõhuturbiini auru kulu järgi,

$T_{13} = \frac{I\omega_0}{\frac{\partial (m_1 + m_2)}{\partial p_a} p_{a0}}$ — turboagregaadi ajakonstant auru rõhu järgi vaheltauruuumis.

2. Vaheltauruuumi võrrand. Tema staatika võrrand on toodud eespool (võrrand 1), s. o. $G_1 - G_a - G_2 = 0$.

Ruumi dünaamika võrrand auru kulude väikeste muudatuste korral on

$$V\frac{d\gamma}{dt} = \Delta G_1 - \Delta G_a - \Delta G_2, \tag{22}$$

kus V — vaheltauruuumi maht,
γ — auru erikaal.

Eeldame, et auru erikaal on võrdeline auru rõhuga, s. o.

$$d\gamma = a\,dp_a. \tag{23}$$

Lahendades koos võrrandid (22) ja (23), saame

$$aV\frac{dp_a}{dt} = \Delta G_1 - \Delta G_a - \Delta G_2. \tag{24}$$

Auru kulu G_1 on funktsioon rõhust p_a ja reguleerimisventiili avamisastmest m_1 ning auru kulu G_2 — rõhust p_a ja reguleerimisventiili avamisastmest m_2, vaheltauru kulu G_a aga sõltub ainult rõhust p_a, s. o.

$$G_1 = G_1(m_1), \quad G_2 = G_2(m_2, p_a) \quad \text{ja} \quad G_a = G_a(p_a). \tag{25}$$

Nende kulude väikesed muutused on seega

$$\Delta G_1 = \frac{\partial G_1}{\partial m_1}\Delta m_1 + \frac{\partial G_1}{\partial p_a}\Delta p_a,$$

$$\Delta G_2 = \frac{\partial G_2}{\partial m_2}\Delta m_2 + \frac{\partial G_2}{\partial p_a}\Delta p_a,$$

$$\Delta G_a = \frac{\partial G_a}{\partial p_a} \Delta p_a. \qquad (26)$$

Võrrandite (24) ja (26) koos lahendamisega leiamegi otsitava võrrandi, s. o.

$$\nu' = \frac{\mu_1}{T_{21}} - \frac{\mu_2}{T_{22}} + \frac{\nu}{T_{23}}, \qquad (27)$$

kus

$T_{21} = \dfrac{aVp_{a0}}{\dfrac{\partial G_1}{\partial m_1} m_{1\,max}}$ — vaheltaururuumi ajakonstant kõrgrõhuturbiini auru kulu järgi,

$T_{22} = \dfrac{aVp_{a0}}{\dfrac{\partial G_2}{\partial m_2} m_{2\,max}}$ — vaheltaururuumi ajakonstant madalrõhuturbiini aurukulu järgi,

$T_{23} = \dfrac{aV}{\dfrac{\partial (G_1 - G_2 - G_a)}{\partial p_a}}$ — tegur, mis iseloomustab vaheltaururuumi statismi.

3. Tajurite võrrandid. Mitte võttes arvesse tajurite masse ja eeldades, et neil puuduvad kataraktid (ideaalne tajuvelement), saame:

$$\delta_1 \eta_1 = \varphi \quad \text{ja} \quad \delta_2 \eta_2 = \gamma, \qquad (28)$$

kus δ_1 ja δ_2 — kiiruse- ja rõhuregulaatorite tajuvelementide (muhvi ja membraani) statismid,

$\eta_1 = \dfrac{\Delta z_1}{z_{1\,max}}$ — kiiruseregulaatori muhvi suhteline asendimuutus,

$\eta_2 = \dfrac{\Delta z_2}{z_{2\,max}}$ — rõhuregulaatori membraani varda suhteline käigupikkus.

4. Teenurite võrrandid.

$$T_{s1}\mu_1' = \sigma_1 \quad \text{ja} \quad T_{s2}\mu_2' = \sigma_2, \qquad (29)$$

kus $\sigma_1 = \dfrac{s_1}{s_{1\,max}}$ ja $\sigma_2 = \dfrac{s_2}{s_{2\,max}}$ — kolvipaaride suhtelised asendimuutused,

T_{s1} ja T_{s2} — teenurite ajakonstandid.

5. Kolvipaaride võrrandid. Mõlema regulaatori kolvipaari asendeile avaldavad mõju nii mõlema regulaatori tajurid kui ka eraldi veel nende oma täitevmehhanismide asendimuutused tagasiside kaudu (joon. 13). Pöörlemiskiiruse regulaatori tüürkolvi asendimuutus

$$s_1 = y_1 - m_1 \frac{e}{d}. \qquad (30)$$

Väikeste asendimuutuste puhul kehtib võrdus

$$\Delta s_1 = \Delta y_1 - \Delta m_1 \frac{e}{d}. \tag{31}$$

Lahendades koos võrrandid (4) ja (31), kus muutuvateks suurusteks on z_1 ja z_2, leiame:

$$\Delta s_1 = \Delta z_1 \frac{a+b+c}{b+c} - \Delta z_2 \frac{a}{b+c} - \Delta m_1 \frac{e}{d}. \tag{32}$$

Tähistame

$$\sigma_1 = \frac{\Delta s_1}{s_{1\,max}}; \quad \eta_1 = \frac{\Delta z_1}{z_{1\,max}}; \quad \eta_2 = \frac{\Delta z_2}{z_{2\,max}} \text{ ja } \mu_1 = \frac{\Delta m_1}{m_{1\,max}}. \tag{33}$$

Viies need tähised võrrandisse (32), saame:

$$\sigma_1 = \eta_1 \frac{z_{1\,max}}{s_{1\,max}} \cdot \frac{a+b+c}{b+c} - \eta_2 \frac{z_{2\,max}}{s_{1\,max}} \cdot \frac{a}{b+c} - \mu_1 \frac{m_{1\,max}}{s_{1\,max}} \cdot \frac{e}{d}. \tag{34}$$

Võttes arvesse seosed (12a) ja (13) ning tähistades

$$\frac{z_{1\,max}}{s_{1\,max}} \cdot \frac{a+b+c}{b+c} = l_1 \text{ ja } \frac{z_{2\,max}}{s_{1\,max}} \cdot \frac{a}{b+c} = l_2,$$

saame võrrandist (34) lõplikult

$$\sigma_1 = \eta_1 l_1 - \eta_2 l_2 - \mu_1. \tag{34a}$$

Rõhuregulaatori tüürkolvi asendimuutuse leiame analoogiliselt, s. o.

$$s_2 = y_2 - m_2 \frac{f}{g}, \quad \text{millest } \Delta s_2 = \Delta y_2 - \Delta m_2 \frac{f}{g}. \tag{35}$$

Lahendades koos võrrandid (7) ja (35), kus muutuvateks suurusteks on jällegi z_1 ja z_2, leiame:

$$\Delta s_2 = \Delta z_1 \frac{c}{b+c} + \Delta z_2 \frac{b}{b+c} - \Delta m_2 \frac{f}{g}. \tag{36}$$

Tähistame

$$\sigma_2 = \frac{\Delta s_2}{s_{2\,max}} \text{ ja } \mu_2 = \frac{\Delta m_2}{m_{2\,max}}. \tag{37}$$

Kasutades tähistusi (35) ja (37), saame võrrandi (36) kirjutada kujul:

$$\sigma_2 = \eta \frac{z_{1\,max}}{s_{2\,max}} \cdot \frac{c}{b+c} + \eta_2 \frac{z_{2\,max}}{s_{2\,max}} \cdot \frac{b}{b+c} - \mu_2 \frac{m_{2\,max}}{s_{2\,max}} \cdot \frac{f}{g}. \tag{38}$$

Võttes arvesse seosed (12a), saame lõplikult:

$$\sigma_2 = \eta_1 n_1 + \eta_2 n_2 - \mu_2, \tag{39}$$

kus

$$n_1 = \frac{z_{1\,max}}{s_{2\,max}} \cdot \frac{c}{b+c} \text{ ja } n_2 = \frac{z_{2\,max}}{s_{2\,max}} \cdot \frac{b}{b+c}.$$

Saame võrrandsüsteemi, mis kirjeldab reguleerimisprotsessi:

$$\left.\begin{aligned} \varphi' &= \frac{\mu_1}{T_{11}} + \frac{\mu_2}{T_{12}} + \frac{\nu}{T_{13}}; \\ \nu' &= \frac{\mu_1}{T_{21}} - \frac{\mu_2}{T_{22}} + \frac{\nu}{T_{23}}; \\ \delta_1\eta_1 = \varphi;\ \ \delta_2\eta_2 = \nu;\ \ & T_{s1}\mu'_1 = \sigma_1;\ \ T_{s2}\mu'_2 = \sigma_2; \\ \sigma_1 = \eta_1 l_1 - \eta_2 l_2 - \mu_1;\ \ & \sigma_2 = \eta_1 n_1 + \eta_2 n_2 - \mu_2. \end{aligned}\right\} \tag{40}$$

Pöörlemiskiiruse autonoomsel reguleerimisel

$$\nu = 0, \quad \frac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}t} = 0 \text{ ja } \eta_2 = 0, \text{ kui } \varphi \neq 0. \tag{41}$$

Sellisel juhul taandub võrrandsüsteem (40) järgmiseks võrrandsüsteemiks

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} &= \left(\frac{1}{T_{11}} + \frac{T_{22}}{T_{12}\cdot T_{21}}\right)\mu_1 \\ T_{s1}\frac{\mathrm{d}\mu_1}{\mathrm{d}t} &= \frac{l_1}{\delta_1}\varphi - \mu_1 \\ T_{s2}\frac{T_{22}}{T_{21}}\frac{\mathrm{d}\mu_1}{\mathrm{d}t} &= \frac{n_1}{\delta_1}\varphi - \frac{T_{22}}{T_{21}}\mu_1 \end{aligned}\right\} \tag{42}$$

Saime kolm võrrandit kahe tundmatuga. Võrrandid on ühtivad ning nende lahendamiseks eeldame, et samade tundmatute ees olevad tegurid on omavahel võrdelised. Teisest ja kolmandast võrrandist (42) saame:

$$\frac{l_1}{\delta_1} : \frac{n_1}{\delta_1} = T_{s1} : T_{s2}\frac{T_{22}}{T_{21}}, \qquad \text{millest} \quad \frac{l_1}{n_1} = \frac{T_{s1}}{T_{s2}}\cdot\frac{T_{21}}{T_{22}} \tag{43}$$

ja

$$\frac{l_1}{\delta} : \frac{n_1}{\delta_1} = 1 : \frac{T_{22}}{T_{21}}, \qquad \text{millest} \quad \frac{l_1}{n_1} = \frac{T_{21}}{T_{22}}. \tag{44}$$

Järelikult

$$\frac{l_1}{n_1} = \frac{T_{21}}{T_{22}} = \frac{T_{s1}}{T_{s1}}\cdot\frac{T_{21}}{T_{22}}. \tag{45}$$

Võrdus (45) kehtib ainult siis, kui $\frac{T_{s1}}{T_{s2}} = 1$, s. o $T_{s1} = T_{s2}$ ning siis $\frac{l_1}{n_1} = \frac{T_{21}}{T_{22}}$. See ongi pöörlemiskiiruse reguleerimise autonoomsuse dünaamika tingimuseks, s. o. kiiruse ja rõhu regulaatorite teenurite ajakonstandid peavad olema omavahel võrdsed ning peale selle suhte $\frac{l_1}{n_1} = \frac{T_{21}}{T_{22}}$ kehtivus peab olema tagatud.

Rõhu autonoomsel reguleerimisel $\omega = \text{const}$ juures saab reguleerimissüsteem impulsi ainult rõhuregulaatorilt, s. t.

$$\varphi = 0;\ \frac{d\varphi}{dt} = 0 \text{ ja } \eta_1 = 0 \text{ kui } \nu \neq 0. \tag{46}$$

Võrrandsüsteem (46) taandub nüüd järgmiseks võrrandsüsteemiks

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\nu}{dt} &= \left(\frac{1}{T_{21}}\frac{T_{12}}{T_{11}T_{22}}\right)\mu_1 \\ T_{s1}\frac{d\mu_1}{dt} &= -\frac{\nu}{\delta_2}l_2 - \mu_1 \\ T_{s2}\frac{T_{12}}{T_{11}}\frac{d\mu_1}{dt} &= -\frac{\nu}{\delta_2}\eta_2 - \frac{T_{12}}{T_{11}}\mu_1 \end{aligned}\right\} \tag{47}$$

Saime jällegi kolm võrrandit kahe tundmatuga ning kuna rõhu muutus on üldiselt väike arv, siis on võrrandsüsteemis (40) olevad liikmed, mille teguriks on ν, s. o. $\frac{\nu}{T_{13}}$ ja $\frac{\nu}{T_{23}}$ jäetud tähele panemata.

Samastades võrrandites (47) samade tundmatute ees olevad tegurid, leiame:

$$\frac{l_2}{n_2} = \frac{T_{11}}{T_{12}} = \frac{T_{s1}}{T_{s2}} \cdot \frac{T_{11}}{T_{12}}. \tag{48}$$

Võrrand (48) on kehtiv ainult siis, kui $\frac{T_{s1}}{T_{s2}} = 1$, s. o. $T_{s1} = T_{s2}$.

See ongi rõhu reguleerimise autonoomsuse dünaamiliseks tingimuseks, s. o. ka sel puhul peavad pöörlemiskiiruse ja rõhu regulaatorite teenurite ajakonstandid olema omavahel võrdsed ning peale selle suhte

$$\frac{l_2}{n_2} = \frac{T_{11}}{T_{12}} \tag{49}$$

kehtivus peab olema tagatud.

Asetades täiendavatesse tingimustesse, s. o. võrdustesse (44) ja (49) nende arvulised väärtused, näeme, et nende suhete täitmine on tagatud, kui on tagatud autonoomsuse staatilised tingimused.

Reaalsetes seadmetes pole täielikku autonoomsust võimalik saavutada, sest praktiliselt on raske võrdsustada teenurite (hüdrauliliste ja pneumaatiliste) ajakonstante nende liikumisel üles ja alla, pole võimalik likvideerida ventiilidevahelist aururuumi ning turbiinide karakteristikud teha lineaarseks nii auru ventiilide ebalineaarse karakteristiku kui ka turbiinide ja aururuumi isereguleerimise tõttu. Sellegi peale vaatamata tuleb mitme reguleeritava

parameetriga objektide automaatreguleerimissüsteem projekteerida autonoomsena, et talle anda häid dünaamilisi omadusi.

Kui teenurite ajakonstandid T_{s1} ja T_{s2} teha ligikaudu võrdseks nulliga, siis kaudse toimega automaatreguleerimissüsteem taandub otsese toimega automaatreguleerimissüsteemiks ning autonoomsust võib tagada ainult süsteemi autonoomsuse staatilise tingimuse täitmisega. Järelikult selleks, et reaalne kaudse toimega automaatreguleerimissüsteem rohkem läheneks autonoomsele reguleerimissüsteemile, on vaja teenurite ajakonstandid T_{s1} ja T_{s2} valida võimalikult väikesed ning seega kõrvaldada nende kahjulik mõju reguleerimise dünaamikale.

Sidestatud autonoomsel reguleerimissüsteemil on palju paremad ekspluatatsioonilised omadused, ta on palju töökindlam ning tema justeerimine on lihtsam kui sidestamata reguleerimissüsteem, mistõttu tuleb teda eelistada viimase ees.

3. Tehnoloogiliste protsesside automatiseerimine keemiatööstuses

Keemiatööstuses kasutatavate tehnoloogiliste protsesside väga suur mitmekesisus, nende erinev ettevalmistus automatiseerimiseks, automaatika juurutamisel tekkinud spetsiifilised raskused tingisidki automatiseerimise võrdlemisi nõrga arengu keemiatööstuses.

Viimaseil aastail loodud suhteliselt täiuslike tehnoloogiliste protsesside kõrval, eriti orgaanilise sünteesi osas, mis on täielikult automatiseeritud, on veel väga palju vana tehnoloogiaga protsesse, mille juhtimine toimub senini käsitsi ja mida on raske, mõnikord ka võimatu automatiseerida. Paljusid keemiatööstuses kasutatavaid tehnoloogilisi protsesse iseloomustavad mitte ainult tihti esinevad parameetrid, nagu rõhk, temperatuur jne., vaid ka rida spetsiifilisi parameetreid, nagu mitmesuguste vedelike, gaaside või aurude koostis, kvaliteet jt. Et viimatinimetatud parameetrid esinevad suhteliselt vähem kui rõhk, temperatuur jne., on nende reguleerimiseks vajalikke tehnilisi vahendeid vähem uuritud ning liiga vähe toodetud. See on teiseks põhjuseks, miks keemiatööstuse automatiseerimine pole olnud küllalt intensiivne. Keemiatööstuses on veel palju niisuguse aparatuuriga tehnoloogilisi protsesse, mida tuleb tingimata käsitsi juhtida. Nende tehnoloogiliste protsesside isegi osaline automatiseerimine on erakordselt raske, kallis ning alati ei anna soovitavat efekti.

Paljudes keemiatööstuse harudes, kus põhiline tehnoloogiline protsess on pidev ning hästi automatiseeritav, on abioperatsioonid perioodilised ja väga töömahukad, kuid sellisel kujul, nagu nad praegu esinevad, mitteautomatiseeritavad.

Seepärast peab keemiatööstuse tehnoloogiliste protsesside enamiku kompleksele automatiseerimisele eelnema nende protsesside täielik mehhaniseerimine. Vastasel korral on keemiatööstuse automatiseerimise areng piiratud.

Kaasaegne tehnoloogilise protsessi kompleksne automatiseerimine nõuab selle protsessi staatilise ja dünaamilise iseloomu tundmist ning tema matemaatilist kirjeldamist, mis näitaks sõltuvust protsessi üksikute parameetrite ja majanduslikult kõige soodsama tehnoloogilise režiimi vahel. Et aga enamik keemiatööstuse tehnoloogilisi protsesse on väga keerulise iseloomuga ning neid pole vajalikus ulatuses uuritud, siis puuduvad meil veel paljudel juhtudel küllaldased teadmised nende protsesside kulgemisest. Seega pole ka võimalik koostada küllalt optimaalseid reguleerimissüsteeme, eriti neid, mis sisaldavad matemaatilisi tüürivaid elemente. Vaatleme mõningate tähtsamate keemiatööstuse tehnoloogiliste protsesside automatiseerimise võimalusi.

Tselluloosi- ja paberitööstuse põhiline tooraine puit tuleb tehase laadimisplatsile hoidmiseks ja ümbertöötamiseks. Protsesse, mis on seoses puidu töötlemisega, on raske automatiseerida isegi siis, kui need protsessid on täiesti mehhaniseeritud. Asi on selles, et senini veel pole olemas aparatuuri, mille abil võiks praktiliseks vajaduseks küllaldase täpsuse ja kiirusega automaatselt kontrollida puidu niiskust, sordilisust jne. Kõige rohkem, mida siin saab teha, on automatiseerida palkide lugemist ning vastuvõetava puidu mahu määramist.

Puitu töödeldakse algul mehaaniliselt (purustatakse) ning hiljem keemiliselt (keedetakse katlais kõrgel rõhul ja temperatuuril sulfit- või sulfaatmenetlusel).

Puidu purustamine toimub vahetpidamatu protsessina ning seda saab automatiseerida.

Happe valmistamine sulfittselluloosi jaoks koosneb kolmest järgust: väävli või väävlisaaduste põletamine, väävligaasi puhastamine ja jahutamine, gaasi neeldumine vees lubja toimel. Protsess on täielikult pidev ning tema kompleksse automatiseerimise korral reguleeritakse sulatatud väävli temperatuuri ja kulu, väävli primaarse ja sekundaarse põlemise intensiivsust väävlipõletusahjus, SO_2 kontsentratsiooni gaasis, gaasilise faasi rõhku ja alarõhku, vee kulu SO_2 absorbeerimiseks, SO_2 kontsentratsiooni vees jt.

Kompleksseks automatiseerimiseks on vaja lahendada happes sisalduva SO_2 kontsentratsiooni reguleerimise probleem. Seda teostatakse vee kulu muutmisega, kusjuures esineb hilinemus 5 ... 12 minutit, mida tuleb arvestada automaatregulaatorite justeerimisel. Puidu keetmine sulfittselluloosi saamiseks toimub kindlal temperatuuril ja rõhul perioodilise toimega keetmiskatlais. Keetmise ajal happest eralduv väävlisgaas lastakse katlast regeneratsioonisüsteemi ning ta absorbeerub toores keetmishappes. Katla keetmisruumi temperatuuri ühtlustamiseks on happel kaasaegseis katlais sundringlus.

Kompleksse automatiseerimise puhul reguleeritakse antud programmi järgi keetmise temperatuuri katlas soojendava auru hulga abil ning rõhku katlast väljuva gaasi hulga abil. Peale selle

on vaja veel täpselt doseerida katlasse minevat puitu ning aktiivseid kemikaale. Keetmisprotsessi põhiliste tehnoloogiliste operatsioonide automatiseerimiseks nõutakse kõigepealt ratsionaalset meetodit katlasse mineva puidu mahu või kaalu kontrollimiseks ja pideva toimega kontrollriista olemasolu, mis määraks objektiivselt keetmise lõppmomendi sõltuvalt tselluloosi vajalikust kvaliteedist. SO_2 regenereerimise automatiseerimine toimub standardsete riistade ja regulaatoritega.

Keedetud tselluloosimass pestakse, puhastatakse okstest, sorteeritakse ja tihendatakse. Saadud tselluloos pleegitatakse klooriga või hüpokloritiga. Põhiliselt on need kõik pidevad protsessid. Pleegitamise lõppstaadium aga toimub mõnikord perioodilise toimega seadmes. Kompleksel automatiseerimisel on vaja reguleerida tselluloosikiudude kontsentratsiooni vees, tema massi mahulist kulu, pleegitavate ainete kulu, massi nivood pleekimispaakides ja vaakuumfiltrites, temperatuuri segajais jm. Pleegitusprotsessi automatiseerimine ei saa käesoleval ajal olla veel täielik, sest puudub aparatuur, mis määraks ära pleegituse vajaliku lõppmomendi. Suurt tähtsust omavad ka aparaadid, mis teevad kindlaks mitmesuguseid kadusid nende protsesside vältel, tselluloosimassi sordi, pH ,kontsentratsiooni jt. suurusi.

Paberilindi valmistamise protsess on pidev. See koosneb kolmest järgust: 1) paberimassi valmistamisest, mis seisab tselluloosi jahvatamises, tselluloosist ja kõrvalainetest vajaliku segu koostamises, lõplikus sorteerimises ja vee lisamises kuni vajaliku kontsentratsioonini; 2) paberilindi moodustamisest paberimasinas koos vee väljapressimisega ning 3) paberilindi kuivatamisest silindritel.

Kaasaegseil paberimasinail pikkusega 120 . . . 150 m on paberilindi laius kuni 8 meetrit ning see liigub kiirusega kuni 600 . . . 700 m/min. Paberimasina ajamiks on kiirusregulaatoriga süsteem «generaator-mootor», millele esitatakse küllaltki kõrgeid nõudeid.

Kompleksel automatiseerimisel reguleeritakse automaatselt järgmisi parameetreid: paberilindi ruutmeetri kaalu või ta paksust, paberilindi niiskust, kuumutusauru rõhku ja temperatuuri kuivatussilindreis, rõhku valtside vahel jm.

Kõigi nende protsesside komplekssе automatiseerimise süsteemis peavad olema veel riistad, mis automaatselt kontrollivad rida tehnoloogilisi ja valmissaaduse parameetreid, distantsjuhtimisorganeid, signaal-, arvutus- ja muid automaatikaseadmeid.

Superfosfaadi tootmise protsess on automatiseeritud ainult mõnedes tehastes. Neis kasutatakse peamiselt pneumaatilisi regulaatoreid, millede abil hoitakse vajalikes piires lahjendatud väävelhappe kulu ja kontsentratsiooni. Automaatselt reguleeritakse happe temperatuuri ja fosfaadi kulu. Protsessi automaatne kontrollimine ja juhtimine, kaasa arvatud käivitamine ja seiskamine, on tsentraliseeritud.

Eesti NSV keemiatööstuse üheks tähtsamaks haruks on

põlevkivitööstus. Ka põlevkivitööstuses on automatiseerimise tase väga madal, eritì veel seepärast, et utmisprotsessi spetsiifika tõttu puudub põlevkivi utmise seadmete komplekssseks automatiseerimiseks vajalik aparatuur ning seadmed ise on oma konstruktsiooni tõttu raskesti automatiseeritavad.

Uurimistööd, mis on senini tehtud ENSV TA Energeetika Instituudis ja mujal, pole veel küllaldased, et teha konkreetseid järeldusi põlevkivitööstuse kompleksse automatiseerimise kohta, kuid juba praegu võib öelda, et näiteks šahtgeneraatori praegune konstruktsioon ei lase meil komplekssselt automatiseerida utmisprotsessi selles seadmes, sest rida operatsioone, mis on vajalikud generaatori töötamiseks, tuleb paratamatult teha käsitsi. Palju paremaid tulemusi peaks andma tunnelahju automatiseerimine. Kuid siin on üheks suuremaks takistuseks vagonettide edasilükkamise ning siibrite ülestõstmise ja allalaskmise mehhaniseerimine ja automatiseerimine. Komplekssset automaatreguleerimist on aga võimalik rakendada tahke soojuskandjaga utmisseadmes. Ekstreem-elektronregulaator on sel juhul seadme pearegulaatoriks, mille ülesandeks on igal hetkel tagada põlevkivist maksimaalse õlikoguse saamine, kui seadme ülesandeks on toota õli, või maksimaalse soojushulga saamine gaasi näol, kui seadme ülesandeks on toota gaasi.

Mis puutub õliaurude kondensatsiooni automaatsesse reguleerimisesse kõigil põlevkivi utmise seadmetel, siis, kuigi ka siin puudub nimetamisväärne automatiseerimine, on seda protsessi võimalik ulatuslikult automatiseerida standardsete, seeriaviisiliselt toodetavate riistade baasil.

KIRJANDUS

Автоматизация производственных процессов. Под редакцией Трапезникова В. А. Изд-во АН СССР, Москва, 1956.

Блох, З. Ш. Динамика линейных систем автоматического регулирования машин. Гос. изд-во научно-техн. литературы, Москва, 1952.

Воронов, А. А. Элементы теории автоматического регулирования. Военное изд-во Мин-ва обороны СССР, Москва, 1954.

Гуров, Г. Полупроводники в технике и в быту. «Московский рабочий», Москва, 1958.

Дудников, Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов. Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1956.

Егоров, К. В. Основы автоматического регулирования. Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1955.

Ивахненко, А. Г. Самонастраивающиеся системы автоматического регулирования. Изд-во АН УССР, Киев, 1957.

Иващенко, Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. Машгиз, Москва, 1958.

Казарновский, Е. М. Регулирование температуры перегретого пара в мощных паровых котлах. Госэнергоиздат. Москва—Ленинград, 1954.

Кириллов, И. И. Регулирование паровых и газовых турбин. Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1952.

Корнилов, Ю. Г. и Пивен, В. Д. Основы теории автоматического регулирования в приложении к теплосиловым установкам. Машгиз, Москва—Ленинград, 1947.

Крыжановский, О. М. «Автоматика и телемеханика», № 5, 1950.

Кузовков, Н. П. Теория автоматического регулирования. Оборонгиз, Москва, 1957.

Кюннап, Э. Ю. Автоматическое регулирование горения сланца в кипящем слое. Известия АН Эстонской ССР, Том V, № 4, 1956.

Лернер, А. Я. Введение в теорию автоматического регулирования. Машгиз, Москва, 1958.

Лурье, А. И. Операционное исчисление. Гос. изд-во технико-теорет. литературы, Москва—Ленинград, 1951.

Майзель, М. М. Основы автоматики и телемеханики. Гизлегпром, Москва, 1958.

Мануйлов, П. Н. Автоматизация тепловых процессов на электростанциях, Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1956.

Миронов, К. А. и Шипетин, Л. И. Теплотехнические измерительные приборы и автоматические регуляторы. Машгиз, Москва, 1956.

Миронов, В. Д. и Стефани, Е. П. Электронные автоматические регуляторы тепловых процессов. Госэнергоиздат. Москва—Ленинград, 1955.

Основы автоматического регулирования. Теория. Под редакцией Солодовникова, В. В., Машгиз, Москва, 1954.

Основы автоматического регулирования. Элементы систем автоматического регулирования. Часть 1. Под редакцией Солодовникова, В. В., Машгиз, Москва, 1959.

Попов, Е. П. Динамика систем автоматического регулирования. Гос. изд-во технико-теорет. литературы. Москва, 1954.
Попов, Е. П. Автоматическое регулирование. Гос. изд-во технико-теорет. литературы. Москва, 1957.
Скрицкий, Л. Г. Автоматика в системах тепло-газоснабжения и вентиляции. Госстройиздат. Москва, 1957.
Трапицин, В. И. Автоматизация производственных процессов промышленных установок. Машгиз, Москва—Ленинград, 1957.
Фельдбаум, А. А. Электрические системы автоматического регулирования. Оборонгиз, Москва, 1957.
Фатеев, А. В. Основы линейной теории автоматического регулирования. Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1954.
Цыпкин, Я. З. Теория релейных систем автоматического регулирования. Гос. изд-во технико-теорет. литературы, Москва, 1955.
Шифрин, М. Ш. Регулирование судовых котельных установок. Судпромгиз, Ленинград, 1957.
Шляндин, В. М. Элементы автоматики и телемеханики. Оборонгиз, Москва, 1954.
Künnap, E. Peenpõlevkivi mehaanilistel restidel põletamise automaatne reguleerimine. ENSV TA Toimetised. VI köide, Nr. 4, 1957.
Künnap, E. Gaasi ja õliküttega väikekatelde automatiseerimisest. Tehnilist informatsiooni Nr. 34. ENSV MN Riiklik Teaduslik-Tehniline Komitee, Tallinn, 1958.
Ceaglske, Norman N. Automatic process control for chemical Engineers. John Wiley and Sons. Inc., New York, 1956.
Truxall, J. G. Automatic Feedback Control System Synthesis. McGraw-Hill Book Company. Inc., New York, Toronto, London, 1955.
Hestenberg, J., Sturm, B., Winkler, O. Messen und Regeln in der chemischen Technik. Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1957.
Hornauer, W. Industrielle Automatisierungstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin, 1956.
Oppelt, W. Kleines Handbuch Technischer Regelvorgänge. Verlag Chemie, Weinheim, 1956.

SISUKORD

Sissejuhatus 3

I. Automaatkontroll, -kaitse, -juhtimine ja -reguleerimine 7
1. Automaatkontroll 7
2. Automaatkaitse 8
3. Automaatjuhtimine 9
4. Automaatreguleerimine 10

II. Automaatregulaatorid ja tema elemendid 19
1. Otsene ja kaudne reguleerimine 19
2. Staatiline, astaatiline ja isodroomne reguleerimine 20
3. Regulaatorite konstruktsioonide elemente 28
Tajurid 29
Võimendid ja teenurid 42
Stabiliseerivad ja korrigeerivad elemendid 51
4. Otsese toimega regulaatorid 52
5. Kaudse toimega regulaatorid 56
Hüdraulilised regulaatorid 56
Pneumaatilised regulaatorid 60
Elektromehaanilised regulaatorid 63
ВТИ-tüüpi elektronregulaatorid 68
Elektrohüdraulilised regulaatorid 73
Radioaktiivse kiirgusega töötavad regulaatorid 74

III. Automaatreguleerimissüsteemid 79
1. Pidev, diskreetne ja releeline reguleerimine 79
2. Jälgiv- ja programmsüsteemid 87
3. Objekti ja regulaatori võrrandi koostamise alused 91
4. Reguleerimise printsiibid 113

IV. Automaatreguleerimissüsteemide elementide dünaamilised omadused ja nende eksperimentaalne määramine 121
1. Üldjooni operaatorarvutusest 121
2. Lüli või süsteemi amplituudi ja faasi karakteristikud 131
3. Tüüplülid 136
Proportsionaalne lüli 136
Aperioodiline lüli 137
Võnkuv lüli 141
Integreeriv lüli 147
Diferentseeriv lüli 149
4. Automaatreguleerimissüsteemide koostamine 150

V. Lineaarsete dünaamiliste süsteemide stabiilsus 160
1. Üldised mõisted ja tingimused 160
2. Stabiilsuse algebralised kriteeriumid 167
Võšnegradski kriteerium 167
Routh'i kriteerium 171
Hurwitzi kriteerium 173

3. Stabiilsuse sageduskriteeriumid 176
Mihhailovi kriteerium 177
Amplituudi ja faasi kriteerium 183
Amplituudi ja faasi pöördkriteerium 192
Logaritmiline kriteerium 193
VI. Reguleerimisprotsessi kvaliteet 196
1. Reguleerimisprotsessi kvaliteedi kriteeriumid 196
Karaktervõrrandi lahendite asetuse meetod 199
Integraalsete hinnangute meetod 203
Sagedusmeetod 209
2. Abinõud reguleerimisprotsessi kvaliteedi tõstmiseks 222
VII. Arvutuslike elementide kasutamine automaatreguleerimissüsteemides 230
1. Arvutusmehhanismid automaatreguleerimisskeemides 230
Summeerimine 230
Korrutamine ja jagamine 232
Diferentseerimine ja integreerimine 234
2. Iseseaduvad süsteemid 236
3. Ekstreemreguleerimine 240
VIII. Tööstuslike protsesside automatiseerimine 244
1. Aurukatelde automaatreguleerimine 244
Katla toiteautomaatika 245
Põlemisprotsessi automaatreguleerimine 250
Ülekuumendatud auru temperatuuri reguleerimine 256
Katla ja turbiini bloki automaatne reguleerimine 258
2. Auruturbiinide automaatreguleerimine 260
3. Tehnoloogiliste protsesside automatiseerimine keemiatööstuses . . 273
Kirjandus 277

Кюннап Эуген Иоханович

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Оформление Э. Тали

На эстонском языке

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

Toimetaja L. Abo
Tehniline toimetaja A. Pill
Korrektorid P. Hiie ja E. Künarpu

Ladumisele antud 13. IV 1960. Trükkimisele antud 14. VII 1960. Paber 60 × 92, 1/16. Trükipoognaid 17,5. Arvutuspoognaid 16,67. Trükiarv 2000. MB-03986. Tellimise nr. 3951. Hans Heidemanni nimeline trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. II

Hind. rbl. 9.30 (93 kop.)

3—2

Rbl. 9.30
1961. a. — 93 kop.

A-23349
IV

