

## PEENPÕLEVKIVI MEHAANILISTEL RESTIDEL PÕLETAMISE AUTOMAATNE REGULEERIMINE

E. KUNNAP,  
tehniliste teaduste kandidaat

Paljudes tööstusharudes levib iga päevaga üha enam tootmisprotsesside automatiseerimine, mille ulatuslikku tarvituselevõtmist tootmise tehnilise taseme tõstmiseks nõuavad otseselt NLKP XX kongressi direktiivid NSV Liidu rahvamajanduse arendamise kuuenda viie aasta plaani kohta aastaks 1956—1960.<sup>1</sup>

Üks alasisid, mis vajab pakiliselt automatiseerimist, on peenpõlevkivi põletamine mehaanilistel restidel, mis leiab küllaltki ulatuslikku rakendamist väikese võimsusega soojuselektrijaamade kolletes, aga ka suuremate tööstuste energiamajanduses. Selle ülesande lahendamisele tahabki kaasa aidata käesolev artikkel, milles käsitletakse peenpõlevkivi mehaanilistel restidel põletamiseks arvesse tulevaid automaatseid reguleerimissüsteeme.

Vaatluse alla on võetud kolm skeemi; kaks neist (skeemid «a» ja «b») reguleerivad põlevkivi ja õhu vahetõrget kaudselt, kolmas aga (skeem «c») — otseselt. Skeemide uurimine toimus otsesel meetodil, s. t. koostati skeemide diferentsiaalvõrrandisüsteemid, need lahendati ning resultaadid esitatakse allpool graafikuina, millede omavaheline võrdlus lubab otsustada iga valitud skeemi siirdeprotsessi dünaamilisi omadusi ja eeliseid teiste suhtes.

Skeemide ökonoomsuse võrdlust ei esitata, kuna seda on juba vajalikul määral valgustatud vastava-alases kirjanduses.

Reguleerimisobjekti prototüübiks on Tallinna Elektrijaama katel nr. 6, mille inertstegurid, mis võeti skeemide teoreetilisel uurimisel objekti inertsteguritena, määrati katseliselt.

### Peenpõlevkivi kihispõletamiskolde inertstegurite määramine

Tolm-, gaasi- ja õliküttega katla auru- ja veemahu dünaamika uurimisel lähtutakse tavaliselt järgmisest:

1) Katla auru- ja veemahtu vaadeldakse kui mahtu, mis akumuleerib soojust vees, auras ja katla torude ning ülekuumendi torude metallis.

2) Katla toitevee entalpia loetakse konstantseks.

3) Eeldatakse, et koldesse sattunud kütus annab põledes vee ja auru segule kohe ära vastava hulga soojust.

4) Ei võeta arvesse gaasi- ja õhutrakti inertssust, sest gaaside ja õhu liikumise kiirused on suhteliselt suured ning nende teekonnal puuduvad akumuleerivad elemendid.

<sup>1</sup> Tallinn, 1956, lk. 8.

Kütuse kihispõletamisel ei saa aga jätta arvestamata katelde kollete inertsust. Seoses sellega tuuakse seadme võrrandisse kihispõletamiskolde võrrandid, mis peegeldavad kütuse kihispõlemise spetsiifikat ning omavad sealjuures selget füüsikalist iseloomu.

Soojuse genereerumise muutused kihis sõltuvad muutustest nii õhu kui ka kütuse hulgas. Ainult õhu või ainult kütuse hulga reguleerimiseseadise asendit muutes pole võimalik pikemaks ajaks muuta soojuse genereerumist: need mõlemad muutused peavad toimuma kooskõlastatult. Õhu hulga muutmisel erineb soojuse genereerumise muutuse kiirus tunduvalt sellest kiirusest, mis esineb kütuse hulga muutmisel. Sel viisil tuleb kihispõletamiskolletes teha vahet kahesuguse inertsuse vahel, sõltuvalt sellest, kas toimub õhu või kütuse hulga muutus. Õhu hulga muutus toimub omakorda kahel viisil — muutub kas primaar- või sekundaarõhu hulk.

Tähistame restidel ärapõlenud ja soojuseks  $Q_{\text{kol}}$  muutunud kütuse hulga suhtelise muutuse tähtedega  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  ja  $\beta_3$ , vastavalt primaarõhu, sekundaarõhu ja värskel kütuse hulga muutusele. Restidel ärapõleva kütuse hulga (millest saab vastava soojushulga) suhteliste muutuste summa  $\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$  ja katla küttepindade poolt vastuvõetava soojushulga  $\beta_k$  vahel (eeldades, et kütuse kütteväärtus on konstantne) on funktsionaalne sõltuvus, mis on ühtlaselt määratud liigõhuteguri muutumisega sellest väärtusest, mis vastab püsivale kindlaksmääratud optimaalsele väärtusele.

Funktsioonid  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  ja  $\beta_3$  erinevad üksteisest mitte ainult oma suuruse poolest, vaid funktsioon  $\beta_3$  erineb nullist ainult siis, kui kihis on eabilanss kihisse mineva ja seal ärapõleva kütuse hulga vahel; kolde püsival, statsionaarsel režiimil peab

$$\beta_3 \infty \equiv 0.$$

Funktsioonid  $\beta_1$  ja  $\beta_2$  võivad erineda nullist nii staatikas kui ka dünaamikas. Summa  $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3$  suurus määratakse ära kütuse ja õhkude reguleerimiseseadiste asendite muutumisega, taandatult õhu üldhulga muutusele  $v = v_1 + v_2$ . See summa määrab ära liigõhuteguri muutuse põlemisproduktides, järelikult ka funktsiooni  $\beta_k$ . Katla inertsilisi omadusi iseloomustavad tema inertsilülide võrrandite inertstegurid, mis määrati katseliselt.

Katla ja kihispõlemiskolde dünaamika võrrandid olid oma teguritega aluseks, mille järgi analüüsiti automatiseeritud katla siirdeprotsesse.

Kolde inertsust iseloomustatakse võrrandisüsteemidega

$$T_{L_1} \beta'_1 + \beta_1 = v_1$$

$$T_{L_2} \beta'_2 + \beta_2 = v_2$$

$$T_k \beta'_3 + \beta_3 = v_3 - \beta_1 - \beta_2,$$

kus  $T_{L_1}$ ,  $T_{L_2}$  ja  $T_k$  on tegurid, mis iseloomustavad kolde inertsust sekundites, vastavalt primaar- ja sekundaarõhu ning värskel kütuse hulga muutusele;  $v_1$ ,  $v_2$  ja  $v_3$  on primaar- ja sekundaarõhu ning värskel kütuse hulga suhtelised muutused.

Tegurite  $T_{L_1}$ ,  $T_{L_2}$  ja  $T_k$  arvuliste suuruste määramiseks võib kasutada gaasianalüüsi andmeid (otsene meetod) või neid võib määrata sõltuvalt auru rõhu muutusest katlas (kaudne meetod). Kuna puudusid vajalikud, väikese inertsusega gaasianalüsaatorid, siis kasutati nimetatud tegurite määramiseks kaudset meetodit. Kasutades võrrandisüsteemi superpositiooni omadust, tehti muutmatu koormuse juures häiring ainult ühe reguleerimiseseadise (muutes kas primaarõhu või sekundaarõhu või kütuse hulka ning hoides teised muutmatutena) ja mõõdeti kindla ajavahemiku järel auru rõhu muutust katlas, mille järgi arvutati välja inertstegurite arvu-

lised väärtused. Katla võrrand vee ja auru mahu järgi  $T_a \varphi' + az\varphi = -\lambda + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + ka(v_3 - \beta_1 - \beta_2 - \beta_3)$  on koostatud tavalisel viisil, kus  $T_a$  — tegur (sek.), mis iseloomustab katla inertsust koormuse muutuse järgi:

$a$  — isereguleerimistegur ( $= 1$ );

$z$  — tegur, mis iseloomustab vaadeldavat režiimi (millisel koormusel töötab katel vaadeldaval momendil);

$\varphi$  — suhteline rõhu muutus katlas;

$\lambda$  — suhteline koormuse muutus katlas;

$k_x$  — tegur, mis iseloomustab katla kasuteguri muutust, sõltuvalt liigõhuteguri muutusest koldes;

$v_1, v_2$  ja  $v_3$  — suhteline primaarõhu, sekundaarõhu ja kütuse hulga muutus.

Lahendamisele kuulub seega 3 võrrandisüsteemi:

1)  $T_k$  määramiseks

$$T_a \varphi' + az\varphi = \beta_3$$

$$T_k \beta_3' + \beta_3 = v_3, \text{ kusjuures } \beta_0 = \beta_{30} = 0, \text{ kui } t = 0.$$

2)  $T_{L_1}$  määramiseks

$$T_a \varphi' + az\varphi = \beta_1$$

$$T_{L_1} \beta_1' + \beta_1 = v_1, \text{ kusjuures } \beta_0 = \beta_{10} = 0, \text{ kui } t = 0.$$

3)  $T_{L_2}$  määramiseks

$$T_a \varphi' + az\varphi = \beta_2$$

$$T_{L_2} \beta_2' + \beta_2 = v_2, \text{ kusjuures } \beta_0 = \beta_{20} = 0, \text{ kui } t = 0.$$

Kasutades arvutusteks vähimate ruutude meetodit, saadi katsete alusel järgmised katla inertstegurite arvulised väärtused:

$$T_a = 225 \text{ sek.}, T_k = 1250 \text{ sek.}, T_{L_1} = 670 \text{ sek. ja } T_{L_2} = 465 \text{ sek.}$$

### Automaatreguleerimisskeemide valik ja nende teoreetiline uurimine

Praktiliselt kasutatavaid põlemise automaatreguleerimise süsteeme on väga mitmesuguseid. Senini rakendatud süsteemides toimub õhu ja kütuse vahekorra reguleerimine kaudselt.

Eelistatuid süsteeme tolmküttega katla juures on esiteks see süsteem, kus kütuse hulk reguleeritakse auru rõhu järgi, õhu hulk aga kolmeimpulsi-õhuregulaatoriga auru kulu, õhu kulu ja kaduvimpulsiga kütuse hulga järgi [1], ja teiseks selline süsteem, kus kütuse hulk reguleeritakse soojusliku koormuse, s. t. auru kulu ning rõhu muutuse kiiruse järgi katla aurukollektoris, kusjuures õhk reguleeritakse sama impulsi järgi, tagasiside aga on tal õhu kulu järgi.\* Kivisöe kihispõlemisel tuleks kolde eelistatumaks automaatreguleerimissüsteemiks lugeda süsteem, kus õhk reguleeritakse auru rõhu, rõhu muutuse kiiruse ning auru kulu järgi, kütus aga auru rõhu järgi [2].

Kaudne reguleerimine ei kindlusta küllalt ökonoomset põlemisprotsessi kulgemist (eriti üleminekuprotsesside ajal) selle tõttu, et kütuse ja õhu hulka reguleerivate seadiste karakteristikad pole püsivad ega lineaarsed ja pealegi on kütuse koosseis muutlik suurus. Põlemisprotsessi ökonoomsuse

\* З. Я. Бейрах, Предварительные соображения о разработанных в Московском отделении ЦКТИ новых схемах авторегулирования процесса горения барабанных паровых котлов, Отчет МО ЦКТИ, Москва, 1954.

näitajateks on CO<sub>2</sub>- ja O<sub>2</sub>-sisaldus väljuvates gaasides. Kui CO<sub>2</sub>-sisaldus võib olla kriteeriumiks kivisöe ja teiste kütuste põletamisel, siis põlevkivi puhul ta seda olla ei saa karbonaatide muutliku lagunemisastme tõttu. Objektivsemat hinnangut võib anda vaba hapnik. Olenevalt sellest ja arvestades ka seda, et meie tööstus juba toodab magneetilise hapnikumõõtjaga elektronregulaatoreid, võiks optimaalsemaks reguleerimissüsteemiks lugeda sellist süsteemi, kus õhu hulk reguleeritakse auru rõhu, kaduvimpulsiga auru kulu ning auru kulu muutuse kiiruse järgi, kütus aga sõltuvalt vaba hapniku sisaldusest lahkuvates gaasides. Süsteem, kus vahetaksime omavahel ära kütuse- ja õhuregulaatorid, on ilmselt vähem efektiivne, sest kolde inertsus on kütuse osas suurem kui õhu osas. Kuna aga kolde inertsus on primaarõhu osas omakorda suurem kui sekundaarõhu osas, siis on ilmselt otstarbekohane reguleerida sekundaarõhku eespool nimetatud impulsside järgi, primaarõhku aga sõltuvalt sekundaarõhu kulust, valides regulaatoris sobiva jääkebaühtsuse, mille suurus täpsustatakse regulaatori justeerimisel, sõltuvalt reguleeritavast objektist.

Kõne alla võiks tulla ka selline skeem, kus koormuse muutus ei mõju õhule, nagu eespool toodud skeemis, vaid tõmbele; hõrendus reguleeritakse õhu hulga muutusega ja O<sub>2</sub> hulga muutus mõjutab omakorda kütuseregulaatorit<sup>[4]</sup>. Käesolevas töös aga seda ei puudutata vaadeldava katla väärohu väikese muutuse tõttu siirdeprotsesside vältel.

Vaatluse alla on võetud alljärgnevad automaatreguleerimissüsteemid.

**Skeem «a».** Sekundaarõhk reguleeritakse kolmeimpulsilise õhuregulaatoriga (auru kulu, õhu kulu ja kaduvimpulss kütuse reguleerimisseadise asendi järgi); kütuse hulk reguleeritakse auru rõhu järgi.

**Skeem «b».** Sekundaarõhk reguleeritakse auru kulu, õhu kulu ja auru kulu muutuse kiiruse järgi; kütuse hulk aga — auru rõhu järgi. (Kolde suure inertsuse tõttu kütuse osas on küllaldane vaadelda kütuse regulaatorit nendes skeemides üheimpulsilise regulaatorina.)

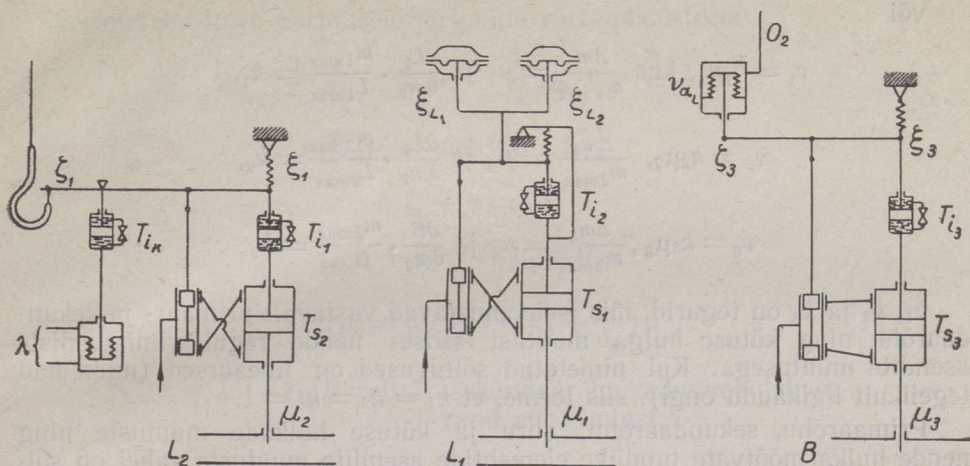
**Skeem «c».** Sekundaarõhk reguleeritakse auru rõhu ja auru kulu muutuse kiiruse järgi, kütus — liigõhu hulga järgi.

Kõikides skeemides reguleeritakse primaarõhk sekundaarõhu kulu järgi, jääkebaühtsusega 7%<sup>[3]</sup>. Nagu tavaliselt, reguleeritakse hõrendus oma suuruse järgi kolde valitud kohas ning ei kuulu analüüsimisele.

Valitud skeemidest on Katla-Turbiini Keskinstituudi andmetel skeem «a» andnud parimaid tulemusi kivisöetolmu põletamisel. Skeem «b» erineb skeemist «a» selle poolest, et kolmeimpulsilise primaarõhuregulaatori asemel on toodud kaduvimpulss mitte kütuse reguleerimisseadise asendi, vaid auru kulu muutuse kiiruse järgi. Skeem «c», kus kasutatakse alles lühikest aega toodetavat hapnikumõõtjaga regulaatorit, on täiesti erinev teistest ja kindlustab põlemisprotsessi kõige ökonoomsema kulgemise. Skeemide omavahelise võrdleva analüüsi kriteeriumiks on reguleerimisprotsessi kvaliteet. Mis puutub põlemise ökonoomilisse külge, siis on seda küsimust juba varem puudutatud mitmesuguste kaudsete kütuse ja õhu vahekorra reguleerimisskeemide puhul<sup>[1, 2]</sup>. Ökonoomsust küljest tuleb vaadeldavatest skeemidest pidada parimaks skeemi «c», kus liigõhu hulk hoitakse praktiliselt konstantsena igasuguse koormuse juures.

Joonisel 1 on toodud valitud süsteemi arvutuskeem. Sellest parema ülevaate saamiseks on relee tüüpi püsiva kiirusega elektriline teenur, mida tegelikult omavad elektromehaanilised ja elektronregulaatorid, näidatud muutliku kiirusega hüdraulilise teenurina. Samas on esitatud ka tähistus, mida kasutatakse arvutuse juures.

\* З. Я. Бейрах, Регулирование экономичности процесса горения, Отчет МО ЦКТИ, 1953.



Joon. 1. Aurukatla põlemisprotsessi automaatreguleerimise arvutuslik skeem (skeem «c»).

Eespool on toodud katlas toimuvate dünaamiliste protsesside matemaatiliste väljendustena diferentsiaalvõrrandisüsteemid.

Võttes arvesse, et uurimisele kuulub reguleerimisprotsesside dünaamika, jätame, nagu seda tavaliselt tehakse, seadme võrrandi lihtsustamiseks ära need tegurid, mis iseloomustavad isereguleerimist, arvates nad püsivuse tagavarasse.

Seega on seadme võrrand järgmine:

$$\varphi' = \frac{1}{T_{L_1}} v_1 + \frac{1}{T_{L_2}} v_2 + \frac{1}{T_k} v_3 - \frac{1}{T_a} \lambda.$$

Primaar- ja sekundaarõhu ning kütuse kulu sõltuvad nende reguleerimiseseadiste asendite muutusest. Tähistame primaar- ja sekundaarõhu ning kütuse hulga reguleerimiseseadiste asendite muudatusi vastavalt  $m_1$ ,  $m_2$  ja  $m_3$ :

$$L_1 = f_1(m_1); \quad L_2 = f_2(m_2) \quad \text{ja} \quad B = f_3(m_3), \quad \text{siit saame}$$

$$\Delta L_1 = \frac{\partial L_1}{\partial m_1} \Delta m_1; \quad \Delta L_2 = \frac{\partial L_2}{\partial m_2} \Delta m_2 \quad \text{ja} \quad \Delta B = \frac{\partial B}{\partial m_3} \Delta m_3.$$

Jagame kõiki võrrandeid vastavalt suurustega  $L_{1 \max}$ ,  $L_{2 \max}$  ja  $B_{\max}$  ning korrutame ja jagame võrrandite paremaid pooli vastavalt  $m_{1 \max}$ ,  $m_{2 \max}$  ja  $m_{3 \max}$ . Saame

$$\frac{\Delta L_1}{L_{1 \max}} = \frac{\partial L_1}{\partial m_1} \cdot \frac{m_{1 \max}}{L_{1 \max}} \cdot \frac{\Delta m_1}{m_{1 \max}},$$

$$\frac{\Delta L_2}{L_{2 \max}} = \frac{\partial L_2}{\partial m_2} \cdot \frac{m_{2 \max}}{L_{2 \max}} \cdot \frac{\Delta m_2}{m_{2 \max}},$$

$$\frac{\Delta B}{B_{\max}} = \frac{\partial B}{\partial m_3} \cdot \frac{m_{3 \max}}{B_{\max}} \cdot \frac{\Delta m_3}{m_{3 \max}}$$

või

$$v_1 = k_1 \mu_1, \text{ kus } \frac{\Delta m_1}{m_{1 \max}} = \mu_1 \text{ ja } \frac{\partial L_1}{\partial m_1} \cdot \frac{m_{1 \max}}{L_{1 \max}} = k_1,$$

$$v_2 = k_2 \mu_2, \frac{\Delta m_2}{m_{2 \max}} = \mu_2 \text{ ja } \frac{\partial L_2}{\partial m_2} \cdot \frac{m_{2 \max}}{L_{2 \max}} = k_2,$$

$$v_3 = k_3 \mu_3, \frac{\Delta m_3}{m_{3 \max}} = \mu_3 \text{ ja } \frac{\partial B}{\partial m_3} \cdot \frac{m_{3 \max}}{B_{\max}} = k_3.$$

$k_1, k_2$  ja  $k_3$  on tegurid, mis iseloomustavad vastavalt primaar- ja sekundaarõhu ning kütuse hulga muutust seoses nende reguleerimiseadiste asendite muutusega. Kui nimetatud sõltuvused on lineaarsed (mida nad tegelikult ligikaudu ongi), siis loeme, et  $k_1 = k_2 = k_3 = 1$ .

Primaarõhu, sekundaarõhu, auru ja kütuse hulkade muutuste ning nende hulka mõõtvate tundlike elementide asendite muutuste vahel on sõltuvus:

$$\xi_{L_1} = n_1 v_1, \quad \xi_{L_2} = n_2 v_2, \quad \xi_B = n_3 v_3 \text{ ja } \xi_\lambda = n_4 \lambda.$$

Kuna sõltuvus on ligikaudselt lineaarne, võib ka siin märkida, et

$$n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 1.$$

Tavaliselt toimub katla reguleerimine nn. «libiseva» režiimi järgi. Seda võetakse arvesse ka käesolevas töös. Matemaatiliselt väljendub see selles, et teenurite võrrandis võrdub võrrandi parem pool nulliga.

Skeemis «a» tuleb uurimisele järgmine võrrandisüsteem:

$$\varphi' = \frac{1}{T_{L_1}} \mu_1 + \frac{1}{T_{L_2}} \mu_2 + \frac{1}{T_k} \mu_3 - \frac{1}{T_a} \lambda - \text{seadme võrrand;}$$

$$T_{S_3} \mu_3' = \text{sign}(\zeta_1 - \xi_1) - \text{kütuse regulaatori teenuri võrrand;}$$

$$\delta_1 \xi_1 + \varphi = 0 - \text{ideaalse kütuse regulaatori võrrand;}$$

$$T_{i_1} \xi_1' + \xi_1 - T_{i_1} \mu_3' = 0 - \text{kütuse regulaatori isodroomi võrrand;}$$

$$T_{S_2} \mu_2' = \text{sign}(-\psi_4 + \xi_4 + \lambda) - \text{sekundaarõhu regulaatori teenuri võrrand;}$$

$$T_{i_k}^* \psi_4' + \psi_4 - \delta_{i_k} T_{i_k}^* \mu_2' = \mu_2 - \text{isodroom-korrektori võrrand;}$$

$$\mu_1 = (1 - \delta_2) \mu_2 - \text{sekundaar- ja primaarõhu suhte regulaatori võrrand;}$$

$$T_{i_2} \xi_2' + \xi_2 - T_{i_2} \mu_3' = 0 - \text{kütuse regulaatorilt tema isodroomi kaudu sekundaarõhu regulaatorile edasiantud kaduimpulsi võrrand.}$$

Kuna pneumaatilise isodroom-korrektori aeg  $T_{i_k}^*$  on väike suurus, võrrandis seadme ajakonstandiga ( $T_{i_k}^* = 5 \div 10$  sek.), siis jätakse see tähele panemata.

Skeemis «b» tuleb uurimisele järgmine võrrandisüsteem

$$\varphi' - \frac{1}{T_{L_1}} \mu_1 - \frac{1}{T_{L_2}} \mu_2 - \frac{1}{T_k} \mu_3 = -\frac{1}{T_a} \lambda;$$

$$T_{S_3} \mu_3' = \text{sign}(\xi_1 - \xi_1);$$

$$\delta_1 \xi_1 + \varphi = 0;$$

$$T_{i_1} \xi_1' + \xi_1 - T_{i_1} \mu_3' = 0;$$

$$T_{S_2} \mu_2' = \text{sign}\left(\lambda - \mu_2 + \frac{\lambda^*}{\delta_p}\right);$$

$$T_{i_k} \lambda^{*'} + \lambda^* - T_{i_k} \lambda' = 0 \text{ — sekundaarõhu kaduvimpulsi võrrand auru kulust;}$$

$$\mu_1 = (1 - \delta_2) \mu_2,$$

kus  $\lambda^*$  — suhteline kulumuutuse impulss regulaatori tundlikus elemendis.

Analoogiliselt eelmistega uuritakse skeemis «c» järgmist võrrandisüsteemi:

$$\varphi' = \frac{1}{T_{L_1}} \mu_1 + \frac{1}{T_{L_2}} \mu_2 + \frac{1}{T_k} \mu_3 - \frac{1}{T_a} \lambda$$

$$T_{S_2} \mu_2' = \text{sign}(\xi_1 - \xi_1) \text{ — sekundaarõhu regulaatori teenuri võrrand;}$$

$$\xi_1 + \frac{1}{\delta_1} \varphi - \frac{1}{\delta_p} \lambda^* = 0 \text{ — sekundaarõhu regulaatori võrrand;}$$

$$T_{i_k} \lambda^{*'} + \lambda^* - T_{i_k} \lambda' = 0$$

$$T_{i_1} \xi_1' + \xi_1 - T_{i_1} \mu_2' = 0 \text{ — sekundaarõhu regulaatori isodroomi võrrand;}$$

$$T_{S_3} \mu_3' = \text{sign}(\xi_3 - \xi_3) \text{ — kütuse regulaatori teenuri võrrand;}$$

$$T_{i_3} \xi_3' + \xi_3 - T_{i_3} \mu_3' = 0 \text{ — kütuse regulaatori isodroomi võrrand;}$$

$$\delta_3 \xi_3 + v_a = 0 \text{ — ideaalse kütuse regulaatori võrrand;}$$

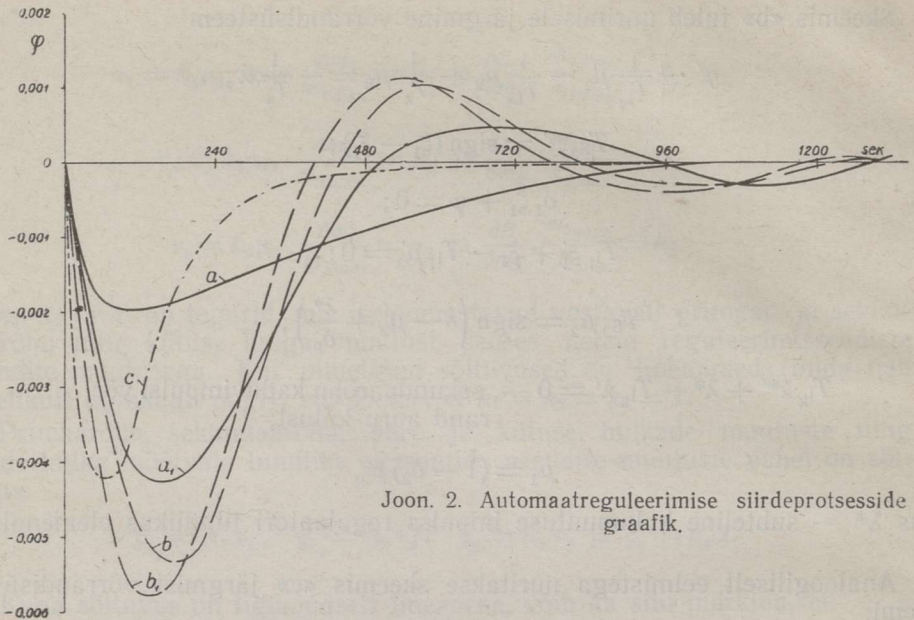
$$v_a = 0,765 \mu_1 + 1,435 \mu_2 - \mu_3 \text{ — võrrand, mis iseloomustab vaba hapniku muutust Tallinna Elektri- jaama katla nr. 6 suitsugaa-sides;}$$

$$\mu_1 = (1 - \delta_2) \mu_2.$$

Nende katla inertstegurite arvuliste väärtuste ning regulaatorite justeerimise juures

$$\delta_1 = \delta_3 = 0,1; T_{i_1} = 100 \text{ sek.}; T_{i_3} = T_{i_2} = 80 \text{ sek.}; \delta_p = 0,53; T_{i_k} = 50 \text{ sek.},$$

on saadud siirdeprotsessid kõikide skeemide jaoks, mis on kujutatud joonisel 2.



Joon. 2. Automaatreguleerimise siirdeprotsesside graafik.

### Valitud skeemide võrdlev analüüs

Reguleerimissüsteemide püsivuse tingimus on küll vajalik, kuid kaugeltki mitte küllaldane nende praktiliseks kasutamiseks. Reguleeritava parameetri suur kõrvalekaldumine siirdeprotsessis ning selle protsessi pikaajaline kestus teevad automaatreguleerimise tihti kasutamiskõlbmatuks. Reguleerimisprotsessi kvaliteedi hinnangut võib anda kas otsesel või kaudsel meetodil. Esimesel juhul lahendatakse valitud skeemi diferentsiaalvõrrandisüsteemid ja esitatakse saadud lahendid graafikuna. Teisel juhul on kvaliteedi hindamise aluseks a) karaktervõrrandi juurte asetus kompleksitasapinnas, b) süsteemi sageduskarakteristike omadused või c) integraalne kriteerium. Otsene kvaliteedi analüüs on täpsem, sest ta võimaldab saada head ülevaadet siirdeprotsessist. Seda meetodit kasutatakse ka käesolevas töös.

Nagu graafikust näha (joon. 2), on auru kulu järsul muutusel 10% võrra kõige suurem parameetri kõrvalekaldumine skeemil «b» ( $T_{ik} = 50$  sek., kõver «b»), kõige väiksem aga skeemil «a» ( $T_{i_2} = 80$  sek., kõver «a»), kusjuures mõlemal on kütuse hulk reguleeritud auru rõhu järgi. (Kuna seadme inertsus on kütuse osas võrdlemisi suur, siis pole täiendavat impulssi kas auru kulu muutuse kiiruse, rõhu muutuse jne. järgi kütuseregulaatorisse sisse toodud ning ühtluse mõttes on küllaldane vaadelda kütuseregulaatorit üheimpulsilise regulaatorina.) Mõõduandvaks sel puhul on sekundaarõhu reguleerimisviis. Sekundaarõhk reguleeritakse skeemis «a» kolmeimpulsilise regulaatoriga auru kulu, õhu kulu ja kaduvimpulsiga kütuse reguleerimisseadise asendi järgi; skeemis «b» on aga nimetatud kaduvimpulss asendatud kaduvimpulsiga auru kulu muutuse kiiruse järgi. Võrreldes neid skeeme, osutus skeem «a» kvaliteedilt paremaks skeemist «b», kui kaduvimpulss kütuse reguleerimisseadise asendi järgi võeti  $T_{ik} = 80$  sek., aga auru kulu muutuse kiiruse järgi  $T_{ik} = 50$  sek.

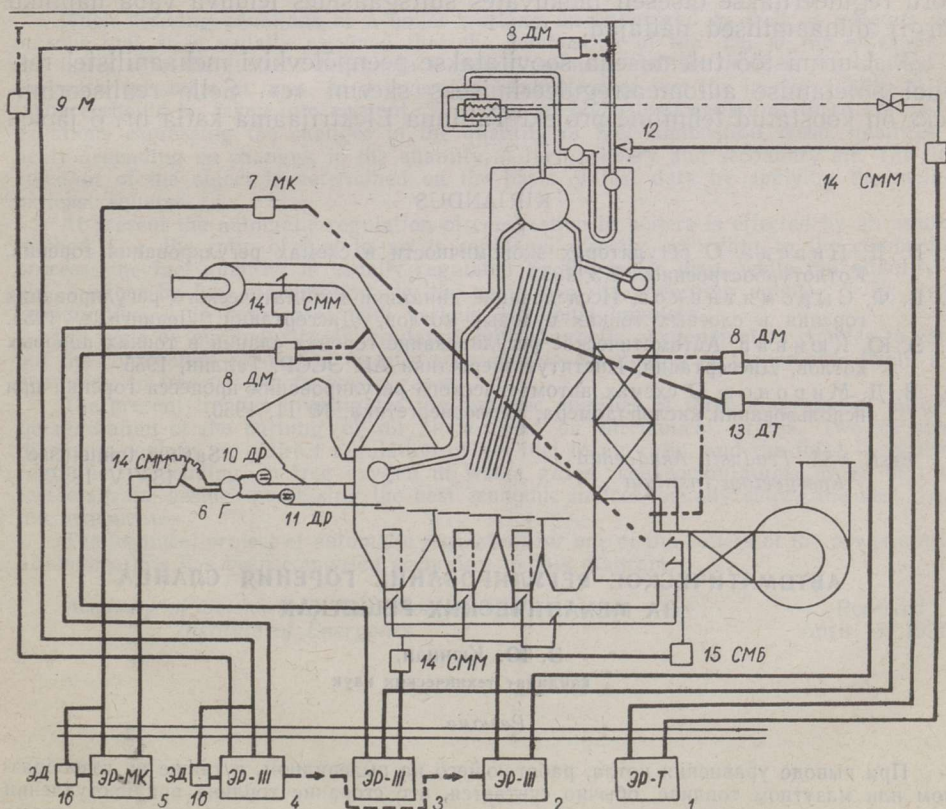
Millist mõju avaldab  $T_{ik}$  suurus siirdeprotsessile, seda näitab võrdluseks kujutatud sama skeemi siirdeprotsess (kõver «b<sub>1</sub>»), kus  $T_{ik} = 0$ , s. t.



on loobutud impulsist auru kulu muutuse kiiruse järgi. Näeme, et sel puhul muutub kõvera kuju üldiselt vähe, kusjuures — nagu võiski arvata — suurenevad parameetri maksimaalne kõrvalekaldumine ja reguleerimisaeg. Kui aga skeemis «a» vähendada impulsi tugevust kütuse reguleerimiseasendi muutuse järgi ( $T_{i_2} = 10$  sek., kõver «a<sub>1</sub>»), siis muutub aperioidiline siirdeprotsess kustuv-võnkuvaks. Kui  $T_{i_2} = T_{i_k} = 0$ , siis on skeemid «a» ja «b» identsed. Kaduvimpulsi tugevnemine skeemis «a» mõjub siirdeprotsessi kvaliteedile märgatavamalt kui skeemis «b», kusjuures mõlemal juhul selle tugevnemine vähendab parameetri maksimaalset kõrvalekaldumist. Sellest järeldame, et dünaamikas on skeemil «a» eeliseid skeemi «b» ees.

Mis puutub skeemide «a» ja «c» omavahelisse võrdlusse, siis võib skeemil «a» küllalt suure  $T_{i_2}$  puhul olla parameetri kõrvalekaldumine küll väiksem kui skeemil «c», kuid reguleerimisaeg on tal suurem. Seega on skeem «c» dünaamilisest aspektist parem skeemist «a», sest tema puhul toimub auru rõhu taastamine kiiremini. Pealegi jääb skeemi «c» puhul reguleerimisaeg lühemaks kui skeemidel «a» ja «b», kuigi suureneb maksimaalse parameetri kõrvalekaldumine siirdeprotsessi kustuv-võnkuvaks muutmisel.

Parimad dünaamilised näitajad on seega skeemil «c», kus kütuse ja õhu vahekorid reguleeritakse otseselt lahkuvate suitsgaaside vaba hapniku sisalduse järgi. Samuti on skeem «c» parim põlemisprotsessi ökonoomilise näitaja poolest. Selle skeemi montaažskeem elektronregulaatoritega on toodud joonisel 3.



Joon. 3. Aurukatla põlemisprotsessi automaatreguleerimise montaažskeem (skeem «c»).

## Kokkuvõte

1. Põlemisprotsessi täieliku mehhaniseerimise puhul on võimalik rakendada põlemise automaatset reguleerimist ka põlevkivi põletamisel kihina mehaanilistel restidel.

2. Mehaanilistel restidel peenpõlevkivi põletamise koldeprotsessi uurimise tulemusena koostati nii selle kolde kui ka katla dünaamika võrrandid, mille tegurite arvulised väärtused määrati kindlaks katseliselt Tallinna Elektriijaama katla nr. 6 jaoks, kasutades vähimate ruutude meetodit.

3. Kolde põlemisprotsessi automaatse reguleerimise võimaluste uurimiseks valiti kolm skeemi, milledest kaks on kütuse ja õhu hulkade vahetõhude kaudse reguleerimisega, kolmas aga otsese reguleerimisega liigõhuteguri järgi.

4. Kõigi kolme skeemi kohta koostati diferentsiaalvõrrandisüsteemid. Vaadeldes reguleerimise «libisevat» režiimi, lahendatakse süsteemid uuritava parameetri — auru rõhu muutuse suhtes ning kõikide skeemide ajakarakteristikad kujutatakse graafikuina ühisel joonisel.

5. Uurimisele võeti valitud skeemide dünaamilised omadused, kuna põlemisprotsessi automaatreguleerimise ökonoomne külg ei vaja uurimist, sest skeemil «с» on ökonoomseid eeliseid teiste ees, mida pealegi on juba küllaldaselt käsitletud vastava-alases kirjanduses.

6. Teoreetilisel uurimisel selgus, et võrreldes skeemidega «а» ja «b» on parimad dünaamilised näitajad skeemil «с»; s. t. et peale ökonoomilise paremuse on paremad ka reguleerimissüsteemi (kus õhu ja kütuse vahetõhude reguleeritakse otseselt lahkuvates suitsgaasides leiduva vaba hapniku järgi) dünaamilised näitajad.

7. Uurimistöö tulemusena soovitatakse peenpõlevkivi mehaanilistel restidel põletamise automaatreguleerimiseks skeemi «с». Selle realiseerimiseks on koostatud tehniline projekt Tallinna Elektriijaama katla nr. 6 jaoks.

## KIRJANDUS

1. В. Д. Пивень, О регуляторах экономичности в схемах регулирования горения, Котлотурбостроение, № 3, 1953.
2. В. Ф. Сыромятников, Исследование динамики автоматического регулирования горения в слоевых топках судовых котлов, Диссертация, Ленинград, 1954.
3. Э. Ю. Кюннап, Автоматическое регулирование горения сланца в топках паровых котлов, Диссертация, Институт энергетики АН ЭССР, Таллин, 1955.
4. В. Д. Миронов, О схемах автоматического регулирования процесса горения при использовании кислородомера, Теплоэнергетика, № 11, 1956.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse  
18. IV 1957

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СЛАНЦА НА МЕХАНИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ

Э. Ю. Кюннап,  
кандидат технических наук

### Резюме

При выводе уравнения котла, работающего на пылевидном, а также на газообразном или мазутном топливе, обычно считается, что сгорание топлива при поступлении его в топку происходит мгновенно и все тепло передается воде или пару сразу. При слоевом сжигании топлива необходимо учесть инерционность топки. К обычным уравнениям котла по нагрузке прибавляются еще уравнения, выражающие изменение коли-

чества сгорания топлива (resp. количества тепла) в зависимости от изменения количества топлива, первичного и вторичного воздуха. Времена разгона объекта определяются на основании опытных данных путем применения метода наименьших квадратов.

Автоматическое регулирование горения в паровых котлах осуществляется в настоящее время косвенным методом, т. е. соотношение топлива и воздуха регулируется непосредственно по процессу горения; количество топлива обычно регулируется по нагрузке котла, а количество воздуха либо по расходу топлива (по положению его регулирующего органа), либо по расходу пара, причем в обоих случаях с различными дополнительными импульсами.

Выпуск нашей промышленностью регуляторов с магнитным кислородомером позволяет осуществить регулирование горения непосредственно по качеству самого процесса, т. е. по свободному кислороду в уходящих газах.

В данной работе исследуются динамические качества трех схем автоматического регулирования горения мелкого сланца на механических решетках, из которых две схемы — с косвенным регулированием соотношения топлива и воздуха, а третья схема — с прямым регулированием в зависимости от свободного кислорода в уходящих газах. Как показывают расчеты, кроме наилучших экономических показателей, последняя схема имеет и наилучшие динамические показатели. По этой схеме был также составлен технический проект автоматического регулирования котла № 6 ГРЭС-4 «Эстонэнерго».

*Институт энергетики  
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
18 IV 1957

## AUTOMATIC REGULATION OF OIL SHALE BURNING ON MECHANICAL GRATES

E. Künnap

### Summary

When deriving equations of a boiler working on pulverized as well as gaseous and masout fuel, it is usually assumed that the combustion of the fuel at the entrance of the latter into the furnace takes place instantaneously and the heat is transmitted to the water or steam at once. At a layerwise combustion of fuel the inertia quality of the furnace should be taken into account. To the usual boiler-load equations there are added equations expressing the changes in the quantity of fuel combustion (resp. quantity of heat) depending on changes, in the quantity of fuel, primary and secondary air. The time constant of the object is determined on the basis of test data by applying the method of least squares.

At present the automatic regulation of combustion in boilers is effected by an indirect method, i. e. the ratio of fuel to air is regulated directly according to the combustion process; the fuel quantity is usually regulated by the boiler load, while the quantity of air — either by fuel consumption (by the position of its governing agent), or by steam consumption — in both cases with various additional impulses.

The issue by our industry of regulators with magnetic oxygenometers enables to carry out the combustion regulation directly according to the quality of the process itself, i. e. according to free oxygen in waste gases.

The present treatise investigates the dynamic qualities of three diagrams of automatic regulation of the burning of oil shale fines on mechanical grates. Two of these diagrams contain an indirect regulation of the fuel to air ratio, and the third — a direct regulation depending on free oxygen in waste gases. The computations prove that the last diagram, besides possessing the best economic indices, equally shows the best dynamic exponents.

The technical project of automatic regulation for one of the boilers of the power-station «Estonenergo» has been composed according to this diagram.

*Academy of Sciences of the Estonian SSR,  
Institute of Energetics*

Received  
April 18, 1957