

DOBOS SZÉNPORTŰZELÉSŰ KAZÁNOK TERHELESSZABA-

LYOZÁSÁNAK NÉHÁNY KÉRDESE

Vámos Tibor

DOBOS SZÉNPORTÜZELÉSŰ KAZÁNOK TERHELESSZABÁ-
LYOZÁSÁNAK NÉHÁNY KÉRDÉSE

Irta:
Vámos Tibor

TARTALOMJEGYZÉK

	Oldal
Előszó.	3
Bevezető.	5
B.1. A tanulmány tárgya.	5
B.2. A tanulmány szerkezete.	8
1. fejezet.	10
A kazánszabályozás irodalmának rövid össze- foglalása.	10
2. fejezet.	23
A gőztermelés átmeneti jelenségei.	23
2.1. A linearitás vizsgálata	23
2.2. A folyamat jellemzői.	27
2.2.1. A jellemzők értékelése	28
2.3. A teljes hatásvázlat.	41
2.4. A szénelőkészítés átmeneti jelenségei .41	
2.5. Az égés dinamikája.	51
2.6. A hőátadás átmeneti viszonyai	53
2.6.1. A tápvizelőmelegítő.	54
2.6.2. Az elhanyagolások hatása	64
2.6.3. A vitzáplálás változásának be- folyása.	66
2.6.4. A forralórész.	72
2.6.5. A kazánobban lejátszódó jelen- ségek.	77
2.7. A teljes hatásvázlat különböző zava- rójellemzőkre	88
2.8. Az átmeneti függvények	
3. fejezet.	96
Kisminta	96

	Oldal
4. fejezet	104
A mérési módszer.	104
4.1. A frekvenciamódszer és a tranziens válasz	104
4.2. A mérések leírása.	106
4.2.1. A szinuszos jeladó.	107
4.2.2. A regisztrálás módja.	115
4.3. A kazán kapcsolása és üzemviszonyai a mérések alatt.	120
4.4. A mérési pontosság	123
4.5. A mérések kiértékelése	126
4.6. Tranziens hőátadási kisminta	127
5. fejezet	129
A mérési eredmények és a számítások össze- hasonlítása	129
6. fejezet	142
Néhány megjegyzés és javaslat a szabályozó kapcsolására és beállítására.	142
Összefoglaló	155
1.sz. függelék	158
2.sz. függelék	159
Irodalomjegyzék.	162

Előszó

A tanulmány célja a dobos szénportüzelésű kazánok terhelésszabályozásának tervezéséhez és beállításához szükséges dinamikai jellemzők vizsgálata. Ezért ez a munka szabályozástechnikai tárgy, bár kalorikus jellegű technológiai folyamatot elemez. A tanulmánynak nem volt célja a technológiai ismeretek bővítése, hanem minden esetben a kazántechnológia ismert adataira támaszkodott, azt igyekezett reldolgozni a szabályozástechnika eszközeivel és a szabályozástechnika céljaira. Így magyarázható, hogy a téma feldolgozása a Villamos Energetikai Kutató Intézet keretei között folyt, szervesen beilleszkedve az együttműködő energiarendszer szabályozásának nagyobb kutatási témakörébe, villamos alapképzettségű szabályozástechnikus által alkalmazva a modern szabályozástechnikának elsősorban az elektrotechnikából kölcsönzött szemléletét és az átmeneti folyamatok tanulmányozására kidolgozott elméleti és kísérleti vizsgálati módszereket.

A tanulmány nem tartalmaz összefoglaló jelölésgyűjteményt, ugyanis a fizikai jellemzők nagy száma és főleg a sok állandó nem tette lehetővé, hogy egy betűjelölés következetesen csak egy mennyiséget fedjen. Az irodalmi összefoglalóban szereplő képletek megtartották az eredeti cikkben alkalmazott jelöléseket, ami további zavart okozott volna. A tanulmány további fejezeteiben alkalmazott jelölések a lehetőséghez képest megfelelnek az MNOSz 4900-nak, a jó áttekinthetőség érdekében a magyarázatok a levezetések elején szerepelnek.

Előljáróban meg kell említeni, hogy a tanulmány az elméleti vizsgálatok során a mértékhelyes Laplace-transzformáció eszközeit alkalmazta a szabályozástechnikában általában gyakrabban kedvelt Carson-

transzformáltak helyett /tehát az egységfüggvény transzformálja esetünkben maga az egységfüggvény/. Ez a módszer a fizikai szemléletet a dimenziók helyessége következtében nagymértékben elősegíti és a számítások helyességét is áttekinthetőbbé teszi.

A szerző ezen a helyen mond köszönetet a Villamos Energetikai Kutató Intézetnek, amely a nagy anyagi támogatást, segédszemélyzetet, laboratóriumot és műhelyt igénylő munkát lehetővé tette, az Erőmű Tröszt, a Dunai Vasmű Erőműve, az inotai November 7. Erőmű és Borsodi Hőerőmű vezetőségének, akik a kísérleteket az erőművek nagy kazánjain és turbogenerátor egységein sokszor a szűkebb üzemi érdekek félretételével engedélyezték, segédszemélyzettel, műszaki és anyagi segítséggel támogatták, aspiránsvezetőjének, Dr. Ronkay Ferencnek, a műszaki tudományok kandidátusának állandó segítségével, amellyel mind a tanulmány elkészítéséhez szükséges ismeretek elsajátításában, mind a kísérletek kivitelezésében és munkája bírálatában támogatta, Szalay Józsefnek, Csordás Zoltánnak, György Zoltánnak és Helm Lászlónak a VILLENKI kazánszabályozási munkabizottsági tagjainak a tanulmány elkészítésében adott értékes tanácsaiért és a kísérleti eszközök létrehozásában nyújtott segítségért, valamint munkatársának, Rósa Emilnek, a VILLENKI technikusának fáradhatatlan munkáját a sok éjszakázással és egyéb nehézségekkel járó, kimerítő kísérletek végzésében.

Bevezető

B.1. A tanulmány tárgya

A magyar energetikai rendszer mai formájában és az atomerőművek túlsúlyra jutásáig, tehát a következő évtizedekben is hőerőművekre épül. A jelenlegi energiaszolgáltató alapegységek gőzfejlesztői túlnyomó többségükben dobos, szénportüzelésű kazánok. Ez a kazántípus jelenleg a gőzfejlesztő egységek teljesítőképességének kétharmadát jelenti, súlyuk azonban ennél lényegesen nagyobb, mert két, kényszeráramlású kazánokkal épített erőművünk kivételével a más rendszerű kazánok általában nem korszerűek, sőt célszerű üzemeltetési idejük is lejárt, így vagy csak különleges energiahiány esetén működnek, vagy leállításuk már tervbe is van véve. A fentiek miatt a következő években a dobos, szénportüzelésű kazánok súlyaránya még nőni fog és meghaladja az összes beépített teljesítőképesség 75 %-át.

Mivel a dobos, szénportüzelésű kazán hazánkban az erőművi kazánok főtipusa, általános tanulmányozásukon kívül rendkívül fontos dinamikai viselkedésük vizsgálata is. Mivel az ország vízerőművei csak jelentéktelen szerepet töltenek be, az energiatermelés és fogyasztás területén jelentkező valamennyi zavaró hatást elsősorban a dobos, szénportüzelésű kazánokkal kell felvenni. Az energiaszolgáltatás biztonsága az energiatermelés nagyfokú rugalmasságát követeli meg, az elosztás megbízhatóságát rendkívül befolyásolja a váratlan zavarások után fellépő átmeneti jelenségek ismerete. Az energiaszolgáltatás hatásláncában az elosztóberendezések, távvezetékek, generátorok, gőzturbinák, kazánok rendszerében a leglassabb átmeneti jelenségeket mutató, legkevésbé tanulmányozott és a legtöbb nehezen számítható változást adó elem a kazán, pedig éppen az előbbi indokok miatt az energiarendszerben a zavaró hatások

következtében előálló átmeneti jelenségek szempontjából ez a legkényesebb tagja a láncnak.

A hazai energiarendszernek a nemzetközi energiaegyüttműködésbe való bekapcsolódása különösen sürgeti a kazánok átmeneti jelenségeinek tanulmányozását, mert a kooperáló energiarendszerek saját érdekében nem engedhetik meg, hogy a másik fél hosszabb ideig váratlanul vegye őket igénybe, ami azzal a veszéllyel jár, hogy energiaszolgáltatási nehézségek esetén azt a segítséget is megszüntetik, amelyet az állapot megzavarása előtt normálisan adtak. Ennek következtében a hazai rendszernek rendkívül gyorsan, legfeljebb néhány percen belül saját erejéből egyensúlyi állapotot kell teremtenie, ami elsősorban a kazánok átmeneti viselkedésén múlik.

A kazánok dinamikai vizsgálata elengedhetetlenül fontos a szabályozóberendezések tervezése és beállítása szempontjából. A kazán a szabályozóberendezéssel együtt alkotja a zártláncu szabályozási rendszert, ezért megfelelő szabályozást csak a szabályozott szakasznak /tehát a kazánnak/ és a szabályozónak helyes összehangolásával és ami ennek előzménye, a szabályozott szakasz dinamikai tanulmányozásával lehet elérni. A hazai erőművek többségében különböző szabályozó berendezéseket szereltek fel a kazánokhoz, azonban éppen a megfelelő összehangolás, beállítás hiányában azok többsége nem volt üzembehelyezhető, vagy nem működött megfelelően.

A korszerű kazánok tervezői messzemenően figyelembeveszik a kazánok szabályozástechnikai követelményeit is. A jól dolgozó, önműködő kazán a kazántervező és a szabályozástechnikus együttműködéséből születik. A tervezési megfontolások elvi alapját a meglévő kazánokon végzett dinamikai vizsgálatok adják.

Nem egységesek az adatok a kazánok önműködő szabályozá-

sával elérhető gazdasági haszon megítélésében. Az üzembiztonság fokozásának pénzben történő értékelése igen bizonytalan. A legátfogóbb adatközlés szovjet forrásokból áll rendelkezésre, amelyek különböző tapasztalatok és mérőszámok alapján az önműködő szabályozásra való áttérés hatásfokjavító eredményét 0,4 - 2,5 %-ra becsülik. [1], [2], [3].

Az elmondottak kezdeményezték azt a nagyszabású kísérleti és elméleti munkát, amely az utolsó 15 évben az egész világon a kazánok átmeneti jelenségeinek vizsgálatát tűzte ki célul. Ezek a kutatások a különböző országokban szokásos kazántípusokra vonatkoztak. Számos részeredményt szolgáltatottak, azonban a kazánszabályozások végleges és általános elméletét még nem kísérelték megalkotni. A főfeladat az, hogy a különböző körülmények által indokolt, igen eltérő kazántípusokra, teljesítmény, gőzjellemző, tüzelőanyag viszonyokra kellő kísérleti adat álljon rendelkezésre, melyeket megfelelő elméleti megfontolásokkal általánosítani lehet. Ezért a nagy kazánépítők és üzemeltetők vizsgálatai mellett sem mondható feleslegesnek a hazai erőműveink legfőbb kazántípusainak tanulmányozása, ami hasznos irányelveket adhat a jelenleg fejlesztés alatt álló hazai automatikagyártásnak és kazánszabályozó rendszerfejlesztésnek.

A fenti szempontok vezettek a tanulmány tárgyának kiválasztásához. A tanulmány igyekszik szigorúan ragaszkodni a cimben foglalt célkitűzéshez és kizárólag a terhelésszabályozás kérdéseivel foglalkozik, a kazánszabályozás egyéb részleteit csak olyan mértékben érinti, amennyiben az a terhelésszabályozással elválaszthatatlanul összefügg. Az energiarendszer szabályozása szempontjából ugyanis ez az elsődleges kérdés, a többi /gőzhőfok, táplálás, stb./ nem tartozik ennek a tanulmánynak keretei közé.

B.2. A tanulmány szerkezete

A tanulmány tárgyát kitűző és megindokló bevezető után a kazánszabályozás eddigi eredményeit ismertető irodalom összefoglalása következik, különös figyelmet szentelve a hazai szakközvélemény előtt a hozzáférhetőség nehézségei miatt kevésbé ismert közleményekre és azokra a művekre, amelyek lényeges forrásmunkaként szerepeltek;

a második fejezet a gőzfejlesztés átmeneti jelenségeinek elméleti vizsgálatát tartalmazza, foglalkozik a jelenségek lineáris és autonóm jellegével, a gőzfejlesztés szabályozástechnikai hatásvázlatával és a hatásvázlat egyes elemeinek átviteli függvényeivel;

a harmadik fejezet a második fejezetben levezett átviteli függvényekkel történő számításokat megkönnyítő modellszámológépet tárgyal;

a negyedik fejezet a kazánok dinamikai jellemzőinek mérésére végzett kísérleti módszereket ismerteti;

az ötödik fejezet összefoglalja a kísérletek eredményeit és összehasonlítja a második fejezet elméleti számításainak adataival;

a hatodik fejezet az elméleti és kísérleti vizsgálatok alapján néhány megjegyzést és javaslatot tartalmaz a kazánok terhelésszabályozásának megjavítására;

a függelékek egyes részletszámításokat közölnek;

a tanulmányt összefoglaló, irodalomjegyzék és tartalomjegyzék zárja.

Az egyes kérdések elemzése a kitűzött tárgyon belül sem egyenletesen részletes, a tanulmány elsősorban azokkal a kérdésekkel kívánt foglalkozni, melyek a vonatkozó irodalomban nem szerepelnek, így részben újabb eredménynek, részben a hazai viszonyokra érde-

kes adatnak tekinthetők. Az értekezés csak olyan ismert részleteket tartalmaz, amelyeket az összefüggések teljessége megkíván. A tanulmány újabb eredményeit az összefoglaló tömöríti.

1. fejezet

A kazánszabályozás irodalmának rövid összefoglalása

A kazánok átmeneti jelenségeivel viszonylag nem régóta foglalkoznak. A régi építésű kazánok általában igen nagy tárolóképesseggel rendelkeztek, így a terhelésingadozásokat nagy víztér rovására könnyen fedezték. A hálózati és fogyasztó viszonyok sem kívánták meg a kazánjellemzők önműködő szabályozását. A viszonylag kis kazánegységek, az olcsó munkaerő szintén az automatizálás ellen szóltak. Ezen kívül az önműködő szabályozás készülékei sem voltak kellőképpen üzembiztosak ahhoz, hogy a kazánokat rábízassák. A fokozott igények a víztér csökkenésével, az egységteljesítmények növekedésével, a portüzelés bevezetésével, a fogyasztói igények fokozódásával léptek fel. Ennek ellenére már a XX. század elején voltak próbálkozások gőzkazánok tüzelésének automatizálására és ezzel párhuzamosan megindult, ha lassan is az átmeneti jelenségekkel foglalkozó elméleti munka. Az első és sok szempontból ma is megbecsülendő összefoglaló mű T.Steiné volt [4], amely az ebben az időben szokásos kazántípusokra alkalmazta a szabályozásméletnek akkor rendelkezésre álló módszereit, ismerteti a szabályozókat és azok működési elvét, dinamikáját, kitér egyes stabilitási kérdésekre is. Természetesen sem a frekvenciamódszer, sem a modern szabályozástechnika más, ma ismert eszköze nem állott rendelkezésére, és a kazánok belső folyamataira vonatkozó ismeretek akkori hiánya is érezteti hatását a művön. A 30-as években jelentős előrehaladás volt a kazánok rugalmasságára vonatkozó vizsgálatok területén, amelyeknek eredményei főleg az Archiv für Wärmewirtschaft [5], [6], [7], [8], [9] hasábjain jelentek meg, to-

vábbá számottevő munka volt Rosahl könyve [10]. Ezek a mérések középnyomású kazánokra ma is használható tájékoztató értéket adnak, bár a tárolóképeség számítására ma már pontosabb módszerek állnak rendelkezésre, mint az említett művekben ismertetett eljárások. Különösen jelentős, hogy már 1930-ban leszögezték [5],[6], hogy a szénportüzelésű kazánok időállandói nincsenek lényegesen messze a velük kapcsolt turbinák szabályozási állandóitól.

Pendkívül jelentős lépés volt P.Profos munkája [10], amelyben először alkalmazta a frekvenciamódszert ipari szabályozott szakasz vizsgálatára. A mű a frekvenciamódszer és a Nyquist-kritérium általános ismertetése után a tulhevitő hőfokszabályozására vonatkozó számításokkal foglalkozik. Profos az (5) és (6)-hoz hasonló alapegyenletekből indul ki, ezekben azonban a zavarófüggvény nem szerepel, a zavarást később, egyszerűsítő feltételek után vezeti be a számításaiba. Az átviteli függvények számos változót /például sebesség, hőátadás/ figyelmen kívül hagynak, azonban a levezetések alapgondolata és menete valamennyi korszerű számítás kiindulópontja. A kapott átviteli függvények eléggé bonyolultak, bizonyos hasonlóságot mutatnak a (14) egyenlettel, így gyakorlati felhasználásukhoz jelentős számítási munkára van szükség. Profos munkája befejezéséül ismerteti a Sulzer gyár laboratóriumában felállított hidraulikus elven működő szabályozási modellt. A Sulzer gyár szabályozástechnikusai Profos vezetésével ezzel a munkával uttörő szerepet vállaltak, az elméleti és kísérleti munka összekapcsolásával elsőnek készítettek olyan kazánokat, amelyeknek szabályozása minden szempontból kielégítő volt. Profos a további eredményekről, melyek a tüzelésszabályozás, kényszeráramlású kazánok dinamikus viszonyai, stb.

kérdésekre terjedtek ki, az utóbbi években több dolgozatot közölt [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], azonban ezek csak általános és végeredményeket ismeretnek, a változások belső dinamikájára nem térnek ki részletesen.

Elsősorban Profos munkája nyomán fejlesztette ki az egyenáramu és ellenáramu hőcserélők általános dinamikai egyenleteit Y. Takahashi [17], [18]. A kapott igen bonyolult átviteli függvények egyszerűsítésére [19]-ben tesz javaslatot. Ez az egyszerűsítés más megfontolásokból indul ki, mint a 2.6.1. fejezeté, elsősorban a hatványsorba fejtés módszerével dolgozik, az egyszerűsítés alapjául szolgáló végeredmény is különbözik a (14) egyenlettől, mivel Takahashi egyenletei elsősorban a hőcserélőkre alkalmazhatók és csak alapfontolataiban használhatók fel kazánok számításánál.

A kazánszabályozó berendezéseket gyártó nagyvállalatok a Sulzer gyárhoz hasonlóan sokat foglalkoztak a korszerű kazánszabályozási rendszerek kialakításával és a szabályozóberendezés és a kazán összehangolásának megoldásával. Ezekről a kísérletekről azonban viszonylag kevés adatot közölnek, az eredményeket és elméleti vizsgálatokat gyári titokként kezelik, a megjelent cikkek elsősorban általános következtetéseket és a gyár szabályozóinak leírását tartalmazzák. Ilyen jellegűek Wunsch közlései [20], melyeket később az Askania Warte hasábjain egészített ki, Samal cikkei [21], [22], Schröder, Oetker és Max-Ulrich Büchting munkái [23], [24], [25], [26], [27].

A nyugati irodalomban a már idézett, háboru előtti vizsgálatokon túl, ipari objektumokon átmeneti fo-

lyamat vizsgálatára lényeges közlemény Liébaut cikke [28], amely vizsgálati módszerében már bizonyos átmenetet jelent a frekvenciamódszer felé. A folyamat elméleti megközelítése igen leegyszerűsítő, viszont alkalmas a cikk további részében elemzett szabályozási kapcsolat eredményességének vizsgálatára. Ezzel kapcsolatban megállapításai igen értékesek, rámutat a tüzelésnek a gőznyomásról és gőztermelésről egyidejűleg kapott impulzusokkal történő szabályozása előnyeire. Több ipari kazánon végzett mérési eredményt is közöl. Ugyancsak lényeges adatokat tartalmaz M. Andritzky cikke [29]. A kísérleteket 1938-1947-ig egy Siemens rendszerű tüzelésszabályozó beállításával végezték, csak az átmeneti függvényre vonatkoztak, tehát a frekvencia módszert még nem alkalmazták. Ezeket a kísérleteket a nyugati irodalom még hosszú ideig idézte, ami arra mutat, hogy hasonló mérések ritkák voltak.

A frekvenciamódszerhez közelebb álló eljárással dolgozott J.F. Clifton [30], aki a Kent gyár részére különböző periódusu szögletjelekkel végzett méréseket, elsősorban a tulhevitő és hőfokszabályozó vizsgálatára. A módszer kritikáját a 4.1. fejezetben ismertetjük.

Különösen értékes munkát végeztek a szovjet kutatók a kazánok átmeneti folyamatainak feltárásában. Sajnálatos módon Magyarországon egyedül [31] ismeretes, egy 1950-ben megjelent könyv fordítása. A könyv megjelenése óta a szovjet tudomány rendkívül komoly eredményeket ért el, maguknak a szerzőknek is több lényeges közleménye [32], [33] látott napvilágot, azonban a mű megjelenése idején sem tükrözte a szovjet kazánszabályozási technika akkori állását. Elméleti része egy korábban megjelent és magyarra le nem

fordított munka összefoglalása [34] lényegében véve nem tárgyalja a kazán belső átmeneti folyamatait, csak különböző feltételekből kiindulva, elsősorban a szabályozók viselkedésével foglalkozik, a frekvenciamódszer felhasználása nélkül. Az ismertetett szabályozóelemek egy részét is ma már a fejlődés túlhaladta.

A szovjet kutatások elsősorban két intézetben, az Összövetségi Hőtechnikai Intézetben /VTI/ és a Központi Kazánturbina Intézetben /CKTI/ folynak. Rendkívül jelentős és elméleti szigorúságban ma sem felülmúlt munka Sumszkajaé [35], [36], [37], [38] a dobos kazánok nyomásváltozásának és szintváltozásának dinamikájáról. Sumszkaja kiindulva a kazándobra felírható anyag- és energiamérlegekből meghatározza a nyomásváltozás sebességének

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{Q_T + \left(\frac{\delta r''}{\delta' - \delta''} - \Delta i \right) G' - \frac{r \delta'}{\delta' - \delta''} G''}{V' \left(\delta' \frac{\partial i'}{\partial p} + \frac{r \delta''}{\delta' - \delta''} \cdot \frac{\partial \delta'}{\partial p} \right) + (V - V') \left(\frac{r \delta'}{\delta' - \delta''} \cdot \frac{\partial \delta''}{\partial p} + \delta'' \frac{\partial i''}{\partial p} \right) + c_M G_M \frac{\partial T''}{\partial p}}$$

egyenletét,

ahol

- p a doبنىomás, ata
- t idő, sec
- Q_T a kazán forrcsövein át a kazánvizzel közölt és fűtőanyagtól származó hő /a tápvizelőmelegítőt és tulhevitőt nem számítva/, kkal/sec
- G' tápvizmennyiség, kg/sec
- G'' gőzelvétel, kg/sec
- V a csövek és kazándob belső térfogata, m³

V' a kazánviz térfogata, m^3

G_M a forrcsövek, kamrák, dobok "aktív" súlya, kg /az a súly, amely a telített gőz hőfokváltását befolyásolja, kb. 30 %/

δ', δ'' a víz és gőz fajtérfogatai, kg/m^3

r rejtett hő, kkal/kg

i_1 a tápvizelőmelegítőből a kazánba lépő víz enthalpiája, kkal/kg

$\Delta i = i - i_1$ a kazánba lépő víz alulhevitettsége

i'' a száraz telített gőz enthalpiája

C_M a fém fajhője, kkal/kg, C° ,

továbbá a szintváltozás sebességének

$$\frac{dh}{dt} = \frac{G' - G''}{(\delta' - \delta'')F} - \frac{1}{(\delta' - \delta'')F} \left[V \cdot \frac{\partial \delta''}{\partial p} + V' \left(\frac{\partial \delta'}{\partial p} - \frac{\partial \delta''}{\partial p} \right) \right] \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{1}{F} \frac{dV''}{dt}$$

egyenletét,

ahol

h a vízszint a kazándobban m;

F a dobben az elgőzölgető vízfelület

a cirkulációs viszonyok megváltozásakor. Az egyenletek állandóit számos, különböző teljesítőképességű és különböző nyomású kazánra megadja. A munkával kapcsolatos és a későbbi kísérletek is megerősítették Sumszkája számításait, értékeit ez a tanulmány is kiinduló pontul fogadja el.

A kazánok dinamikájának általános kérdéseivel foglalkozik Bejrah, akinek már 1939-ben megjelent idevontkozó közleménye. [39]. Ez sajnos Magyarországon nem található meg. Bejrah 1953-ban készített jelentésében [40] összegezi a CKTI-ben kialakult számítási módszereket. A dobos kazán nyomásváltozásokkal

kapcsolatos átmeneti viselkedését a

$$T \frac{d\varphi}{dt} = \mu_{\text{tüzelőanyag}} - \mu_{\text{gőz}}$$

egyenlettel írja le,
ahol

T az idő

φ nyomás

μ_t tüzelőanyag táplálás
változása

$\mu_{\text{gőz}}$ gőzelvétel változás

és a T -re egyszerűsítő feltételek figyelembevételével

$$T = \frac{3,6 \cdot v \cdot \gamma \cdot \alpha_1 \cdot p_0}{(D_{\max} - D_{\min})(i_0 - i_{t.v.})}$$

képletet szolgáltatja,
ahol

v a kazánviz térfogata m^3

γ a kazánviz fajsúlya kg/m^3

i_0 telített gőz hőtartalma p_0 nyomáson,
 $kkal/kg$

p_0 névleges nyomás kg/cm^2

$i_{t.v.}$ tápviz hőtartalma $kkal/kg$

$D_{\max} - D_{\min}$ a kazán maximális és minimális terhelésének különbsége a kazán szabályozási tartományában $t/ó$

$\alpha_1 = \left(\frac{di}{dp} \right)_{p=p_0}$ $kkal \text{ cm}^2/kg^2$

i' a forrásban lévő víz hőtartalma
 $kkal/kg$.

Az általános meggondolásokból és a kísérleti eredményekből adódó átviteli függvények segítségével leírja a teljes kazán viselkedését. A cikk számos regisztrátumot is közöl.

Ugyancsak a CKTI eredményeit ismerteti Piveny [41], azonban ezek a közlések Sumszkája művén kívül keveset foglalkoznak a jelenségek belső dinamikájával, így a számítási és kísérleti eredmények összhangja nem eléggé meggyőző.

A kényszeráramlású kazánok átmeneti viszonyait klaszikus módon foglalta össze E.P.Szerov, a MEI /Moszkvai Energetikai Intézet/ -ben folytatott kutatások alapján [42]. Kiindulva a

$$\frac{\partial}{\partial x}(G \cdot i) + F \frac{\partial}{\partial \tau} (\gamma \cdot i) = q$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\omega \gamma) + \frac{\partial \gamma}{\partial \tau} = 0$$

alapegyenletekből,

ahol

G kg/s munkavégző közeg mennyisége

i kkal/kg hőtartalom

F m² fűtőfelület

γ kg/m³ fajsúly

q kkal/ms hőterhelés

τ s idő

ω m/s sebesség

igen szemléletes fizikai képpel alátámasztott levezetések közöl, amelyek viszonylag könnyen kezelhető eredményeket adnak. A fémtömegek tárolóképességét csak a túlhevítő hőmérsékletváltozásával veszi figyelembe. Az átmeneti jelenségeket azonnal időfüggvények alakjában ve-

zeti le, ezért kénytelen számos, a jelen munkánál lényegesen nagyobb mértékű, egyszerűsítő feltételt alkalmazni. A közölt kísérleti eredmények jól egyeznek a számított értékekkel. A közlemény gondolatmenete és módszere, eredményeinek használhatósága a maga nemében ma is egyedülálló az irodalomban.

A VTI-ben rendkívül intenzív munka folyik a kazánok belső dinamikájának vizsgálatára. Ebből a szempontból eddig a legjelentősebb közlemény. A.A.Armand tanulmánya, a nem-stacionárius hőcsere vizsgálatára kazánok egy- és kétfázisú közegeit fűtő felületek számítására [43]. Armand modellkísérleteket végzett számításainak ellenőrzésére és a felvett állandók megállapítására. A számítások kezelhetőségének javítására egyszerűsítő összefüggéseket vezetett le, amelyek azonban jelen munka gondolatmenetétől eltérő jellegűek. Armand és Sumszkája munkásságára támaszkodva Mironov [44], [45], [46] az irodalomban első ízben végzett a teljes kazánon szabályozási vizsgálatokat frekvenciamódszerrel. A kísérleti módszer sok tekintetben hasonlít a jelen munkában ismertetett-hez. Számos kérdést Mironov közvetlen szóbeli közlései alapján oldottunk meg. Lényeges eltérést jelent, hogy a VTI a vizsgálatokat zárt láncu rendszerben végezte, ami körülményeik között több szempontból előnyösebb, mint az általunk alkalmazott, nyílt láncu rendszerre vonatkozó vizsgálatok. A zárt láncu rendszer elemzése több lehetőséget nyújt a külső zavarások kiküszöbölésére és a rendszernek tiszta szinuszos lengő állapotban való tartására. A VTI ennek megfelelően saját rendszerű elektronikus szabályozóját használta fel a kísérleteknél, a szinuszos zavarást az alapjelre vitte rá [47], [48]. Ipari szabályozott szakaszok, első sorban kazánok átmeneti jelenségeinek a frekvenciamódszerrel történő kísérleti vizsgálatát egyébként a

szovjet irodalom tárgyalja legalaposabban [49], bár erről a kérdésről a nyugati irodalomban is igen jelentős közlemények jelentek meg [50], [51], [52].

Mironov elsősorban a kazánok nyomásszabályozó rendszerének viselkedését vizsgálta, gondolatmenetei sok tekintetben fontos támpontot jelentettek, jelen munka készítésénél is. A hőcsere vizsgálatánál elektromos modelltől indul ki, amely azonban nem mindenben tükrözi hűen a valódi viszonyokat. Az egyfázisú szakaszon a hőátadást végén rövidrezárt kábel analógiájával, az eloszlott kapacitások, ellenállások és levezetések számítása alapján tárgyalja. Ez a tárgyalásmód azonban nem nyújt lehetőséget a sebességek figyelembevételére, ugyanezt a feladatot egy angol szerző nem teljesen kielégítő eredménnyel, aktív elemek alkalmazásával igyekezett megoldani [53]. Jelen munka szerzője szerint ez az analógia nem ad a fizikai képnek megfelelő megoldást, az egyszerűsítéssel és elhanyagolással nyert eredmény csak azért ad a mért értékekhez hasonló eredményeket, mert a mérési pontosság és az eredmények reprodukálhatósága a számítási eljárásokétől messze elmarad, így a mérési eredmények nem eléggé megbízható igazolásai a számítási módszereknek. Ez utóbbi megjegyzés természetesen jelen munkára is vonatkozik.

Mironov munkájának különösen értékes és eredeti része az együttműködő kazánok dinamikus jelenségeinek elméleti és kísérleti vizsgálata.

Armand-dal egyidőben végzett számításokat egyfázisú közegeket melegítő felületek vizsgálatára /tápvíz előmelegítő, tulhevitő/ A.A.Talj [54], a moszkvai CKTI munkatársa. Talj kiinduló egyenletei hasonlóak az (5) és

(6) egyenletekhez⁺ és

$$\frac{\partial}{\partial t} i_1 \gamma_1 \frac{\pi d^2}{4} dx = \alpha (T_2 - T_1) \pi d \cdot dx - \frac{\partial}{\partial x} i_1 \gamma_1 w \frac{\pi d^2}{4} dx$$

$$\frac{\partial}{\partial t} i_2 \gamma_2 \delta^x \pi d \cdot dx = -\alpha (T_2 - T_1) \pi d \cdot dx + q \pi d \cdot dx$$

alakúak,

ahol

t	idő	s
x	távolság a cső kezdetétől	m
i	hőtartalom	kcal/kg
T	hőfok	C°
c	fajhő	kcal/kg, C°
γ	fajsúly	kg/m ³
q	hőterhelés	kcal/m ² , s
w	hőhordozó sebessége	m/s
d	cső belső átmérője	m
δ^x	$\delta(1 + \delta/d)$ cső relatív vastagsága,	m
α	hőátadási tényező	kcal/m ² , s, C°

1 indexek a hőhordozóra

2 indexek a csőre vonatkoznak.

A további levezetés során azonban a linearitás feltételei különbözőek, Talj egyszerűsítő feltételei egyszerűbbek és így a kapott átviteli függvények eltérőek. Talj volt az első, aki a hőközvetítő közeg áramlási sebességére vonatkozó átviteli függvényeket is számította. A nyert átviteli függvények számításra alkalmas alakra való hozására nem végez egyszerűsítést Takahashi vagy Armand példájára, hanem az egyébként zárt alakban visz-

⁺Talj tanulmányát a szerző csak a hasonló kiinduló pontu rész számításának befejezése után kapta kézhez.

aza nem transzformálható függvényeket táblázatokban és diagrammban megadott numerikus értékekkel teszi gyakorlati számítások céljaira hozzáférhetővé.

Hasonló jellegű vizsgálatokat végzett I.Sz.Kocsenov [55] a Szovjetunió tudományos akadémiájának energetikai intézetében, azonban a nyilvánosságra hozott közlemény az eredményeket nem diszkutálja részletesen.

Magyarországon kazánszabályozási kérdésekkel tudományos színvonalon elsősorban Szalay József foglalkozott, akinek értékes szóbeli közléseit a tanulmány több kérdésben felhasználta.

A szénportüzelésű kazánok átmeneti jelenségeinek egyik fő hordozójával a szénörlő malmokkal több közlemény foglalkozik. A szovjet cikkek elsősorban a Szovjetunióban leggyakrabban használt típusokkal, az aknás és golyósmalmokkal foglalkoznak [56], [57], [58], [59], [60], [61], [61], [62], [63]. A szénörlőmalmok átmeneti viselkedésének hátterét, ha leegyszerűsítve is és kísérleti adatok közlése nélkül a legáltalánosabban Schneider elemzi [64], eredményeit a szérelő és örlőhatás különválasztásával és különálló tárgyalásával vezeti le. Ezek az eredmények jól egyeznek a szovjet irodalom adataival. Jelen munkában lényegében ezekre az elméleti eredményekre támaszkodtunk, kiegészítve a Magyarországon használatos Raymond, Loesche rendszerű örlőtányéros, KSG típusu ventillátor- és a kalapácsos malmokra vonatkozó saját mérésekkel.

Az irodalomjegyzék valamivel több, mint száz, a témába vágó könyvet, cikket, vagy más jellegű publikációt sorol fel. Ezek egyrésze a folyamat általános ismertető leírásával, másik része az elméleti háttér mellőzésével, kizárólag az automatika készülékezés ismertetésével [64], [74], [80], [81], [82], [86], [87], [88], [89], [90], [91],

[92], [94], [106], [107] , az automatika üzemvitelének problémáival [75], [92] , egyes részletkérdésekkel [72], [73], [76], [77], [98], [102], [105], [108], [110], [111] , a modellezés lehetőségeivel [70], [78], [79], [84], [109] , más alapcikkben megtalálható eredmények összefoglalásával [66], [67], [68], [69], [71], [85], [93], [95], [96], a beállítás módszereivel [83], [97], [99], [100], [101], [103], [104], [112] , a szabályozás kapcsolásával [113], [114] foglalkoznak.

A fenti irodalmi ismertetés elsősorban azokról a munkákról szólt, amelyeket jelen tanulmány lényeges forrásmunkaként használt fel, különös tekintettel azokra a szovjet közleményekre, amelyek a hozzáférhetőség nehézségei miatt a hazai szakemberek előtt általában nem voltak ismeretesek.

2. fejezet

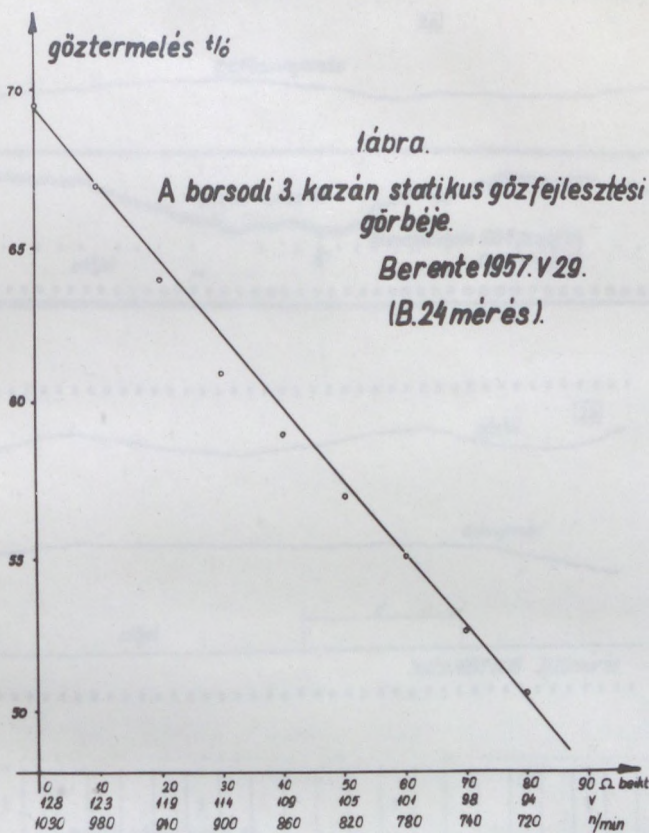
A gőztermelés átmeneti jelenségei

2.1. A linearitás vizsgálata

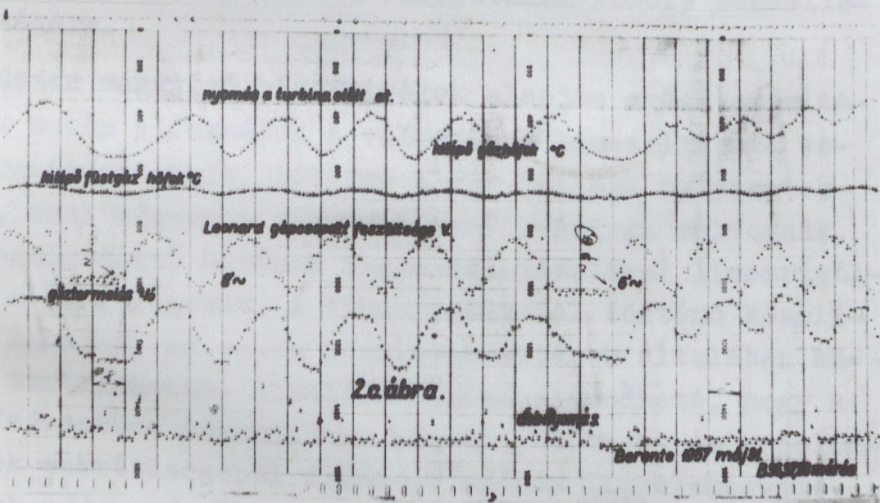
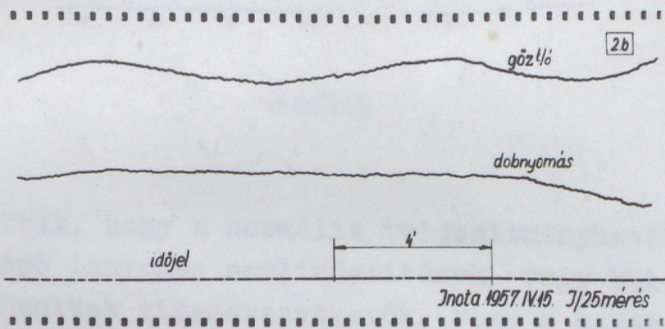
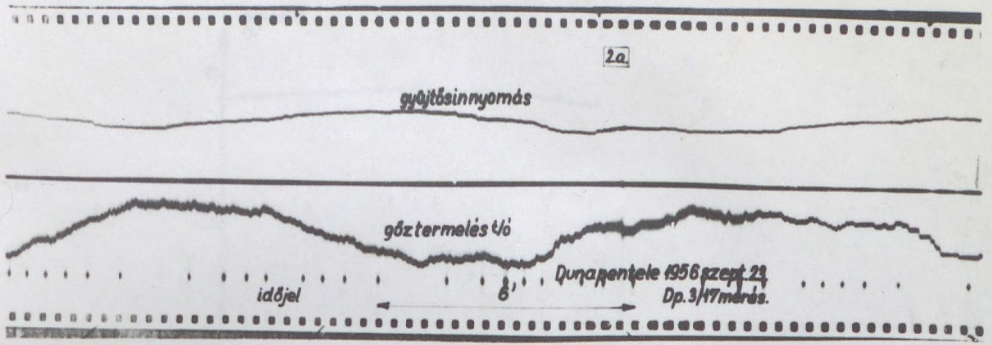
A dobos, szénportüzelésű kazánok vizsgálatánál alapvető felvetés, hogy a jelenségek lineárisan folynak le. Ez a valósággal szemben bizonyos közelítést jelent, azonban abban a szabályozási tartományban, amely a kazán üzemé számára célszerű, jól alkalmazható. A kazán üzemében a terhelhetőség alsó határát általában a tűz folytonossága határozza meg. Bizonyos tüztérhőmérsékleten alul a befuvott szén gyulladása nincs biztosítva. Ez a határ igen változó, azonos kazántípuson belül is erősen függ a huzatviszonyoktól, a kazán állapotától /elpiszkolódás, stb./ és a szén minőségétől. Ez az alsó határ például a dunapentelei kazánoknál a névleges terhelés 55-65 %-a, a borsodi és inotai kazánoknál 35-45 %-a.

A kazán igénybevételének felső határát számos esetben nem is a tulajdonképpeni kazán, hanem a segédberendezések, például szénörlő malmok, szivóventillátorok szabják meg. Amennyiben a felső korlátozás nem marad lényegesen a szavatolt legnagyobb teljesítőképesség alatt, a kazán üzemére és élettartamára nézve ez bizonyos szempontból tulajdonképpen előnyösnek tekinthető.

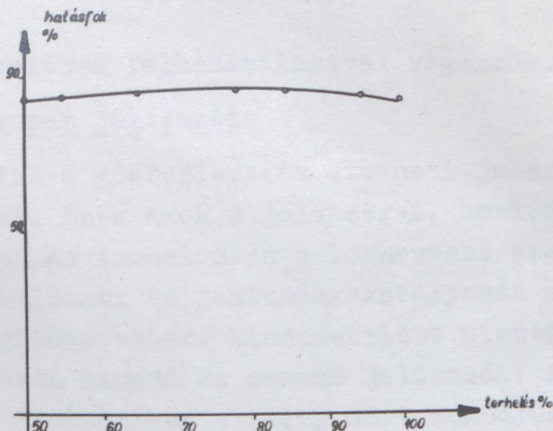
A normális üzem számára ilyenformán természetesen kijelölt határok között a kazán viselkedését valóban jó közelítéssel lineárisnak lehet tekinteni. Az 1. ábra tartalmazza a borsodi 3. kazán statikus gőzfejlesztési jelleggörbéjét, azaz a gőzmennyiség változásokat a beadagolt szén mennyiségének függvényében. A szén mennyiségét az adagoló motorok fordulatszámával, mint segédjellemzővel mértük. A linearitást bizonyítja a 2. ábra is, amely a dunapentelei, inotai és borsodi mért kazánok választását mutatja szinuszos zavarás hatására.



A zavaró jellemző ugyancsak a szénmennyiség, amelyet ebben az esetben az adagoló fordulatszámával arányos szabályozó feszültséggel mértünk. A kimenő jel, a gőzmennyiség sem nonlinearis torzításokat, sem más eredetű felsőbb harmonikusokat nem tartalmaz lényegesebb mértékben. Világosan bizonyítják a linearitási feltétel alkalmazhatóságát a kazánok hatásfok-görbéi. A 3. ábrán látható, jellegzetesen lapos hatásfok-görbe [105] azt mutatja, hogy a kazán arányos szénmennyiség bemenetre arányos gőzmennyiség kimenettel válaszolt. A kísérletek egyöntetűen azt



2. ábra.
Harmonikus válaszok.



3. ábra.

bizonyították, hogy a normális teljesítményhatárok között fellépő lényeges nonlinearitások vagy külső zavarásokra voltak visszavezethetők, vagy a kazán, valamint a segédberendezések állapotának komoly rendellenességére.

Mindezen meggyőző bizonyítékok alapján egész számításunk során elfogadtuk a változások linearitására vonatkozó feltételt, illetve olyan jellegű folyamatoknál, ahol bizonyos tényezők nemlineárisan változnak, a megengedhető határok figyelembevételével linearizáltuk a jelenségeket. A linearizálással történő közelítés hibáját, az egyes részletszámítások általában külön tartalmazzák. Általánosságban elmondható, hogy a 4. fejezetben ismertetett mérési pontosság és a jelenségek sokrétűségéből származó szórás figyelembevételével a linearizálás 50-60 %-os terheléstől 100 %-os terhelésig igen jó közelítésnek számít.

Mindez lehetővé tette, hogy a vizsgálatokat a ma már klasszikusnak mondható lineáris szabályozástechnika módszereivel, a szuperpozíció elvének és a Laplace

transzformációnak felhasználásával végezzük.

2.2. A folyamat jellemzői

Vizsgálataink a gőzfejlesztés átmeneti jelenségeire terjednek ki. Ezek azok a jelenségek, amelyeknek tanulmányozása az irodalomban a legkevésbé szerepel és amelyek a hálózati teljesítményszabályozás szempontjából a legfontosabbak. Mindenekelőtt tisztázni kell, melyek a kazán kimenő és bemenő jellemzői. A kazánt a szabályozástechnikus elvileg zárt sokpólusnak tekintti. A belső jelenségek csak addig érdekesek számára, amíg a bemenő és kimenő jellemzők közötti összefüggést keresi. Ezt az összefüggést a folyamatot leíró differenciálegyenletek, illetőleg azoknak Laplace-transzformáltakkal kifejezett átviteli függvényei írják le, az átviteli függvények a szabályozástechnika számítási eszközei. Ezen túl a kazán, mint black box, fekete doboz szerepel, amelyet a kimenő és bemenő jellemzők közötti összefüggések teljesen leírnak és a szabályozástechnikus számára egyben helyettesítenek is.

A bemenő jellemzők:

- a tüzelőanyag mennyisége
- a tüzelőanyag fajlagos fűtőértéke
- a tüzelőanyag minőségi jellemzői /nedvesség, salakolvadáspont, hamutartalom, stb./
- a belépő tápvíz mennyisége
- a " " nyomása
- a " " hőfoka
- a befuvott levegő mennyisége
- a " " hőfoka
- a huzat

a lángmag kialakulását szabályozó tényezők /másodlevegő, stb./

A kimenő jellemzők: a kilépő gőz hőfoka
a " " nyomása
a " " mennyisége

Figyelembe kell venni ezenkívül olyan, az előbbieken burkoltan szereplő segédjellemzőket, amelyek a tüzelési folyamatot vagy a kazán állapotát jellemzik. Ilyen: a kilépő füstgáz hőfoka

a " " összetétele / O_2 , CO , CO_2 tartalom/

a hatások

a salak éghető tartalma

a vízszint a kazánban

a cirkulációs sebesség

a kazánviz vegyi jellemzői, stb.

A kazán átmeneti jelenségeit ezenkívül olyan, sokszor mennyiségileg nehezen meghatározható tényezők is befolyásolják, mint a kazán közvetlen előélete /tüztér hőfoka/ és a tartós előélet /elpiszkolódás, stb./.

2.2.1. A jellemzők értékelése

A jellemzők nagy száma és az egyes jellemzők mennyiségi meghatározásának nehézségei szükségessé teszik a kérdések egyszerűsítését azzal a feltétellel, hogy az elhanyagolások mértékét és azok hatását minden esetben gondosan figyelembe kell venni. A jellemzők a következő csoportokba oszthatók:

a mennyiségi számításoknál figyelembe veendő jellemzők

az elhanyagolható jellemzők

az olyan jellemzők, amelyeket csak zavarásokként vehetünk figyelembe és ezekre csak a zavarás fokának

mértékét és támadási pontját kell meghatározni az átmeneti folyamatok jelleggörbéjét meghatározó, illetve megváltoztató tényezők

Az első csoportba tartoznak a tüzelőanyag mennyisége, a belépő tápvíz mennyisége, a kilépő gőz hőfoka; a második csoportba tartozik például a kazán közvetlen előélete;

a harmadik csoportba soroljuk a tüzelőanyag fűtőértékét és minőségi jellemzőit;

a negyedik csoportba a huzatot, a lángmag kialakulását befolyásoló tényezőket, a kazán tartós előéletét.

A tüzelés folyamatának változásait lényegében az energiaviszonyok szabják meg. A bemenő energiamennyiségnek /tehát a tüzelőanyag hőtartalmának/ a változása, amely adódhat akár a mennyiség, akár a fajlagos fűtőérték változásából, vagy a belépő tápvíz jellemzőinek megváltozásából, módosítja a kimenő energiaviszonyokat. A változások közül hasznos a gőztermelésnek kalória/időegységben mért változása, amely a gőz mennyiségének, nyomásának és hőfokának változásából tevődik össze, káros a veszteséghők arányának /füstgázhőmérséklet, a salak éghető tartalma, a füstgáz összetétele, stb./ változása. Ezenkívül számításba kell venni a kazán vízterében, fémtömegében és falzatában az átmeneti jelenségek alatt tárolt hőt. Ezekkel az értékekkel a kazán energiamérlege az átmeneti jelenségek alatt

$$\frac{dQ_{be}}{dt} = \frac{dQ_{ki}}{dt} + \Delta \eta \cdot \frac{dQ_{be}}{dt} + \frac{dQ_{tár}}{dt} \quad (1)$$

ahol

$Q_{be, ki, tár}$	a bemenő, kimenő és tárolt energia
η	a hatásfok
t	idő

Az egyenlet jobboldalán a második tag, mint azt a linearitási feltételekről szóló fejezetben kimutattuk, elhanyagolható, így a veszteséghők arányának változását számításainkban a továbbiakban nem vesszük figyelembe.

Az (1) egyenlet lényegében parciális differenciálegyenletrendszerre rejt magában, ahol a Q_{be} például mindazokat a tényezőket tartalmazza /szénmennyiség, szénminőség, tápvizmennyiség, tápvizhőfok, levegőmennyiség, levegőhőfok, stb./, amelyek a kazánál mint a bemenő energiát jellemző mennyiségek szerepelhetnek. Ilyenformán, mint arra már többen rámutattak [40], a kazán átmeneti **viselkedését** pontosan csak sokváltozós parciális differenciálegyenletrendszerrel lehet leírni. Az egyes mennyiségek egymástól nem függetlenek, a rendszer nem autonom. Így például a gőzmennyiség növelése a túlhevítés folyamán megváltoztatja a kilépő gőz hőfokát, ami a gőzhűtésre befecskendezett vízmennyiség megváltoztatását teszi szükségessé, ez befolyásolja a víztáplálási viszonyokat. A víztáplálás változása hatással van újra a gőzmennyiségre, stb. A szabályozás akkor lenne tökéletes, ha a kazán dinamikai viselkedését valamennyi előforduló jellemzőre pontosan ismerve, az egyes jellemzők egymás közötti összefüggéseit kifejező és az (1) egyenlettel jellemzett sokváltozós, lényegében nemlineáris differenciálegyenletrendszer rendelkezésre állna. Ebben az esetben megfelelő számológép - mint szabályozó-se-

gitségével lehetne a szabályozási feladatot megoldani. A szabályozástechnikus azonban csak a technológia jelenlegi ismeretei alapján határozhatja meg a szabályozó feladatát, a kazánok belső folyamatainak vizsgálatai eddig csak az összefüggések egy részét tárták fel, több kérdés általános fizikája sem kellőképpen ismeretes, néhány probléma matematikailag sincs megfogalmazva és számos olyan tényező is van, amelyeknek jellemzőit objektív mérőszámmal mérni sem tudjuk. Így bár elvileg igen tetszetős lenne a kazánt, mint több jellemzős, nem autonóm szabályozott szakaszt kezelni, a valóságban éppen a nem megbízhatóan leírt folyamatok miatt ez hibásabb megoldásokra vezethetne, mint a jelenleg szokásos, egyszerűbb módszerek. A több jellemzővel való számítást úgy helyettesítjük, hogy a lényeges hatásokat zavarójelként kapcsoljuk rá a szabályozásra. A tanulmány főfeladatának a gyakorlat számára fontos, egymástól szétválasztható és lényeges jellemzők hatásának vizsgálatát tekinti.

A gőzfejlesztő szabályozásával kapcsolatos kérdések a vizeztáplálás, a gőzhőfok, a huzat, a levegő és az égés minőségének /füstgázösszetétel/ szabályozása is. Ha lemondunk - és az előbbieken alapján le kell mondanunk - a kazánnak, mint összefüggő rendszernek közös szabályozásáról, az egyes kérdéseket különválasztva kell kezelni, így a tüzelés, mint bemenő jellemző, a fejlesztett gőz mennyisége és nyomása, mint kimenő jellemző szerepelnek számításainkban. A többi tényezővel kapcsolatban csak néhány kiegészítő megjegyzésre szorítkozhatunk.

A levegő mennyiségét általában úgy szabályozzák, hogy az öhmiködő szabályozó vagy tüzelőanyag mennyiséggel vagy a fejlesztett gőzmennyiséggel arányos mértékben változtatja a levegő aláfúvást. Mint közismert, az első módszer változó minőségű tüzelőanyagnál hibás

eredményre vezet, a második módszer pedig bizonyos kétséget jelent a levegő és a szén helyes égési arányának beállításában.

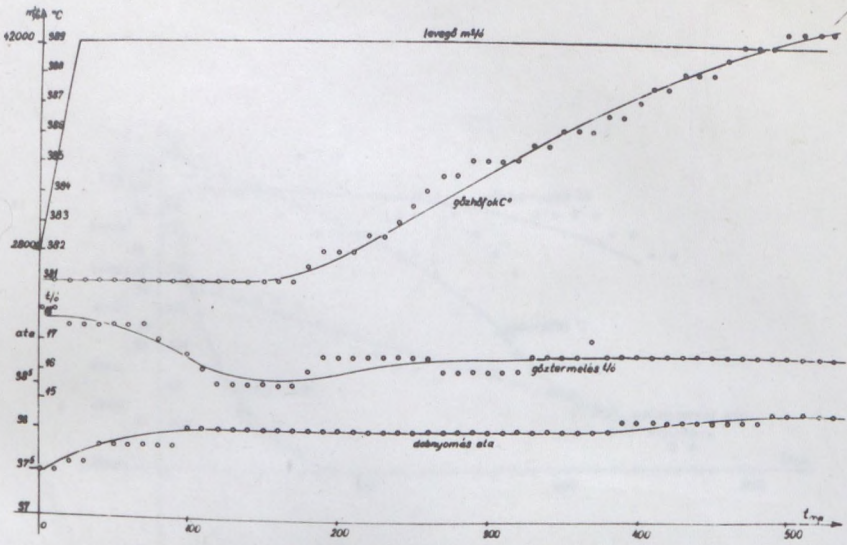
Mindkét módszer csak megközelítő, a helyes eljárás a levegőmennyiségnek a füstgázösszetétel, tehát az égés minősége alapján történő szabályozása. A mi szempontunkból azonban az a kérdés érdekes, hogy a levegőmennyiség szabályozása milyen mértékben tekinthető autonomnak, azaz milyen mértékben befolyásolja az általunk vizsgált folyamatot, az adott jellemzőjű gőz termelését. Az eredmények, amelyek minden mérésünkénél egyértelműek voltak, azt igazolják, hogy igen tág határok között $\pm 20-25\%$ -os levegőváltoztatás esetén is a termelt gőz mennyisége és nyomása kevéssé változik. Az idevonatkozó mérési eredményeket a 4. ábrák és az 1. táblázat foglalják össze.

1. táblázat

A levegőadagolás változtatásainak hatása a gőztermelésre

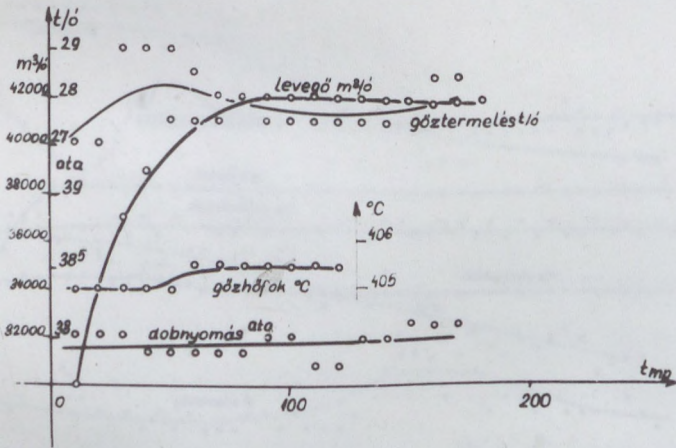
ábraszám	levegő változtatás %-a	gőztermelés változás %
4.a.	+ 50	5
4.b.	+ 50	-
4.c.	- 30	4
4.d.	+ 16	-
4.e.	\pm 40	-
4.f.	\pm 10	-

A jelenség magyarázata az, hogy lényeges mértékű levegőmennyiség változásoknál is a hatásfok legfeljebb 1-3 %-ot változik, ami a gőztermelésben hasonló, mű-



4.a. Levegő elállítás 28000-42000 m³/ó.

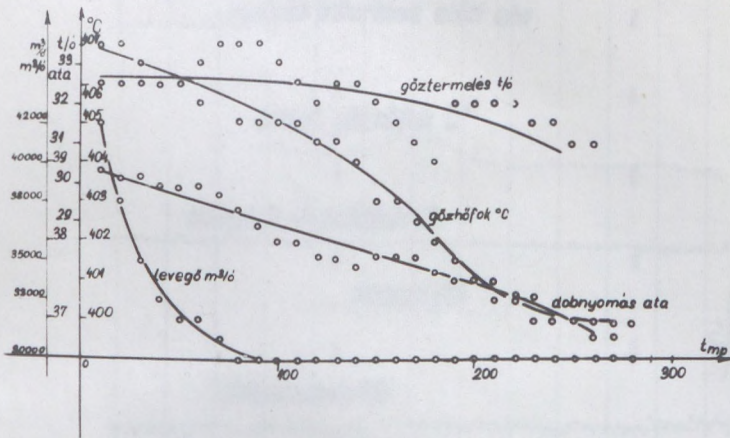
Dunapentele. 1955 aug.4. Dp. 4/4 mérés.



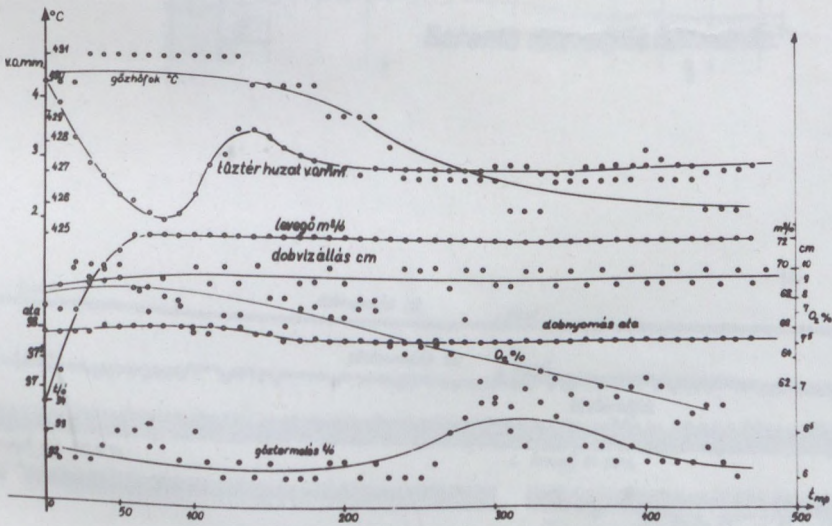
4.b. ábra.

4. ábra.

Levegő változtatásának hatása.



4.c. ábra.

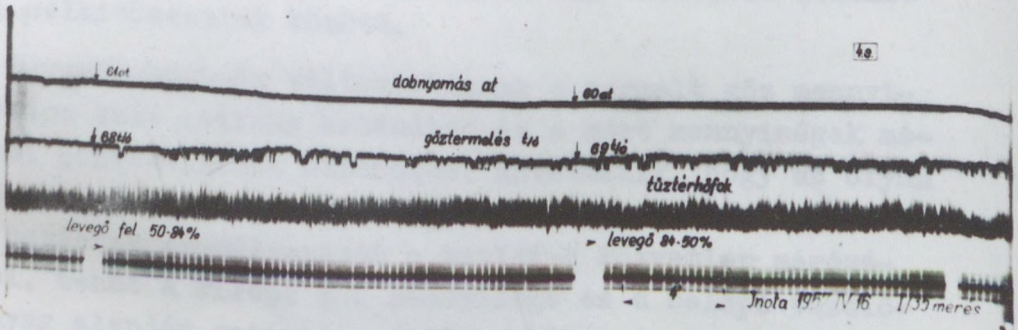
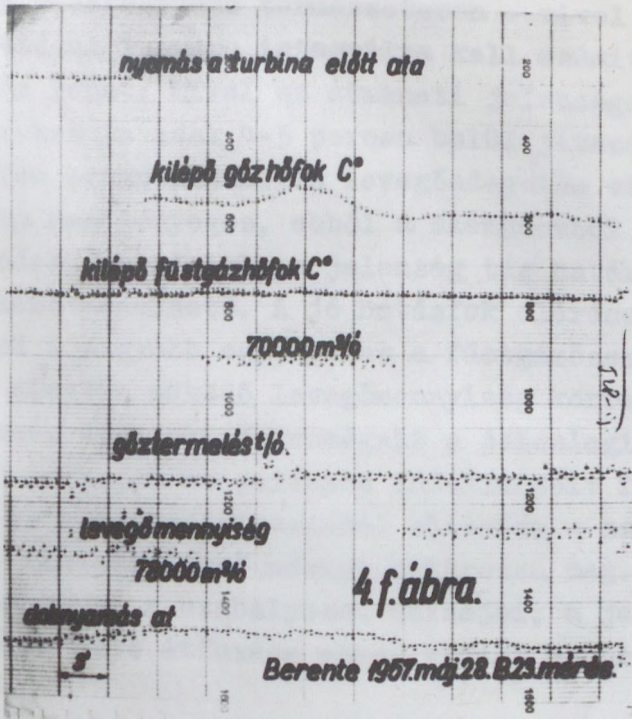


4.d. ábra.

Dunapentele. 1953. aug. 16 Dp2/2 mérés.

4. ábra.

Levegő változtatásának hatása.



4. ábra.

Levegő változtatásának hatása.

szerrel alig észrevehető változást hoz létre. Gazdasági haszonban, vagy veszteségben természetesen - mivel hosszabb időre, például 1 napra integrálva kell számítani - ez igen jelentős lehet. Mivel az átmeneti jelenségek legrosszabb esetben is csak 4-5 percen belül játszódnak le, a gőztermelés szempontjából a levegőadagolás változtatása általában nem lényeges, ebből a szempontból mindkét említett módszer megfelel, a jelenség tág határok között autonómként kezelhető. A jó hatásfok elérése érdekében célszerű a nagyobb egységeket a füstgázösszetétel elemzése alapján működő levegőmennyiség korrekcióval ellátni. Ennek átmeneti jelenségeit a jelenlegi készülékek nagy holtidejét és jelentős időállandóit figyelembevéve a-terhelésszabályozástól eltérően - majdnem kizárólag a füstgázelemző műszer határozza meg. A szellőzők működtetése, a szabályozók önidejei, a jelenségeknek a kazánon való átfutása ehhez képest ma még elhanyagolhatók.

A mérések azt mutatják, hogy a levegőmennyiség változtatásának hatása jelentősebb a tulhevitett gőz hőmérsékletére. Ennek vizsgálata azonban nem szerepelt jelenlegi célkitűzéseink között.

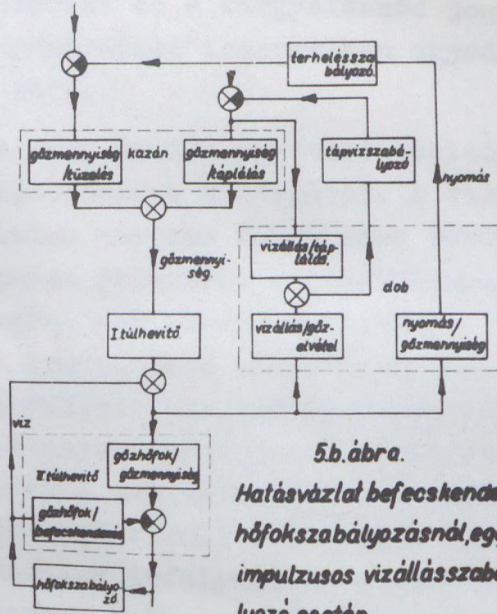
A levegőmennyiség változtatásnak a termelt gőz mennyiségére való csekély hatásából és a mért mennyiségek mérési pontosságának határaiból következik, hogy az olyan törekvések, amelyek a levegőmennyiség és ezen keresztül a hatásfok szabályozását a hatásfok közvetlen mérésével, tehát a kilépő gőz mennyisége és a belépő tüzelőanyag alapján optimális értékszabályozóval akarják elérni, a mai kazánoknál eleve kudarcra vannak ítélve.

A belépő tápviz mennyiségének a gőztermelésre való befolyásával a 2.6.3. fejezetben foglalkozunk. A tápviz belépő hőfokának változása a gőztermelés szempontjából egyszerű holtidős jelenség, bár ez utóbbi a normális

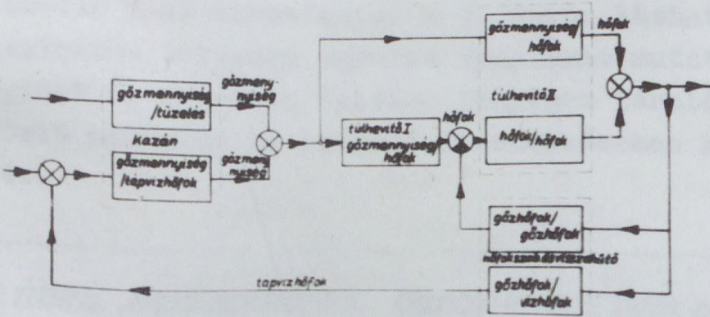
üzem közben nem szokott lényeges mértékű lenni. A vizállás változása a doboan megváltoztatja a viz-gőz térfogati viszonyokat, bizonyos mértékig kihat a nyomásra is. Ez a hatás sem szokta azonban a mérési pontosság határait túlhaladni, már csak azért sem, mert a nyomásváltozás okozta gőztelítési állapotváltozás és az ezzel kapcsolatos gőzképződés, illetve lecsapódás a jelenségre önszabályozó hatást is gyakorol. Ha ugyanis a vizállás csökken, a gőztérfogat kissé nő, a nyomás csökken, ez a telítési hőfok csökkenése miatt többletgőztermeléssel jár, ami a nyomást bizonyos mértékig visszaállítja.

A kazán szabályozásának a terhelésszabályozáson kívül egyik legbonyolultabb kérdése a kilépő gőzhőfok szabályozása. Ez a kérdés külön tanulmány tárgya. A gőzhőfok szabályozás nélküli alakulása a gőzfejlesztéssel sorbakapcsolt jelenség, így a gőzfejlesztésre visszahatása nincs, azaz a gőzfejlesztés ettől elkülönítve vizsgálható. Visszahatást jelent azonban - mint már említettük - a hőfokszabályozás módszere, akár visszahütéses /keverő vagy befecskendező/, akár az égők billentésével történik. Utóbbi megoldásra Magyarországon még nincs példa, így azzal nem foglalkozhatunk. A keverő vagy befecskendező visszahütéssel kapcsolatos hatás értékelésére a következő számítást végezzük:

A mérési sorozatban szereplő kazánok között a borsodi típus tulhevitőjelleggörbéje a legmeredekebb, erősen pozitív jelleggel. A kilépő gőz hőmérséklete 70 t/ó terhelésnél éri el befecskendezés nélkül az engedélyezett 500 C° -ot. 50 t/ó terhelésnél a kilépő gőz hőfoka 470 C° . Ha a jelleggörbe meredeksége körülbelül állandó, a névleges 100 t/ó terhelésen a kilépő gőz hőfoka kb. $540\text{--}550\text{ C}^{\circ}$ lenne. A két állapot közötti entalpiakülönbségek:



5.b. ábra.
Hatásvázlat befecskendező
hőfokszabályozásnál, egy-
impulzusos vízállásszabá-
lyozó esetén.

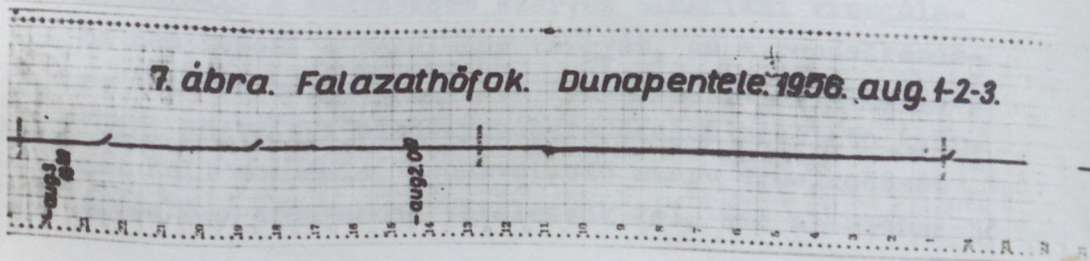


6. ábra
Hatásvázlat keverő hőfokszabályozásnál

gőzfejlesztés átmeneti jelenségeit autonóm hatáslánc-ként tárgyaljuk, egyben bebizonyítottuk, hogy állítá-sunk, amely szerint ez a tárgyalásmód jogos, sőt a ka-zán belső folyamatainak ismeretében egyedül célrave-zető, helyes volt.

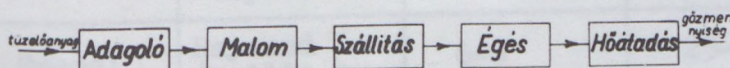
Foglalkoznunk kell az (1) egyenlet utolsó tagjával is, a kazán tárolóelemeinek szerepével. A vasanyag tároló-képességét minden esetben figyelembe vettük, bár hatá-sa nem túlságosan jelentős, a jelenségekhez való hoz-zájárulása legfeljebb néhány százalékos. Nem vettük figyelembe az irodalomban teljesen egybehangzó utalá-sok alapján a falazat tárolóképességét [115]. Ez elméletileg is könnyen indokolható. A falazat a hőáta-dásban közvetlenül nem vesz részt, a sugárzás, illet-ve a konvekció közvetlenül a csöveket érinti. Ha az átmeneti jelenségek lefolyásában a nagy hőkapacitású falazatnak szerepe volna, az átmeneti jelenségek ide-je nem legfeljebb néhány perc, hanem annál sokkal hosszabb időtartam lenne. Mint a 4. fejezet részlete-sen ismerteti, Dunapentelén kb. 1 héten keresztül ál-landóan regisztráltuk a falazat hőfokát, a falazat különböző mélységeiben, a legkülönbözőbb üzemállapotok alatt 60-110 %-os terhelésig. A 7. ábrán látható, hogy a regisztrátum teljesen egyenes vonalakat mutat. A ka-zán legfőbb és egyetlen valóban lényeges tárolóeleme a szénörlő malmokon és szérelő berendezéseken kívül a víztér.

7. ábra. Falazathőfok. Dunapentele. 1956. aug. 1-2-3.



2.3. A teljes hatásvázlat

A gőzfejlesztés átmeneti jelenségeinek tanulmányozása során a fentiek alapján a tüzelőanyag mennyiségének változtatásából indulunk ki, figyelemmel kísérjük a tüzelőanyag utját a mennyiségváltoztatás beavatkozó helyétől az őrlő berendezésen át a tüztérbe való befuvásig, a tüztérben a tüzelőanyag elégését és az így keletkezett hőmennyiség változásnak a kazáncsöveken keresztül a tápvizbe való átadását, a kazán csövezetékeiben a gőzfejlesztés megváltozásának folyamatát. Ezek alapján az átmeneti jelenségeket a 8. ábra hatásvázlata szerint fogjuk vizsgálni.



8. ábra.

A teljes hatásvázlat.

2.4. A szénelőkészítés átmeneti jelenségei

A kazán terhelésszabályozása elsősorban a tüzelőanyag adagolási helyén avatkozik be a kazán üzemébe. A beavatkozás a vizsgált esetekben a kaparólánccal dolgozó szénadagolók sebességének valamilyen mechanikai vagy villamos uton történő megváltoztatásával folyik. A szokásos szerkezetek elvileg majdnem mind hasonlóak. A beavatkozó szervek dinamikai vizsgálata nem képezi a tanulmány tárgyát, ez a rendelkezésre álló szabályozókészülék rendszerétől és típusától függ, adatait a szabályozóberendezést szállító gyárnak kell megadnia. A beavatkozó szerv viselkedését egyenlőre arányosnak tételezzük fel, ami általában jó

közelítést jelent.

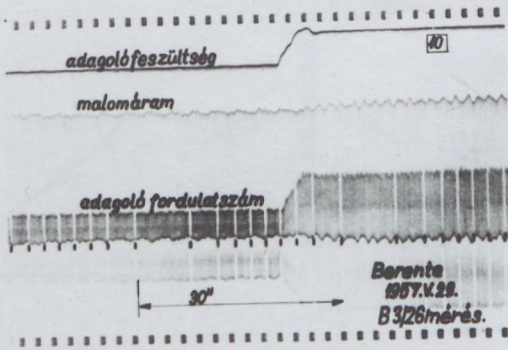
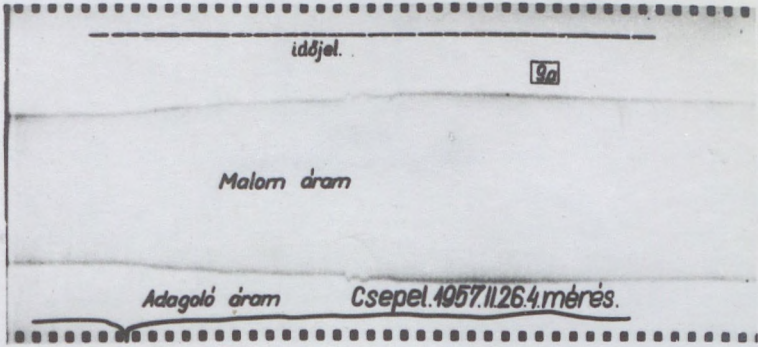
Mivel a beavatkozás sebességváltoztatás jellegű, a rétegvastagság változatlanul hagyása mellett a malmok feletti ejtőcsőbe jutó szén mennyisége átmeneti folyamat nélkül, azonnal megváltozik. A malombajutást kizárólag az ejtőcsőben való esés ideje késlelteti. A 9. oszcillogrammokon világosan látszik a jelenség lefolyása, a mérések összesített adatait a 2. táblázat mutatja.

2. táblázat

Szénelőkészítés időállandói

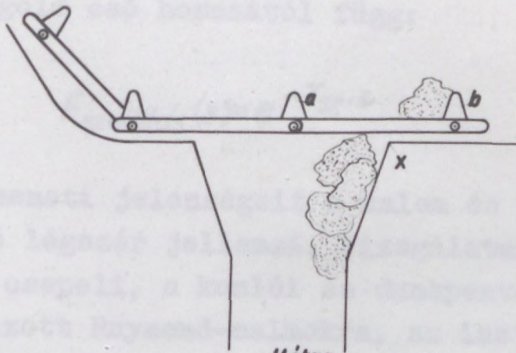
mérés helye	malom-típus	holtidők s	idő-állandók s
Csepel	Raymond Április 4.	6-8	25-35
Inota	Kalapácsos Csehszlovák	5-6	45-50
Berente	Ventillátor NDK	4-5	4-5

Az adagolóban lejátszódó jelenségeket a malom igen gyorsan és hűen követi. A 10. oszcillogrammon jól láthatók a malom áramfelvételének periódikus ingadozásai. Egy perióduson belül is két szétválasztható lökés figyelhető meg. A 11. ábrán láthatjuk a kaparóláncon belül a tüzelőanyag elhelyezkedését. Az első lökés azt a szénkupacot jelzi, amely akkor esik a malomba, amikor az *a* jelű lánctag, elhagyva az adagoló nyílás *x* élét, kellő nyílást enged a két lánctag közötti, kissé összetapadt szénmennyiség nagyobb részének leesésére, a második pedig a *b* jelű lánctag előtti, az első szénmennyiségből megmaradt szénkupac letolását jelzi. Ilyenformán a dinamikai rendszer első időtagja tiszta holtidős tag, ez a szénnek

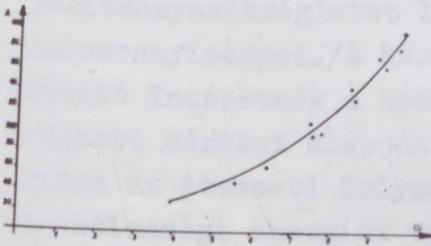


9-10. ábrák.

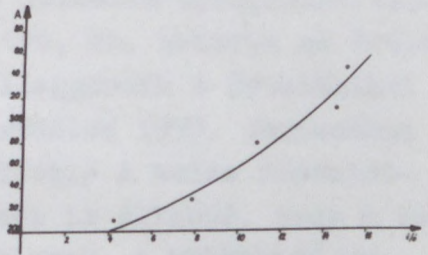
A malmok átmeneti viselkedése.



11. ábra.
Aszén letolása az adagolóba.



12.a. ábra.



12/b. ábra.

11-12. ábrák.

Malom jellegű görbék.

az adagolóból a malomba jutását képviseli és lényegében az adagoló cső hosszától függ:

$$F_{\text{szállítás}}(s) = e^{-T_{sz} \cdot s} \quad (2)$$

A malom átmeneti jelenségeit a malom és főleg a malomhoz tartozó légszér jellemzi. Vizsgálatainkat 3 malomfajtára, a csepeli, a komlói és dunapentelei erőművekben alkalmazott Raymond-malmokra, az inotai és tiszapalkonyai erőművekben működő kalapácsos malmokra és a borsodi erőműben működő KSG-típusú ventilátor malmokra terjesztettük ki.

A malomfolyamat két jól elválasztható szakaszból: az őrlésből és a szérelésből áll. Az őrlési folyamat megfelelő levegőmennyiségváltoztatás feltételezésével, mint azt a 12. ábrán látható malomjelleggörbék mutatják, bizonyos határok között lineáris, azaz a malom teljesítményfelvétele az igen jelentős üresjárás teljesítményszükségletet leszámítva, kb. arányos az őrlött szénmennyiséggel./A közölt jelleggörbék a Hőtechnikai Kutató Intézetnek a borsodi erőműben 1957. júniusában végzett mérései alapján készültek./ A malom fordulatszám az átmeneti folyamat alatt is állandó, azaz a tehetetlenségi energiák változatlanok. A különböző malomtipusoknál azonban a különböző terhelésállapotoknak eltérő telítési fokok felelnek meg. Ez igazolható azzal a megfontolással is, hogy az ütéssel dolgozó malmoknál nagyobb teljesítmény eléréséhez az ütőfelületek és a szén között nagyobb érintkezési felületre van szükség, az őrlőtípusoknál /Raymond és Loesche/ pedig nagyobb az őrlőnyomás, azaz vastagabb a szénréteg az őrlőtányér és az őrlőgörgők között. Ennek a nagyobb, a malomban tartzkodó szénmennyiségnek a módosulása adja a malom időbeli viselkedésének egyik

összetevőjét. A malom szerves része, a folyamat másik befolyásolója a szérelő. A szérelő csak a meghatározott finomságra őrölt szenet engedi át, beállítása meghatározza, hogy a szén átlagosan hányszor kering a malomban a tüztérbe jutásig. A viszonyokat természetesen a malomalkatrészek kopása is befolyásolja.

A szérelő tárgyalásánál abból a feltételből indulnak ki, hogy a szérelő állandó szén- levegő koncentrációt tart fenn. Ez csak abban az esetben helytálló, ha a szénmennyiség változtatásával arányosan és egyidőben változik a levegőmennyiség is. Ez a feltétel nincs kielégítve a különben korszerű gőz- levegő viszony szabályozásnál sem, továbbá nem elégíthető ki teljesen a malom ventillációs viszonyaival sem. Kísérleteink nagyobbik részét olyan körülmények között végeztük, amikor csak a szénmennyiséget változtattuk, de végeztünk olyan méréseket is, amelyeknél a szénmennyiség változtatásával egyidejűleg változtattuk a levegőmennyiséget is és állítottuk a megfelelő malomcsapantyukat. A jelenségek a levegőmennyiség növelésével, illetve csökkentésével meggyorsulnak, illetve lassulnak. Általában, mivel a malomban az átmeneti folyamat alatt a szén- levegő koncentráció viszonyok megváltoznak, a szérelőnek, mint tárolóelemnek a feltöltése, illetve kisütése következik be [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64].

A terheléstől függően bizonyos mértékig megváltozik a kiörlés finomsága is, ami két tényezőtől is adódik: a malomban megváltozó örlési viszonyokból és a szérelőben megváltozott aerodinamikai viszonyokból.

A malom átmeneti viselkedésére nem kis befolyással van a malomban lefolyó szárítási folyamat változása. A különböző szénmennyiségek szárítása azonos hőmérsékletű meleg levegő, illetve füstgáz esetén a malom,

a légszér és a kilépő levegő-füstgáz szénkeverék hőfokát is megváltoztatja, ami hatással van a nyomásviszonyokra, a keverék fajtérfogatára és ennek következtében az áramlási és szérelési viszonyokra.

Az említett, eléggé bonyolult és egymásra ható összefüggések részletesebb matematikai elemzése nem célszerű, mert a jelenlegi kutatások még nem szolgáltatnak gyakorlatilag használható eredményeket, viszont a számítást bonyolulttá tenné és az exaktságlátszatával fellépve sokszor hamis következtetéseket is eredményezne.

A közölt és az ellenőrzésül különböző körülmények között felvett nagyszámu oszcillogramm azt mutatja, hogy a malomban és a légszérben lejátszódó átmeneti jelenségeket jól leírhatjuk egy holtidő nélküli egytárolós elemmel, azaz a malom átviteli függvénye

$$F_{malom}(s) = \frac{1}{1 + T_m s} \quad (3)$$

alaku lesz.

Az ábrákon látható és a táblázatban is szereplő holtidő az előbb említett szállítási holtidőből adódik.

Az időállandót a jelenség lefolyásánál elsősorban szerepet játszó mennyiség, a malom és a légszér tárolóképesége és a levegősebesség határozza meg.

A közölt adatokból is jól látható a kis tárolóképeségű **Raymond** és ventillátormalmok és a nagyobb tárolóképeségű kalapácsos malmok közötti különbség. Az átmeneti jelenségek számításához a már ismert típusokon elvégzett mérések helyes extrapolációs, vagy interpolációs lehetőséget adnak.

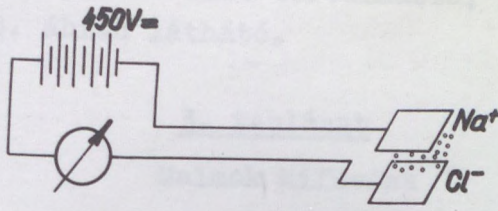
A szérelőt és az esetleges külön szénporventillátort

elhagyó változott szénmennyiség a befuvott levegő áramával érkezik a tüztérbe, azaz a szénporvezetékek hosszának és a befuvási sebességnek megfelelő, általában rövid holtidővel.

A tiszta átfutási idő számításának nagyságrendi ellenőrzésére több kísérletet végeztünk. A kísérletek során a szénnel együtt a tüztérbe juttatott konyhasó átfutását mértük. Két módszert is alkalmaztunk. A konyhasó nátrium tartalma következtében a lángban megjelenő és kézi spektroszkóppal jól észlelhető 589 μ m hullámhosszu sárga spektrumvonal megjelenésével, továbbá egy 450 V feszültségre feltöltött és a tüztérben a szén befuvási irányában elhelyezett elektródapárral, amelyek között az ionizált só jelentékeny áramot indított. /13. ábra/. Az utóbbi kísérletet Fraknóy József fizikus javaslata alapján végeztük. A bedobás és a só megjelenése közötti időt stopperórával mértük, a kezdeti és végidőket hangjelzéssel jelezve. Az inotai, dunapentelei és borsodi erőművekben végzett mérések mindkét módszerrel egyöntetűen kb. 10-15 s átfutási időt mutattak a beavatkozás helyétől a tüztérbe vezető uton. /Fénykép a 119. oldalon/.

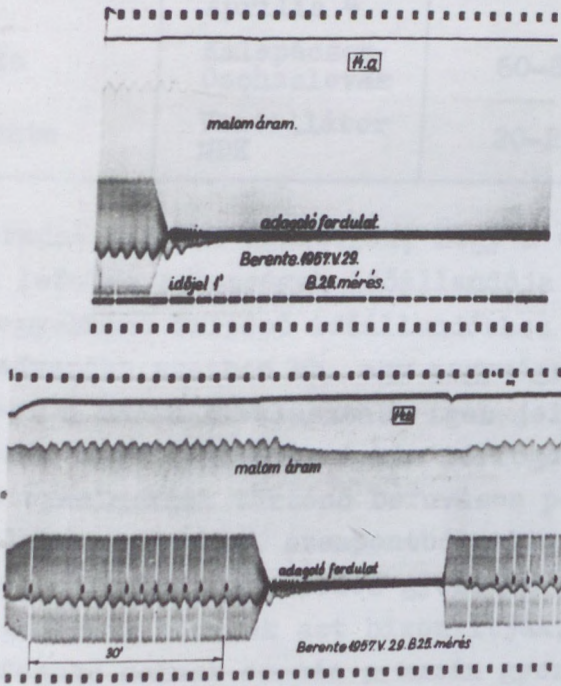
A mérési módszer kifogásolható a konyhasónak a széntől eltérő őrlési viszonyai és fajsúlya miatt. A teljesen megbízható eljárás az lett volna, ha a konyhasó vizes oldatával szenet itatunk, azt az erőműben használatos nyersszén nedvességszázalékáig kiszáritjuk és így a sótartalmu szenet juttatjuk be az adagolóba. A kevésbé pontos módszerrel végzett mérések azonban annyira összeváltak az egyéb mérésekkel és az elméleti megfontolásokból is kiadódó időekkel, hogy szükségtelennek tartottuk a sokkal körülményesebb, pontos eljárás alkalmazását.

A malomban lejátszódó átmeneti jelenségek lefolyásá-



13.c. ábra.

A holtidő kimutatása elektródákkal.



14. ábrák.

Malmok kifűvése.

ra, ha mennyiségileg nem is megbízható, de minőségileg igen jellemző képet adnak a malom kifuvásáról, illetőleg feltöltéséről felvett oszcillogrammok. A mért eredményeket a 3. táblázat tartalmazza, néhány oszcillogramm a 14. ábrán látható.

3. táblázat

Malmok kifuvása

Mérés helye	Malom típus	Kifuvás ideje s
Csepel	Raymond Április 4.	40-50
Inota	Kalapácsos Csehszlovák	60-80
Berente	Ventillátor NDK	20-25

A közölt eredmények azt igazolják, hogy a tüzelőszervezetekben lefolyó jelenségek időállandója a kazánfolyamatban egyébként fellépő időállandókhöz képest kisebb. Legkedvezőbb esetben kb. egy nagyságrenddel kevesebb. Ezért a malom kiválasztása igen jelentős a kazán átmeneti viselkedésére. A kis térfogatu, például ventillátormalmokkal történő befuvásos porszéntüzelés szabályozástechnikai szempontból alig marad alatta a gáz-, illetve olajtüzelés gyors és rugalmas kezelhetőségének. A mérések azt bizonyítják, hogy ilyen kistérfogatu malmok esetén a kazán gyors működése szempontjából közbenső szénporhombárok alkalmazása nem jelentős és az ezzel járó esetleges más jellegű nehézségeket nem éri meg. Csak abban az esetben indokolt, ha egyéb okok következtében nagyobb térfogatu /kalapácsos vagy golyós/ malmokat alkalmaznak.

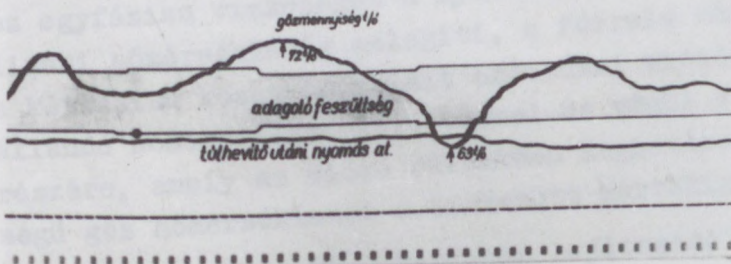
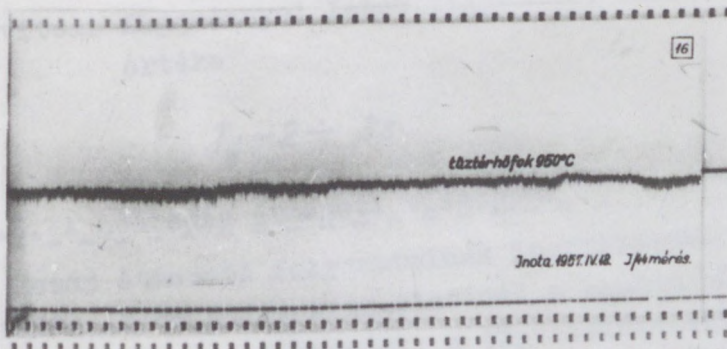
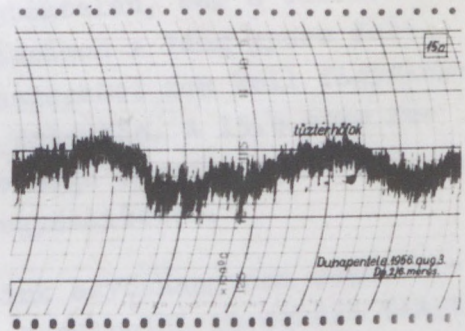
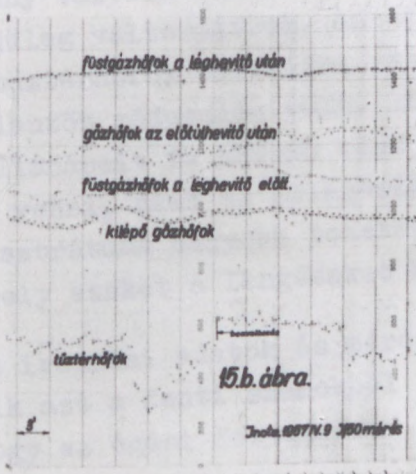
2.5. Az égés dinamikája

Miután a megváltozott mennyiségű szénpor-levegőkeverék a kazán tüztérébe jut, a lejátszódó jelenségek két fő-részből tevődnek össze: az égés és a hőátadás folyamatából.

Az égés dinamikájával az irodalom igen bőven foglalkozik / [116], [117], [118] /. Az égés olyan gyorsan lejátszódó folyamat, amelynek időbeli változása a hőátadásnál fellépő többi változáshoz képest majdnem két nagyságrenddel kisebb. A teljesség kedvéért megjegyezzük, hogy az égés dinamikájának alapösszefüggését a szénpor-levegőkeverék kifuvási sebességének és a gyulladás sebességének egyensúlyából lehet levezetni. További számbaveendő tényező a fáklyahossz, ami az égés idejére jellemző a megadott sebességek mellett. A fáklya kiterjedése a terheléstől függően változik.

A szénpor-levegő keverék belépés előtti sebessége kb. 15-20 m/s, amit a tüztérben megfelelő áramlási viszonyok fenntartásával igyekeznek viszonylag alacsony értéken tartani. A fáklyahossz a kazán méreteitől erősen függ, a vizsgált kazánoknál általában 5-10 m volt.

Az égés dinamikájának vizsgálatára a 4. fejezetben leírt módszerekkel számos mérést végeztünk, amelyek során minden esetben a tüztérhőfok változását regisztráltuk. A tüztérhőfok ugyan nem egyedüli jellemzője az égésben bekövetkező változásoknak, a helyes szénlevegőarány betartása mellett elsősorban a fáklya mérete és ennek következtében a sugárzó felület változik meg. A 15. ábra olyan regisztrátumokat mutat, amelyek csak a szénmennyiség változtatásának hatását tükrözik, a levegőmennyiség változatlan értéken marad. Az ábrák jól mutatják, hogy a tüztérhőfok gyakorlatilag azonnal válaszolt a szénadagolás változtatására /leszámítva a szállítási holtidőt és a malmok átmeneti folyamatait/.



15-16. ábrák.

Tűztérhőfokok.

A 16. ábra azt az esetet mutatja, amikor a szén-levegő-arány változatlan maradt, azaz a két mennyiséget egyidejűleg változtattuk. Az oszcillogram tanulsága szerint a tüztérhőfok változása jelentéktelen, bár a tüzelésben jelentős módosulás volt. Az ábrákon a láng gyors felvillanásait is követő sűrű rezgéseket nem kell figyelembe venni, csak az átlagérték jelentős. A 15.b ábra regisztrátuma nagyobb tehetetlenségű műszerrel készült, amely ezeket a lengéseket kiegyenlítette.

Az irodalmi adatok és méréseink egybehangzóan megerősítik azt a fenti számokból is körülbelül következő ténnyt, hogy az égési folyamatot

$$F_{\text{égés}} (s) = \frac{1}{1 + T_e s}$$

átviteli függvénnyel lehet figyelembe venni, ahol értéke

$$T_e = 2 \div 3 s.$$

2.6. A hőátadás átmeneti viszonyai

A kazán átmeneti folyamatainak legfontosabb része a hőátadás. A hőátadás vizsgálatánál a kazánt három elkülöníthető részre oszthatjuk: a tápvizelőmelegítőre, amely az egyfázisú vízközeget a nyomás által meghatározott teilitési hőmérsékletig melegíti, a forraló részre, amely a kétfázisú közeg bonyolult hőátadási viszonyai között állandó hőmérsékletű gőzt termel és végül a tulhevitő részére, amely az előző részekben meghatározott mennyiségű gőz hőmérsékletét a tervezett mértékig emeli.

Az égés változása következtében lejátszódó változásokat a hőátadó felületek terhelésével /kcal/m²,s/ jellemeztük. Ez a mennyiség azért előnyös a folyamatok leírására, mert mint arra rámutattunk, a különböző jellegű változások során nem mindig elsősorban a tüztér, illetve a

füstgáz hőfok változása lényeges. A sugárzott felületknél a lángfűfok és a fűklya sugárzó felületének módosulása, a konvektív felületknél pedig a fűstgázfűfok és a fűstgáz áramlási sebességének egyűttes hatása befolyásolja a hűterhelést. Az egész jelenséget lineárisnak tétélezve fel, a hűterhelés lineáris változása az a legkedvezűbb és legáltalánosabb jellemző, amelylyel a következűekben számolhatunk.

2.6.1. A tápvizelűmelegítű

A hűátadás átmeneti folyamatainak vizsgálatát a tápvizelűmelegítű tárgyalásával kezdűjk. A zavaróhatást kétfűleképpen alkalmazhatjuk a vizsgált szakaszra: megváltoztathatjuk a tápvizelűmelegítű hűterhelését /csűkkentűjk, vagy nűvelűjk a fűtést/, vagy módosítathatjuk a vitzáplálást, illetűleg ami ezzelegyértelmű, a viz sebességét a tápvizelűmelegítű csűveiben.

A tárgyalás módszere a következű: meghatározzuk az egy elemi csűdarabra vonatkozó fizikai változások egyenleteit, megoldjuk a hűfokváltozásra kifejezett differenciálegyenleteket. A dinamikai tárgyalás céljaira a viszonyok szemléletesebb áttekintésére elűször a forraló tápvizelűmelegítű változásait vizsgáljuk. Ugyancsak a matematikai tárgyalás megkűnnyítésére a tápvizelűmelegítűrész kezdűpontját a fűtűtt csűhossz kezdűpontjával azonosítűjk, melyet a belépű tápvizhűmérséklet határoz meg. A tápvizelűmelegítűrész végpontja számításainkban az az átmeneti folyamatok alatt mozgó pont, amelynel az adott nyomásu viz eléri a nyomás által meghatározott forráspontot. A hűmérsékletváltozásnak a differenciálegyenletekbűl kapott, idűtűl és helykoordinátától függű megoldásából fejezűnk ki a tápvizelűmelegítűrész végpontjának mozgásegyenletét. A kazán gűztermelése számára ugyanis a lényeges jelenség az, hogy a gűztermelésre szűnt felű-

let a fűtés, illetve a vízsebesség változtatására módosul. A forraló tápvizelőmelegítőre kapott eredmények a-zután megfelelő értelmezéssel könnyen alkalmazhatóak az olyan tápvizelőmelegítőre is, amelyben a tápviz nem éri el a forráspontot.

A számítás egyszerűsítésére a következő közelítő feltételekkel számolunk:

a/ a tápvizelőmelegítő hőterhelése az egész szakaszon állandó és csak az idő függvénye. Ez a feltevés az ellenirányu hőcsere folyamán elég jó és mint később kimutatjuk, ha az egyenletes hőterhelésselosztástól van is bizonyos eltérés, ez az időbeli lefolyást kevéssé érinti.

b/ A tápviz fajhőjét és fajsúlyát az egész tápvizelőmelegítő részen állandónak vesszük. A fajhő változása a teljes tápvizelőmelegítő részen nem több, mint kb. 4 % úgy, hogy a vizsgált változási tartományban 0,5 % alatt marad. A fajsúly változása jelentősebb, eléri a 30 %-ot, ami a vizsgált változási tartományban kb. 5 %-os legnagyobb eltérésnek felel meg. Ez azonban az átmeneti folyamat lefolyását nem befolyásolja lényegesen, így változatlan víztáplálás esetén a vízsebességet az egész tápvizelőmelegítő hossz-szon állandónak vesszük.

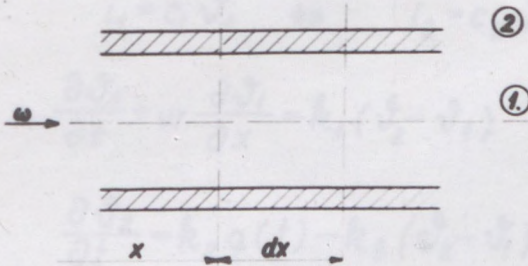
c/ A tápvizelőmelegítő részen végbemenő kismértékű nyomásváltozást sem vesszük figyelembe.

d/ A cső hosszirányu hővezetését elhanyagoljuk.

Ezekkel a feltételekkel a 17. ábra alapján

$$\left(\frac{\partial i_1}{\partial t} + w \frac{\partial i_1}{\partial x} \right) F_1 \gamma_1 dx = \alpha \cdot K (\vartheta_2 - \vartheta_1) dx \quad (5)$$

$$\frac{\partial i_2}{\partial t} F_2 \gamma_2 dx = q(t) dx - \alpha K (\vartheta_2 - \vartheta_1) dx \quad (6)$$



17. ábra.

Elemi csőszakasz.

ahol

- i_1 a folyadék hőtartalma kkal/kg
- i_2 a csőfal hőtartalma kkal/kg
- w a folyadék sebessége m/s
- γ_1 a folyadék fajsúlya kg/m³
- γ_2 a csőfal fajsúlya kg/m³
- F_1 a folyadék keresztmetszete m²
- F_2 a csőfal keresztmetszete m²
- ϑ_1 a folyadék hőfoka C^o
- ϑ_2 a csőfal hőfoka C^o
- K a csőfal belső kerülete m
- $q(t)$ a hőterhelés kkal/m, s

- α a hőátadási tényező $\text{kcal}/\text{m}^2, \text{C}^\circ, \text{s}$
 t idő
 x a soros csőhossz a tápvizelőmelegítő kezdőpontjától

$$i_1 = c_1 \vartheta_1 \quad \text{és} \quad i_2 = c_2 \vartheta_2 \quad \text{-vel}$$

$$\frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} + w \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} = k_1 (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \vartheta_2}{\partial t} = k_2 q(t) - k_3 (\vartheta_2 - \vartheta_1), \quad \text{ahol} \quad (8)$$

c_1 a folyadék fajhője $\text{kcal}/\text{C}^\circ, \text{kg}$

c_2 a csőfal fajhője $\text{kcal}/\text{C}^\circ, \text{kg}$

$$k_1 = \frac{\alpha K}{F_1 \gamma_1 c_1} \left[\frac{1}{\text{s}} \right]; \quad k_2 = \frac{1}{F_2 \gamma_2 c_2} \left[\frac{\text{m}, \text{C}^\circ}{\text{kcal}} \right]; \quad k_3 = \frac{\alpha K}{F_2 c_2 \gamma_2} \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$$

(3)-ből

$$\vartheta_2 = \frac{1}{k_1} \left(\frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} + w \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} + k_1 \vartheta_1 \right)$$

ezt (4) -be helyettesítve

$$\frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial t^2} + w \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial t \partial x} + (k_1 + k_3) \frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} + k_3 w \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} = k_1 k_2 q(t) \quad (9)$$

$$\lambda_1 = w \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]; \quad \lambda_2 = k_1 + k_3 \left[\frac{1}{\text{s}} \right]; \quad \lambda_3 = k_3 w \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]; \quad \lambda_4 = k_1 k_2 \left[\frac{\text{m}, \text{C}^\circ}{\text{kcal}, \text{s}} \right]$$

jelölésekkel:

$$\frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial t^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial t \partial x} + \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} + \lambda_3 \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} = \lambda_4 q(t) \quad (10)$$

a kényelmesebb kezelhetőség érdekében a megoldást növekmény értékekre számítjuk. Mivel

$$v_1 = \theta_{10} + \delta v_1;$$

$$q = q_0 + \delta q,$$

ahol a 0 -val jelzett értékek a $t = 0, x = 0$ állapotra vonatkoznak

$$\frac{\partial^2 \delta v_1}{\partial t^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 \delta v_1}{\partial t \partial x} + \lambda_2 \frac{\partial \delta v_1}{\partial t} + \lambda_3 \frac{\partial \delta v_1}{\partial x} = \lambda_4 \delta q(t) \quad (11)$$

Ha a δT_1 Laplace-transzformáltját φ -vel
 δq " " η -val jelöljük, azaz

$$\varphi = s \int_0^\infty \delta T_1 e^{-st} dt$$

$$\eta = s \int_0^\infty \delta q(t) e^{-st} dt$$

$$s^2 \varphi + \lambda_1 s \frac{d\varphi}{dx} + \lambda_2 s \varphi + \lambda_3 \frac{d\varphi}{dx} = \lambda_4 \eta, \quad (12)$$

ezt rendezve

$$\varphi (s^2 + \lambda_2 s) + \frac{d\varphi}{dx} (\lambda_1 s + \lambda_3) = \lambda_4 \eta. \quad (13)$$

A differenciálegyenletet a $\varphi(x)$ változóra megoldva

$$\varphi = \frac{\lambda_4 \eta}{s^2 + \lambda_2 s} \left[1 - \exp \left(-x \frac{s^2 + \lambda_2 s}{\lambda_1 s + \lambda_3} \right) \right]. \quad (14)$$

A (10)-es egyenlet φ/η -ra olyan átviteli függvényt tartalmaz, amely zárt alakban nem transzformálható vissza a frekvenciatartományból az időtartományba, ezért igyekszünk olyan jól kezelhető közelítő képlet-

hez jutni, amely számításainknak jobban megfelel.

A (14) -ben szereplő exponenciális függvény kitevőjét az operátorparameter frekvenciaértelmezése esetén valós és képzetes részre bonthatjuk:

$$\exp\left(-x \frac{(j\omega)^2 + \lambda_2 j\omega}{\lambda_1 j\omega + \lambda_3}\right) = \exp\left(\omega^2 x \frac{\lambda_3 - \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3^2 + \lambda_1 \omega^2}\right) \cdot \exp\left(-j\omega x \frac{\lambda_2 \lambda_3 - \lambda_1 \omega^2}{\lambda_3^2 + \lambda_1 \omega^2}\right) \quad (15)$$

A kifejezés valós része a szokásos értékek mellett elhanyagolható. A tápvizelőmelegítő soros csőhossza, az x legfeljebb 100-200 m. A kísérletek során mérhető legnagyobb körfrekvencia 0,0522 rad/s volt. A szokásos csőméretekéből / \emptyset 32/22; \emptyset 32/24; \emptyset 24/18; \emptyset 38/31, stb./ és vízsebességekből /0,5-1 m/s/ számítható λ értékek alapján az exponenciális függvény valós részének értéke legfeljebb 2-3 %-kal tér el az egységtől.

A képzetes rész szemelláthatóan első közelítésben a frekvenciával arányos értéket ad, azaz visszatérve az operátorparameterre a (14) közelítése

$$\frac{\varphi}{\eta} = \frac{\lambda_4}{s(s+\lambda_2)} \left(1 - e^{-\mu x s}\right) \quad (16)$$

alaku lesz.

Az állandót szintén az $s \rightarrow 0$ feltétel alapján lehet meghatározni, ami $\omega < 0,05$ értékekre ezrelékpon-tossággal helyes eredményt ad. Innen

$$\mu = \frac{\lambda_2}{\lambda_3}$$

A (16) már könnyen visszatranszformálható. Ha az η , illetve az időtartományban a δq zavaróhatást egységugrásalakunak tételezzük fel:

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\varphi}{\eta}\right) = \frac{\delta \mathcal{V}}{\delta q} = \frac{\lambda_4}{\lambda_2^2} e^{-\lambda_2 t} \left(1 - e^{-\frac{\lambda_1 \mu x}{t}}\right) + \frac{\lambda_4 \mu x}{\lambda_2}, \text{ ha } t \geq \mu x \quad (17/a)$$

$$= \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \left(t + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2}\right); \quad t \leq \mu x \quad (17/b)$$

Az eredményül kapott időfüggvény a tápvizelőmelegítőben folyó víz hőmérsékletének változását adja abban az esetben, ha az $\eta = \bar{f}[\eta]$, azaz a tápvizelőmelegítőcsövek fűtése a teljes hosszban egyidőben, egyforma mértékben változik. Ez a feltétel megengedhető, hiszen a tápvizelőmelegítőt fűtő füstgázok sebessége 4-6 m/s, azaz még osztott tápvizelőmelegítő esetén is a változás 1-3 s alatt végigvonul, ami elhanyagolhatóan rövid idő az átmeneti folyamat lefolyásához képest.

A kapott függvény kitűnően tartalmazza a jelenség fizikájából is megalkotható képet. Ha a melegített cső mindkét irányban végtelen hosszú lenne, a (17/b) egyenlet lenne érvényes a teljes folyamatra, $t_{kr} = \mu x = \infty$. A (17/b) egyenletben az x nem szerepel, azaz a változás függetlenül attól megy végbe, hogy a cső melyik pontját vizsgáltuk meg. A jelenség fő jellemzője az első, integráló jellegű tag, a vizsgált pont vízhőmérsékletében ugyanis a vízsebesség által meghatározott beérkezés sebességével integrálódik az összes előző, végtelen sok dx csődarabon átadott $d\delta q$ hőmennyiség. Ezt az értéket csökkenti az $1 - e^{-\lambda_2 t}$ -vel arányos tag, az a hő, amely a csővezeték hőkapacitásának feltöltéséhez szükséges. Ez a tag az idővel 0-felé tart.

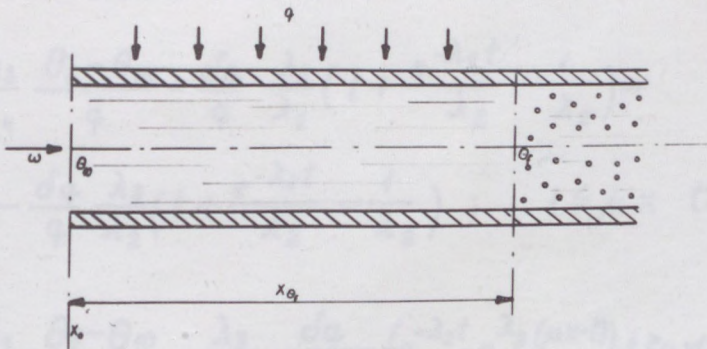
A (17/a) egyenlet annak hatását tükrözi, hogy a tápviz-előmelegítőcső a belépés oldaláról véges méretű. A véges kezdőpont hatása akkor érezhető, ha az a folyadék elem, amely a változás kezdetén lépett be a csőbe, a sebesség által meghatározott idő alatt a vizsgált x pontra érkezik.

Ettől kezdve az integráló hatás megszűnik, a hőfokot jellemző legfontosabb tag a $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \mu x$, azaz a hőterhelés egyenletességét kifejező, a kezdőponttól mért távolsággal arányos mennyiség. A (17/a) egyenlet első tagja pedig akkor érvényesül, ha a csőfalban lezajló átmeneti tárolási jelenségek még észrevehetőek. Így a (17/a) egyenlet rövid csőszakaszra, a (17/b) egyenlet elsősorban a hosszú csőszakaszra jellemző. A két egyenlet, mint a behelyettesítéssel könnyen belátható, $t_{kr} = \mu x$ időpontra azonos értéket szolgáltat.

Feltűnő, hogy a μ értékére mégsem $\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{w}$ adódott, hanem olyan érték, amely a sebesség által egyedül meghatározott $t = \mu x$ kritikus időt meghosszabbítja. Ez szintén a csőfal tárolóképességével magyarázható. Az integrálás akkor fejeződik be, ha a cső kezdőpontján lejátszódó átmeneti jelenségek állandósulása idején bekövetkező állapot hatása a csőszakasz végére érkezik. A fenti megfontolások mellett, hogy igazolják a közelítés helyes voltát, megmutatják annak korlátait is. A dinamikai jelenségeknek azt a bonyolult lefolyását, amelyet a (14) tükröz, csak abban az esetben lehet a fentiek alapján egyszerűsíteni, ha a jelenséggel sorbakapcsoltan olyan elemek vannak, melyek a nagyobb frekvenciák hatását kiszűrik. Hőcserélőnél természetesen általában ez az eset nem áll fenn, ilyenkor célszerű [19] alapján számolni. A közelítés mértékét mutatja egyben az állandók meghatározásának bizonyos önkényes volta. A kazánokon végzett mé-

rések, a hőátadási kismintakísérletek, melyeket a 4. és 5. fejezetek ismertetnek, igazolják, hogy kazánokra a közelítés módszere és eredménye teljesen kielégítő.

Nézzük meg a továbbiakban a csőben a folyadék forráspontjának mozgásegyenletét az átmeneti folyamat alatt. A forráspont helykoordinátáját x_{θ_f} -el jelöljük /18. ábra/, a forrás hőfoka az adott nyomáson állandó θ_f érték.



18. ábra.

A folyadéknak az $x = x_{\theta_f}$ helyig és a $t = t_{\theta_f}$ idő alatt a belépési θ_{10} hőfokról θ_f hőfokra kell felmelegednie. Stacionárius állapotban, állandó hőterhelés mellett

$$\vartheta_1 = \theta_{10} + q \frac{1}{w c_1 F_1 \gamma_1} x = \theta_{10} + \frac{\lambda_4}{\lambda_3} q x,$$

igy a δq többlet hőmennyiség által szolgáltatandó felmelegedésnek $\delta \vartheta = \theta_f - \theta_{10} - \frac{\lambda_4}{\lambda_3} q x$ -nek kell lennie a cső x pontján, hogy az a tápvizelőmelegítőszakasz végpontja legyen. A (17/a) és (17/b) -ből

$$\frac{\delta J}{\delta q} = \frac{\theta_f - \theta_{10}}{\delta q} \frac{\lambda_4}{\lambda_3} \frac{q}{\delta q} x = \frac{\lambda_4}{\lambda_2^2} e^{-\lambda_2 t} (1 - e^{-\lambda_2 \mu x}) + \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \mu x; t \geq \mu x \quad (18/a)$$

$$= \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \left(t + e^{-\lambda_2 t} \frac{1}{\lambda_2} \right); \quad t \leq \mu x \quad (18/b)$$

innen

$$x = \frac{\lambda_3}{\lambda_4} \frac{\theta_f - \theta_{10}}{q} - \frac{\delta q}{q} \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \left(t + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2} \right) =$$

$$= x_0 - \frac{\delta q}{q} \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \left(t + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2} \right); \quad t \leq \mu x \quad (19/a)$$

$$x = \frac{\lambda_3}{\lambda_4} \frac{\theta_f - \theta_{10}}{q + \delta q} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2^2} \frac{\delta q}{q + \delta q} \left(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_2 (\mu x - t)} \right); t \geq \mu x \quad (19/b)$$

Amint láthatjuk a $t \geq \mu x$ esetben x -re nem kapunk explicit kifejezést. Mivel a szokásos esetekben az x és a t elegendően nagy, a (19/b) kifejezés második tagja az elsővel szemben elhanyagolható és az $x = x_{dill} = \frac{\lambda_3}{\lambda_4} \frac{\theta_f - \theta_{10}}{q + \delta q}$ közel áll az x_{krit} -hez / $t = \mu x$ eset/. Ha ez nem áll fenn és a (19/a) kifejezés t -re megoldható és ebben az esetben

$$t = -\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{\lambda_2^2}{\lambda_4} \frac{\theta_f - \theta_{10} - \frac{\lambda_4}{\lambda_3} (q + \delta q) x}{\delta q (1 - e^{-\lambda_2 \mu x})}$$

kifejezéssel, mint inverz függvénnyel számolhatunk, amiből az $x = x(t)$ meghatározható.

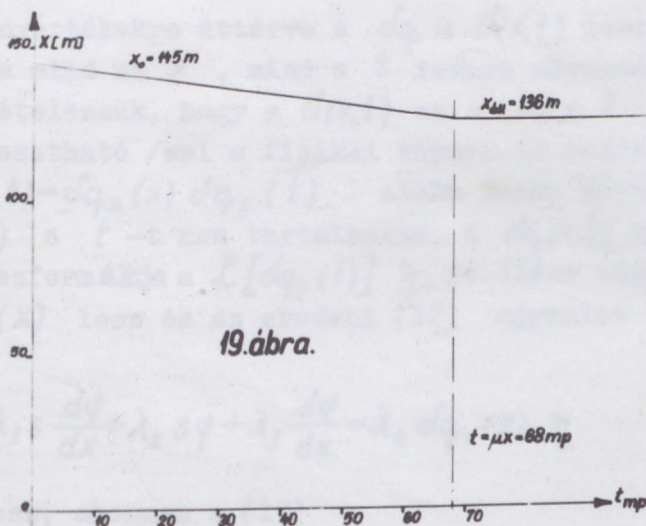
Az $x=x(t)$ lefolyását

$$q = 1 \text{ kkal/m}^2, \text{ s hőterhelésre}$$

$$\theta_f = 274 \text{ C}^\circ / 60 \text{ at/}$$

$$\theta_0 = 160 \text{ C}^\circ \text{ belépő tápvizhőfok}$$

értékekre, 10 %-os zavarásra a 19. ábrán láthatjuk. Mivel innen is látszik, hogy a második rész befolyása jelentéktelen, az átmeneti függvény egyszerűsítve (19/a) alakú lesz, $t=\mu x$ értékig, ettől pedig az $x_{kr} = x t / \mu$ értéken állandósul.



2.6.2. Az elhanyagolások hatása

Vizsgáljuk meg bizonyos elhanyagolások hatását. A számítások során feltételeztük, hogy a $q=f(x)$, azaz a teljes tápvizelőmelegítőrészen a hőterhelés azonos időpontban állandó. Ez a feltétel az ellenáramú hőcserélőnél is csak közelítőleg használható, a valóságban pedig a hőterhelés mindig $q(x, t)$. Ezzel a feltétellel az eredeti (8) egyenlet így lesz pontosabb:

$$\frac{\partial \vartheta_2}{\partial \tau} = k_2 \cdot q(x, t) - k_3 (\vartheta_2 - \vartheta_1), \quad (20)$$

innen (7)-be helyettesítve és az állandók eredeti jelölését fenntartva a (10)

$$\frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial t^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial t \partial x} + \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} + \lambda_3 \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} = \lambda_4 q(x, t) \quad (21)$$

alaku lesz.

Növekményértékekre áttérve a δq is $\delta(x, t)$ lesz, tartalmazva mind az x , mind a t irányu növekményeket. Ha feltételezzük, hogy a $\delta(x, t)$ az x és a t szerint szétválasztható /ami a fizikai képnek is megfelel/, a $\delta q(x, t) = \delta q_x(x) \delta q_t(t)$ alaku lesz. Mivel a $\delta q_x(x)$ a t -t nem tartalmazza, a $\delta q(x, t)$ Laplace-transzformáltja a $\mathcal{L}[\delta q_t(t)]$ η jelölést meghagyva $\eta \cdot \delta q_x(x)$ lesz és az eredeti (12) egyenlet

$$s^2 \varphi + \lambda_1 s \frac{d\varphi}{dx} + \lambda_2 s \varphi + \lambda_3 \frac{d\varphi}{dx} = \lambda_4 \delta q_x(x) \cdot \eta \quad (22)$$

alaku lesz, ahonnan a (13)

$$\varphi(s^2 + \lambda_2 s) + \frac{d\varphi}{dx} (\lambda_1 s + \lambda_3) = \lambda_4 \delta q_x(x) \cdot \eta \quad (23)$$

-ra módosul.

A differenciálegyenletnek x függvényeire kiszámított megoldása adja az új $\frac{\varphi}{\eta}$ átviteli függvényt.

$$\varphi = \exp\left(-x \frac{s^2 + \lambda_2 s}{\lambda_1 s + \lambda_3}\right) \left[\lambda_4 \frac{\eta}{\lambda_1 s + \lambda_3} \int \left(\exp\left(\frac{s^2 + \lambda_2 s}{\lambda_1 s + \lambda_3} x\right) \cdot \delta q_x(x) dx \right) \right] \quad (24)$$

ahol a kezdeti feltételekből

$$C = \lambda_4 \eta \frac{\lambda_2 s^2 \lambda_3}{s^2 + \lambda_2 s} \delta q_x \quad \text{alaku.}$$

A $\delta q_x(x)$ -et az integrálszámítás középértéktételével legnagyobb és legkisebb értékével egyenlővé téve kiemelhetjük az integráljel alól

$$q_{x \max} \varphi_{\text{köz}} \leq \varphi \leq q_{x \min} \varphi_{\text{köz.}}$$

ahol

a φ közelítésre felvett

$\varphi_{\text{köz}}$ a (14) -es egyenletben kapott érték.

Igy a hőterhelésnek hosszirányú változása esetén az átmeneti folyamat módosulása nem nagyobb, mint a hőterhelés hosszirányú módosulása.

2.6.3. A víztáplálás változásának befolyása

Vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor a tápvizelőmelegítőn átfolyó víz sebessége változik, de a külső hőterhelés azonos marad. A folyamat ebben az esetben lényegesen nemlineáris lesz, mert az egyenletben szereplő α hőátadási tényező a sebesség függvénye. Ugyanazokkal a feltételekkel, mint az előbbieken, ha az $\alpha = \beta w^{0,8}$ -al számolunk, egyenleteink a következőképpen alakulnak:

$$\left(\frac{\partial i_1}{\partial t} + w \frac{\partial i_1}{\partial x} \right) F_1 \gamma_1 dx = \beta_1 w^{0,8} (\mathcal{V}_2 - \mathcal{V}_1) K dx \quad (25)$$

$$\frac{\partial i_2}{\partial t} F_2 \gamma_2 dx = q \cdot dx - \beta_1 w^{0,8} (\mathcal{V}_2 - \mathcal{V}_1) K dx \quad (26)$$

innen

$$\frac{\beta_1 K}{F_1 \delta_1 c_1} = l_1, \quad \frac{q}{F_2 \delta_2 c_2} = l_2 \quad \text{és} \quad \frac{\beta_1 K}{F_2 \delta_2 c_2} = l_3 \quad \text{állandókkal}$$

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial t} + w \frac{\partial \psi_1}{\partial x} = l_1 w^{0,8} (\psi_2 - \psi_1) \quad (27)$$

$$\frac{\partial \psi_2}{\partial t} = l_2 - l_3 w^{0,8} (\psi_2 - \psi_1), \quad (28)$$

az egyenletek egyszerűsítésére csak a növekményérté-
kekkel számolunk, tehát $\psi_1 = \theta_{10} + \delta \psi_1$

$$\psi_2 = \theta_{20} + \delta \psi_2$$

$$w = w_0 + \delta w$$

és a $w^{0,8} = (w_0 + \delta w)^{0,8} \approx w_0^{0,8} + 0,8 w_0^{-0,2} \delta w$ -al line-
arizálunk, a

$$w \frac{\partial \psi_1}{\partial x} = (w_0 + \delta w) \frac{\partial \psi_1}{\partial x} = (w_0 + \delta w) \frac{\partial \delta \psi_1}{\partial x}$$

szorzatot pedig a

$w_0 \frac{\partial \delta \psi_1}{\partial x} + \delta w \left(\frac{\partial \delta \psi_1}{\partial x} \right)_0 - w_0 \left(\frac{\partial \delta \psi_1}{\partial x} \right)_0$ -el köze-
litjük meg, továbbá a másodrendűen kicsi $l_1 0,8 w_0^{-0,2} \delta w \delta \psi_1$
és $l_1 0,8 w_0^{-0,2} \delta w \delta \psi_2$ értékeket elhanyagoljuk, a (27)
és (28) egyenletek az alábbiak szerint alakulnak át:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta \psi_1}{\partial t} + w_0 \frac{\partial \delta \psi_1}{\partial x} + \delta w \left(\frac{\partial \delta \psi_1}{\partial x} \right)_0 - w_0 \left(\frac{\partial \delta \psi_1}{\partial x} \right)_0 &= l_1 w_0^{0,8} \delta \psi_2 - l_1 w_0^{0,8} \delta \psi_1 + \\ &+ l_1 0,8 w_0^{-0,2} (\theta_{20} - \theta_{10}) \delta w \end{aligned} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial t} = -l_3 \omega_0^{0,8} \mathcal{L} \mathcal{V}_2 + l_3 \omega_0^{0,8} \mathcal{L} \mathcal{V}_1 - l_3 \cdot 0,8 \cdot \omega_0^{-0,2} \theta_{20} \mathcal{L} \omega + l_3 \cdot 0,8 \cdot \omega_0^{-0,2} \theta_{10} \mathcal{L} \omega. \quad (30)$$

$$\mathcal{L}(\mathcal{L} \mathcal{V}_1) = \varphi; \quad \mathcal{L}(\mathcal{L} \mathcal{V}_2) = \psi; \quad \mathcal{L}(\mathcal{L} \omega) = \eta \quad \text{és}$$

$$l_1 \omega_0^{0,8} = \mu_1; \quad \omega_0 = \mu_2; \quad l_1 \cdot 0,8 \cdot \omega_0^{-0,2} (\theta_{20} - \theta_{10}) - \left(\frac{\partial \mathcal{L} \mathcal{V}_1}{\partial x} \right)_0 = \mu_3$$

$$\omega_0 \left(\frac{\partial \mathcal{L} \mathcal{V}_1}{\partial x} \right)_0 = \mu_4; \quad l_3 \omega_0^{0,8} = \mu_5; \quad l_3 \cdot 0,8 \cdot \omega_0^{-0,2} (\theta_{10} - \theta_{20}) = \frac{l_3}{l_1} \mu_3 = \mu_6 \quad \text{jelölésekkel:}$$

$$\varphi(s + \mu_1) + \mu_2 \frac{d\varphi}{dx} = \mu_3 \eta + \mu_4 \psi + \mu_4 \quad (31)$$

$$\psi(s + \mu_5) = \mu_5 \varphi + \mu_6 \eta, \quad (32)$$

ahonnan a ψ -t kiejtve

$$\varphi[s^2 + (\mu_1 + \mu_5)s] + \frac{d\varphi}{dx} (\mu_2 s + \mu_2 \mu_5) = \eta [\mu_3 s + (\mu_1 \mu_6 + \mu_3 \mu_5)] + \mu_4 s + \mu_4 \mu_5 \quad (33)$$

a differenciálegyenlet a frekvenciatartományban értelmezett φ és η változókra a következő megoldást szolgáltatja:

$$\varphi = \frac{\mu_4 s + \mu_4 \mu_5}{s^2 + (\mu_1 + \mu_2)s} + c \cdot \exp \left[-\frac{s^2 + (\mu_1 + \mu_2)s}{\mu_2 s + \mu_2 \mu_5} x \right] + \quad (34)$$

$$+ \frac{\mu_3 s + (\mu_1 \mu_5 + \mu_3 \mu_5)}{\mu_2 s + \mu_2 \mu_5} \exp \left\{ -\frac{s^2 + (\mu_1 + \mu_2)s}{\mu_2 s + \mu_2 \mu_5} x \left[\int \eta \cdot \exp \left(\frac{s^2 + (\mu_1 + \mu_2)s}{\mu_2 s + \mu_2 \mu_5} x \right) dx \right] \right\},$$

ahol a c az integrálási állandó.

Mivel az η nem függvénye az x helykoordinátának

$$\varphi = \eta \frac{[\mu_3 s + (\mu_1 \mu_6 + \mu_3 \mu_5)] + \mu_4 s + \mu_4 \mu_5}{s^2 + (\mu_1 + \mu_5) s} \left[1 - \exp\left(-s x \frac{s + \mu_1 + \mu_5}{\mu_2 s + \mu_2 \mu_5}\right) \right] \quad (35)$$

alaku lesz a kezdő feltétel figyelembevételével. Ha az átmeneti függvényt keressük a $\mathcal{L}^{-1}(\eta) = 1 \quad t > 0$
 $= 0 \quad t < 0$

értéket helyettesítjük a (31) -be. Az átviteli függvény exponenciális részének kitevőjében lévő tört $s \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ esetre $\frac{\mu_1 + \mu_5}{\mu_2 \mu_5}$, $s \rightarrow \infty (t \rightarrow 0)$ esetre $\frac{1}{\mu_2}$ lesz. A visszatranszformálhatóság és egyszerűbb összefüggések nyerése érdekében itt is egy μ értékkel közelítjük a kitevőben szereplő tört kifejezést.

A közelítés jóságát hasonlóképpen bizonyíthatjuk, mint a korábbi esetben, a pontos és közelítő átviteli függvények nem térnek el lényegesen egymástól, a függvényközelítés első szakaszán a kitevőben szereplő tag egyáltalán nem jelentkezik, csak a kritikus pont meghatározásában van jelentősége.

A

$$\frac{\mu_1 + \mu_5}{\mu_2 \mu_5} = \mu = \text{áll}$$

közelítéssel és

$$\beta_1 = \frac{\delta w (\mu_1 \mu_6 - \mu_1 \mu_3) - \mu_1 \mu_4}{(\mu_1 + \mu_5)^2}; \quad \beta_2 = \frac{\delta w (\mu_1 \mu_6 + \mu_3 \mu_5) + \mu_4 \mu_5}{\mu_1 + \mu_5}$$

jelölésekkel a (35) szögletes-zárójel előtti szorzótagjának visszatranszformáltja

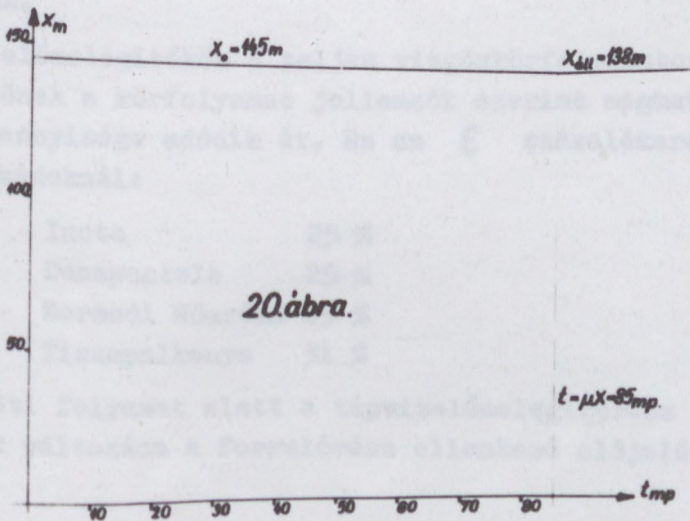
alakú, az $1 - e^{-\mu x}$ eltolás figyelembevételével pedig

$$\delta T_1 = \beta_1 e^{-(\mu_1 + \mu_5)t} + \beta_2 t - \beta_1; \quad t \leq \mu x \quad (36/a)$$

$$\delta T_1 = \beta_1 e^{-(\mu_1 + \mu_5)t} \left(1 - e^{(\mu_1 + \mu_5)\mu x} \right) + \beta_2 \mu x; \quad t \geq \mu x \quad (36/b)$$

esetekre a (17/a) és (17/b) -vel analóg megoldást ad azzal a különbséggel, hogy az állandók értékébe $\delta w - t$ be kell számítani. Innen a (19/a), (19/b) egyenletekhez hasonló kifejezést kapunk a tápvizelőmelegítő végpontjának mozgásegyenletére, csak az állandók lesznek különbözőek.

Az átmeneti folyamat lefolyását a 19. ábrához hasonló értékekre, $w = 1m/s$ -ra, 10 %-os zavarás esetére a 20. ábrán láthatjuk.



Ebből is kitűnik, hogy a (17) egyenlettel jellemzett esethez hasonlóan, hosszú csőszakaszra az átmeneti folyamat (36/b) -vel leírt lefolyása már nem hoz lényeges változást a $t = \mu x$ időpontig bekövetkezett változásokkal szemben.

Hasonló megfontolásokat végezhetünk abban az esetben, ha a korábban említett egyszerűsítő feltételek vizsgálatánál számításba vesszük a sebesség helykoordináta szerinti változását is, amely a hőmérsékletváltozás következtében előálló kiterjedés miatt lép fel. Ebben az esetben a $\delta w = f(\delta v_i)$ összefüggést, melyet a vizgőztáblázatok tartalmaznak, megfelelő függvénnyel kell közelíteni és a (34) integrált a $L(\delta w) = L[f(\delta T_i)] \eta$ helyettesítéssel kell megoldani. A számítás könnyen elvégezhető, de gondolatmenetünket csak bonyolítaná és ugyanakkor nem adna minőségileg különböző eredményt. A mennyiségi különbség hatása pedig a szokásos mérési pontossághoz és egyéb fizikai tényezők elhanyagolásához viszonyítva nem jelentős.

Abban az esetben, ha a hőterhelésben és a sebességben egyidejűleg következik be változás, a linearitási alapfeltételek következtében a két változást szuperponálhatjuk.

A tápvizelőmelegítőknél a teljes vizgőkörfolyamaton közölt hőnek a körfolyamat jellemzői szerint meghatározott mennyisége adódik át. Ez az ξ százalékarány hazai kazánoknál:

Inota	25 %
Dunapentele	25 %
Borsodi Hőerőmű	25 %
Tiszapalkonya	31 %

Az átmeneti folyamat alatt a tápvizelőmelegítő rész hosszának változása a forralórész ellenkező előjelű

változásának felel meg, így a tápvizelőmelegítőrészen történt változásokat forraló előmelegítő esetén a forralórészen vesszük figyelembe azzal a sullyal, amellyel a megfelelő rész a hőátadásban előzőleg résztvett. Természetesen ez a feltevés is bizonyos elhanyagolást rejt magában, mert a forralórészen a hőátadási viszonyok jelentősen különböznek az előmelegítőrésztől.

A fenti megfontolások alapján a gőzfejlesztés változására felírva a tápvizelőmelegítő rész átviteli függvénye:

$$F_{\text{tápvize.}}(s) = \frac{\varepsilon_1}{s(s+\lambda_2)} \frac{1}{\mu x} \left(1 - e^{-\mu x s}\right) = \frac{\varepsilon_1}{T_e} \frac{1}{s(1+T_{ec}s)} \left(1 - e^{-T_e s}\right) \quad (37)$$

alaku lesz.

2.6.4. A forralórész

A forralórészen a hőátadás viszonyai rendkívül bonyolultak és viszonylag kevésé vannak feltárva. Az ismert eredmények is általában kisebb nyomásokon és hőfokon végzett kísérletek extrapolációi. A hőátadás legfőbb problémái (a forralás közben) röviden összefoglalva a következők: [38], [119], [120], [121], [122], [123]

- 1/ a vizgőz keverék áramlási viszonyai
- 2/ a gőz- és vizrészek relativ áramlási viszonyai
- 3/ a gőzbuborékok relativ nyomásviszonyai
- 4/ a gőzképződés és a hőátadás viszonyai /buborékos, hártvás, gőzrudképződés, stb./

Elsősorban minőségi jellegű vizsgálatainkhoz az eszközölt egyéb elhanyagolások figyelembevételével vehetjük, hogy

$$\alpha = Cq^{0,7}, \quad (38)$$

ahol

- a C a nyomástól is függő tapasztalati állandó
- a q értékét buborékos forrás esetére a szokásos $q = (400-500) \cdot 10^3 \text{ kkal/m}^2 \cdot \text{ó}'$ hőterhelésekre számítjuk.

A számítási elhanyagolások ebben az esetben még jelentősebbek, mint a tápvizelőmelegítő vizsgálatánál. Fontos szerepet játszik az a tény, hogy a hőátadás viszonyai elméletileg még nem eléggé tisztázottak. A hőterhelést újra állandónak vesszük, ami utóbbi elhanyagolás azonban ebben az esetben kisebb jelentőségű, mert az egyes csőszakaszon lejátszódó események nem befolyásolják az utána következő szomszédos csőszakaszok változásait. Az egész forralórészen a víz-gőzkeverék hőmérsékletét állandónak tételezzük fel, amely megfelel az adott nyomáson meghatározott telítési hőmérsékletnek. Így nem vesszük figyelembe a kazánviz egyes részeinek viszonylag jelentéktelen mértékű tulhevülését, vagy alálhülését. A telítési hőfokot θ_f -val, a gőztermelést D -vel (kg/s) jelölve

$$Ddx = \frac{\alpha}{r} (\nu_2 - \theta_f) K \cdot dx \quad (39)$$

$$F_2 c_2 \gamma_2 \frac{d\nu_2}{dt} dx = q dx - \alpha (\nu_2 - \theta_f) K dx, \quad (40)$$

ahol

- D a termelt gőzmennyiség kg/s
- r az adott nyomáson meghatározott rejtett hő kkal/kg, továbbá

$$k_1' = \frac{K}{r}; \quad k_2' = \frac{1}{F_2 c_2 \gamma_2}; \quad k_3' = \frac{K}{r} \Theta_f; \quad k_4' = \frac{K}{F_2 c_2 \gamma_2}; \quad k_5' = \frac{K \Theta_f}{F_2 c_2 \gamma_2}$$

jelölésekkel:

$$D = \alpha k_1' \mathcal{V}_2 - \alpha k_2' \quad (41)$$

$$\frac{d\mathcal{V}_2}{dt} = k_3' q - \alpha k_4' \mathcal{V}_2 - \alpha k_5' \quad (42)$$

Ha $D = D_0 + \delta D$; $\alpha = \alpha_0 + \delta \alpha \approx C(q_0^{0,7} + 0,7 q_0^{-0,3} \delta q)$,
továbbá

$$q = q_0 + \delta q; \quad \mathcal{V}_2 = \Theta_{20} + \delta \mathcal{V}_2$$

$$k_1 = C k_1'; \quad k_2 = C k_2'; \quad k_3 = k_3'; \quad k_4 = C k_4'; \quad k_5 = C k_5'$$

a szokásos egyszerűsítésekkel és összevonásokkal a
(41) és (42) egyenlet

$$\delta D = q_0^{0,7} \cdot k_1 \delta \mathcal{V}_2 + 0,7 q_0^{-0,3} \cdot k_1 \Theta_{20} \delta q - 0,7 q_0^{-0,3} \cdot k_2 \delta q \quad (43)$$

$$\frac{d\delta \mathcal{V}_2}{dt} = k_3 \delta q - 0,7 q_0^{-0,3} \cdot k_4 \Theta_{20} \delta q - q_0^{0,7} \cdot k_4 \delta \mathcal{V}_2 - 0,7 q_0^{-0,3} \cdot k_5 \delta q \quad (44)$$

alaku lesz. Ha a fenti egyenletekben szereplő állandókra a

$$\lambda_1 = q_0^{0,7} \cdot k_1; \quad \lambda_2 = 0,7 q_0^{-0,3} (k_1 \Theta_{20} - k_2);$$

$\lambda_3 = q_0^{0,7} \cdot k_4$; $\lambda_4 = k_3 - 0,7 q_0^{-0,3} (k_4 \Theta_{20} + k_5)$ jelöléseket alkalmazzuk:

$$\delta D = \lambda_1 \delta \mathcal{V}_2 + \lambda_2 \delta q \quad (45)$$

$$\frac{d\delta \mathcal{V}_2}{dt} = -\lambda_3 \delta \mathcal{V}_2 + \lambda_4 \delta q \quad (46)$$

egyenleteket kapjuk. Laplace-transzformáltakra áttérve

$$\mathcal{L}(\mathcal{J}D) = \xi; \quad \mathcal{L}(\mathcal{J}\mathcal{J}_2) = \psi; \quad \mathcal{L}(\mathcal{J}q) = \eta$$

jelölésekkel a (45) és (46) egyenlet

$$\xi = \lambda_1 \psi + \lambda_2 \eta \quad (47)$$

$$s\psi = -\lambda_3 \psi + \lambda_4 \eta \quad (48)$$

alakba írható. Innen

$$\frac{\xi}{\eta} = \frac{\lambda_1 \lambda_4}{s + \lambda_3} + \lambda_2 \quad (49)$$

A (49) egyenletet visszatranszformálva, ha az η zavarás ugrásfüggvény alakú

$$\mathcal{J}D = \mathcal{J}q \left[\frac{\lambda_1 \lambda_4}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 t}) + \lambda_2 \right] \quad (50)$$

átmeneti folyamatot kapunk, azaz a gőzképződés a hőterhelés változása után azonnal meghatározott értékkel ugrásszerűen megváltozik, majd az átmeneti folyamat tartama alatt az λ_3 időállandóval tovább nő az állandósult állapotig.

Matematikailag még nehezebben követhető az egyes csőszakaszokon képződött gőzbuborékok felszállásának és összegyűlésének folyamata. Bár a természetes cirkulációjú kazánokban a keringtetési sebesség 0,5-1 m/s között szokott változni [123], a valódi sebesség ennél általában lényegesen nagyobb és egyes irodalmi adatok szerint eléri a 10 m/s-ot [119], függően a kazán nyomásviszonyaitól, a csőátmérőtől és a vizgőzkeverék összetételétől. A folyamatra vonatkozó megfigyelések elég hiányosak, az egyes irodalmi adatok ellent-

mondóak [124]. Így a tüztér alján keletkező gőzbuborékok a gőz abszolút sebességétől függően kb. 2-15 s alatt érkeznek a kazánodba, azaz ezalatt az idő alatt a kazánod integrálja a forracsőben lejátszódó változásokat. Meg kell még jegyezni, hogy a hőátadás előbbi módon levezetett számítása a hőátadási tényező statikus szemléletéből indul ki, figyelembe kell azonban venni, hogy a hőátadási tényező rendkívül függ attól, hogy a gőzképződés milyen formában történik, hol lépi át a buborékos gőzképződés a teljes gőzrudak képződésének határát, ami pillanatnyi labilitást vihet be a hőátadásba. Ilyen jelenség a forracsövek felszálló ágai-ban a gőzbuborékok összegyűlésének és egyesülésének következtében könnyen létrejöhet. Így a korábban levezetett folyamatot csak általános összefüggésként foghatjuk fel. Az idevonatkozó ismereteket jelentősen bővíteni fogja az a nagyjelentőségű kutatómunka, amely jelzett atomok segítségével igyekszik a kazán cirkulációs viszonyait, a víz- gőzkeverék eloszlását nagyméretű kísérleti kazánokon vizsgálni. Az eddigi megállapítások alapján is azonban az leszögezhető, hogy a gőzbuborékok felgyűlésének időbeli lefolyása integráló jellegű, hiszen amint említettük a dob integrálja a forracsövek felszálló ágaiból érkező gőztömeget. Ez az integrálás addig folyik, amíg az utolsó gőzmennyiség változás is elérkezik az elgőzöltetés legalsó pontjától a dob víztükréhez. Ha a felzálló gőzbuborékok sebessége w_c és a forraló csőhossz átlaga L_c a felszállás ideje $T_c = \frac{L_c}{w_c}$ és az átmeneti folyamat

$$F_{cirk}(s) = \frac{1 - e^{-T_c s}}{T_c s} \quad (51)$$

alakú lesz, amelynek visszatranszformáltja /az időbe-

11 lefolyás/

$$\sigma D(t) = \sigma D_{all} \frac{t}{T_c}; \quad t \leq T_c \quad (52/a)$$

$$\sigma D_{all} \frac{t}{T_c} - \sigma D_{all} \left(\frac{t - T_c}{T_c} \right) = \sigma D_{all}; \quad t \geq T_c. \quad (52/b)$$

2.6.5. A kazánokban lejátszódó jelenségek

Az eddigi számításoknál figyelmen kívül hagytuk a gőznyomás változását. Ez az idealizált eset rendkívüli tanulsággal szolgál. Ha a gőznyomást sikerül a dobban változatlan értéken tartani, az átmeneti jelenségek meglepően rövid idő alatt, kb. 15-20 s holtidővel és 40-60 s időállandóval játszódnak le, a kazán a tüzelésben bekövetkező változásokat rendkívül rugalmasan követi. A szabályozásnak tehát fő feladatául kell kitűznie a kazán nyomásának állandósítását, ha ezt az egyéb üzemviszonyok lehetővé teszik.

Lényegesen módosul a helyzet, ha a tüzelés változása következtében beálló gőzterhelésváltozás nyomásváltozással is együtt jár.

Azonos dobnyomás és azonos turbinaszelep nyitás mellett a tüzelés módosítása következtében jelentkező gőztöbblet vagy hiány a dobban és a dob után a turbina /-ák/ szabályozó szelepéig a túlhevítőt és a csővezetéseket magában foglaló gőzterben felgyülik /integrálódik/. A turbina /-ák/ állandó szabályozó keresztmetszetén változó mennyiségű gőzt csak változó nyomás tud átkényszeríteni. Így a gőzterhelés változását a fogyasztó /vagy akár a gőzvezetékbe beépített mennyiségmérő miszer/ csak akkor és olyan mértékben

észleli, amikor és amilyen mértékben az áramlást kényszerítő dobnomás, vagy az áramlás akadályát jelentő turbinaszelepállás megváltozik. A dobban a nyomás változása a gőzmennyiségfeleslegnek a $(D_{termelt} - D_{fogyasztott})$ időbeli integráljától függ.

A dobnomás módosulása következtében megváltozik a túlhevítőn és a csővezetékeken átáramló gőzmennyiség, amely megváltoztatja az ellenállások következtében fellépő nyomásesést. Ez a jelenség bizonyos mértékig visszahat a primer jelenségre, visszacsatolásként fogható fel.

A dobnomás változása megváltoztatja a nyomás alatt álló vízmennyiség telítési hőmérsékletét, ezzel lényegesen megváltoznak a forrás viszonyai. A nyomás növekedése esetén a telítési hőmérséklet emelkedik, a kazánban tárolt nagymennyiségű, telített állapotban levő víz telítés alatti állapotba kerül, a tüzelés fokozódásának elsősorban ezt a többlethőt kell fedeznie. A nyomás csökkenése esetén a telítési hőmérséklet csökken, ami a két telítési hőmérséklet közötti, a teljes kazánvizben tárolt hőtartalom rovására a gőzfejlesztésben jelentkezik. A dobnomás változásának hatása így a primer jelenséggel ellentétes irányú, visszacsatolásként fogható fel, az átmeneti jelenségek idejét növeli.

A tárolásnak ezeket a jelenségeit számos, a korábbiakban ismertetett jelenség befolyásolja, amelyek részben üzemi, részben konstrukciós jellegűek. Ez magyarázza a mérési eredményeknek a későbbiekben még tárgyalandó elég jelentős szórását.

A minőségi áttekintés után nézzük meg a jelenségek mennyiségi alakulását.

A nyomásváltozást első közelítésben statikus megfontolások alapján vizsgálva

$$p - p_0 = k^x \int_0^t (D_{\text{termelt}} - D_{\text{fogyasztott}}) dt,$$

azaz

$$\Delta p = k^x \int_0^t \Delta D dt, \quad (53)$$

ahol

k^x állandó

p a nyomás at.

Az egyszerű közelítés érdekében a vízfelszíntől a turbinaszélepig terjedő gőztérben a gázállapotegyenletet egyformán érvényesnek vesszük és a nyomásváltozások és hőmérsékletváltozások következtében előálló fajtérfogatváltozásokat, mint a jelen esetben másodrendűen kis mennyiségeket elhanyagoljuk.

Az állandó megállapításánál az adott kazán gőzjellemzőiből kell kiindulni. A telítési állapotban a 4. táblázat alapján 60 %-os nyomásnövekedésnél a $p v'' = k_1$ szorzat értéke csak 6,5-7 %-ot változik. A gőz fajtérfogata a túlhevítő után a hazánkban szokásos nyomásvizonyoknál majdnem kétszeresére nő, így a túlhevítő és a csővezeték térfogatát is beszámítva, statikus elgondolásokból kiindulva a $p v''$ szorzat értékét a k_1 számításánál a telítettségi érték 1,2-1,5-szörösére kell venni, azaz kb.

$$k_1 = 2-3 \frac{\text{at} \cdot \text{m}^3}{\text{kg}}$$

Mivel $G \cdot v'' = V''$ ahol $V'' [\text{m}^3]$ a gőztérfogat és G kg a termelt gőzmennyiség

$$G = \frac{V''}{k_1} p,$$

a k^x értéke

$$\frac{V''}{k_1} \approx \frac{V''}{2-3} \frac{\text{kg}}{\text{at}}$$

lesz, azaz

$$\delta p = \frac{k_1}{V''} \delta G = \frac{k_1}{V''} \int_0^t \delta D dt.$$

4. táblázat

A $k_1 = p v''$ értékei telített állapotban

p at	v'' m^3/kg	$\frac{p v''}{\text{at m}^3/\text{kg}}$
40	0,05077	2,02
42	0,04829	2,02
44	0,04601	2,02
46	0,04394	2,02
48	0,04203	2,02
50	0,04026	2,01
55	0,03639	2,00
60	0,03313	1,98
65	0,03036	1,97
70	0,02798	1,96
75	0,02589	1,94
80	0,02405	1,93
85	0,02243	1,91
90	0,02096	1,89
95	0,01965	1,87
100	0,01846	1,85
110	0,01638	1,80
120	0,01463	1,76
130	0,01313	1,70
140	0,01182	1,65

Tehát a gőzterhelés növekedésétől függően a nyomásnövekedés átviteli függvénye

$$F_p(s) = \frac{\mathcal{L}(\delta p)}{\mathcal{L}(\delta D)} = \frac{k_1}{V''} \cdot \frac{1}{s} \quad (54)$$

lesz.

A nyomásváltozás következtében a kazánvíz hőtartalma

$$\Delta i' = k_2 \Delta p \quad (55)$$

arányban változik, ahol a k_2 értéke a 40-140 at-ás tartományban 1,7-0,93-ig változik az 5. táblázat szerint és a szokásos 1-3 at-ás nyomásváltozásoknál igen jó közelítéssel lineáris.

5. táblázat

A $k_2 = \frac{\Delta i'}{\Delta p}$ értékei telített állapotban

p at	i' kkal/kg	$k_2 = \frac{\Delta i'}{\Delta p}$ $\frac{\text{kkal}}{\text{kg, at}}$
40	258,4	1,7
42	261,8	1,6
44	265,0	1,6
46	268,2	1,55
48	271,3	1,5
50	274,3	1,44
55	281,5	1,36
60	288,3	1,30
65	294,8	1,24
70	301,0	1,20
75	307,0	1,16
80	312,8	1,12
85	318,4	1,08
90	323,8	1,03
95	329,1	1,02
100	334,2	1,02
110	344,2	0,97
120	353,9	0,95
130	363,4	0,93
140	372,7	

Ugyanekkor a fejlesztendő gőz rejtett hője ellenkező előjellel változik:

$$\dot{r} = -k_3 \dot{p}, \quad (56)$$

ahol a k_3 értéke 40-140 at-ás tartományban a 1,0 - 0,55-ig változik a 6. táblázat szerint.

6. táblázat

A $k_3 = \frac{\dot{r}}{\dot{p}}$ értékei

p at	r kkal/kg	$k_3 = \frac{\dot{r}}{\dot{p}}$ $\frac{\text{kkal}}{\text{kg, at}}$
40	669,0	0,1
42	668,8	0,15
44	668,5	0,15
46	668,2	0,15
48	667,9	0,20
50	667,5	0,18
55	666,6	0,24
60	665,4	0,28
65	664,0	0,28
70	662,6	0,32
75	661,0	0,34
80	659,3	0,34
85	657,6	0,38
90	655,7	0,38
95	653,8	0,42
100	651,7	0,45
110	647,2	0,47
120	642,5	0,53
130	637,2	0,55
140	631,7	

Mivel a szokásos doboskazánok viztere az óránkénti gőztermelés 30-35 %-a, a \dot{p} kisnyomásoknál és nagy víztérnél 4-5 óra alatt, nagyobb nyomásoknál és kis víztérnél is kb. 3/4 óra lenne a \dot{r} -vel egyenlő nagyságrendű és így ez a tényező elhanyagolható.

A nyomásváltozás következtében történő telítési hőmérsékletváltozás miatt a felszabaduló, illetve lecsapódó gőzmennyiség

$$\delta G_2 = \frac{k_2 V'}{r} \delta p, \quad (57)$$

ahol

V' a kazánban tárolt, telített állapotú viz [kg]

δG_2 a gőzmennyiség [kg]

Ez a hatás csatolódik vissza a gőztermelésre. Mivel a hatáslánc előző tagjával a másodpercenkénti gőztermelést számítottuk, a visszacsatolásnál a mennyiséget az idő szerint differenciálni kell, azaz a visszacsatolás átviteli függvénye

$$F_V(s) = \frac{L(\delta D_2)}{L(\delta p)} = k_2 \frac{V'}{r} s \quad (58)$$

alakú lesz.

Ha a fémtömeg, elsősorban a kazán hőtartalmának változását is figyelembe akarjuk venni, amely változás a telítési hőmérséklet megváltozása miatt következik be, a telítési hőmérséklet értékét a nyomásváltozástól lineárisan függőnek vesszük, kis változások esetére, azaz

$$\delta \theta_f = k_5 \delta p, \quad (59)$$

ahol a k_5 a 7. táblázat szerint alakul.

Innen a továbbiakhoz hasonló megfontolásokkal a fémtömeg által tárolt hőből leadott vagy felvett gőzmennyiség

$$F'_{fém}(s) = \frac{L(dG_s)}{L(dp)} = \frac{k_s \cdot c_{fém} \cdot G_{fém}}{1 + \frac{c_{fém} \cdot G_{fém}}{F \cdot \alpha} \cdot s}$$

ahol

$c_{fém}$ a féanyag fajhője $\frac{\text{kcal}}{^\circ\text{C}, \text{kg}}$

$G_{fém}$ a féanyag sulya kg

F a hőátadási felület m^2

7. táblázat

A $k_s = \frac{d\theta_f}{dp}$ értékei

p at	θ_f $^\circ\text{C}$	$k_s = \frac{d\theta_f}{dp}$ $\frac{^\circ\text{C}}{\text{at}}$
40	249,18	1,45
42	252,07	1,40
44	254,87	1,35
46	257,56	1,30
48	260,17	1,26
50	262,70	1,20
55	268,69	1,12
60	274,29	1,05
65	279,54	0,99
70	284,48	
75	289,17	0,94
80	293,62	0,85
85	297,86	0,81
90	301,92	0,78
95	305,80	0,75
100	309,53	0,70
110	316,58	0,66
120	323,15	0,61
130	329,30	0,58
140	335,09	

amit r -rel osztva, megkapjuk azt a gőzmennyiséget, amit ezzel a hővel termelünk, illetve lecsapunk. E-gészen nagynyomású és kisvizterű kazánok kivételével ez az érték a \mathcal{G}_2 alatt kb. egy nagyságrenddel elmarad és így a továbbiakban nem vesszük számításba; 120-140 at felett, mint korrekciót vehetjük figyelembe.

A megváltozott nyomás változott mennyiségű gőzt tud a tulhevitő, a csővezeték és a turbina beömlő keresztmetszete által alkotott ellenálláson áthajtani. Ha a dobtól a turbina szabályozószelepig a nyomásesés Δp és

$$\Delta p = k_4 D_0^2 \quad (61)$$

$$\Delta p + \mathcal{D}p = k_4 (D_0 + \mathcal{D}D)^2,$$

ezt linearizálva és a másodrendűen kicsi $\mathcal{D}D^2$ -et tartalmazó tagot elhanyagolva, kis változásokra

$$\mathcal{D}p = 2 k_4 D_0 \mathcal{D}D = \frac{2\Delta p}{D_0} \mathcal{D}D,$$

azaz

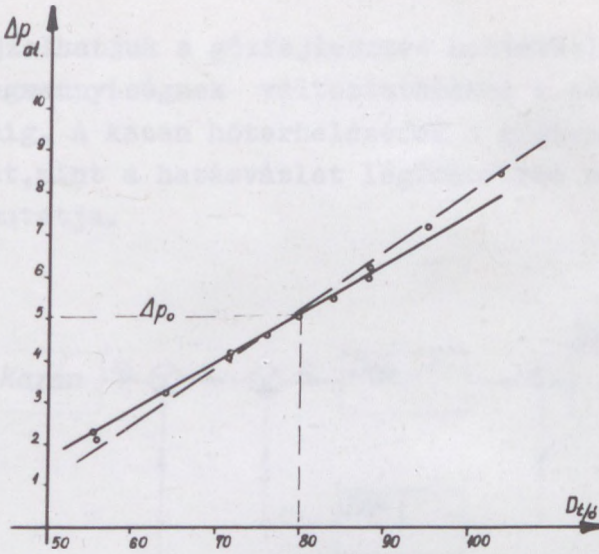
$$\mathcal{D}D = \frac{D_0}{2\Delta p} \mathcal{D}p \quad (62)$$

A linearizálással elkövetett hibát a gőztermelésnek $\pm 30\%$ -ig terjedő változása esetére a 21. ábra mutatja.

Nagyságrendi tájékoztatóul, ha a D_0 100t/ó volt 2 at-ás nyomásnövekedésnél a

$$\mathcal{D}D = 20t/ó'$$

lesz.



21. ábra. A δp közelítése.

A tulhevitő egyébként a fogyasztóhoz jutó gőz mennyiségén nem változtat, az ellenállás előbb tárgyalt hatását kivéve, csak a gőz hőmérsékletét határozza meg. A tulhevitő szerepét a gőzmennyiség szempontjából az a holtidő mutatja, amely alatt a gőz a dobtól a kilépő gőzvezetékig terjedő utat megjárja. Ha a tulhevitő hossza L_t és a gőzsebesség w_t

$$T_t = \frac{L_t}{w_t} ,$$

azaz a tulhevitő átviteli függvénye a gőzmennyiségre

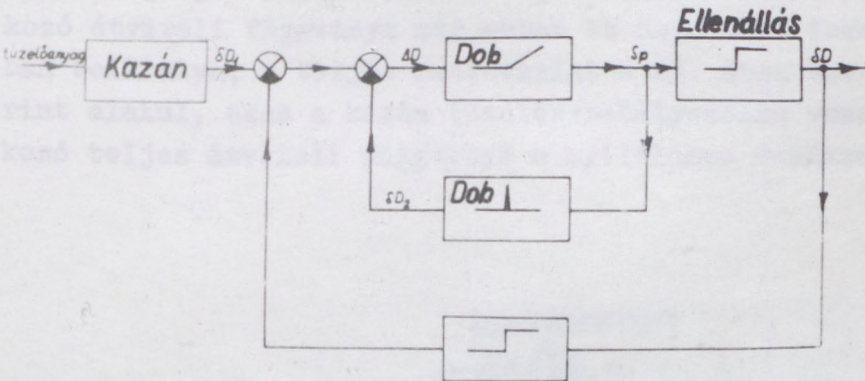
$$F_t(s) = e^{-T_t \cdot s} . \quad (63)$$

A szokásos értékeknél $L_t = 50 - 100 m$, $w_t = 10 - 20 m/s$.

$$T_t = 5 - 10 s$$

Az előzőek során figyelembe vettük az összes, a gőztermelés mennyiségére ható tényezőt és ezek alapján

felrajzolhatjuk a gőzfejlesztés hatásvázlatát, a tüzelőanyagmennyiségnek változtatásától a gőzmennyiség változásáig. A kazán hőterhelésének a gőztermelésre való hatását, mint a hatásvázlat legfontosabb részét, a 22. ábra mutatja.



22. ábra.

A dobfolymat hatásvázlata.

Az ábra alapján

$$\Delta D = \mathcal{S}D_1 - \mathcal{S}D_2 - \mathcal{S}D \quad (64)$$

$$\frac{\mathcal{L}(\mathcal{S}D)}{\mathcal{L}(\mathcal{S}D_1)} = \frac{1}{1 + T_g \cdot \mathcal{S}} \quad (65)$$

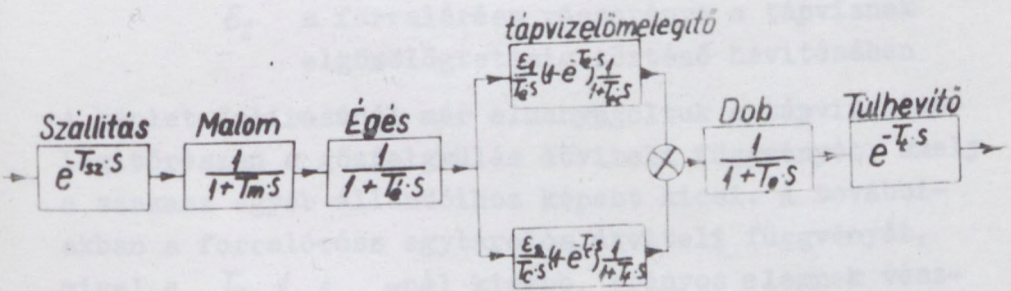
ahol a T_g időállandó

$$T_g = \frac{1 + \frac{k_1}{V''} \cdot \frac{k_2 V'}{r}}{\frac{k_1}{V''} \cdot \frac{D_0}{2\Delta p}} \quad (66)$$

mivel a tört első tagja a második taghoz képest elhanyagolható, jó közelítéssel

$$T_g = \frac{2k_2 \Delta p V'}{r D_0} \quad (67)$$

2.7. A teljes hatásvázlat különböző zavarójellemzőkre
 Így a végleges hatásvázlatba a gőzfejlesztésre vonatkozó átviteli függvényt már ebben az összevont formában beiktatva, a teljes hatásvázlat a 23. ábra szerint alakul, azaz a kazán tüzelésszabályozásra vonatkozó teljes átviteli függvénye a nyíltláncu rendszerben



23. ábra

A teljes hatásvázlat az átviteli függvényekkel

$$F(s)_{\text{tüzelés}} = \frac{1}{(1+T_m s)(1+T_e s)(1+T_g s)} e^{-(T_t + T_{sz})s} \left[\frac{\epsilon_1}{T_e} \frac{1}{s(1+T_{ec} s)} (1 - e^{-T_e s}) + \frac{\epsilon_2}{T_c} \frac{1}{s(1+T_f s)} (1 - e^{-T_c s}) \right] \quad (68)$$

lesz, ahol

T_m	a malom időállandója
T_e'	az égés időállandója
T_g	a gőzfejlesztés időállandója
T_{ec}	a tápvizelőmelegítő időállandója
T_e	a " " integrálideje
T_f	a forralószakasz időállandója
T_c	a gőzbuborékok felgyülemési integrálideje
T_{sz}	a szállítási holtidő
T_t	a tulhevitő holtideje
ε_1	a tápvizelőmelegítő
ε_2	a forralórész részaránya a tápviznek elgőzölögtetésig történő hevítésében

A képlet felírásánál már elhanyagoltuk a tápvizelőmelegítőrészen a gőzfelgyülemés átviteli függvényét, amely a szakasz egyéb állandóihoz képest kicsi. A továbbiakban a forralórész egytárolós átviteli függvényét, mivel a T_f / s -nél kisebb, arányos elemnek vesszük, továbbá a tápvizelőmelegítő ugyancsak $1/s$ -en aluli vagy e körüli T_{ec} értékét is elhanyagoljuk a T_e szokásos, 50-100 s-os értékeivel szemben. Ezekkel az egyszerűsítésekkel kapjuk végül:

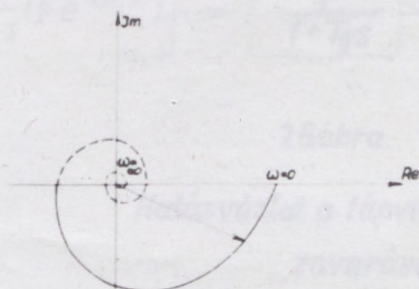
$$F(s) = \frac{1}{(1+T_m s)(1+T_e' s)(1+T_g s)} e^{-T_h s} \left[\frac{\varepsilon_1}{T_e s} (1 - e^{-T_e s}) + \frac{\varepsilon_2}{T_c s} (1 - e^{-T_c s}) \right], \quad (69)$$

ahol

T_h a folyamat teljes holtideje.

A nyert átviteli függvény általános alakját a 24. ábra mutatja. A szögletes zárójelben levő kifejezés számításának megkönnyítésére a 2. Függelékben közöljük a

függvény diszkuszióját, mivel a közkezen forgó szabályozástechnikai tankönyvekben és kézikönyvekben ez általában nem található.



24.ábra.

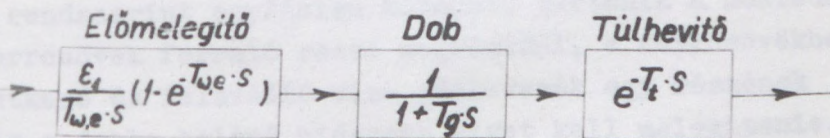
A kazán átviteli függvényének általános alakú helygörbéje.

Ha a zavaró jellemző a tápviz mennyisége a (36) alapján és a korábban ismertetett megfontolások szerint a hatáslánc a 25. ábra szerint alakul és a teljes átviteli függvény

$$F_{vizm.}(s) = \frac{L(\sigma D)}{L(\sigma w)} = \frac{\epsilon_1}{T_{w,e} s} (1 - e^{-T_w e s}) \frac{1}{1 + T_g s} e^{-T_t s} \quad (70)$$

lesz.

Abban az esetben, ha a tápviz betáplálási hőmérséklete változik, ez egyszerű holtidőt jelent az átmeneti folyamatok szempontjából, ahol $T_{e,x} = \frac{x}{w}$ / a tápviz-előmelegítő rész teljes hossza/.



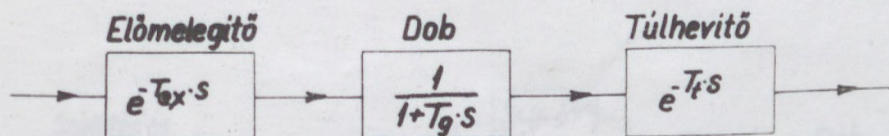
25.ábra.

Hatásvázlat a tápvizmennység zavarására.

A hatásvázlat a 26. ábra szerint

$$F_{vzh} = \frac{\mathcal{L}(\delta D)}{\mathcal{L}(\delta \theta_{10})} = \epsilon_1 e^{-(T_t + T_{e,x}) s} \frac{1}{1 + T_g \cdot s} \quad (71)$$

alakulesz.

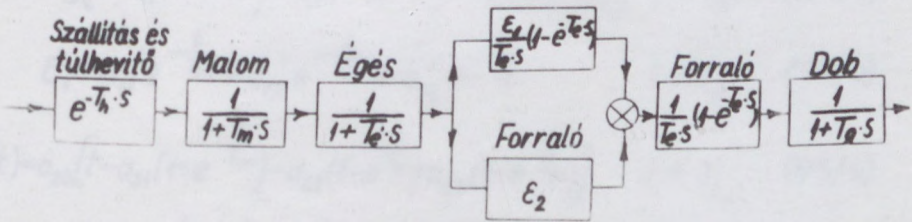


26.ábra.

Hatásvázlat a tápvizhőfok zavarására.

Vizsgálatainknál eddig minden esetben forraló tápviz-előmelegítőt tételeztünk fel, bár ez a hazai gyakorlatban kevésbé elterjedt. Azonban eddigi számításainkat áttekinthetőbbé és fizikailag szemléletesebbé tette. Ha a tápvizelőmelegítő olyan hőmérsékletű vizet

táplál a kazánobba, amely a telítési hőfokot nem egészen éri el, a telítettségi állapothoz hiányzó energiamennyiséget a tápvizel a forraló részben kell közölni, ami annyit jelent, hogy a forrcsővek alsó szakaszán még rendszerint egyfázisú közegnek történik a hőátadás, a forrcsővek forraló része megrövidül, a forrcsővekben keletkező és felszálló víz- gőzkeverék egy részének pedig a dobba belépő hidegebb vizet kell melegítenie. A változás jellege azonban hasonlít az előzőekben ismerttetethez. A forralórész addig érzékeli a tápvizelőmelegítő részben lejátszódó változásokat, tehát addig tart a dobba belépő tápviz lehülése, illetőleg felmelegedése, amíg a tápvizelőmelegítő részen az átmeneti jelenségek tartanak. A változás a forraló tápvizelőmelegítővel szemben az, hogy míg a forraló tápvizelőmelegítő önálló gőzfejlesztő egység és így hatása párhuzamosan kapcsolódik a forralórész hatásláncához, ebben az esetben az előmelegítő rész sorban a forralórész előtt szereplő elem és így az átviteli függvény a 27. ábra



27. ábra

Hatásvázlat nem forraló tápvizelőmelegítő esetén.

hatásvázlata alapján a következőképpen alakul:

$$\frac{1}{(1+T_m s)(1+T_e s)(1+T_g s)} e^{-T_h s} \left[\frac{\varepsilon_1}{T_e s} (1-e^{-T_e s}) + \varepsilon_2 \right] \frac{1}{T_c s} (1-e^{-T_c s}). \quad (72)$$

2.8. Az átmeneti függvények

A (69), (70), (71), (72) átviteli függvények visszatranszformáltjai a következő átmeneti függvényeket adják:

A (69)-ből a forraló tápvizelőmelegítő kazánra:

$$\begin{aligned} \frac{\mathcal{D}}{D} &= 0 & ; & & t \leq T_h \\ \frac{\mathcal{D}}{D} &= [F_e(t) + F_c(t)] \frac{\mathcal{Q}}{Q} & ; & & t \geq T_h \end{aligned} \quad (73)$$

ahol

Q a tüzelőanyagmennyiség kg

$$F_e(t) = a_{10} \left[t - a_{11} (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) - a_{12} (1 - e^{-\frac{t}{T_e'}}) - a_{13} (1 - e^{-\frac{t}{T_g}}) \right] \quad t \leq T_e \quad (74/a)$$

$$\varepsilon_1 + a_{11}' e^{-\frac{t}{T_m}} + a_{12}' e^{-\frac{t}{T_e'}} + a_{13}' e^{-\frac{t}{T_g}} \quad t \geq T_e \quad (74/b)$$

$$F_c(t) = a_{20} \left[t - a_{21} (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) - a_{22} (1 - e^{-\frac{t}{T_e'}}) - a_{23} (1 - e^{-\frac{t}{T_g}}) \right] \quad t \leq T_c \quad (75/a)$$

$$\varepsilon_2 + a_{21}' e^{-\frac{t}{T_m}} + a_{22}' e^{-\frac{t}{T_e'}} + a_{23}' e^{-\frac{t}{T_g}}, \quad t \geq T_c \quad (75/b)$$

ha

$$a_{10} = \frac{\varepsilon_1}{T_e}; \quad a_{11} = a_{21} = \frac{T_m^2}{(T_m - T_e')(T_m - T_g)}$$

$$a_{20} = \frac{\varepsilon_2}{T_e}; \quad a_{12} = a_{22} = \frac{T_e'^2}{(T_m - T_e')(T_m - T_g)} ;$$

$$a_{31} = a_{33} = \frac{T_g^2}{(T_m - T_g)(T_e' - T_g)} ;$$

$$a_{11}' = \frac{T_m^3}{(T_m - T_e')(T_m - T_g)} e^{\frac{T_h}{T_m}} \left(1 - e^{-\frac{T_c}{T_m}}\right) ;$$

$$a_{12}' = \frac{T_e'^3}{(T_m - T_e')(T_e' - T_g)} e^{\frac{T_h}{T_e'}} \left(1 - e^{-\frac{T_c}{T_e'}}\right) ;$$

$$a_{13}' = \frac{T_g^3}{(T_m - T_g)(T_e' - T_g)} e^{\frac{T_h}{T_g}} \left(1 - e^{-\frac{T_c}{T_g}}\right) ;$$

$$a_{21}' = \frac{T_m^3}{(T_m - T_e')(T_m - T_g)} e^{\frac{T_h}{T_m}} \left(1 - e^{-\frac{T_c}{T_m}}\right) ;$$

$$a_{22}' = \frac{T_e'^3}{(T_m - T_e')(T_e' - T_g)} e^{\frac{T_h}{T_e'}} \left(1 - e^{-\frac{T_c}{T_e'}}\right) ;$$

$$a_{23}' = \frac{T_g^3}{(T_m - T_g)(T_e' - T_g)} e^{\frac{T_h}{T_g}} \left(1 - e^{-\frac{T_c}{T_g}}\right) ;$$

A (70) -ből a víztáplálás változtatására:

$$\frac{\delta D}{D} = 0 \quad ; \quad t \leq T_t \quad , \quad (76/a)$$

$$\frac{\delta D}{D} = \frac{\varepsilon_1}{T_{w,e}} \left[t - T_g e^{\frac{T_t}{T_g}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_g}}\right) \right] \frac{\delta w}{w} \quad , \quad T_f \leq t \leq T_{w,e} \quad (76/b)$$

$$\frac{\delta D}{D} = \left(\varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_1}{T_{w,e} \cdot T_g} e^{\frac{T_t + T_{w,e}}{T_g}} \cdot e^{-\frac{t}{T_g}} \right) \frac{\delta w}{w} \quad ; \quad t \geq T_{w,e} \quad (76/c)$$

(71)-ből a tápviz hőmérsékletének változására:

$$\frac{\sigma D}{D} = 0 \quad ; \quad t \leq T_t + T_{e,x} \quad ; \quad (77/a)$$

$$\frac{\sigma D}{D} = \varepsilon_1 \left(1 - e^{-\frac{t - T_t + T_{e,x}}{T_g}} \right) \frac{\sigma \theta_{10}}{\theta_{10}} \quad ; \quad t \geq T_t + T_{e,x} \quad (77/b)$$

A (72) visszatranszformáltja hasonló alakú, mint (73), csak az állandók módosulnak.

3. fejezet

Kisminta

A kazánok átmeneti folyamatainak kismintája igen változatos lehet aszerint, hogy mi a kismintával elérendő cél és milyen eszközök bizonyulnak a leghasznosabbaknak. Analóg fizikai folyamatokkal történő kismintázás lehetőséget nyújt a jelenség fizikájának mélyebb megértésére, a nehezen számolható összefüggések mérésére és nagy kísérleti berendezések megtakarítására. Kalorikus folyamatok villamos kismintázására számos kísérlet ismeretes [11], [43], [53], [70], [78], [79], [34], [109], [125]. A hőátadási folyamatok és a villamos jelenségek között azonban nem áll fenn olyan egyértelmű, fizikailag világos analógia, mint a hővezetés és a villamos erőter között a Laplace-egyenlettel leírható törvényszerűség. Ennek két lényeges oka van. Az egyik az, hogy az áramló hőközvetítő közeg sebességére nem sikerült megfelelő analóg villamos jelenséget találni. A villamos hullámterjedést jellemző frekvencia erre a célra nem használható fel, mert a tárolóelemek /induktivitás és kapacitás/ is frekvenciafüggőek. Így a teljes analógia nem oldható meg. A másik ok a hőátadási jelenségek lényeges nonlinearitása, amely a logaritmikus, illetőleg exponenciális hasonlósági összefüggésekben jelentkezik. A hőátadási tényező változása villamosan nehezen képezhető le. Az irodalomban leírt megoldások vagy többé-kevésbé sánta analógián alapszanak, vagy nem fizikai analógián, hanem egyszerű közelítésen, mint arra Mironov tanulmányának elemzése során az 1. fejezetben már rámutattunk [44], [46].

A jelenségek fizikájának tanulmányozásához, így a villamos, vagy villamos elven /pneumatikus RC körökből/ felépített pneumatikus analógia keveset segít, sőt sokszor tévutakra vezet. A folyamatok egyes elemeinek a vizsgálatánál elsősorban kalórikus kismintákat lehet a hasonlósági törvények alapján segítségül venni, mint azt a 4. fejezetben leírt vizsgálatnál az egyfázisú közeggel történő átmeneti jelenségek mérésére tettük. Megközelítő kisminta /tehát analóg számológép/ alkalmazása általában felesleges, a 2. fejezet számításai azt mutatják, hogy az elméleti eredmények nem túlságosan bonyolult összefüggésekkel használható alakra hozhatók, ezekben az állandók meghatározása elég egyszerű feladat.

A (69) képletig a számításokat egyszer és mindenkorra elvégezhetjük, számítástechnikai segédeszközre csak a (69), (72) alkalmazásánál lehet szükség.

Fenti megfontolásokból kiindulva a számológép kérdéseivel csak ebben a vonatkozásban foglalkoztunk. A (69), (72) egyenletek megoldására is többféle ut kínálkozik. Villamos kisminta előnyös abból a szempontból, hogy viszonylag olcsó, kis méretben igen könnyen valószínűsíthető meg. A villamos kisminta alkalmazásának két hátránya van: a természetben előforduló időállandók csak igen bonyolult eszközökkel valószínűsíthetőek meg, a másik hátrány pedig, hogy a holtidők leképezése is nagyon megnehezíti a kisminta készítést. Az előbbi nehézségen úgy segíthetünk, ha az időléptéket megváltoztatjuk. Ebben az esetben azonban a tényleges szabályozókészülék nem próbálható ki a kismintán, ezt is a megfelelő időléptékben villamos analógiával kell leképezni. A holtidőknek egyszerű eszközökkel történő leképezésére még visszatérünk. A másik - nagyobb felkészültséget igénylő - módszer, pneumatikus ele-

mekkel, valóság-hű időállandókkal és holtidőkkel leképezni a rendszert, illetve a (69) átviteli függvényt. Erre a kismintára a szabályozó közvetlenül rákapcsolható és ugyan úgy beállítható, mint a leképezett be rendezésen. Ilyen pneumatikus kisminta készítésére Magyarországon most folynak kísérletek a Műszeripari Kutató Intézet-ben Csordás Zoltán vezetésével.

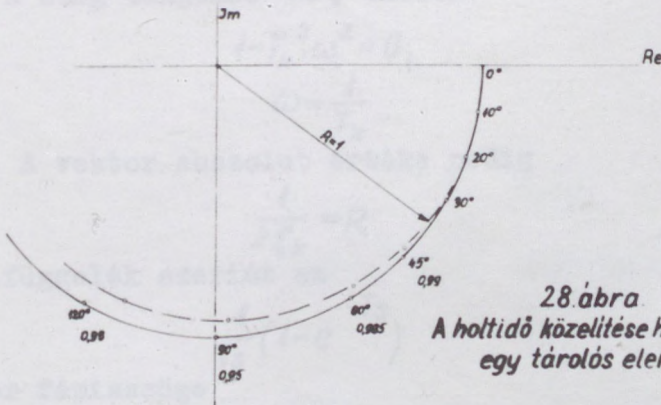
A Villamos Energetikai Kutató Intézetben az előbbi módszert választottuk gyakorlati okokból. A leírt villamos számológép igen könnyen, néhány órás munkával és néhány száz forint értékű anyagból valósítható meg, helyszükséglete rendkívül kicsi, a változó frekvenciát közönséges ipari elektronikus szinuszgenerátorral állíthatjuk elő, az átmeneti jelenségeket és az átviteli függvényeket oszcilloszkópon ellenőrizhetjük. A holtidős tagot három egytárolós taggal helyettesítettük. A helyettesítés elve a következő: a holtidő a vele szorzott komplex vektor abszolút értékét nem változtatja meg, azonban a frekvenciával arányos $T_h \cdot \omega$ szöggel elforgatja. Az egytárolós tag átviteli függvénye olyan tulajdonságu, hogy az $\omega = \omega_k = \frac{1}{T_k}$ -nál kisebb frekvenciára az attenuációja gyakorlatilag 1 /az erősítés 0 db/, az $\omega \leq 0,5 \omega_k$ frekvenciákra pedig a fáziseltolás jó közelítéssel $/2^\circ$ -os legnagyobb hibával/ $T_k \cdot \omega$. A hiba nagyobb frekvenciánál jelentősebb. Mivel a közelítésnek a komplex számsík alsó térfelén kell megfelelőnek lennie, a feladatot három egytárolós taggal lehet kielégítően megoldani. Az egyes tárolós tagok egyformák, így a fenti feltételekből a T_k -t úgy kell választani, hogy

$$T_k = \frac{T_h}{3}$$

legyen, azaz a közelítés

$$e^{-T_h s} \approx \frac{1}{\left(1 + \frac{T_h}{3} s\right)^3} \quad (79)$$

A pontos és közelítő átviteli függvényt a komplex számsíkon a 28. ábra mutatja.



28. ábra.
A holtidő közelítése három egy tárolós elemmel.

A $\frac{1}{T_s}(1 - e^{-T_s})$ átviteli függvényt lengő taggal közelítjük. A lengő tag attenuációja erősen függ a csillapítástól, fázisszöge pedig $\omega \leq 0,4 \omega_k$ tartományban 2° legnagyobb hibával $2\zeta_k T_k \omega$, ha a lengő tag

$$\frac{1}{T_k^2 s^2 + 2\zeta_k T_k s + 1}$$

alaku. Az átviteli függvény vektorának fázisszöge az ω -vel arányos, így a lengő tag ennek a feltételnek megfelel, az attenuáció pedig ebben az esetben nő. Az ilyen átviteli függvény jól közelíthető olyan lengő taggal, amelynek az $\omega = 0$ ponton kívül még egy kitüntetett pontját az eredeti függvényvel azonosítjuk. A legcélszerűbb erre az $\varphi = 90^\circ$ -hoz tartozó

pontot kiszemelni, így a közelítő számítás egyszerűbb lesz. Az $\varphi = 90^\circ$ -nál a lengő tag

$$F(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-T_k^2\omega^2)^2 + (2\xi_k T_k \omega)^2}} e^{-j \arctg \frac{2\xi_k T_k \omega}{1-T_k^2\omega^2}}$$

alak szerint

$$\varphi = -\arctg \frac{2\xi_k T_k \omega}{1-T_k^2\omega^2},$$

azaz a szög tangense ∞ , amiből

$$1-T_k^2\omega^2 = 0, \\ \omega = \frac{1}{T_k}$$

lesz. A vektor abszolút értéke pedig

$$\frac{1}{2\xi_k} = R$$

a 2. függelék szerint az

$$\frac{1}{T_s} (1 - e^{-Ts})$$

vektor fázisszöge

$$\varphi = \frac{\omega T}{2} = \frac{\pi}{2},$$

azaz

$$\omega = \frac{\pi}{T}$$

$$\frac{\pi}{T} = \frac{1}{T_k}, \text{ vagyis } T_k = \frac{T}{\pi}.$$

Az abszolút érték

$$R = \frac{1}{\omega T} (1 - \cos \omega T) = \frac{2}{\pi} = \frac{1}{2\xi_k},$$

innen

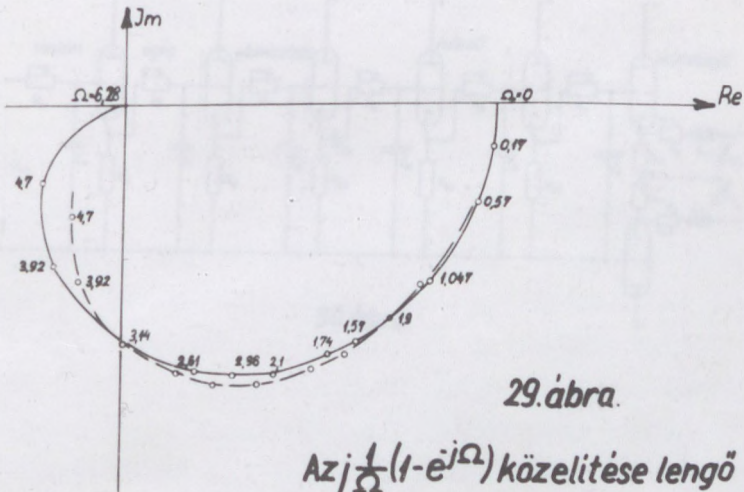
$$\xi_k = \frac{\pi}{4}.$$

Igy a közelítő átviteli függvény

$$\frac{T^2}{\pi^2} \frac{1}{(j\omega)^2 + \frac{T}{2}(j\omega) + 1} \approx \frac{1}{j\omega T} (1 - e^{-j\omega T})$$

lesz.

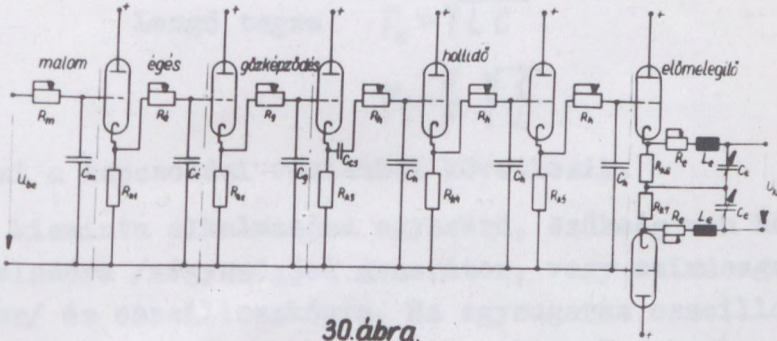
A közelítő és az eredeti átviteli függvény helygörbéjét a 29. ábra mutatja. Az eltérés csak olyan frekvenciáknál lényeges, amelyek a kazánüzem szempontjából már nem jönnek számításba.



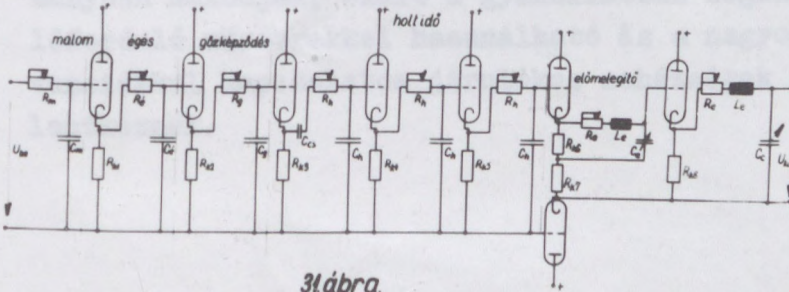
29. ábra.

Az $j\frac{1}{\Omega}(1-e^{-j\Omega})$ közelítése lengő
elemmel.

A számológépet a 30., illetve 31. ábra elvi kapcsolásában állítottuk össze. Az ábrákon az egyes időtagokat beállító impedanciák jelei megfelelnek a vonatkozó időállandó jelölésének. Az elektroncsövek kizárólag azt a feladatot látják el, hogy az egyes elemeket végtelen ellenállással lezárják és így azokat egymástól függetlenné tegyék. A rácselőszítés ellenállásai a csőjelleggörbéknek megfelelően sorban növekednek és néhány $k\Omega$ értékűek. A kapcsolásban szereplő C_{cs} csatoló kondenzátor értéke az időtagok kondenzátorainál nagyságrenddel nagyobb, az időbeli lefolyást nem befolyásolja. A kismintán az $1\text{ s} \sim 1\text{ }\mu\text{s}$ időléptéket választottuk. Az időket a tároló tagokban a potencióméterekkel lehet beállítani, amelyek a táblán közvetlenül időben vannak



30. ábra.



31. ábra.

Villamos modell nem forraló előmelegítő esetére.

skálázva. A lengő tagokban az idő a változtatható kapacitásokkal állítható be. Ehhez azonban a csillapítás $\zeta = \frac{\pi}{4}$ értékét minden kondenzátor beállításához külön kell igazítani.

Tehát a potencióméterek és a kondenzátorok azonos elemnél azonos időbeállításban kell, hogy álljanak.

Az idők beállításának alapképletei:

Tárolótagra $T = RC$.

Lengő tagra $T_k = \sqrt{LC}$,

$$\xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}},$$

ami a kapcsolási vázlatból következik.

A kisminta alkalmazása egyszerű, szükség van hozzá jeladóra /négyszögjel generátor, vagy szinuszgenerátor/ és oszcilloszkópra. Ha egysugaras oszcilloszkópot alkalmazunk, a bemenő és a kimenő jelnek egy ernyőn való ellenőrzésére az ábra kapcsolásában egy elektronikus kapcsolót is alkalmazni kell. A kisminta méretezése olyan, hogy a hangfrekvenciás tartományban működjék, ezért a gyakorlatban leginkább előforduló műszerekkel használható és a nagyobb frekvenciákkal kapcsolatos járulékos nehézségek nem jelentkeznek.

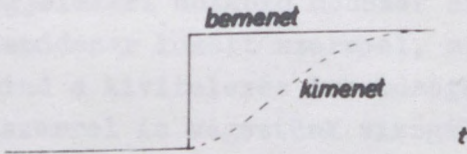
4. fejezet

A mérési módszer

4.1. A frekvenciamódszer és a tranziens válasz

A dinamikai viselkedések mérésére több módszer áll rendelkezésre. Az elméletileg leghelyesebb eljárás a szabályozott szakasz frekvenciajelleggörbéjének felvétele, azaz változó frekvenciájú, állandó amplitudójú szinuszos bemenő jelek hatásának vizsgálata a szabályozott szakasz kimenetén. Lineáris rendszer esetén a kimeneten ugyancsak szinuszos, a bemenő jellel megegyező frekvenciájú, de a frekvenciától függően változó amplitudójú és fázisban eltolt jeleket kapunk. Ez a módszer lényegében az operátoros átviteli függvény gyakorlati mérése, az operátor paraméter frekvencia értelmezésével a szabályozott szakasz frekvenciajelleggörbéje rajzolódik ki. Lineáris rendszer esetén a frekvenciaösszetevők szuperponálhatók, így a Fourier-integrál alapján bármilyen jelalakú bemenő jelre meghatározható a kimenő jel viselkedése, azaz teljes felvilágosítást kapunk a lineáris, vagy közelítésben annak tekinthető szabályozott szakasz minden előre várható viselkedéséről.

Szinuszos bemenőjelek előállítása azonban számos esetben nehézségekbe ütközik, vagy legalábbis különleges eljárást igényel és hosszú időt vesz igénybe. Bizonyos információ szerezhető a szabályozott szakasz átmeneti viselkedéséről az átmeneti függvény felvételével, amely ugrásfüggvény esetére adja meg a kimenet időbeli lefolyását /32. ábra/. Az ugrás-



32. ábra.
Ugrásfüggvényre az átmeneti
válasz.

függvényre kapott válasz alapján elméletileg mindenfajta bemenetre a tranziens válasz a Duhamel-integrál segítségével kiszámítható. Az egységugrás azonban a teljes frekvenciasávot különböző súlyozásban tartalmazza, lényeges frekvenciasávokra történő válasz kiértékelése főleg a magasabb frekvenciatarományban esetleg igen pontatlanná válhat, mert súlyszázalékuk az egységugrás-válaszban a mérési pontosságon belül van. Kísérleteinknél minden esetben a tranziens válasz vizsgálatából indultunk ki, ellenőrizve azt pontosabb módszerekkel. A kazánok átmeneti folyamatainál, mint azt a 2. fejezet igazolja, a jelenségek rendkívül bonyolultak. A tárgyalásnál elkövetett elhanyagolások és a mérési pontosság amúgy is korlátozó volta következtében a matematikai leírást annyira egyszerűsítettük, hogy a főbb típusokra pontosabb módszerekkel meghatározott frekvenciajelleggörbe alapján, az általános összefüggések ismeretében, a gyakorlatban rendszerint elegendő lesz az átmeneti függvény felvétele. Hangsúlyoznunk kell azonban, hogy ez a módszerbeli egyszerűsítés csak akkor engedélyezhető, ha a jelenségek általános megítélésére kellőszámu, pontosabb módszerrel végzett

kísérlet áll rendelkezésre.

A négyszögjelekkel dolgozó módszer az ugrásfüggvény és frekvenciamódszer között szerepel, mind megoldási pontosság, mind a kivitelezés lehetősége szempontjából. Ilyen módszerrel is végeztünk vizsgálatokat, változó frekvenciájú szögletjeleket alkalmazva a szabályozott szakasz bemenetére. A szögletjel Fourier analizise

$$\varphi(\omega) = \frac{4}{\pi} \left(\sin \omega + \frac{\sin 3\omega}{3} + \frac{\sin 5\omega}{5} + \dots \right)$$

felbontást ad, tehát a harmadik harmonikus 1/3 amplitudóval szerepel. 20 db/dekád attenuáció figyelembevételével is ez több, mint 10 %-os hibát szolgáltat, kisebb frekvenciáknál a helyzet még rosszabb. Csak olyan esetekben alkalmaztuk ezt a módszert, ahol más eljárásra nem volt mód, továbbá több mérést végeztünk fenti megállapításunk ellenőrzésére. Ez a módszer különösen kedvezőtlen olyan esetben, amikor egyéb zavaró tényezők miatt amugy is van bizonyos felharmonikus-tartalom /nem linearitások/, a tiszta szinuszos vizsgálat ilyenkor sokkal jobban lehetővé teszi az alapharmonikus pontos kiszűrését. Ugyancsak nehézségeket okoz a kiértékelésben, ha a mérés közben az alapszint eltolódik, ami ipari jellegű méréseknél majdnem elkerülhetetlen.

4.2. A mérések leírása

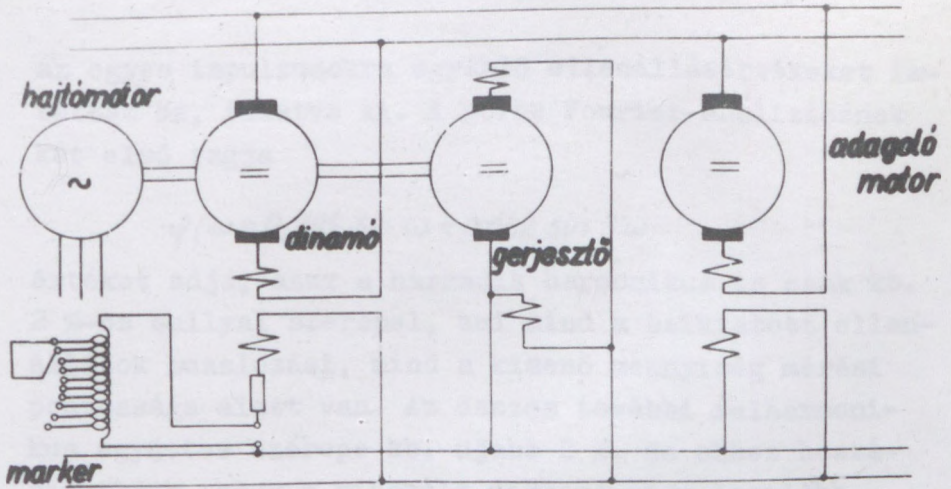
A kísérletsorozat 1955-ben kezdődött Dunapentelén az V. és VI. 50 tonna/ó -s kazánokon, az átmeneti folyamatok mérésével. Ebben az időben még semmiféle regisztráló berendezés nem állott rendelkezésre, a kazánnál a beavatkozás kézzel történt, a leolvasás pedig az üzemi mérőműszereken, 10 s időközökben sipjellel, előre beosztott mérőlapon. Az időbeli lefolyást a mérőlapokról leolvasott adatok összerajzolásával

rögzítettük. A módszer primitív, megbízható embereket igényel /8-10 főt is/, akiknek sokszor kellemetlen körülmények között /melegben, poros helyen/ kell dolgozni, a sipjel nem hallatszik el megbízhatóan a kazánház minden pontjára. Ennek ellenére üzemi méréseknél, a szabályzóberendezések beállításának ellenőrzésére ma is javasolható olyan helyeken, ahol megfelelő többszörös gyorsregisztráló nem áll rendelkezésre.

4.2.1. A szinuszos jeladó

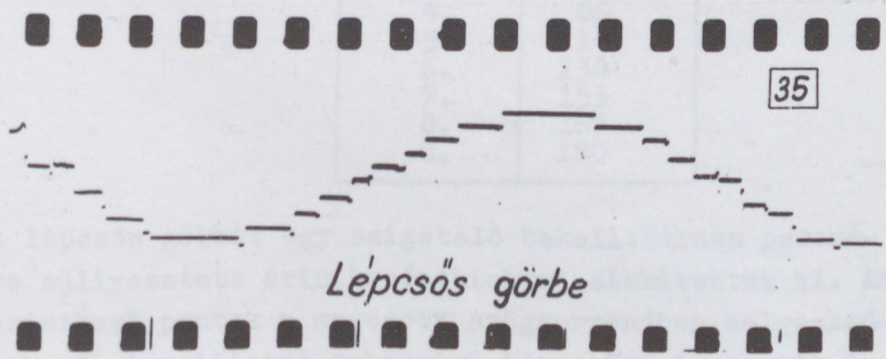
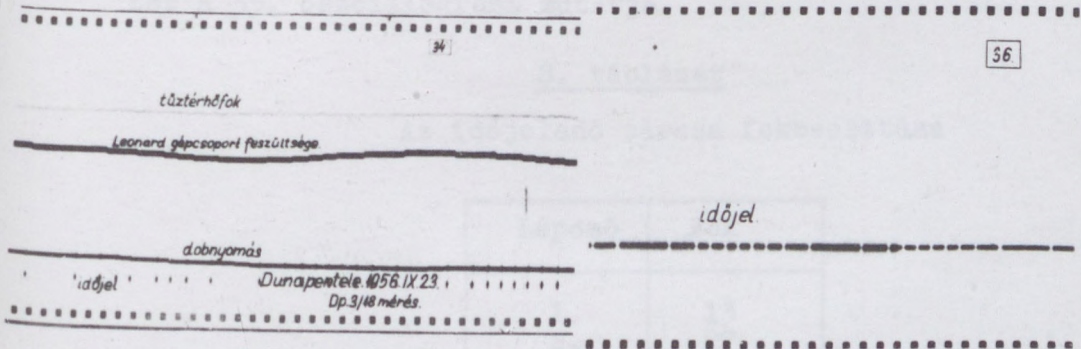
Az 1956-ban folytatott kísérletek már elsősorban a frekvenciamódszerrel folytak. A tüzelésváltoztatás tanulmányozására olyan megfelelő szinuszalaku jelet adó készüléket kellett kidolgozni, mely a kazánoknál szükséges igen kis frekvenciák tartományában működik. A Leonard-gépcsoporttal szabályozott tüzelésekhez /Dunapentele, Borsod/ olyan jeladót készítettünk, amely a Leonard gépcsoport gerjesztőjének szabályozó ellenállása szerepét vette át. A gépcsoport és a jeladó szabályozó ellenállásának kapcsolása a 33. ábra szerint történt. Mivel a készülék által sorbakapcsolt ellenállás a teljes áramkör ellenállásánál egy nagyságrenddel kisebb volt, a szabályozás jó közelítéssel lineáris változásokat adott, amit a 34. oszcillogramm mutat.

A folyamatos szabályozás nehézségekbe ütközött, megfelelő csuszkaelmozdulás, megbízható érintkezés fenntartása miatt nagy surlódást és ezért nagy állítóerőt követelt volna, ami pontosan csak nehézkes és bonyolult szervomechanizmussal lenne megvalósítható. Ezért relés, lépkedő megoldást választottunk, amelynek során a teljes szinuszt (2π) 18 lépcsővel közelítettük meg a 8. táblázat fokbeosztása szerint. A lépcsős görbe lépcsői egyenlő magasak, azaz a relék



33. ábra

A jeladó kapcsolása Leonard gépcsoporttal szabályozott adagoló irányítására.



az egyes impulzusokra egyenlő ellenállásértékeket iktattak be, illetve ki. A görbe Fourier-analízisének két első tagja

$$\varphi(\omega) = 0,996 \sin \omega + 0,002 \sin 3\omega$$

értéket adja, azaz a harmadik harmonikus is csak kb. 2 %-os sullyal szerepel, ami mind a beiktatott ellenállások huzalozási, mind a kimenő mennyiség mérési pontossága alatt van. Az összes további felharmonikus együttes szerepe kb. újabb 2 %. Ha ehhez hozzászámítjuk, hogy a vizsgált tartományban legalább 20 db/dekád attenuációval kell számolnunk, a harmadik harmonikus hatása csak kb. harmadsullyal szerepel a kimenő frekvenciasprektumban, azaz a hiba 0,5 % körüli értékre csökken. A lépcsősgörbe menétét a 35. oszcillogramm mutatja.

8. táblázat

Az időjeladó tárcsa fokbeosztása

Lépcső	Fok
1.	13
2.	27
3.	42
4.	66
5.	114
6.	138
7.	153
8.	167
9.	180

A lépcsős görbét egy szigetelő bakelittárcsa peremébe sülyesztett érintkezőpontokkal alakítottuk ki. Az érintkező pontok a megadott szögsorrendben helyezkednek el, így állandó sebességű tárcsaforgás esetén időben szinuszosan sűrűsödő, illetve ritkuló impulzus-

sorozatot adnak egy olyan áramkörben, amelyet a tárcsa érintkező pontjai és egy csuszókefe zárnak. Az impulzusok változását a 36. oszcillogramm mutatja. Az oszcillográffal történt felvételeknél ezt használtuk időjelnek is. A tárcsát egy 800 gcm nyomatékú óramotor hajtja. A motor kimenőtengelyének fordulatszámát nagyáttételű beépített fogaskerékszekrénnyel csökkentve 1/perc. A tárcsa és a motor közé szerelt, könnyen cserélhető fogaskerék-hajtás lehetővé teszi a 9. táblázat periódusidőinek megvalósítását. Az időjelet adó berendezést a 37. fénykép mutatja.

9. táblázat

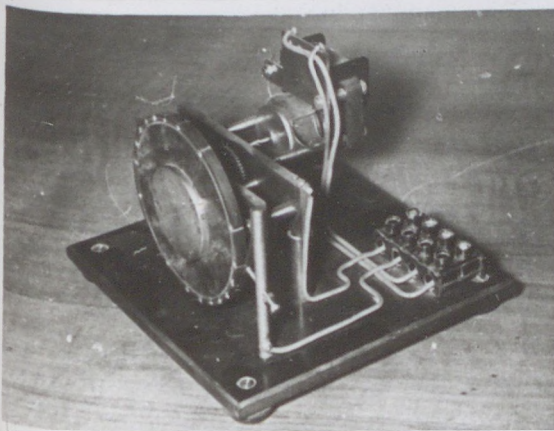
Periódus- idő T min	Körfrekvencia rad/s
16	0,00654
12	0,00873
8	0,0131
6	0,0174
4	0,0262
2	0,0523
1	0,1046

A 38. fényképen, illetve 39. kapcsolási vázlaton látható további elemek az impulzus erősítését, ismételt téves kapcsolások elkerülését, a gyorsabban melegedő reléterkerccsek rövid meghúzási idejét biztosítják. A készülék további lényeges eleme egy Siemens rendszerű telefon-lépkedő /marker/, amelynek az érintkező karon kívül 17 állása van. Az érintkező kar egyben az alaphelyzetet is szolgáltatja 18. lépcsőként. A lépkedő a kapcsolatban fellépő áramokat kifogástalanul szakította meg, mi-



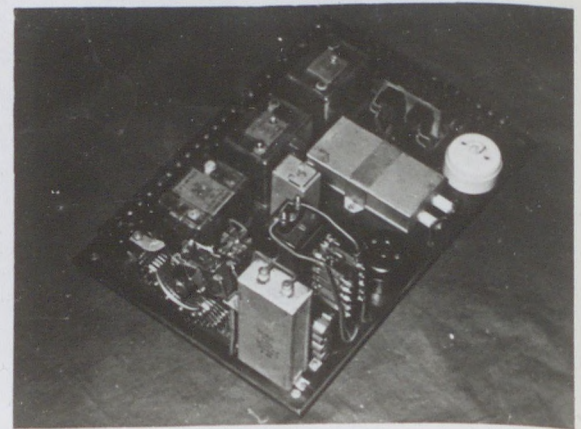
13. ábra.

Az átfutási idő mérése ionizációs módszerrel



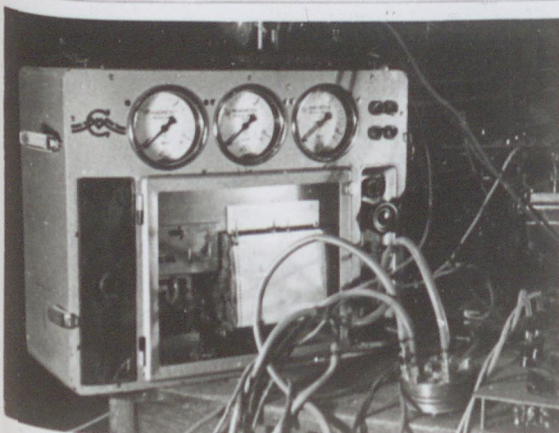
37. ábra.

Szinuszos jeladó készülék



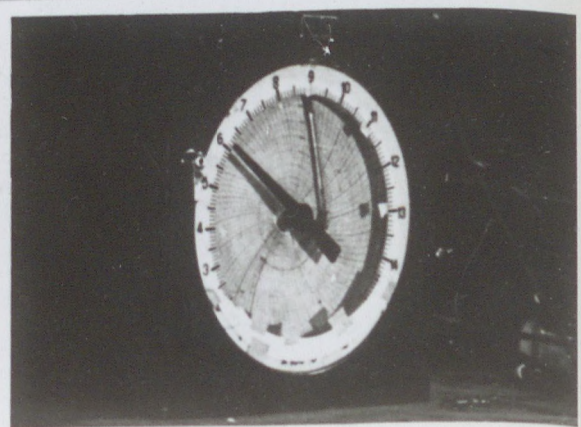
38. ábra.

Impulzusadó



42. ábra.

transzferométer és pneumatikus erősítő



45/a. ábra.

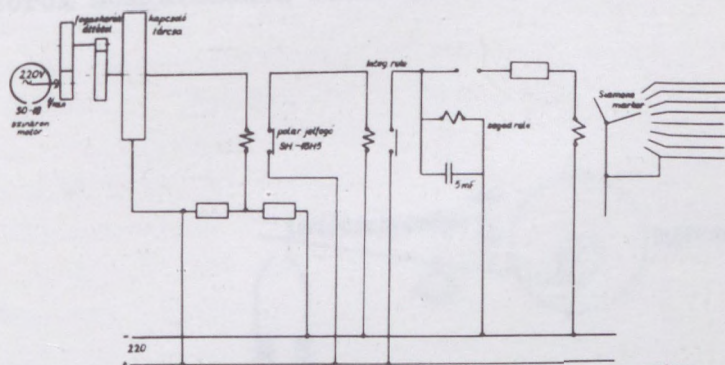
Kompenzográf

vel a teljes áramkör megszakítására nem került sor.

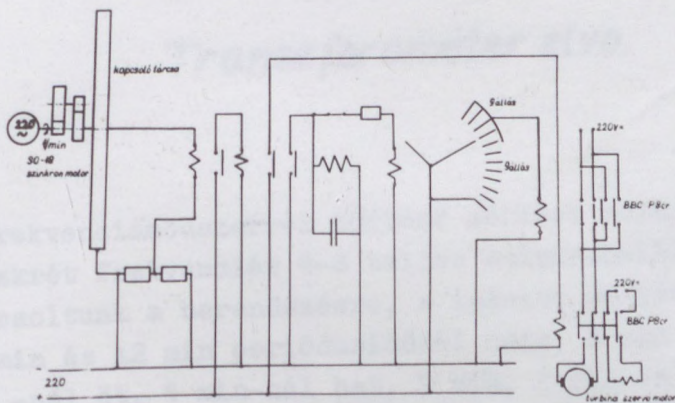
A tárcsától kiinduló impulzusok, mint említettük, időjelzésként is szerepeltek. Az egyenlőtlen elosztás kitűnő lehetőséget nyújt a fáziseltolásnak közvetlenül szöghen történő leolvasására.

A lépcsős görbével működő impulzusadó készülék igen alkalmas olyan jellegű beavatkozószervek működtetésére, ahol folyamatos készülékkel vagy egyáltalán nem lehet, vagy csak bonyolult szervomechanizmussal lehetséges időben szinuszos görbét kapni. Ilyenek az integráló jellegű beavatkozó szervek, például a gőzturbinák villamos szervomotorja, amelyeknél a szabályozószelep nyitása a motorok sebességét integrálja. A hálózatról, illetve turbógépcsoportról érkező zavaróhatások vizsgálatára a kazánból történő gőzfogyasztás változtatását is ezzel a készülékkel végeztük. Az állandó lépcsőmagasságokat itt az integrálási idő beállításával biztosítottuk, a szervomotor bekapcsolási idejét BBC időrelével szabályoztuk. A turbina szervomotorját BBC P8 cr segédrelé kapcsolta, a pülusváltást a forrásirány megváltoztatására hasonló segédrelé végezte a telefon-lépkedő vezérlése alapján, a 40. ábra kapcsolásában.

A pneumatikus működtetéssel és szabályozással felszerelt inotai erőműben a szinuszos jel előállítására az MMG-MIKI-ben György Zoltán által kifejlesztett transferométer adórészét használtuk fel. A jeladó az állandó értékű táplevegő nyomást úgy szabályozza, hogy a fuvóka nyílása előtt elhelyezett torlólemez, mint excenterkart periódikusan mozgatja. A torlólemez a fuvóka nyílástól távolodva levegőt enged el és így a kimenő nyomást csökkenti. /41. ábra, 42. fénykép/. A torlólemez szinkronmotor mozgatja, széles tartomány-

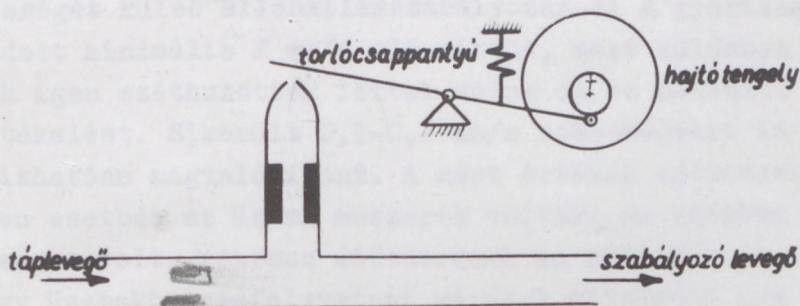


39. ábra.
Jeladó kapcsolási vázlat.



40. ábra.
Turbina működtetése a jeladóval.

ban változtatható áttétellel szabályozott frekvenciákkal. A nyert, kb. 0,7-1 at-ig váltakozó nyomást pneumatikus erősítővel erősítettük fel, a pneumatikus szervomotorok mozgatásához szükséges kb. 2,8-4 at-ig nyomásig.



41. ábra.

Transzferométer elve.

A frekvenciamódszerrel történő mérések során egy diszkrét frekvenciát 4-8 teljes szinuszhullámmal kapcsoltunk a berendezésre, a lassabb periódusoknál, 16 min és 12 min periódusidőnél négy, 8 min és 6 min -nál öt, 4 min-nál hat, 2 min, 1 min és ennél kisebb időknél nyolc periódust, egymásután folyamatosan. Ez az idő elegendő volt a megbízható belengetésre. Az ugrásfüggvénnyel történő méréseket úgy végeztük, hogy a mérés előtt 15 percig a kazán állapotán nem történt változtatás és a lökéseket is 15 percenként adtuk, ami elegendő volt a biztos, állandósult állapot beállításához. Valamennyi mérést

igyekeztünk a reprodukálhatóság bizonyítása érdekében legalább egyszer megismételni.

4.2.2. A regisztrálás módja

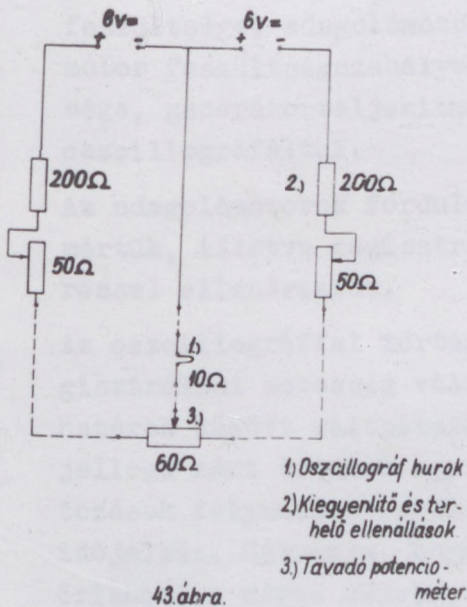
A regisztrálás különböző eszközökkel történik. A gyorsabban változó folyamatokat többhurkos oszcillográfokkal /általában háromhurkos Siemens, illetve RFT készülékkel/ fényképeztük. Az oszcillográf papírmozgatási sebességét külső ellenállásszabályozással a gyárilag megadott minimális 2 mm/s alá vittük, mert különben a jelek igen széthuzottak lettek volna és ez nehezíti a kiértékelést. Sikerült 0,1-0,2 mm/s sebességeket is megbízhatóan megvalósítani. A mért értékek adóműszerei minden esetben az üzemi műszerek voltak. Ez részben szükséges volt, részben célszerűnek is mutatkozott. A nagy üzemekben lefolytatott mérések általában nem teszik lehetővé különleges műszerek beépítését, mert ez az üzem esetleges leállítását tenné szükségessé. A célszerűséget az indokolja, hogy a mérések végső céljaként beállítandó szabályozóberendezések is általában hasonló vagy azonos műszerekről kapnak jeleket. A mérések elsősorban a változások szempontjából voltak érdekesek, amire a műszereket kellőképpen érzékennyé lehetett tenni, bár az abszolút értékeket is pontosan hitelesítettük a mérés előtt és után, sőt ahol lehetett, a mérés alatt is. A mennyiségmérő és nyomásmérő műszerek potenciométeres távadóval voltak ellátva. A potenciométereket és az oszcillográfhurkokat a 43. ábra szerint megfelelő kompenzáló kapcsolásba kötöttük, a stabil tápfeszültséget állandóan ellenőrzött, nagykapacitású akkumulátorokkal biztosítottuk. A kompenzáló kapcsolás lehetővé tette, hogy állandósult állapotban az oszcillográfhurkokat magába foglaló középső ág árammentes legyen, az érzékenység pedig igen tág határok között úgy szabályozható, hogy

az oszcillográfhurok végkiterése a mért érték maximális amplitudóváltozásának feleljen meg, ami a nyomásmérők távadóinál az alapműszer érzékenységének kb. 20-szorosát, mennyiségmérőknél kb. 10-szeresét jelentette.

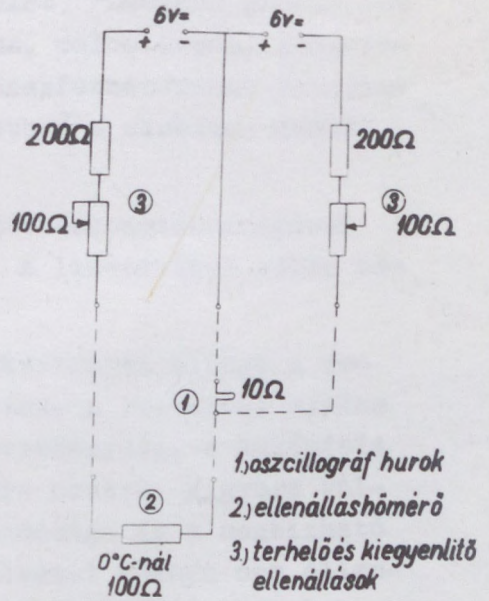
Az ellenálláshőmérő kapcsolása hasonló volt /44. ábra/, az alapérzékenység fokozása az üzemi műszerekhez képest kb. 10-15-szörös.

A hőelemek termofeszültsége még a legérzékenyebb /1,5 mA, 10Ω / oszcillográfhurok kiteréséhez is kevés volt, a változások regisztrálására pedig teljesen elégtelen. Ezért olyan esetben, amikor a regisztrálás oszcillográffal történt, egycsatornás körtárcsás EP-120 jelű kompenzográfot iktattunk közbe. A kompenzográf hidkapcsolásának ellenállásértékeit úgy választottuk meg, hogy a teljes 320° -os skálakiterés kb. 5 mV-nak feleljen meg, a skála kezdőpontját pedig a változásoknál előforduló minimális hőfokig, illetve termofeszültségig toltuk el. A kompenzográf közös ellenállás-csuszka- és mutatótengelyére erősített potenciométeres távadó közvetítette a felerősített jelet az oszcillográfhurokra /45. ábra/.

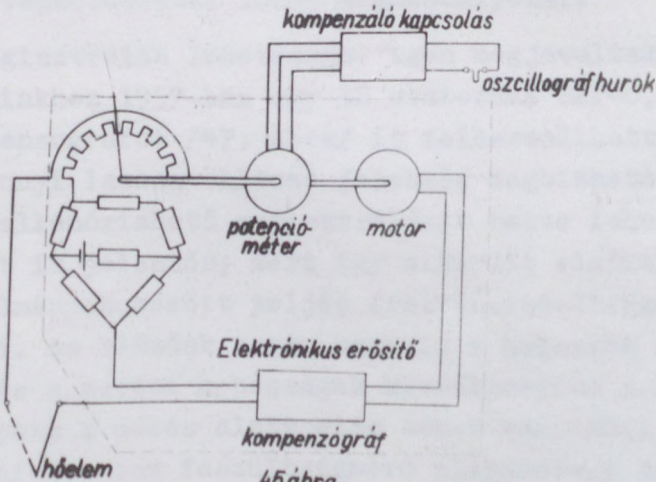
A tüztérhőmérsékletet kezdetben Foster gyártmányu regisztráló pirométerrel mérték. A pirométer vörösérzékeny fotócellát tartalmaz, a regisztráló és mérőkörben a fotócella 5 mA érték körüli, felerősített áram folyik. A műszer igen érzékeny és gyakorlatilag nincs tehetetlensége. Később egy nehezen beszerezhető cső meghibásodása miatt áttértünk a magyar gyártmányu Magnephot alkalmazására, amelyet tudomásunk szerint hasonló célokra még nem alkalmaztak. A Magnephot fénymérő műszer, vörösérzékeny fotócellával, megfelelő előtéttel kitűnően lehetett felhasználni és igen nehéz körülmények között állt helyt. /46. ábra/. A hitelesítések a lényegesen nagyobb tehetetlenséget mutató



43. ábra.
Kompenzáló kapcsolás.



44. ábra
Ellenálláshőmérő kapcsolása.



45. ábra.
Hőelem regisztrálása kompenzográf közbeiktatásával.

Hartmann-Braun gyártmányu Pyrradio-val történtek.

A közvetlen villamosmennyiségeket /Leonard gépcsoport feszültsége, adagolómotor árama, malom árama, adagolómotor feszültségszabályozó transzformátorának feszültsége, generátorteljesítmény, stb./ a szokásos módon oszcillografáltuk.

Az adagolómotorok fordulatszámát tahométerdinamóval mértük, illetve regisztráltuk, a linearitást külön méréssel ellenőriztük.

Az oszcillográffal történt regisztrálás előnye a regisztrálási sebesség változtatása, a rendkívül széles határok között változtatható érzékenység, a különféle jellegű mért értékek egy szintre hozása, a gyors változások folyamatos regisztrálhatósága és a megbízható időjelzés. Hátránya, hogy a felvétel közben nem ellenőrizhető a mérés menete, az oszcillográf-felvételek előhívása időtrabló és körülményes, továbbá a kompenzáló kapcsolások hibája folytán az oszcillográfhurkok könnyen tulterhelhetők. Ez utóbbit megfelelő, a mérési tartományban lineáris, ezen felül erősen nonlineáris védőelötéttel lehet megakadályozni.

A regisztrálás lehetőségei igen megjavultak, amikor méréseinkhez 1957-ben egy 12 csatornás EPP-0,9 típusu kompenzográfot /47. ábra/ is felhasználhattunk. Ez valamennyi lassan változó jelenség megbízható, üzemben ellenőrizhető regisztrálását tette lehetővé, ami azért is jelentős, mert így sikerült elsősorban azonos körülmények között teljes frekvenciajelleggörbét felvenni. Az előzőek során ugyanis a hosszabb megszakítások és a mérési nehézségek következtében a kazán üzemi állapota a mérés alatt elég sokat változott. A kompenzográfot, mint feszültségmérő alapműszert használtuk, a teljes 275 mm-es skálahosszon, érzékenysége 16 mV volt. A potenciométereket és ellenálláshőmérő távadókat eb-

A mérés elrendezése



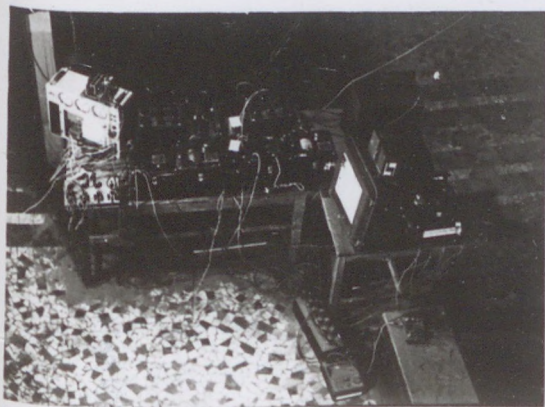
46. ábra.

Tűzterhőfok mérése Magnephottal



47. ábra.

Az EPP-09 típusú kompenzográf

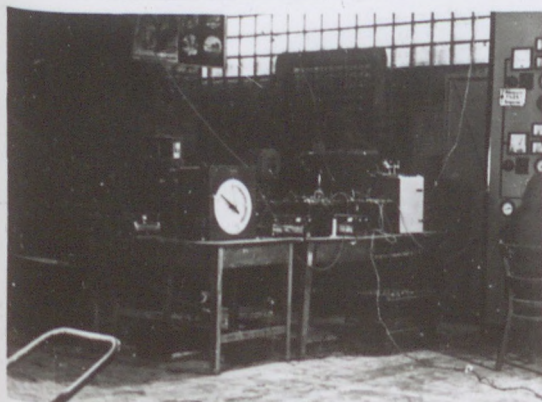


A mérés elrendezése



48. ábra.

A mérés elrendezése



48. ábra.

A mérés elrendezése



52. ábra.

A hőátadási modell

ben az esetben is kompenzáló kapcsolással mértük, a hőelemek mérését a műszer közvetlenül teszi lehetővé, mivel elsősorban erre készült. Az erősáramú villamos mennyiségeket /Leonard feszültség, adagoló áram, stb./ megfelelő feszültségosztókkal és mellékáramkörű kapcsolásokkal alakítottuk át arányos mV értékekre. A kompenzográf egy mérőpont kiegyenlítését és a mért értéknek regisztrálását /papírra történő pecsételését/ 3 s időközökben végezte. Így az általunk legtöbbször alkalmazott 6 mérőhelyes kapcsolásban 18 s időközökben kaptunk a regisztrátumon új pontokat. Ez a regisztrálási sebesség az esetek többségénél megfelelt. A regisztrátumok áttekinthetősége érdekében az egyes jellemzők középértékét a papíron eltoltuk egymástól, ami azonban külön gondos hitelesítést igényelt.

Kezdetben megpróbálkoztunk ejtőkengyeles, többszínirő regisztráló műszerekkel történő mérésekkel. Ezek azonban 20 s-os regisztrálási idejük, rendkívül lassu papírelőtölésük, kis csillapításuk miatt alkalmatlannak bizonyultak, az egyes regisztrátumok időbeli egyeztetése is nehézségekbe ütközött. Olyan helyeken volt célravezető ilyen lassu működésű regisztráló alkalmazása, ahol éppen a jelenség állandóságát volt célszerű bizonyítani, például a falhőmérséklet méréseknél a falazat különböző mélységeiben. Ezt a mérést Dunapentelén végeztük el, több alkalommal megismételve. Az érzékelő csupasz, védőburkolat nélküli hőelemdrótpárokat a falazótéglák közötti fugák kivésásával helyeztük el. A nyílást ezután samotthabarccsal gondosan betöltöttük, így a külső levegő hűtőhatása nem érvényesült.

4.3. A kazán kapcsolása és üzemviszonyai a mérések alatt

A méréseket minden esetben a nyíltláncú rendszerben vé-

geztük. Önműködő tüzelésszabályozással felszerelt és teljesen megbízható kazán a mérések idején nem állt rendelkezésre. A borsodi erőmű szabályozói beállítás alatt voltak, de figyelembevételre, hogy ezekben az erőművekben a szabályozás a gyűjtősin egy meghatározott pontjának nyomásától kap ellenőrzőjelet, a mérés zárt láncu lefolytatása sem adna lényegesen jobb eredményt. Ebben az esetben ugyanis figyelembe kellene venni a hosszú gyűjtősinen /nagy közbeiktatott ellenálláson át/ együttműködő kazánok együttes dinamikáját, ami a 9-10 kazánból álló kazánsoron a többi kazánból érkező zavaróhatásokat még fokozottabban érvényesítené.

Ilyen körülmények között elvileg két megoldás között lehet választani. Az egyik, elméletileg megbízhatóbb módszer az, hogy a vizsgált kazán egy hasonló méretű géppel a közös gőzrendszerről leválasztva, egységkapcsolásban dolgozik. Például egy 100 t/ó kazán egy 20-21 MW-os géppel. Így a rendszerhez csatlakozó elemek zavaróhatását teljesen ki lehet küszöbölni. Gyakorlatilag ez a mérési módszer hazai erőműveinkben nehezen valósítható meg. A kazánházi és gépházi személyzet a blokküzemhez még olyan helyen sincs hozzászokva, ahol erre a tervezés lehetőséget ad, sok helyen azonban a gépek és kazánok különböző méretei vagy egyéb hőkapcsolási okok miatt ez alig lehetséges. A fellépő lényeges nyomás- és hőfokváltozások a személyzetet idegessé teszik, sokszor feleslegesen avatkoznak be az üzembe, a lengésekre nem készülnek fel, és így azokat esetleg helytelen beavatkozással még tulhintáztatják. A biztosítószелеpek lefújása és a turbina előtt tartandó minimális nyomás amúgy is nagyon szűk mozgási szabadságot ad a lengés beállítására. A turbina előtti admissziónyomás állandó értéken tartása, tehát a turbina gőzfogyasztásának a

kazán gőztermelésével szinkronban való járatása egy erőműben sem volt a kazánszeméllyzettel megvalósítható. M. Andritzky idézett kísérletei során ugyanezt az elvet követte, de a közölt mérési eredmények világosan mutatják, hogy a célt a külön e mérésre beállított, jól képzett és megkettőzött németországi kezelőszeméllyzettel sem sikerült megvalósítania.

A másik módszer a kazánok hosszú, lehetőség szerint végtelennek tekinthető gyűjtősinre való kapcsolása. Ebben az esetben a kazánterhelés ingadozásait a végtelen gyűjtősin felveszi, a fogyasztói nyomás állandó. A hosszú gyűjtősin olyan üzemben, amikor az erőmi menetrendjén változás nincs és üzemzavar nem fordul elő, eléggé mentes a vizsgált kazánokra gyakorolt zavarásoktól, az egyes kisebb zavaróhatások a sok kazán között eloszlanak, így alig lépik túl az egy kazán változásainál a mérési pontosság által meghatározott, amúgy is beszámítandó hibát. Ezt a módszert valósítottuk meg Borsodban. Ha ilyen lehetőség nincs, az is megfelelő, ha a mért kazánnal szomszédos egység a mért kazánnal ellentétes előjelű lengést végez, közben nagy figyelmet szentelve a gyűjtősinnyomás állandóságára. A dunapentelei mérések során ezt a módszert követtük.

A mérések folyamán mind a két fő eljárást kipróbáltuk, de mivel a hosszú gyűjtősinre dolgozó kazánon történő mérés legalább olyan kedvező volt, mint a blokkban történő, viszont az előbbi az üzemvitel oldaláról nézve előnyösebb, a legtöbb mérés hosszú gyűjtősinre dolgozó kazánon történt. Ez a módszer lehetőséget adott többnapos, megszakítás nélküli mérések lefolytatására is.

A mérések általában azonos szénminőség mellett úgy készültek, hogy egy-egy méréssorozat előtt a kazán bunkereit egyfajta szénrel huzatták tele. A kazánházi kezelőszeméllyzet csak vész-esetben avatkozott be az

üzembe /vizállás, hőfok, nyomás, nem megengedhető mértékű változása esetén/, a kazán normális üzemállapotra, mint alapszintre beállítva, csak a jeladó berendezés hatására, szabadon változtatta üzemét.

Minden olyan mérésnél, ahol önműködő tápvizszabályozó működött, azt üzemben tartottuk, ha nem működött, külön kezelő ellenőrizte a vizállást.

Önműködő hőfokszabályozó egyik erőműben sem volt üzemben. A gőzhőfok változásában csak ott és akkor avatkoztunk be, ha az a kazán túlhevítőjét, illetve a turbinát veszélyeztette. A mérés és a készülékek összeállítását a 48. képeken láthatjuk.

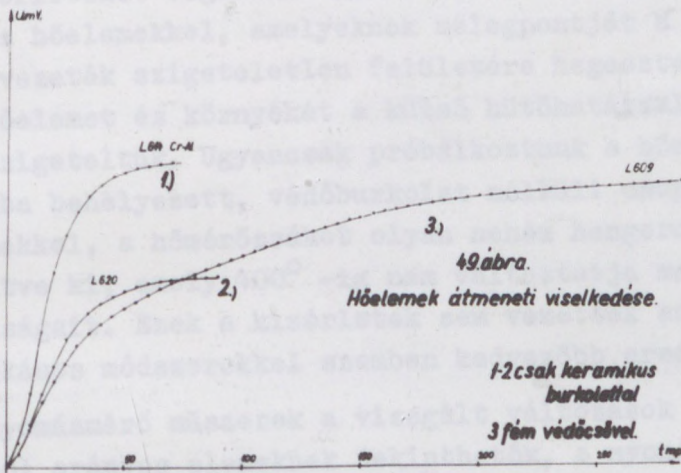
A két év alatt végzett mérések során kb. 200 óra tiszta megfigyelést végeztünk a különböző kazántípusokon, melyekről a regisztrátumok rendelkezésre állnak. A mérések folyamán a mérés, vagy azzal kapcsolatos előkészületek, készülékek, körülmények következtében üzemzavar nem volt, sőt a hosszú gyűjtősinen történő mérések alatt az üzem menetrendjében, körülményeiben sem kellett semmiféle változtatást foganatosítani.

4.4. A mérési pontosság

A mérési pontosságnál a leírt kísérletek szempontjából két fogalmat kell megkülönböztetni: a statikus és dinamikus pontosságot. A statikus pontosság a műszer érzékelő elemének, távadójának, hozzávezetésének és a mutató, illetve regisztráló műszernek együttes pontossága. A fő regisztráló berendezések /kompenzográf és hurkos oszcillográfok/ 0,5 osztályúak, a hőelemek kb. 1 %, a távadók 2-3 %, a nyommérések 1,5 %, a nyomiségmérők 1-2 %, az ellenálláshőmérők 0,5-1 % pontosságúak.

A mérések szempontjából a lényegesebb a dinamikus pontosság, amely részben a vizsgált jellemzők adott szinten mért érzéketlenségéből és a változások leké-

pezésének hűségéből, tehát a mérőrendszer átviteli függvényéből adódik. Hőmérséklet mérésénél a védőtokos hőmérő hőtehetetlensége a legfontosabb befolyásoló tényező. Az irodalomban erről a kérdésről a legalaposabb és elméletileg legmodernebb cikkek Linahan [126] és Kondratyev [106] közlései. Az általuk levezett rendkívül bonyolult összefüggések egyszerűsítése azt mutatja, hogy első közelítésben a hőmérők burkolatukkal egy időállandós elemként foghatók fel. Ezt a végkövetkeztetést Linahan tanulmányában leszögezi. A vizsgált hőmérőtípusokon méréseket végeztünk, az időbeli lefolyást a 49. ábra, az időállandókat a 10. táblázat foglalja össze.



A méréseket álló folyadék közegben végeztük. Turbulens áramlás esetén a folyadékban és gőzben Linahan, Mc Adams [121] és Aikman [127] mérései szerint az átmeneti jelenségek állandói azonos állóközeghez képest max. kb. $\pm 20\%$ -os eltérést mutatnak. Az általunk mért gőzhőfokok értékelésébe be kell számítani azt a tényt, hogy a csővezetékbe behesztyelt hőmérőzsák és az acél- és keramikus védőburkolatu ellenál-

lás, illetőleg hőelemhőmérők között újabb levegőréteg van, ezért az időállandók az 5-10 perces tartományban mozognak.

10. táblázat

Hőelem	Időállandó s
1.	20
2.	25
3.	120

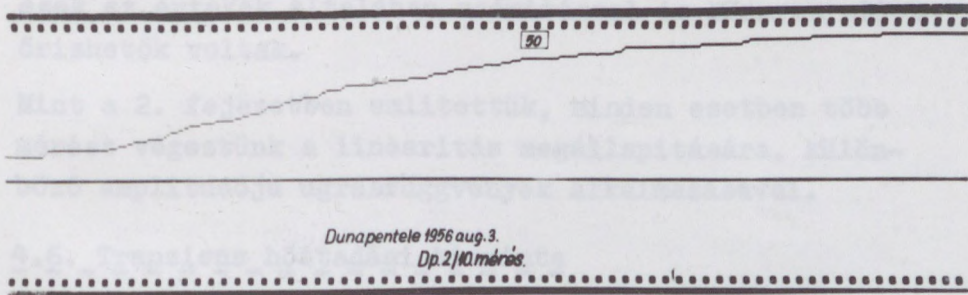
Kísérleteket végeztünk az Inotai Erőműben olyan csupasz hőelemekkel, amelyeknek melegpontját a kilépő gőzvezeték szigeteteletlen felületére hegesztettük. A hőelemet és környékét a külső hűtőhatással szemben leszigeteltük. Ugyancsak próbálkoztunk a hőmérőzsákba behelyezett, védőburkolat nélküli csupasz hőelemekkel, a hőmérőzsákot olyan nehéz hengerolajjal töltve ki, amely 400° -ig nem változtatja meg tulajdonságait. Ezek a kísérletek sem vezettek azonban a szokásos módszerekkel szemben kedvezőbb eredményre.

A nyomásmérő műszerek a vizsgált változások szempontjából arányos elemeknek tekinthetők, a nyomáshullám hangsebességgel terjed, a vezetékek viszonylag rövidek, a Bourdon-cső mozgásideje a mért jelenségek időállandóihoz viszonyítva tökéletesen elhanyagolható. A mennyiségmérők időbeli viselkedésére a legjellemzőbb adat az un. beállási idő, amely a mechanikus mozgásidőt jelenti. Ezt a műszermutató 80 %-20 % méréstartományban való mozgásával értelmezik, általában 10-20 s. Esetünkben, $\pm 10\%$ - 15% -os változásokat feltételezve, ez 5-10 s-ot jelent. Ezt az időt az átmeneti viszonyok mérésénél be kell számítani.

A mennyiségmérő egyéb kérésére a beállási időhöz képest jelentéktelen, a hatónyomás hangsebességgel terjed.

A távadóelemek, az átvitel és a villamos regisztráló a jelenségek szempontjából tehetetlenség és holtidőmentes arányos elemek.

A műszerek érzéketlensége a mérési pontosságon belül volt, az érzéketlenség mértékét jól mutatják az 50. oszcillogramm apró ugrásai. Ezek az alapműszer /billenőgyűrűs mennyiségmérő/ surlódásából és a távadó potenciométer meneteinek ugrásaiból adódnak. A görbe lefolyását nem torzítják, legfeljebb a holtidő mérésénél lehetne figyelembevenni, azonban mértéke itt is mélyen alatta van a mérés egyéb eltéréseiből adódó szórásnak.



4.5. A mérések kiértékelése

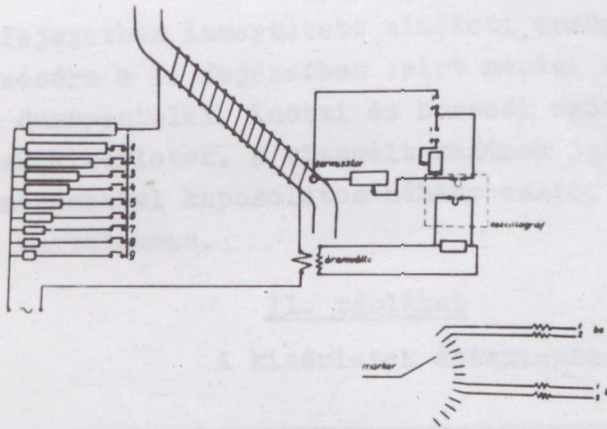
A mérések kiértékelése úgy történt, hogy valamennyi mérés adatait figyelembe vettük és rögzítettük, ezután kizártuk a nyilvánvalóan idegen okok miatt rossz felvételeket, amelyek a méréseknek kb. 20-25 %-át jelentették. A műszakilag valószínűsíthető mértékű szórás minden esetben figyelembe vettük. Az időálló megállapítása az érintő módszerrel és az állandósult állapot 63 %-a idejének mérésével történt. A területintegrálási módszer a rendkívül nagyszámú mérésnél tulságosan időtrabló lett volna. Az átmeneti függvé-

nyek kiértékelésénél felhasználtuk Strejc [128] rendkívül szellemes módszerét, amely főleg a szabályozott szakasz többterese jellegének kimutatására és a tárolóelemek számának meghatározására igen célszerűnek mutatkozott. A frekvenciamódszerrel történő méréseknél az amplitudóviszonyokat az állandósult állapotok közötti viszonyokra vonatkoztattuk, azonos mértékű zavarás mellett. Így az átviteli tényező értéke 1 lett. A fázisszögeket a már ismertetett módszerrel, közvetlenül olvastuk le. A fázisszögek egyébként lényegesen megbízhatóbb és reprodukálhatóbb összefüggéseket adtak, mint az amplitudóviszonyok, ezért a holtidő által megadott fáziseltolások levonásával a rendszert első közelítésben minimál-fázisunak tekintve, értékes tanulságokat vonhatunk le csak a fázisszögek vizsgálatából. A holtidőket a már ismertetett külön mérésekkel határoztuk meg, ezenkívül ezek az értékek általában számítással is könnyen ellenőrizhetők voltak.

Mint a 2. fejezetben említettük, minden esetben több mérést végeztünk a linearitás megállapítására, különböző amplitudóju ugrásfüggvények alkalmazásával.

4.6. Tranziens hőátadási kis minta

A 2.6. fejezet számításának ellenőrzésére az intézetben egy tranziens hőátadási kis mintát készítettünk. A kis minta a hőterhelés ugrásszerű és szinuszos változásának hatását vizsgálta állandó és változó sebességgel folyó folyadék kilépő hőfokára. A 25/22 mm átmérőjű és 1450 mm fűtött hosszú csövet kívülről, ellenálláshuzallal melegítettük. A melegítő áram 20-50 A-ig volt változtatható, 380 V feszültségen. A melegedés változását a korábban leírt szinuszos impulzusadó vezérelte az 51. ábra kapcsolása szerint. Az áramot a párhuzamosan kapcsolódó ellenállásokkal változtattuk. Az ellenállásokat DK 10 típusu erősáramú relék kapcsolták. A hőfokot a



51. ábra.
Hőadási modell kapcsolása.

cső végén Tungfram gyártmányu termisztor-kristállyal mértük. A termisztor saját időállandója méréseink szerint 1 s volt. A termisztor ellenállását és az áramot kompenzográffal és hurkos oszcillográffal regisztráltuk. A mérés elrendezését az 52. fénykép mutatja. A mérés közben az átfolyó vízmennyiséget köböző edény-nyel mértük.

5. fejezet

A mérési eredmények és a számítások összehasonlítása

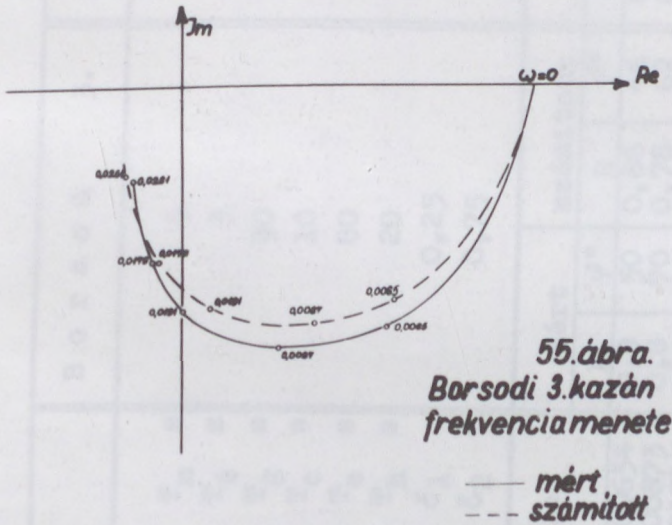
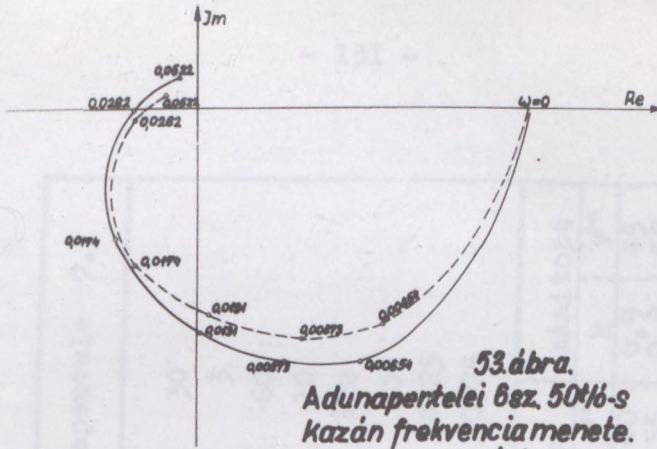
A 2. fejezetben ismertetett elméleti eredmények ellenőrzésére a 4. fejezetben leírt mérési módszerekkel a dunapentelei, inotai és borsodi erőművekben folytak kísérletek. A vizsgált kazánok jellemzőit és a mérésekkel kapcsolatos néhány adatot a 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat

A kísérletek áttekintése

Erőmi	Dunai Vasmű	November 7.	Borsodi Hőerőmű
Kazán száma	5. 6. 7.	4.	3.
Gyártó	Láng Darugyár	CKD /Csehszl/	EKM Borsig/NDK/
Teljesítőké- pesség t/ó	50 100	100	100
Nyomás att	40	64	80
Kilépő gőz- hőfok C°	450	480	500
Tápvizhő- fok C°	120	180	190
Kísérlet ideje	1955. jun. 1955. jul. 28- aug. 5. 1956. szept. 18-27.	1957. ápr. 10-19.	1957. máj. 24-31.

A frekvenciamódszerrel végzett mérések eredményeit a 12. táblázat és az 53, 54, 55. ábrák tartalmazzák. A táblázatok és az ábrák összehasonlításul közlik az



Frekvencia jelleggörbék.

12. táblázat

Mérések frekvenciamódszerrel

	B o r s o d	3.	Dunapentele 6.	Dunapentele 7.	mért		számított		mért		számított	
					R	φ°	R	φ°	R	φ°	R	φ°
					számított		számított		számított		számított	
T_m	s	5	25	30	0,9	55	0,9	48	0,9	40	0,9	45
T_6	s	3	3	3	0,8	70	0,8	65	0,8	55	0,8	60
T_8	s	90	80	60	0,65	90	0,65	88	0,7	90	0,65	88
T_c	s	10	10	10	0,45	125	0,5	113	-	-	-	-
T_e	s	80	50	120	0,2	180	0,2	170	0,35	130	0,37	145
T_h	s	20	15	15	0,1	240	0,1	200	0,14	180	0,14	200
ϵ_1		0,25	0,25	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-
ϵ_2		0,75	0,75	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-
ω												
0,00654					0,9	50	0,86	46	0,9	46	0,9	45
0,00873					0,8	70	0,78	62	0,8	70	0,8	60
0,0131					0,65	90	0,64	83	0,65	90	0,65	88
0,0174					0,5	100	0,5	98	0,45	125	0,5	88
0,0262					0,3	130	0,3	125	0,2	180	0,35	145
0,0522					-	-	-	-	0,1	240	0,1	200

elméleti számításokból adódó értékeket, továbbá az átviteli függvények számításában szereplő állandókra vonatkozó adatokat.

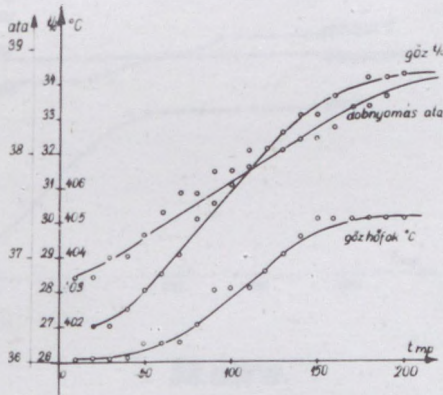
A tranziens válasz alakulását /ugrásfüggvénnyel végzett kísérletek/ az 56.-72. ábrák mutatják. A közölt görbék töredékét jelentik annak a nagyszámu és eredetiben rendelkezésre álló felvételnek, amelyeket különböző kazánokon és különböző üzemviszonyok között végeztünk, a nem közölt eredmények azonban a közöltekkel megegyező értékeket mutatnak, a mérések nagy száma a statisztikus viselkedés tisztázását célozta. A mérések értékelését a 13. táblázat tartalmazza.

13. táblázat

Mérések ugrásfüggvénnyel

Ábraszám	Holtidő s	Időállandó s
56	20	100
57	15	80
58	15	70
59	30	70
60	15	100
61	20	120
62	15	100
63	15	140
64	20	160
65	20	250
66	20	240
67	15	220
68	20	120
69	20	80
70	20	120
71	20	100
72	20	110

Az ugrásfüggvénnyel történt mérések kiértékelésénél általában egységes időállandót állapítottunk meg a 4. fejezetben említettek alapján. A tranziens válaszból az egyes összetevők értékelésére ugyancsak tettünk kísérletet, de az nem eléggé megbízható és általában nem volt szükséges, mert a frekvenciamód-

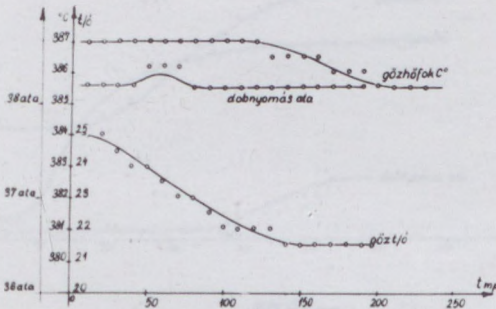


56. ábra.

Szénadagolás elállítása.

adagoló feszültség 68-100V

Dunapentele 1955. aug. 4. Dp. 47. mérés.



57. ábra.

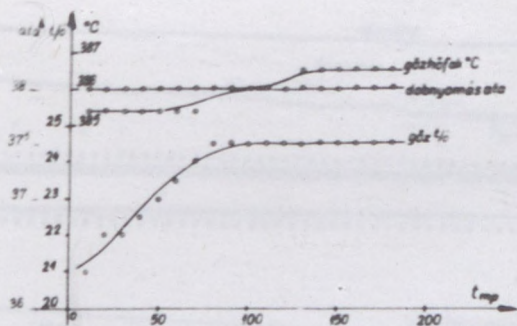
Szénadagolás elállítása.

adagoló feszültség 120-95V.

Dunapentele. 1955. aug. 5. Dp. 48. mérés.

56, 57. ábrák.

Tranziens válaszok.

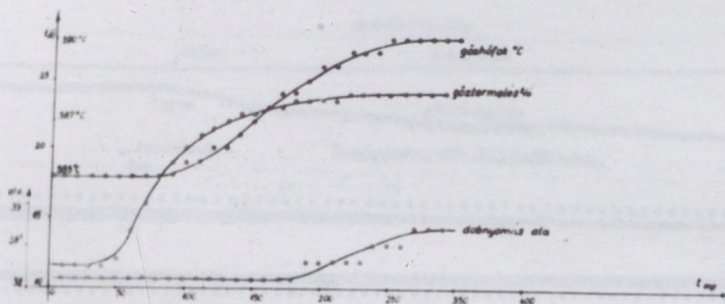


58. ábra.

Szénadagolás elállítása.

adagoló fesz. uzttség 95-120V

Dunapentele 1955 aug 5 49 mérés



59. ábra.

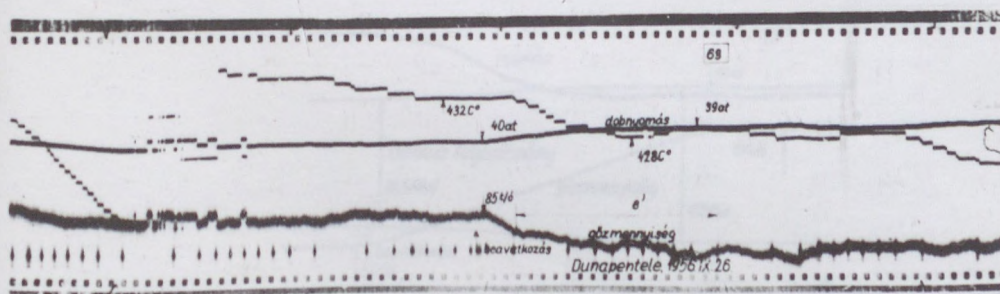
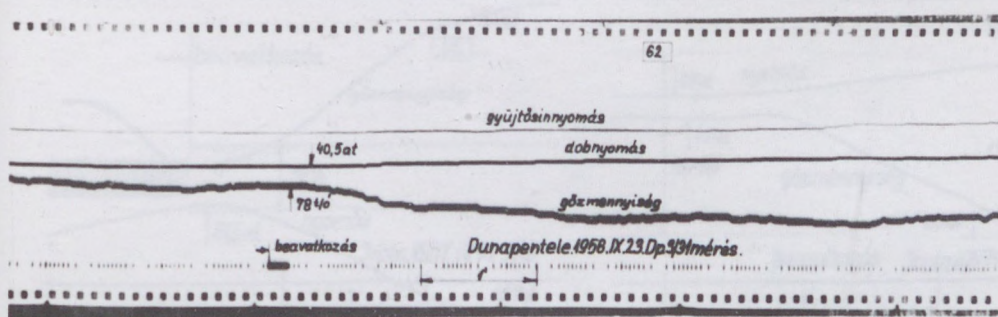
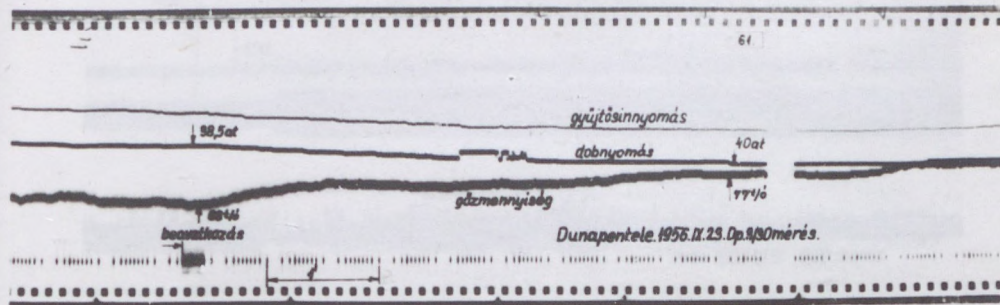
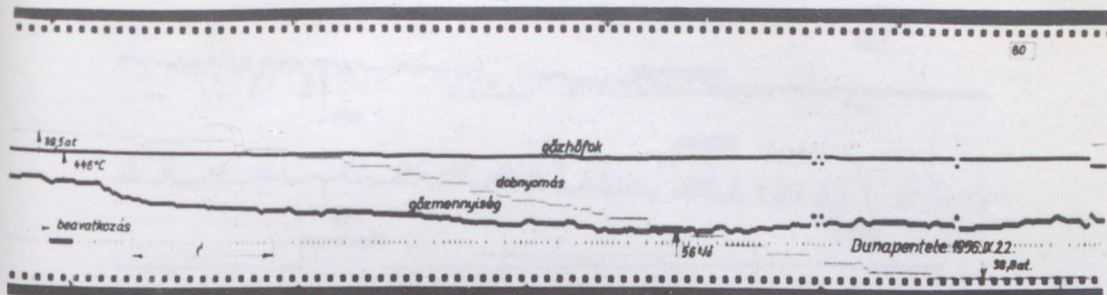
Szénadagolás elállítása

adagoló fesz. uzttség 70-120V

Dunapentele 1955 aug 5 Dp 110 mérés

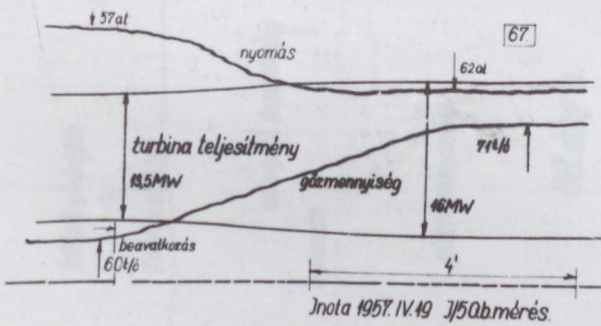
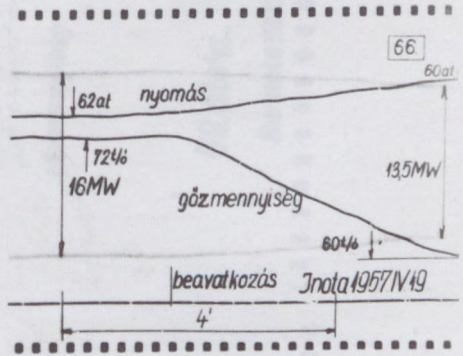
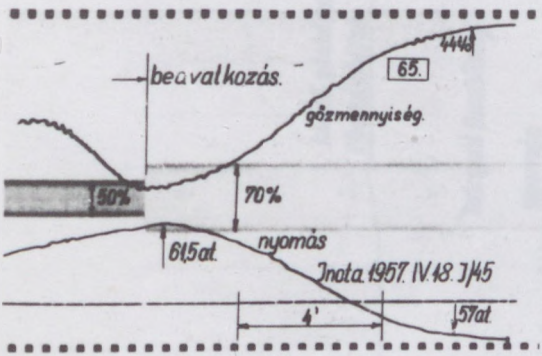
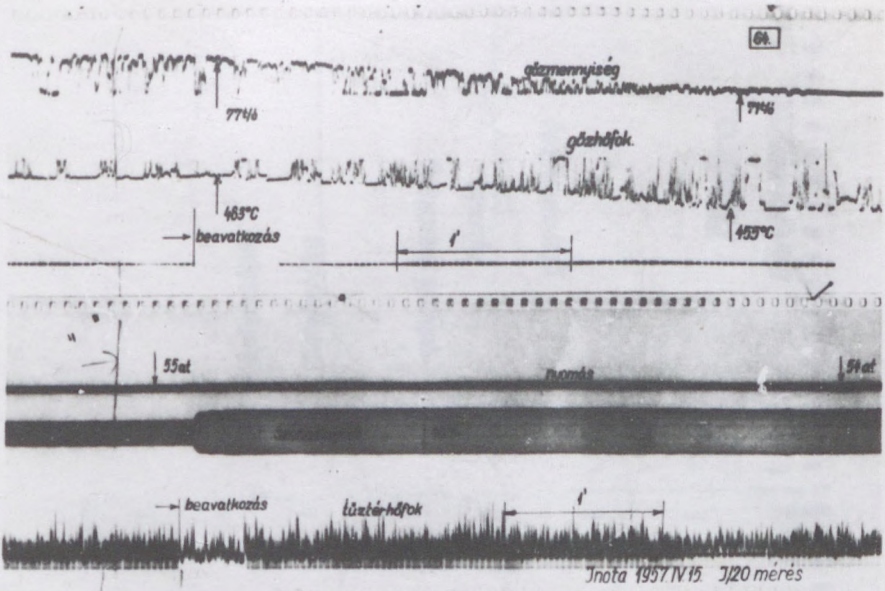
58, 59. ábrák.

Tranziens válaszok.



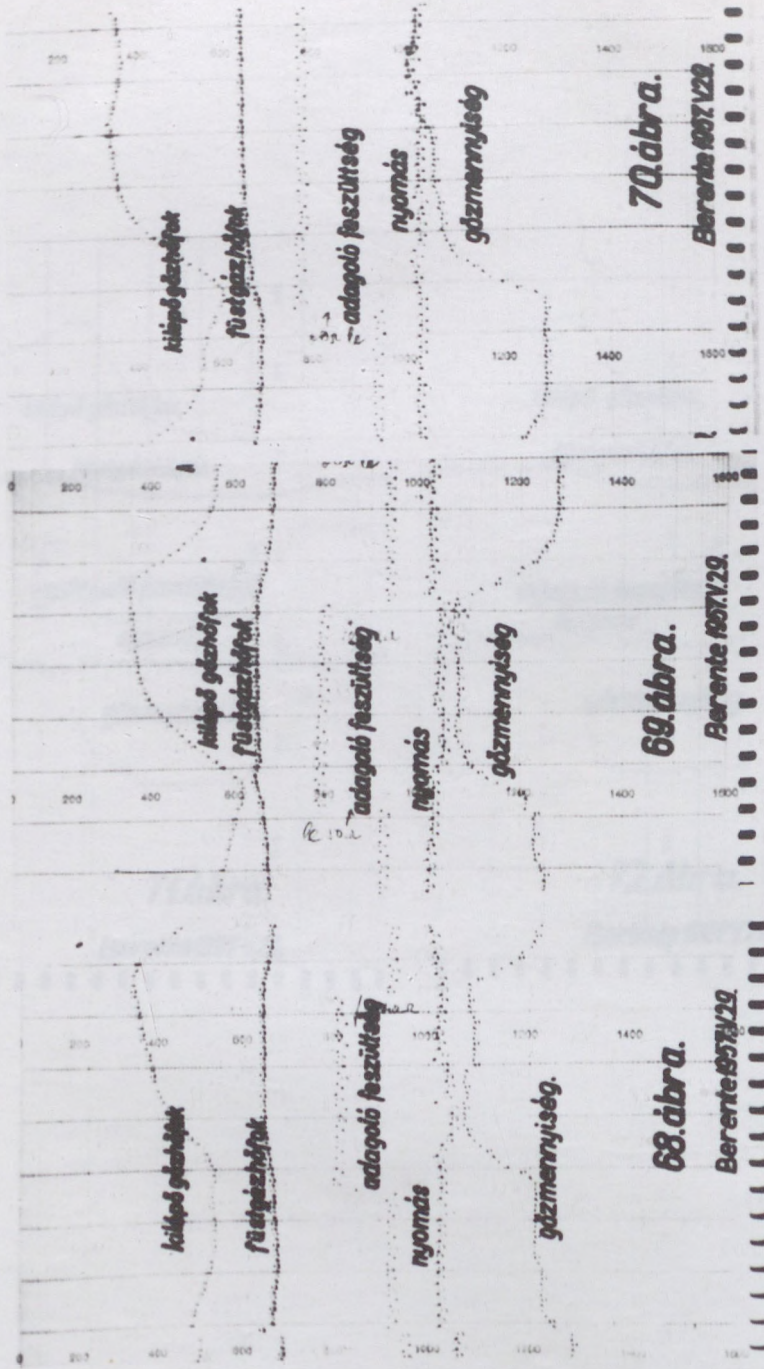
60-63. ábrák.

Tranziens válaszok.



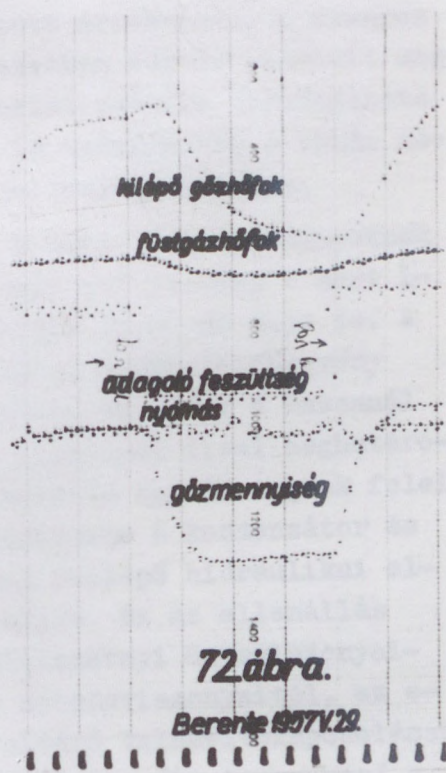
64-67. ábrák

Tranziens válaszok.



68-70. ábra.

Tranziens válaszok.



71-72. ábra.

Tranziens válaszok.

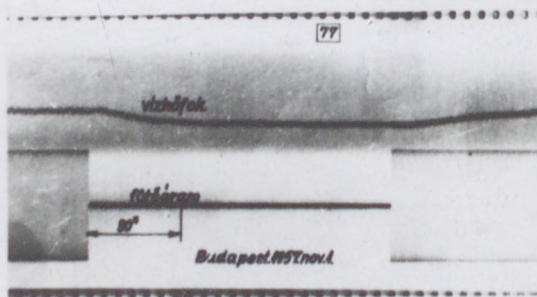
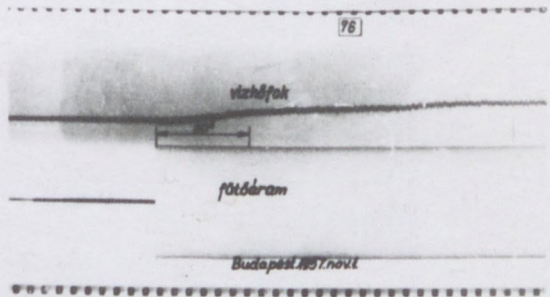
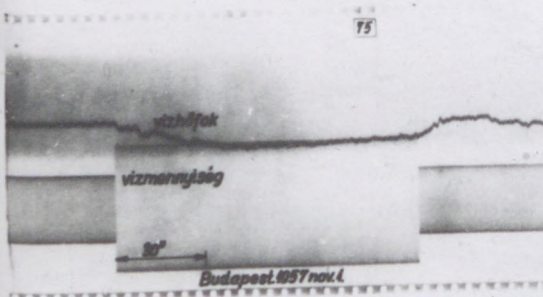
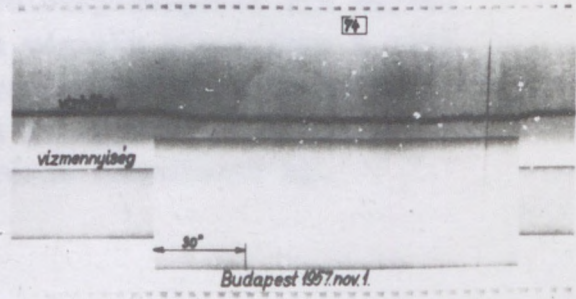
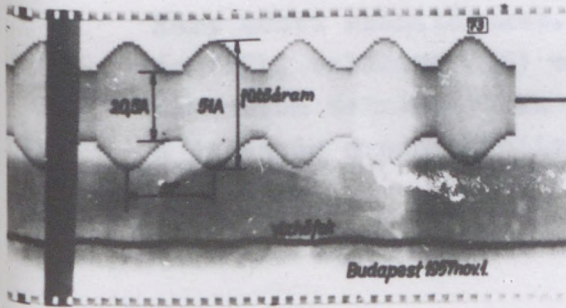
szer a pontosabb értékeket szolgáltatta. Az egységes időállandó viszont jó képet ad a kazán általános viselkedéséről. A mérési eredmények két lényeges és egymásnak bizonyos mértékig ellentmondó tanulsággal szolgálnak: bizonyítják, hogy a kísérleti eredmények jól egyeznek a számítással kapott értékekkel, a kazánok átmeneti jelenségei a fejezetben közölt elméleti megfontolások alapján a gyakorlat számára alkalmazható és igazolható módon előre is számíthatók a kazán néhány szerkezeti és üzemi jellemzője alapján.

A másik lényeges tanulság a kísérleti eredményeknek már hivatkozott szórása, mely sok esetben a mért időállandókra vonatkozóan eléri az 50-80 %-ot is. A szórás elméleti magyarázata az átviteli függvény

$\frac{1}{1+T_g}$ tagjánál keresendő. Ez a tag a kazánál a tárolás és a gőzelvétel viszonyai által meghatározott érték, villamos analógiában egy RC tagnak felel meg, ahol a kazán tárolóképesége a kondenzátor és a kazándobtól a fogyasztóig fellépő hidraulikai ellenállás a villamos ellenállás. Ez az ellenállás lényegesen függ a kazán pillanatnyi üzemi viszonyaitól, a szomszédos kazánok nyomásviszonyaitól, az egyes szomszédos kazánok eltérő tulhevitőkapcsolásaitól, a kazánnak a gőzgyűjtősínein /ha ilyen van/ a helyzetétől, a kazán és a turbina távolságától, a turbina üzemi viszonyaitól. A T_g számításánál a (67) képletben a D_0 és a $\Delta\rho$ tagok mutatják az időállandónak az üzemi viszonyoktól való függését.

Mironov idézett munkái [45], [46] igyekeznek figyelembe venni több együttműködő kazán dinamikus ellenállási viszonyait, azonban ez a számítás legfeljebb tájékoztató jellegű lehet.

A 73.-77. ábrák a rövid csőszakaszon fűtött egyfázisú közeg hőmérsékletnek a külső hőterhelésváltozás hatá-



73-77. ábrák.

Kisminta - mérések.

sára bekövetkező változásaira végzett és a 4. fejezetben leírt kísérletek eredményeit mutatja. A mérések igazolják a csőanyagok tárolóképességének kis mértékére adott számításokat. A végzett kísérletek a (16) és (17), valamint (36) egyenleteket igazolják. A rövid szakaszon természetesen az integráló hatás még csekély, a jelenség exponenciális része domborodik ki.

6. fejezet

Néhány megjegyzés és javaslat a szabályozó kapcsolására és beállítására

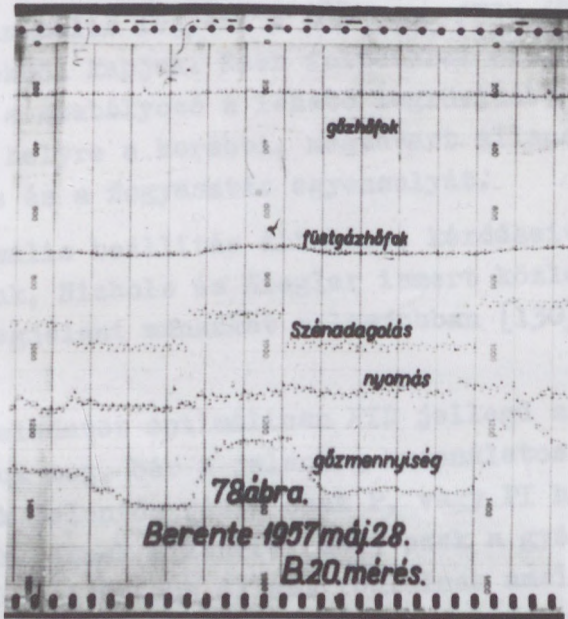
Az elméleti és kísérleti vizsgálatok összefoglalása lehetőséget ad a dobos, szénportüzelésű kazánok terhelésszabályozására vonatkozó néhány megjegyzésre és javaslatra.

A szabályozás feladata, hogy a fogyasztói igénynek megfelelően a berendezés számára miszkilag megállapított határok között állandó minőségű /nyomásu és hőfoku/ gőzt szolgáltatson, a terhelésváltozásokat a lehető leggyorsabban kövesse és a legjobb hatásokértékeket biztosítsa.

Ismerve a szabályozott szakasz átviteli függvényeit, ez a feladat korszerű szabályozóval minden esetben megoldható, annál is inkább, mert a (69)-(72) átviteli függvények viszonylag kis holtidőt tartalmaznak, integráló tag az átviteli függvényben nem szerepel, a csillapítás, mint a közelítésnek a kisminta számára történő tárgyalása kimutatta, elég nagy ($\xi = 1; \frac{\pi}{4}$), így a rendszernek önmagában a lengési hajlandósága kicsi és csak igen nagy erősítésű visszacsatolás esetében léphet ki a stabilitási tartományból. Ennek következtében a stabilitási problémák a szabályozó beállításnál csak másodrendű szerepet játszanak.

Sokkal jelentősebb kérdés a szabályozó legkedvezőbb kapcsolása és optimális beállítása. Optimális beállítás ebben az esetben a fogyasztói igény leggyorsabb és legsimább kielégítését jelenti, azaz optimálisan működik a kazán terhelésszabályozója, ha a gőzfogyasztási igények változása esetén a gőztermelést

a lehető leggyorsabban és lengésmentesen megváltoztatja úgy, hogy a nyomástartó helyen /kazándob, gyűjtősin, vagy turbina előtt/ a nyomás a lehető legállandóbb maradjon, a gőztermelési viszonyok /például szénminőség/ megváltozása esetén a lehető leggyorsabban állítja helyre az eredeti állapotot. A kérdést közelebbről megvizsgálva, a feladat szempontjából két esetet kell megkülönböztetni. Az első esetben a zavaróhatás a gőztermelés viszonyaiban következik be, a legtöbb esetben a tüzelőanyag minősége változik meg. A 79. ábra szerint kapcsolt, szokásos hatásvázlat ebben az esetben megfelel a korábban tárgyalt feltételeknek.



A kazán állapotában bekövetkező változást, mint azt a 78. diagramm mutatja, a nyomás és a gőztermelés egyidejűleg érzékelik, a két mennyiség változása is körülbelül arányos. A folyamatba korábban beavatkozni csak akkor lenne mód, ha annak valamilyen jellemzőjét /például a zavarójellemzőt, a tüzelőanyag minőségét/ már korábban gyorsan és megbízhatóan érzékelni lehetne. A

gőzmennyiségnek, mint kiegészítő jellemzőnek a szabályozás hatásláncába való bevezetése /amit egyes gyárak és közlemények ajánlanak/ nem jelentene további előnyt, feltéve, ha olyan érzékeny gőznyomásmérő áll rendelkezésre, mint amilyen érzékeny a gőzmennyiségmérő. Korszerű eszközökkel ez azonban megoldható. Ahhoz, hogy a nyomás a dobban /és stacionárius üzemben a további esetleges nyomásmérő pontokon is/ helyreálljon, a folyamatban fellépő időkésések miatt szükséges, hogy a szabályozás bizonyos túllendüléssel működjék. Az optimális beállítás feltétele a négyzetes integrálkritérium alapján, hogy az

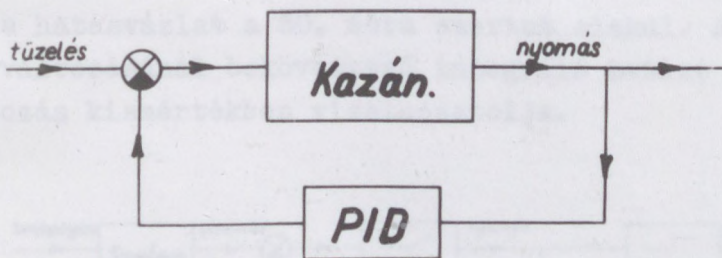
$$\int_0^{\infty} (\mathcal{S}D_{dill} - \mathcal{S}D)^2 dt$$

érték minimális legyen. A $\mathcal{S}D$ -t a (73), (74), (75) egyenletekből kapjuk. Ezen feltételek elegendőek ki akkor, ha a szabályozó a lehető legrövidebb időn belül állítja helyre a korábbi, megzavart állapotot, a gőztermelés és a fogyasztás egyensúlyát.

Az optimális beállítás általános kérdéseivel nem foglalkozunk, Nichols és Ziegler ismert közleménye óta [129] megjelent munkákat a legjobban [130] foglalja össze.

Ezt a feladatot optimálisan PID jellegű szabályozóval oldhatjuk meg, bár a jelenleg használatos kazánszabályozók jelentős része csak P, vagy PI hatással rendelkezik. Annak ellenére, hogy ezek a gyárak közleményeikben időnként állást foglalnak amellett, hogy kazánoknál a PI jellegű szabályozó teljesen kielégítő, le kell szögezni, hogy éppen annak következtében, hogy az érzékelők a gőzfejlesztés viszonyaiban bekövetkező változásokat csak integrálva érzékelik, a differenciáló hatás nélküli szabályozó a feladatot csak jóval kisebb igényekkel tudja megoldani. A konzervatív szemléletet indokolta az, hogy a szabályo-

zás /ha hosszabb idő alatt is és ezért nagyobb nyomásingadozásokkal/ PI szabályozóval is megoldható, továbbá, hogy a PID szabályozó beállítása nagyobb tanulmányt és felkészültséget igényel. A PID szabályozóval zárt és a 79. ábra szerinti hatáslánc optimális beállításának számítása elég körülményes lenne, azonban a 3. fejezetben ismertetett számológép segítségével ez igen könnyen oldható meg, így numerikus módszert a szabályozó beállítására a számológép készítésén kívül ez a tanulmány nem közöl, mert annak gyakorlati alkalmazhatósága csekélyebb lenne.



79.ábra.

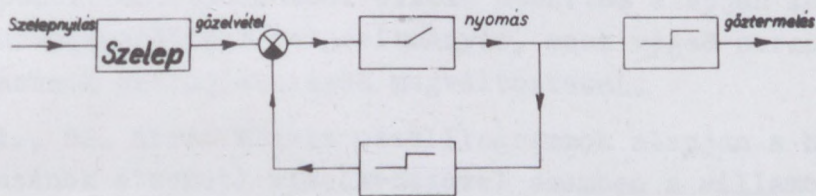
Hatásvázlat a PID nyomásszabályozóval.

A beállításnál figyelemmel kell lenni a T_g -t tartalmazó tag üzemi változására is. Ezt a változást a PID szabályozó lényegesen jobban tudja követni, mint a PI szabályozó, hiszen az exponenciális átmeneti függvény időállandója a differenciálhányadosban már mint arányos szorzó is szerepel, így a szabályozó a folyamat kezdetén, ha nem is pontosan, de körülbelül érzékeli az időállandónak az üzemviszonyok által meghatározott pillanatnyi értékét.

Lényegesen módosul a helyzet a szabályozónak nagyobb igénybevételt jelentő és az energiarendszer szabályozása

szempontjából fontosabb esetben, ha a gőzfogyasztás viszonyai változnak meg. Ebben az esetben is két lehetőséget kell megkülönböztetni. Az első lehetőség az, amikor a vezénylőből, vagy központi teherelosztóból érkező utasítás alapján kézi, vagy automatikus szabályozással a turbinák szekunderszabályozóján történő beavatkozással megváltoztatják a turbinák szabályozószelepeinek állását, ezzel egyidejűleg a gőzfogyasztást.

A másik lehetőség az, amikor a hálózati periódusszám növekedése, vagy csökkenése következtében a turbina primerszabályozója lép működésbe és az előbb leírt folyamat ennek következtében játszódik le. Mindkét esetben a hatásvázlat a 80. ábra szerint alakul. A dobnyomás változásánál bekövetkező integráló hatást a nyomásváltozás kismértékben visszacsatolja.



80.ábra.

Zavarás a gőzelvétel oldaláról.

A változó nyomás ugyanis az eredeti jelenséggel ellenkező irányban változó gőzmennyiséget hajt át a tulhívítón, a csővezetéken és a turbinabeömlésen. Ennek következtében a jelenség kismértékben önkiegyenlítő jellegű, mint azt a 80. és 81. oszcillogrammok mutatják is. A két hatás között a különbség főleg abban nyilvánul meg, hogy a szekunderszabályozóra ható beavatkozás előre /a kazán viszonyaiban bekövetkező tranzien válasz lefolyása előtt/ megtudható és esetleg mint zavarójel-

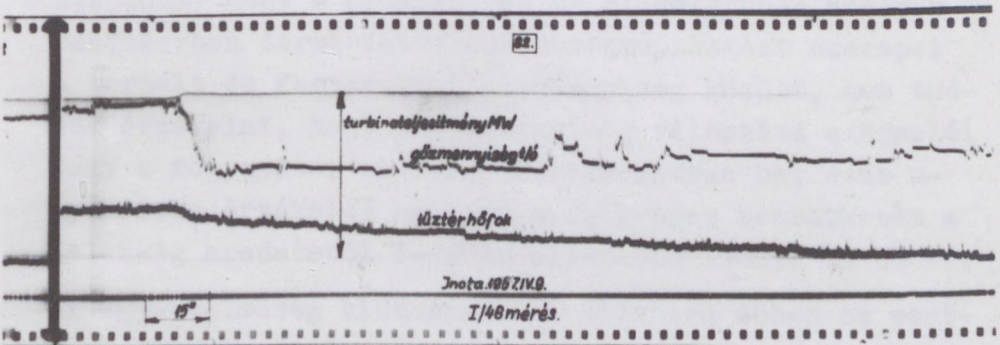
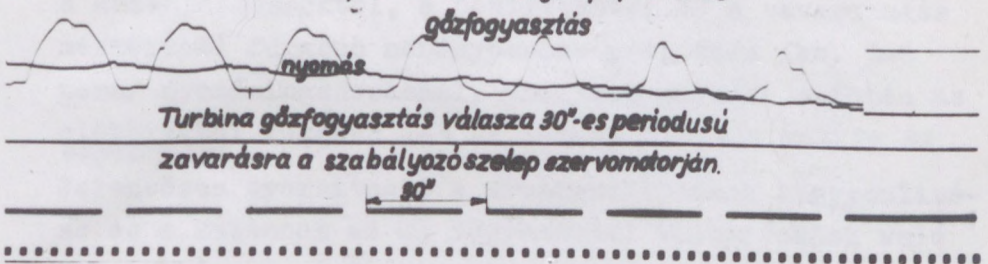
lemző a szabályozó működésébe bekapcsolható, a másik esetben azonban a változás csak a kazán válaszából érzékelhető.

Meg kell jegyezni, hogy a periódusszám változása következtében fellépő hatásra adott válasz olyan rendszerekben, mint a hazainál sokszorta nagyobb rendszerekhez kapcsolódó magyar energiarendszerben, nem jelentős, mert nem a kis rendszernek a feladata a nagy rendszerben támadt nehézségek következtében fellépő periódusingadozást kiegyenlíteni. Így ebben az esetben a gőztermelés zavarása esetére beállított nyomásszabályozó általában megfelel.

Különösen fontos az az eset, ami a hazai energiarendszerben a leggyakoribb feladat, amikor az országhatáron belül fellépő terhelésingadozások felvételére a központi teherelosztóból érkező utasítás alapján kell a turbogenerátorok teljesítményét, azaz végső soron a kazánok gőzfejlesztését megváltoztatni.

A 81., 82. ábrán közölt oszcillogrammok alapján a hatás a kazánok átmeneti viselkedésével szemben a villamos szervomotoron történő beavatkozás után a gőztermelésben első közelítésben arányosnak, a nyomásban integrálónak tekinthető. Amíg az előbbi feladatok elvégzésére legalkalmasabbnak bizonyult nyomásszabályozó a változásokat érzékeli, a szabályozó beavatkozik és a hatás a teljes hatásláncon átfut, jelentős idő telik el, ami lényeges változtatás esetén lényeges nyomásingadozást is létesít. A borsodi méréseknél például a gőztermelés változatlan értéken tartása mellett a nyomásesés 4 at/t gőz, Inotán kb. 5 at/t gőz volt. Ez a normálisnak tekinthető 15 %-os gyors terhelésváltoztatás esetén a 100 t/ó-s kazánoknál percenként kb. 1 at-ás nyomásesésnek felel meg.

81. ábra. Dunapentele 1956 aug. 3. Dp2/3 mérés



A feladat ebben az esetben PI nyomásszabályozóval egyáltalán nem oldható meg. Világos ugyanis, hogy amíg a PI jellegű szabályozó a gőzfogyasztásban /tehát a nyomásváltozásban/ olyan mértékű változást észlel, amelynek következtében kellő mértékben avatkozik be a tüzelésbe, igen jelentős nyomásesés áll be, ami az üzemvitel szempontjából már nem engedhető meg. Ha a számológépen kiszámoljuk, a nyomásesés eléri a 4-5 at-át is. Mivel az érzékelt mennyiség a nyomás, a tulajdonképeni szabályozott jellemzőnek, az időegység alatt termelt gőzmennyiségnek integrálértéke, a differenciáló hatás lényegében a tulajdonképeni szabályozott jellemző arányos értékét adja.

A megoldás ebben az esetben az igényektől függően

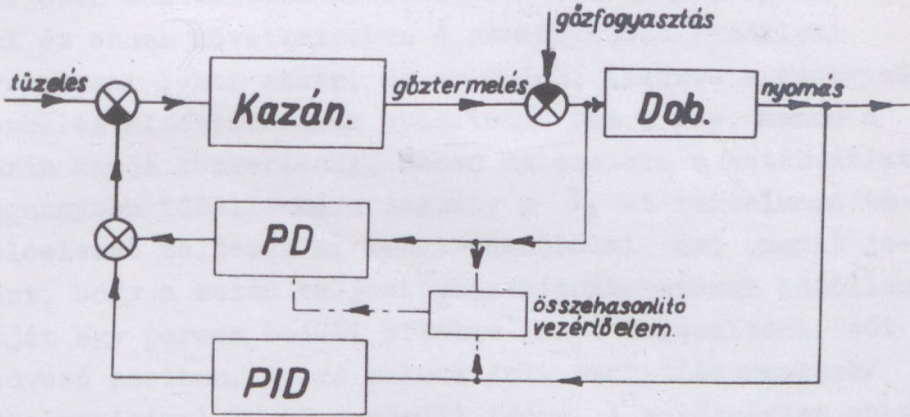
többféle lehet. Megmaradhatunk a korábbi feltételek szerint beállított PID nyomásszabályozók mellett, ami a kazánjellemzőktől, a beállítástól és a zavaróhatás mértékétől függően néhányperces periódusu /kb. 3-6 perc/ nyomásingadozással, amelynek mértéke szintén az előbbiektől függően 1-3 at lehet, állítja helyre az egyensúlyt.

Jelentősen gyorsítható a nyomásváltozások kiegyenlítése és a kazánnak az új fogyasztási viszonyokhoz való alkalmazása a gőzfogyasztás mérésének a hatásvázlatba való bekapcsolásával. Itt azonban abba a nehézségbe ütközünk, hogy a nyomásméréssel ellentétben, amely a rendszerben természetes különbségképzésként szerepel a termelt és fogyasztott gőzmennyiség között, nem tudjuk érzékelni, hogy a gőzmennyiség változása a termelői vagy a fogyasztói oldalról következett-e be, azaz ugyanolyan érzékelés mellett a szükséges beavatkozás a jelenség eredetétől függően ellenkező irányu is lehet.

Az egyértelműség biztosítására célszerű ebben az esetben a nyomástól is vezérlőimpulzust venni. A zavaróhatás eredetétől és előjelétől függően a két jellemző ugyanis a következőképpen alakul:

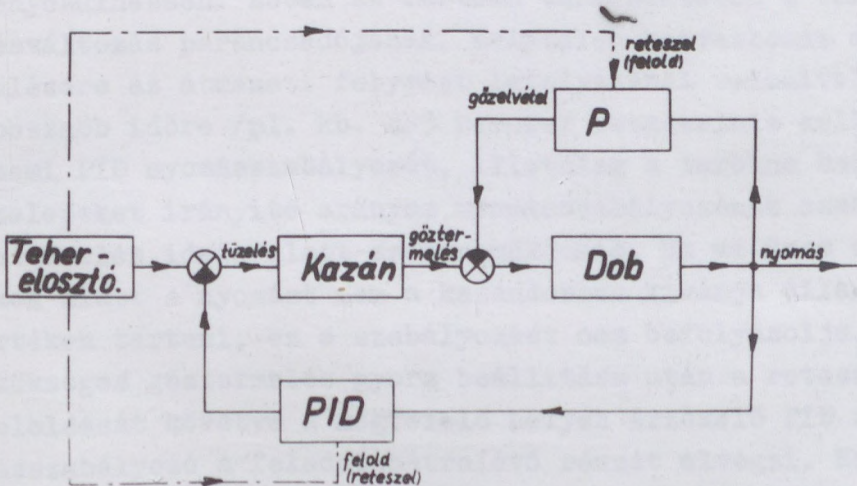
zavaróhatás	nyomás	gőzmennyiség
termelés nő	nő	nő
termelés csökken	csökken	csökken
fogyasztás nő	csökken	nő
fogyasztás csökken	nő	csökken

Ennek alapján a két jellemző differenciálhányadosának összehasonlítása ad csak teljes felvilágosítást a változások okáról. Ha tehát a gőzmennyiségmérést bekapcsoljuk a szabályozásba, a hatáslánc a 83. ábra szerint alakul.



83.ábra.

A gőzmennyiség bekapcsolása
a hatásvázlatba.



84.ábra.

Vezérlés bekapcsolása a szabályozás
hatásvázlatába.

Teljesen mentesíteni lehet a kazánt a nyomásingadozásoktól és ennek következtében a szabályozást rendkívül gyorsítani lehet akkor, ha az erőmi, illetve a gépegység terhelésváltoztatásának utasítását nem a gép, hanem a kazán kapja közvetlenül. Ebben az esetben a hatásvázlat legnagyobb időállandóju tagját, a T_g -t tartalmazó tárolóelemet teljesen ki lehet küszöbölni, ami annyit jelent, hogy a kazán teljesítményválttatásának időállandóját egy percen belüli értékre lehet leszorítani, sőt kedvező esetben, gyors malmok /pl. ventillátormalmok/ alkalmazásával 30-40 s körüli időre. A hatásvázlat ebben az esetben a 84. ábra szerint alakul. A gőztermelés változását érzékeny, arányos nyomásszabályozó érzékeli és ez nyitja a turbina beömlő szelepeit olyan mértékben, hogy a kazán dobnyomása mindig állandó értéken maradjon, azaz a kazán tárolóképessége, mely a nyomásváltozások következtében elnyújtja a jelenségek lefolyását, ne érvényesülhessen. Ebben az esetben természetesen a terhelésváltozás parancsadjának, helytelen beavatkozás elkerülésére az átmeneti folyamat lefolyásánál valamivel hosszabb időre /pl. kb. 2-3 percre/ reteszelnie kell az üzemi PID nyomásszabályozót, illetőleg a turbina beömlő szelepeket irányító arányos nyomásszabályozónak csak a reteszelés ideje alatt szabad működnie. Ha az üzem egyéb okok miatt a nyomást nem a kazándobban kívánja állandó értéken tartani, ez a szabályozást nem befolyásolja, a szükséges gőztermelés gyors beállítása után a reteszelés feloldását követve a megfelelő helyen érzékelő PID nyomásszabályozó a feladat hátralévő részét elvégzi. Ez a rövid időközés azonban az egyéb üzemi körülményeket nem érinti, a turbina előtt változó nyomás következtében beálló kismértékű határfokváltozás ez alatt a rövid idő alatt nem lehet jelentős, a lényeges az új gőztermelési viszonyok gyors beállítása.

Mint látható, a fokozottabb igények bizonyos mértékig bonyolultabb megoldásokat tesznek szükségessé, bár hangsúlyozni kell, hogy ezeknek végrehajtása, akár hazai eszközökkel is, nem jelent semmiféle különösebb nehézséget, a rendelkezésre álló robusztus és megbízható eszközök nem rejtenek magukban további üzemzavarlehetőséget.

Az alkalmazandó megoldást a követelményektől és körülményektől függően kell kiválasztani. A tárgyalt fejezet elsősorban arra kíván rámutatni, hogy ez az átviteli függvények ismerete nélkül nem lehetséges, a szabályozott jellemzőkkel szemben támasztott igények a szabályozóberendezés szemszögéből nézve a dinamikus jellemzők ismerete hiányában fel sem mérhetők.

A szabályozó beállításának kérdésénél meg kell emlékezni egy - különösen a hazai erőműveinknél jelentős - kérdésről. Már a 2. fejezetben említés történt arról, hogy a kazánnak a kazán és a segédberendezések viszonyai alapján természetesen kijelölt szabályozási tartománya van. A közölt vizsgálatok csak erre a tartományra vonatkoznak, ezen kívül a jelenségek erősen eltorzulnak, követhetetlenül nemlineárisak lesznek.

Hazai erőműveink számára ez a határ azért különösen jelentős, mert a szénminőség változása következtében a szabályozási jelleggörbék üzem közben eltolódnak. Számos erőműben azért idegenkednek az önműködő szabályozók üzemmentartásától, mert azok ezt a hatást nem veszik figyelembe, folytatják a szabályozást akár lefelé a tűz kialvásáig, illetve a kazán berobbanásáig, felfelé pedig a szénörlőmalmok eltömődéséig és túlterhelés miatt bekövetkező kieséséig, vagy a szellőzők túlterheléséig. A gyakorlatban a fűtő, illetőleg kazán gépész sem tesz ilyenkor mást, mint az igények vál-

tozása ellenére a megadott tartományon túl kézzel megszünteti a szabályozást, azaz a tüzelés fokozását vagy csökkentését. A megbízható működés érdekében ezért a szabályozóberendezést is el kell látni kiegészítő vezérlőimpulzusokkal, amelyek például a szénadagolók bizonyos fordulatszámra, vagy megadott gőztermelés alatt, illetőleg a malommotorok és a szellőzők bizonyos áramfelvétele felett a szabályozást korlátozzák. Ez a kiegészítő, vezérlő jelekkel dolgozó rendszer egyszerűbb és könnyebben kivihető, mint magának a szabályozónak esetleg nemlineáris korlátozó elemekkel való ellátása. Az ilyen kiegészítéssel működő szabályozók számára a változó szénminőség semmiféle további problémát nem jelent az olyan szabályozókkal szemben, amelyek viszonylag állandó szénminőségű kazánt irányítanak. Természetesen olyan mechanikai jellegű zavarokon, mint a rendkívül nagyméretű, vagy nedves szénnek az adagolóban történő elakadása, vagy az adagolócsőben történő beragadása a szabályozóberendezés nem segíthet, de ezeket a zavarokat /ha azok gyakoriak/, nem a kazán kezelője, hanem külön erre a célra beállított személyzet szokta általában elhárítani.

A terhelésszabályozók beállításáról és kapcsolásáról szóló fejezet befejezéséül meg kell állapítani, hogy a hazai erőművekben szokásos kazánok átviteli függvényeinek a tanulmányban adott mértékű ismerete éppen a mérési pontosság és a jellemzők kimutatott üzemi változása következtében nemcsak szükséges, de elégséges is, ezek alapján a rendelkezésre álló és ma már teljesen megbízható berendezések széles skálájával minden igény kielégíthető. A szerző véleménye szerint a kutatás következő feladata a mérési technika javítása és ezen belül gyorsműködésű és megbízható folyamatos szénminőség- és füstgázellenőrzés megvalósítása lenne.

Az előbbi lehetőséget nyújtana a szénminőség változása következtében beálló átmeneti jelenségek kiküszöbölésének gyorsítására, a zavaró jellemzőnek megbízható bekapcsolásával a szabályozás hatásvázlatába, az utóbbi pedig a megfelelő hatásfok- és ennek eszköze-ként az égésszabályozás megoldását teszi lehetővé.

Összefoglaló

A tanulmány a dobos szénportüzelésű kazánok terhelés-szabályozásának kérdéseivel foglalkozik. Összefoglalja a vonatkozó irodalmat, különös figyelmet szentelve a hazai szakközvélemény előtt a hozzáférhetőség nehézségei miatt kevésbé ismert irodalomra és azokra a közleményekre, amelyeket forrásmunkákként alkalmazott.

Megvizsgálja, mennyiben választható szét a terhelés-szabályozás, tehát a szénmennyiség bemenetre gőznyomás és gőzmennyiség kimenet válasszal autonóm foglalkozó szabályozási kör a kazán átmeneti jelenségeinek többi tényezőitől. Ismerteti azokat az adatokat, amelyek bizonyítják, hogy a feladat a gyakorlat számára szükséges tartományon belül lineárisként kezelhető. Irodalmi és saját elméleti vizsgálatokra támaszkodva különböző zavaróhatásokra megállapítja a kazán gőztermelésének Laplace-operátoros átviteli függvényeit, figyelembe veszi a kiinduló feltételeknél alkalmazott elhenyagolások hatását, a nyert gyakorlati számításokra kevésbé alkalmas igen bonyolult összefüggéseket jó közelítéssel olyan egyszerű alakra hozza, amelyek üzemi célokra is alkalmazhatók. Ezek alapján a tüzelőanyag mennyiségében történő zavarás esetére forraló tápvizelőmelegítővel dolgozó kazánokra a gőztermelés átviteli függvénye:

$$F(s) = \frac{1}{(1+T_m s)(1+T_e s)(1+T_g s)} e^{-T_h s} \left[\frac{\varepsilon_1}{T_e s} (1 - e^{-T_e s}) + \frac{\varepsilon_2}{T_c s} (1 - e^{-T_c s}) \right] \quad (69)$$

egyébként

$$\frac{1}{(1+T_m s)(1+T_e s)(1+T_g s)} e^{-T_h s} \left[\frac{\varepsilon_1}{T_e s} (1 - e^{-T_e s}) + \varepsilon_2 \right] \frac{1}{T_c s} (1 - e^{-T_c s}) \quad (72)$$

A tápviz mennyiségének változása esetén

$$F_{vizm}(s) = \frac{\mathcal{L}(\mathcal{D})}{\mathcal{L}(\mathcal{D}\omega)} = \frac{\varepsilon_1}{T_w e^s} (1 - e^{-T_w e^s}) \frac{1}{1 + T_g s} e^{-T_t s} \quad (70)$$

hőfokának változása esetén

$$F_{vzh} = \frac{\mathcal{L}(\mathcal{D})}{\mathcal{L}(\mathcal{D}\theta_{10})} = \varepsilon_1 e^{-(T_t + T_{e,x})s} \frac{1}{1 + T_g s} \quad (71)$$

alaku.

A nyert átviteli függvényekkel történő számítás céljaira villamos analóg számológépet dolgoz ki, amely könnyen megvalósítható és alkalmas a szabályozó tervezésére és beállítására.

Az elméleti vizsgálatok igazolására számos kísérletet végeztünk nagyteljesítőképességű erőművi kazánokon, üzemi körülmények között. A tanulmány ismerteti az alkalmazott mérési módszereket és a különböző módszerekkel végzett mérések eredményeit. A mérések és elméleti számítások hasonló eredményeket adnak.

Befejezésül a tanulmány néhány megjegyzést és javaslatot tesz a dobos, szénportüzelésű kazánok terhelésszabályozásával kapcsolatban, különös tekintettel a hálózati kooperációs szabályozás követelményeire.

Célszerű az összefoglalóban ismertetni a tanulmányt azokat a kérdéseit, amelyek a szerző tudomása szerint a vonatkozó irodalomban még nem szerepeltek és így újabb eredményként kezelhetők.

A közölt átviteli függvények jelenlegi alakjukban azok, ami annak következménye, hogy a tanulmány bizonyos tényezőket figyelembe vesz, melyeket más közlemények elhanyagoltak, több olyan esetet feldolgoz /a tápvizhőmérséklet és mennyiség változásainak hatása, a hőtáadási tényező változásának hatása, stb./,

melyek máshol nem szerepelnek. Az átviteli függvények egyszerűsítésének módszere eltérő az irodalomban szokásostól és a gyakorlati esetek számára pontosabb eredményt szolgáltat, mint a más módszerekkel történő egyszerűsítések. Nem szerepel az irodalomban a kazánokban lejátszódó változásoknak a 22. ábra szerinti, a szabályozástechnika szempontjait jobban ki-domborító felfogása, ami lehetővé teszi a kazán átmeneti folyamatainál legnagyobb szerepet játszó időké-sés elemzését, a belső visszacsatolások felismerését és a szabályozási folyamatok gyorsítására tett lényeges következtetést. Új egyszerűsítő eljárást közöl a jelenségeknek villamos analógiával egyszerű eszközökkel történő leképezésére. A tanulmánnyal kapcsolatos mérések során elsősorban sikerült hazánkban nagy ipari szabályozott szakaszon frekvenciamódszerrel dinamikai vizsgálatokat végezni és így ezt a külföldön már bevált eljárást meghonosítani és a hazai viszonyokra alkalmazni.

A tanulmányban közölt mérésanyag jelentősen nagyobb, mint az irodalomban szokásos mennyiség. A mérési mód-szerek közül számos részletkérdés megoldása /holtidők mérése, integráló jellegű beavatkozó szervekre szinuszos jelek alkalmazása/ az irodalomban nem szerepelt. A szabályozó kapcsolására irányuló javaslatok között lényeges annak kimutatása, hogy a hálózati teljesítményszabályozás követelményeit legfeljebb PID jellegű szabályozókkal lehet kielégíteni, a sokszor alkalmazott PI jellegű szabályozók erre nem felelnek meg, a vezérlő jeleknek a javasolt módon a szabályozásba való bevitele szintén nem szerepel a hasonló közleményekben.

A tanulmány eredményei elsősorban az együttműködő energiarendszer 40-140 at nyomáshatárok között dolgozó, do-bos, szénportüzelésű kazánjaira alkalmazhatók.

1. sz. Függelék

A

$$\frac{\varphi}{\gamma} = \frac{\lambda_4}{s^2 + \lambda_2 s} (1 - e^{-\mu x s})$$

visszatranszformálási menete:

$$\frac{\lambda_4}{s^2 + \lambda_2 s} = \frac{\lambda_4}{s} \frac{1}{s + \lambda_2},$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\lambda_4}{s}\right) = \lambda_4 t,$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s + \lambda_2}\right) = \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\lambda_4}{\lambda_2} \frac{1}{s} \frac{1}{s + \lambda_2}\right) = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \frac{d}{dt} \int_0^t (t - \tau) (1 - e^{-\lambda_2 \tau}) d\tau = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \left(t + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2}\right);$$

mivel az $e^{-\mu x s}$ szorzó az időtartományban μx -el történt eltolást jelent

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)e^{-\mu x s}] = \begin{cases} f(\tau) - f(t - \mu x), & \text{ha } t \geq \mu x \\ f(t), & \text{ha } t \leq \mu x \end{cases}$$

amiből a (17/a és b) egyenlet következik.

2. sz. Függelék

Ha az

$$F(s) = \frac{1}{Ts} (1 - e^{-Ts})$$

átviteli függvény frekvenciajelleggörbáját meg akarjuk állapítani, áttérve az operátor paraméterről a komplex frekvencia paraméterre

$$F(j\omega) = \frac{1}{j\omega T} (1 - e^{-j\omega T})$$

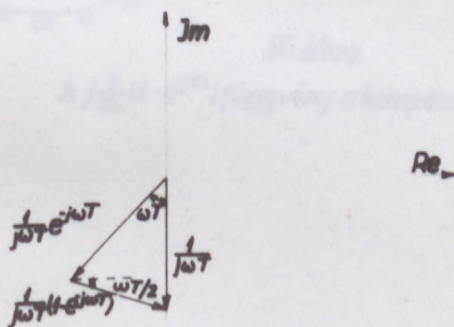
alakot kapunk. Ez a komplex számsíkon az $\frac{1}{j\omega T}$ és az $\frac{1}{j\omega T} e^{-j\omega T}$ vektor különbségvektora, ami két egyenlő abszolút értékű és egymástól $-\omega T$ szöggel eltolt vektor kivonását jelenti. A 85. ábra szerint a különbségvektor rádiusza

$$R = \frac{2}{\omega T} \sin \frac{\omega T}{2}$$

és szöge

$$\varphi = -\frac{\omega T}{2}$$

lesz, amely áttérve az $\omega T = \Omega$ általános frekven-



85. ábra.

Az $\frac{1}{j\omega T} (1 - e^{-j\omega T})$ komplex vektor.

ciaparameterre

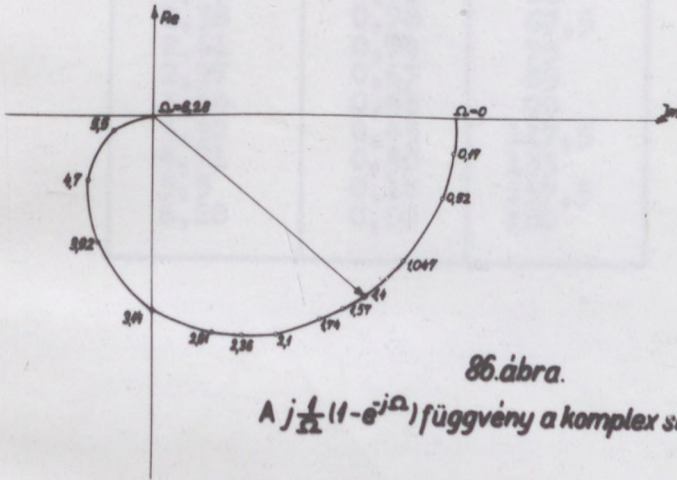
$$R = \frac{2}{\Omega} \sin \frac{\Omega}{2} \quad \text{és}$$

$$\varphi = -\frac{\Omega}{2}$$

alakba írható. Ez derékszögű koordinátákban

$$\operatorname{Re}[F(j\omega)] = \frac{2}{\Omega} \sin \frac{\Omega}{2} \cos \frac{\Omega}{2} = \frac{1}{\Omega} \sin \Omega \quad \text{és} \quad \operatorname{Im}[F(j\omega)] = \frac{2}{\Omega} \sin \frac{\Omega}{2} \sin \frac{\Omega}{2} = \frac{1}{\Omega} (1 - \cos \Omega),$$

aminek alapján a helygörbe a 86. ábra szerint alakul. Az ábra és a mellékelt 14. táblázat alapján a (69) képlet szögletes zárójelében álló kifejezés tetszőleges ωT értékekre könnyen megadható.



86. ábra.

A $j \frac{1}{\Omega} (1 - e^{-j\Omega})$ függvény a komplex síkon

14. táblázat

Az $\frac{1}{j\Omega} (1 - e^{-j\Omega})$ függvény értékei

Ω	R	φ°
0,174	1,00	5
0,52	1,00	15
0,785	1,00	22,5
1,047	0,99	30
1,22	0,93	35
1,4	0,91	40
1,57	0,89	45
1,74	0,88	50
2,09	0,83	60
2,36	0,78	67,5
2,61	0,74	75
2,97	0,67	85
3,14	0,63	90
3,92	0,45	117,5
4,71	0,30	135
5,5	0,14	157,5
6,28	0,00	180

I R O D A L O M

1. Automaticseszkoe regulirovanie teplovüh processszov na élektrosztancijah. Szbornik sztatej. Goszénergoizdat, 1952.
2. Sztefani E.P. Teploénergetika, 1955.No.9.pp.3-7.
3. Duel, Litvak: Élektricseszkie sztancii, 1955.6.pp. 4-6.
4. Stein T.: Regelung und Ausgleich Dampfanlagen, Springer, 1926.
5. Rosin, Rammler, Kauffmann: Versuche an Braunkohle-Rostfeuerungen. Arch.f.Wärmewirtschaft, 1930.Heft 4, pp. 123-130.
6. Rosin, Rammler, Stimmel: Elastizität von Braunkohlenstaub-Kesseln. Arch.f.Wärmewirtschaft, 1930. Heft 12, pp. 387-392.
7. Schulte, Presser: Elastizität von Steinkohlenfeuerungen. Arch.f.Wärmewirtschaft, 1931.Heft 10, pp. 281-289.
8. Michel: Die Speicherfähigkeit des Bensonkessels. Arch.f.Wärmewirtschaft, 1943. Heft 2, p. 49.
9. Rosahl: Untersuchungen über die Speicherfähigkeit von Kesseln. Arch.f.Wärmewirtschaft, 1942.Heft 8, pp. 175-178.
10. Rosahl: Belastungsstosse und Speicherfähigkeit in Dampfkesselbetrieben. Vulkan-Verlag, Essen, 1942.
11. Profos P.: Vektorielle Regeltheorie, Leemann Verlag, Zürich, 1944.
12. Profos P.: Verhalten der Sulzer-Einrohrkessel bei grossen und raschen Laständerungen. Energie, 1954. Nr.11.pp.373-375.

13. Profos P.: Das dynamische Verhalten der Regelstrecke von Druckregulierungen. Schweizer Archiv, 1951. Heft 4.
14. Profos P.: Dynamics of Pressure and Combustion Control in Steam Generators. Combustion, 1955. No.3. pp.34-44.
15. Profos P.: Dynamik der Druck und Feuerregelung von Dampferzeugern, Sulzer Technische Rundschau, 1955. Nr.4.pp.1-15. Energie, 1955.Nr.11. pp.408-414.
16. Profos P.: Die Regulierung des Sulzer-Einrohr-Dampferzeugers. VGB.Mitteilungen, 1956.Heft 43.
17. Takahashi Y.: Transfer Function Analysis of Heat Exchange processes, Automatic and Manual Control, Butterworths Sc.Publ., London. 1952.p.235.
18. Takahaschi Y.: Regeltechnische Eigenschaften von Gleich- und Gegenstromwärmeaustauschern. Regelungstechnik, 1953. Heft 2.pp.32-35.
19. Takahashi, Paynter: A New Method of Evaluating Dynamic Response of Counterflow and Parallel-Flow Heat Exchangers, Trans.ASME, 1956,May,pp.749-758.
20. Wunsch G.: Grundlagen der Regelung von Damfkesseln. Technische Mitteilungen, Essen. 1938.p.580.
21. Samal E.: Grundsätzliches zur Regelung von Dampferzeugern.. AEG Mitt. 1957.Heft 9/10,pp.353-369.
22. Samal E.: Die AEG-Kesselregelung, AEG Mitt.1957. Heft 9/10, pp.369-381.
23. Schroeder G.: Grundsätzliches zur Kesselregelung an Hochdruckkesseln. Siemens Zeitschrift, 1951. pp.76-80.
24. Oetker, Schroeder: Die Regelbarkeit des Druckes von Dampferzeugern. BWK, 1953.Heft 11, pp.361-366.

25. Büchting: Die Entwicklung der Siemens-Kesselregelung, Siemens Zeitschrift, 1956.Heft 5/7 pp.262-269.
26. Schroeder G.: Die Technik der elektrischen Kesselregelung. Siemens Zeitschrift, 1951.Heft 4.pp.192-198.
27. Schroeder G.: Die Regelbarkeit des Benson-Kessels. VGB-Mitt.1956.Heft 43.p.235.
28. Liébaut: Étude théorique de la regulation automatique des chaudières. Mesures, 1944.pp.85-88,113-116,141-144.
29. Andritzky M.: Versuche mit einer elektrischen Kesselregelung an einem Dampfkessel mit 67 atü. Glückauf. 1949, pp.600-604.
30. Clifton S.J.: Recent Developments in Power Plant Control. Jurlan and Record of Transactions. 1950.Jan.Pt.4.
31. Geraszimov, Dudnyikov, Csisztjakov: Kazánberendezések önműködő szabályozása. Nehézipari K. 1952.
/Geraszimov, Dudnyikov, Csisztjakov: Avtomaticeszkoe regulirovanija kotel'nyh usztanovok. Goszénergoizdat, 1950/.
32. Csisztjakov: Iszpol'zovanie sztaticeszkih karakterisztik reguliruemih ob'ektov dlja opredelenija ih dinamiczeszkih szvojsztv. Trudü MEI, Vüpuszk XXV.,Goszénergoizdat, 1955.pp.197-221.
33. Dudnyikov: Avtomatika i Telemehnika, 1953.No.3.
34. Geraszimov: Teoreticeszkie osznovü avtomaticeszko-go regulirovanija teplovüh proceszszov. Goszénergoizdat, 1949.
35. Sumszkaja: O vlijanija cirkuljacii zsidkosztü i para na izmenenie davlenija i urovnja v barabannom kotle. Trudü CKTI, kniga 19. pp. 95-122. Goszénergoizdat,1951.
36. Sumszkaja: Szkoroszt' izmenenija davlenija v barabannih kotlah pri nesztacionarnih rezsimah. Teploéner-

getika, 1954.No.4 pp.46-50.

37. Sumszkaja: Izmenenie urovnja v barabannüh kotlah pri nesztacionarnüh rezsimah. Teploénergetika, 1954.No.6. pp.35-39.
38. Kutateladze: Teploperedacsá pri kondenzácii i kipe-nii. Masgiz, 1952.
39. Bejrah: Vüvod uravnenij dinamiki barabannogo parov-nogo kotla. Avtomatika i Telemekhanika, 1939.No.2.
40. Bejrah: Voproszü teorii regulirovanija kotel'nih usz-tanovok , Trudü II. Vszesz. Szovescs. po teorii av-tomaticseszkogo regulirovanija. Tom.1.pp. 521-542. Izd.A.N.SzSzSsr., 1955.
41. Piven': Dinamika kotlov sz esztetszvennoj cirkulja-ciej. Trudü CKTI. kniga 19. pp. 3-17. Goszénergoiz-dat, 1951.
42. Szerov: Rabota prjamotocsnih kotlov pri peremennom rezsimé. Trudü MÉI, vüpuszk XI., Goszénergoizdat, 1953. pp.204-228.
43. Armand, Kon'kov: Iszsztledovanie nesztacionarnogo tep-loobmena. VTI jelentés, 1955.
44. Mironov: O regulirovanii davlenija para v avtomati-zirovannoj kotel'noj. VTI jelentés, 1954.
45. Mironov, Naumov: Szisztéma regulirovanija davlenija para v kotel' p ocseredi GRÉSsz No.4. VTI jelentés, 1955.
46. Mironov: O dinamiczeszkih szvojsztvah barabannüh kot-lov po davlenijam i raszhodam para. Teploénergetika, 1955. No.12. pp.14-22.
47. Davidov, Dudnyikova, Dudnyikov, Mel'nikov: Metodika opredelenija csasztotnih harakterisztik promüslén-üh obe'ktov regulirovanija. Informacionnüt material

- VTI, 1956.
48. Davüdiv, Dudnikova, Dudnikov, Mel'nikov: Metodika opredelenija csasztotnüh karakterisztik promüslennüh obektov regulirovanija. Teploénergetika, 1956. No.9.pp.35-42.
 49. Kraszszov, Barkalov: Opredelenie dinamicseszkih karakterisztik ob'ektov i reguljatorov sz medlenno protekajuscsimi proceszszami. Avtomatizacija proizvodsztvennüh proceszszov. Id.AN.SzSzSzR, 1955.pp. 68-80.
 50. Aikman A.R.: A portable instrument for process control analysis. Instrument Practice, 1951.pp.393-398.
 51. Schäfer, Feissel: Ein verbessertes Verfahren zur Frequenzgang-Analyse industrieller Regelstrecken. Regelungstechnik, 1955.No.9.pp.225-229.
 52. Frequency Response Symposium. Trans.ASME, 1954.Nov. pp.1145-1393.
 53. Ford.R.L.: Electrical Analogues for Heat Exchangers. Proc. I.E.E., 1956.Jan.Part B.,No.7.pp.62-65.
 54. Tal': O dinamicseszkih szvojsztvah odnofaznüh ucsasztkov parovodjanogo trakta kotla. Izv.AN.SzSzSzR.1957, No.2.,pp.49-58.
 55. Kocsenov: O nesztacionarnom tecsenii zsidkoszti v obogrevaemoj trube. Dokl.AN.SzSzSzR., 1956.pp. 689-692.
 56. Afanaszov: O dinamicseszkih szvojsztvah sahtnüh mel'nic, Teploénergetika, 1955.No.11. pp.23-26.
 57. Afanaszov, Sztroganov: Avtomatizacija proceszsza gorenija v kotloagregate sz sahtno-mel'nicsnümi topkami. Izv.VTI., 1950.No.8.pp.6-10.

58. Davüdiv, Kazanovics: Avtomatizacija zagruzki topliva v pneuromel'nicu. VTI. Izv.,VTI. 1950.No.8. pp.10-14.
59. Romadin: O regulirovanii mel'nicnüh usztrojsztv. Izv. VTI. 1951.No.5. pp.8-11.
60. Avdeev, Naumov: O szposzobah avtomatizacii zagruzki barabanüh ventiliruemüh mel'nic, rabotajuscsh v sziszteme sz prombunkerom. Izv.VTI.1951.No.5. pp. 12-13.
61. Zsirnöv: Avtomaticseszkie regulirovanie sarövüh ne-ventiliruemüh mel'nic. Izv.VTI.1951. No.5. pp.14-17.
62. Bejrah: K voproszu ob avtomaticseszkom regulirovanii kotlov, oborudovannüh sahtnümi mel'nicami. Trudü CKTI, kniga 19. pp. 41-53. Masgiz, 1951.
63. Arszén'ev, Piven: O szhemah avtomaticseszkiego regulirovanija kotlov sz sahtno-mel'nicnümü topkami. Trudü CKTI. kniga 19. pp. 73-94. Masgiz, 1951.
64. Schneider: Das regeldynamische Verhalten von Einblase-Kohlenmühlen. Fachtagung Regelungstechnik, Heidelberg, 1956. Beitrag, No.57.
65. Dickin: Unified Boiler Control at East-Yalland. Engineering. 1950. No.4681. pp.546-547.
66. Waxman: Fundamentals of Combustion Control Systems. Instruments and Automation. 1954. No.10. pp.1636-1640.
67. Bücken: Selbsttätige Feuerregler in Industriekraftwerken. AEG Mitt. 1939.pp.127-130.
68. Pasa: Un criterio per ottenere la stabilita dei processi termici regolati automaticamente. Misure e Regolazioni. 1954.No.4. pp.142-148.
69. Borghesé D.: Note introduttive sullo studio delle regolazione combustione. Misure e Regolazioni. 1954. No.4. pp.151-155.

70. Oetker: Ein elektrisches Kesselmodell. Siemens Zeitschrift, 1951. pp. 114-115.
71. Ahnert: Moderne elektrische Regelverfahren an Hochleistungskesseln. Energie-Technik, 1955. No.5.
72. Schunck: Der Einfluss der Vorverdampfung im Speisewasservorwärmer eines Dampfkessels auf die Wasserstandsregelung. Fachtagung Regelungstechnik, Heidelberg, 1956. Beitrag No.56.
73. Golz: Das regeldynamische Verhalten eines Heissdampfüberhitzers. Fachtagung Regelungstechnik, Heidelberg, 1956. Beitrag No. 84.
74. Wechselau: Bauelemente neuzeitlicher Regelanlagen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendung für Bensonkessel. VGB. Mitt. Heft 43. 1956.Aug.
75. Frensch: Regelung eines 300 t/h Bensonkessels. VGB. Mitt. 1956. Heft 43.
76. Dolezal: Bekämpfung der Wärmeträgheit der Hochdruck-Hochtemperatur Überhitzer. VGB. Mitt.1956. Heft 43.
77. Farquhar: Automatic Combustion Control. Trans.of the Soc. of Instruments Technology. 1954.No.1.
78. Lawson, Mc Guire: The Solution of Transient Heat Flow Problems by Analogous Electrical Networks. Proc. IME.Pt. A. 1953.p.275.
79. Laclémandiere: Étude experimental de la transmission de la chaleur en regime variable á l'aide la méthode des analogies électrique et thermique. Chaleur et Industrie 1947.pp. 293-308, 1948.pp.14-28.
80. Kosarszkij: Szpravocsnik po priboram teplovogo kontrolja i avtomatiki. Goszénergoizdat, 1955.
81. Mironov, Sztefani: Elektronnüe avtomaticseszkie reguljatorü. Goszénergdzdat, 1955.

82. Naladka i ékspulátácija reguljatorov proceszszov gorenija i püleprigotovlenija szisztema CKTI. Gosz-énergoizdat, 1954.
83. Davüdov: Dinamicseszkie harakterisztiki élektron-
nü reguljatorov VTI. Teploégergetika, 1954.No.5.
pp.34-45.
84. Kirpicsev, Miheev: Modelirovanie teplovüh uszt-
rojsztv. Izd. AN.SzSzSzR. 1936.
85. Kornilov, Piven: Osznovü teorii abtomaticseszkogo
regulirovanija v prilozsenie k teploszilovüh uszt-
tanovok. Masgiz, 1947.
86. Kremlevszkij: Novüe teploénergeticseszkie proizve-
dennüe priborü i reguljatorü. Masgiz, 1953.
87. Manuilov: Abtomaticseszkoe regulirovanie pitaniya
barabannüh parovüh kotlov. Goszénergoizdat, 1954.
88. Davüdov: Prosztejsie dinamicseszkie szvjazi mezszdu
élektronnümi reguljatorami VTI. Teploénergetika,
1956.No.3. pp. 14-21.
89. Erofëev: Élektronnüe usztrojsztva kontrolja i re-
gulirovanija teplovüh proceszszov. Goszénergoiz-
dat, 1955.
90. Poktovszkij, Kuzin: Teplotehnicoseszkie kontrol'no-
izmeritel'nüe priborü. Masgiz, 1955.
91. Mironov, Sipetin: Teplotehnicoseszkie izmeritel'nüe
priborü i avtomaticseszkie raguljatorü. Masgiz,
1956.
92. Epstejn: Kompleksznaja avtomatizacija krupnoj tep-
lovoj élektrosztancii. Szovescs.po priboram tep-
lovogo kontrolja, 1956.
93. Stein Marcell: Automatizálás erőművekben. Mérnöki
Továbbképző Intézet, 1953.

94. Szalay József: A szabályozás szerkezeti elemei és alkalmazása. Mérnöki Továbbképző Intézet, 1953.
95. Stein Marcell: Energiagazdaság, 1951. 4/6.
96. Fafournoux: Problèmes posés par les variations d'allure dans les chaudières. Chaleur et Industrie. 1955. No.364. pp.327-342.
97. Sztefani: Opredelenie nastrojki reguljatorov dlja obektov bez szamoviravnivanie. Izv. VTI. 1952.No.12. pp. 1-7.
98. Mironov, Kaplunov: Avtomatizacija kotloagregata szo szloevüm szsiganiem torfa. Izv.VTI.1950.No.8. pp.6-10.
99. Sztefani: Ob ulucssenii dinamicseszkih harakterisztik reguliruemüh ucsasztkov kotel'nih agregatov. Izv.VTI., 1950.No.8. pp.15-18.
100. Mironov: O vozmuscenijah reguliruemogo ucsasztka. Izv.VTI. 1950.No.8. pp.19-22.
101. Sztefani: Priblizsennüj rascset nastrojki reguljatorov sz obratnoj szvjazju. Izv.VTI.1951. No.5. pp.1-8.
102. Undric, Duleev: Avtomatizacija processza gorenija pri szsiganii mazuta i gaza. Izv.VTI. 1951.No.5. pp.17-19.
103. Mironov, Naumov: Rascset i nastrojka odnoimpul'-élektronnogo reguljatora pitaniija. Izv.VTI.1952. No.1. pp.1-9.
104. Sztefani: Reguljator sz zsesztkoj obratnoj szvjazoj dopol'nitel'nümi impulszom szo szkorosztii izmenenija reguliruemoj velicsinü. Izv.VTI. 1951.No.1. pp. 9-12.

105. Kazarnovszkij: Regulirovanija temperaturü peregre-tovo para v moscsnüü parovüü kotlah. Goszénergoiz-dat, 1954.
106. Kremlevszkij: Teploénergeticseszkie priborü i regul-jatorü. Masgiz, 1954.
107. Kucskin, Manuilov: Avtomaticseszkoe regulirovanie teplovüü processzszov na élektrosztancijah. Goszé-nergoizdat, 1950.
108. Kessler, Schroeder: Die Kesselautomatik im Gross-kraftwerk. ETZ.A. 1957.Heft.3. pp.110-115.
109. Schlitte: Lösung einer Wärmeleitungsaufgabe durch Analogiebetraschtungen. Arch.für Elektrotechnik, 1957.Heft 1. pp.51-58.
110. Mayr-Harting: Zur näherungsweise Berechnung der Speicherfähigkeit von Ruths-Gefällespeichern für hohe und höchste Drücke. Energie, 1955.Nr.3.pp. 75-77.
111. Cleve: Die Totzeit bei Änderung der Heissdampf-kühlung von Damfkesseln. Energie, 1956.No.8. pp. 311-314.
112. Szegievskaja: Opredelenie optimal'nüü nasztroek élektroonnüü reguljatorov. Teploénergetika, 1957. No.3. pp.12-16.
113. Davüüüüü, Kancüüüüü, Mel'nikov: Iszpitanija novoj szisztemü regulirovanija barabannüü kotlov na TÉC 11. Moszénergo. VTI jelentés, 1956.
114. Mironov, Naumov: Principial'nüüe szhemi avtomati-zacii kotel'nüüü agregatov sz primeneiem élektrom-noj avtomatiki VTI.
Élektricseszskaja szhema szisztemü regulirovanija processzsza gorenija dlja parallel'no rabotajuscsih barabannüü kotlov. VTI jelentés, 1955.

115. Kurzbericht über die Aussprache auf der VGB Informationsvertagung über Regeltechnik für Zwangsdurchlaufkessel am 5. März. 1956. in Essen. VGB.Mitt.1956. Aug.Heft.43.
116. Knorre: Topocsnüé proceszszí. Goszénergoizdat, 1951.
117. Knorre: Iszszledovanie kotel'no-topocsnüé proceszszov.
118. Kornickij: Par vüszokogo davlenija v énergetike. Goszénergoizdat, 1950.
119. Sztüríkovics: Vnutrikotlovüé proceszszí. Goszénergdzdat. 1954.
120. Miheev: Osznovü teploperedacsi. Goszénergoizdat, 1949.
121. Mc Adams: Heat Transmission, Mc Graw-Hill, 1954.
122. Bosworth: Heat Transfer Phenomena. Ass.General Publications PTY, Sidney
123. Zinzen: Dampfkessel u. Feuerungen. Springer, 1950.
124. Kaissling: Steiggeschwindigkeit von Dampfblasen in Kesselrohren, Forschung, 1943. Heft 1. pp.30-34.
125. Kourim G.: Die elektrische nachbildung der instationären thermischen Vorgänge beim Wärmeaustauschern. Regelungstechnik, 1957. Heft.5. pp.163-167.
126. Linahan: The Dynamic Response of Industrial Thermometers in Wells. Tran.ASME, 1956.May. pp.759-763.
127. Aikman, Mc Millan, Morrison: Static and Dynamic Performance of Sheathed Industrial Thermometers. Trans of the Society of Instrument Technology, 1953. Dec.
128. Strejc: Aproximace aperiodických prechodových charakteristik. Slaboproudý Obzor, 1957.No.18. pp.565-571.

129. Ziegler, Nichols: Optimum Settings for Automatic Control. Trans ASME, 1942. pp.759-768.
130. Oppelt: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Verlag Chemie, 1956.