

MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet Budapest





MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA  
SZÁMITÁSTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI KUTATÓ INTÉZET

MELEGHENGERMŰVI VILLAMOS HUOKEMELŐ HAJTÁS VIZSGÁLATA

Egyetemi doktori disszertáció

Kalavszky Dezső

Tanulmányok 163/1984

A kiadásért felelős:

*Vámos Tibor*

igazgató

Osztályvezető:

*Nagy István*

ISBN 963 311 182 X

ISSN 0324-2951

## TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS .....	5
1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS .....	7
1.1 Hengerművek automatizálása .....	7
1.1.1 A vaskohászat komplex automatizálása .....	7
1.1.2 Hengerművek automatizálása .....	9
1.2 Hurokemelő hajtások .....	12
1.2.1 A hurokemelő hajtás feladata .....	12
1.2.2 Irodalmi vonatkozások .....	13
2. RENDSZEREGYENLETEK .....	15
2.1 Általános egyenletek .....	15
2.2 Az armatúrakör egyenletének kiegészítése .....	16
2.3 A mozgásegyenlet kiegészítése .....	17
2.3.1 A tehetetlenségi nyomaték változása .....	17
2.3.2 A hajtás $m_f$ terhelő nyomatéka .....	22
2.4 Rugalmas szalagfeszítés modell .....	26
2.4.1 Általános megfontolások .....	26
2.4.2 A szalagfeszítés modellje .....	27
2.4.3 Geometriai viszonyok: a $\Delta l(\gamma)$ függvény .....	28
2.5 Szabályozási kérdések .....	30
2.5.1 Áramalapjel képzése .....	30
2.5.2 Ellenőrzőjel képzése .....	31
2.6 A 2.fejezet összefoglalása .....	31
3. NAGYJELŰ VIZSGÁLAT SZIMULÁCIÓVAL .....	34
3.1 A hajtás állapotter modellsége .....	34
3.2 Numerikus szimuláció .....	38
3.3 Minőségvizsgálat szimulációval .....	39

3.3.1	Két szimulációs példa .....	39
3.3.2	A bekapcsolási szalagfeszültség-csúcs vizsgálata .....	41
4.	AZ ÁRAMIRÁNYÍTÓ PONTOS MODELLEZÉSE .....	44
4.1	Ujszerű áramirányító modell .....	44
4.1.1	A pontos modell szabályozástechnikai jelentősége .....	44
4.1.2	Az ismert módszerek áttekintése .....	44
4.1.3	Az algoritmikus módszer ismertetése .....	45
4.2	Pontos minőségvizsgálat szimulációval .....	52
4.2.1	A hajtás indulási folyamatai .....	52
4.2.2	Munkaponti tranziensek .....	54
5.	DINAMIKAI VIZSGÁLAT AZ s-TARTOMÁNYBAN .....	55
5.1	Linearizálás munkapont körüli kis változásokra .....	55
5.1.1	A rendszeregyenletek linearizálása .....	55
5.1.2	Kisjelű blokkvázlat .....	56
5.2	Dinamikai vizsgálat gyök-helygörbe módszerrel .....	58
5.2.1	Sajátértékek meghatározása .....	58
5.2.2	Az $Y(s)$ hurokátviteli függvény .....	59
5.2.3	Eredmények .....	67
5.3	Modellverifikáció domináns póluspár alapján .....	71
6.	ÖSSZEFOGLALÁS .....	73
	FÜGGELEK .....	75
	IRODALOM .....	76
	MTA SZTAKI TANULMÁNYOK 1983-1984 .....	80



## BEVEZETÉS

A meleghengerművi széles-szalag gyártó **kész-hengersorok** teljes automatizálására vonatkozó igény világviszonylatban általánosnak mondható. Ezt az igényt a mind termelékenyebb gyártási eljárások keresése kelti fel, minthogy a nagysebességű, a hengerelt szalaggal szemben támasztott fokozott minőségi követelményeket kielégítő hengerlés korszerű mérőeszközök, beavatkozó szervek, valamint szabályozási és folyamatirányítási megoldások nélkül elképzelhetetlen. A teljesen automatizált meleghengersorokban kulcs szerep jut az állványok között elhelyezkedő **hurokemelő**knek, melyek **feladata** a szalag kis értékű és közel állandó mechanikai húzófeszültséggel történő hengerlésének biztosítása minden zavaró hatás ellenére. Azt elbírálni, hogy a hurokemelők hogyan látják el említett feladatukat, pontosan csak a hengersor komplex dinamikai vizsgálatával lehetséges. Azonban fontos önmagának a hurokemelő rendszernek a részletes analízise is, mivel ennek eredményeképpen egyfelől tökéletesíthető a hurokemelő automatikus szabályozási rendszere, másfelől jogos egyszerűsítések adhatók meg a hurokemelő rendszerre nézve a teljes hengersor dinamikai vizsgálata céljából.

Villamos hurokemelő hajtásoknál általában külső gerjesztésű egyenáramú nyomaték-motort használnak, melyet tirisztoros hid-egyenirányítóról táplálnak. A hajtásszabályozás arra irányul, hogy állandósult állapotban olyan áram folyjon az armatúrakörben, amely mellett a motornyomaték éppen a kívánt szalagfeszültség értéknél lesz egyenlő a terhelőnyomatékkal, függetlenül a hurokemelő kar pozíciójától. Tekintettel azonban arra, hogy a hajtás gyakorlatilag állandóan tranziens állapotban van a szabályozási beavatkozások és a zavarások hatására, elsőrangú fontosságú a hajtás jó dinamikai tulajdonsága.

E dolgozatban az adott hét energiatárolós, nemlineáris hurokemelő hajtás vizsgálata állapotter modell segítségével történik, egyfelől digitális számítógépes szimuláció útján. Egy modellben a hid arányos rendszer-komponensként szerepel, egy másikban pedig pontosan van leképezve, így megkereshető a szabályozási paramétereknek az az értéke, amely mellett a két rendszermodell ekvivalens, legalábbis a jelek középértékét tekintve. Az egyes

paraméterváltoztatások hatása plotter-rajzokon, időfüggvények formájában könnyen nyomon követhető.

Más jellegű, tömörebb vizsgálatot tesz lehetővé a **gyök helygörbés módszer** alkalmazása, amelynek alapjául az egyszerűbb modell szolgál, a munkapontok kis környezetében linearizálva a rendszert.

Ez utóbbi módszerrel verifikálható az állapotter modell, másrészt az előbbi szimulációs módszerrel átmeneti függvények adhatók meg olyan bonyolult esetben, amikor – mint a vizsgált hajtásnál is – a zárt rendszer operátoros átviteli függvényének kiértékelése már nehézkes. Vagyis a szimulációs és a gyök helygörbés eljárás – párhuzamosan alkalmazva azokat – előnyösen kiegészíti egymást.

A hangsúly a dolgozatban a hurokemelő rendszer adekvát vizsgálatára alkalmas eszközök (matematikai, szabályozás- és számítástechnikai eszközök) leírásán van. Szükszerű eredményeket csak az alkalmazott módszerek használhatóságának szemléltetésére, ill. a hurokemelő rendszer kvalitatív tulajdonságainak bemutatására adunk meg. Egyfelől ugyanis a helyi adottságok (a hengercsiga és a hurokemelő geometriai, gépészeti, villamos stb. adatai) és a hengerlendő fém jellemzői (vastagsági, szélességi méretek, anyagállandók, hőmérséklet) igen sok, többé-kevésbé szabadon változó paramétert visznek be a vizsgálatokba, másfelől az alkalmazott rugalmas szalag-feszítés modell egy szükségszerű (de óvatos!) fizikai közelítés, amely a kvantitatív vizsgálatok pontosságát eleve korlátozza.



## 1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

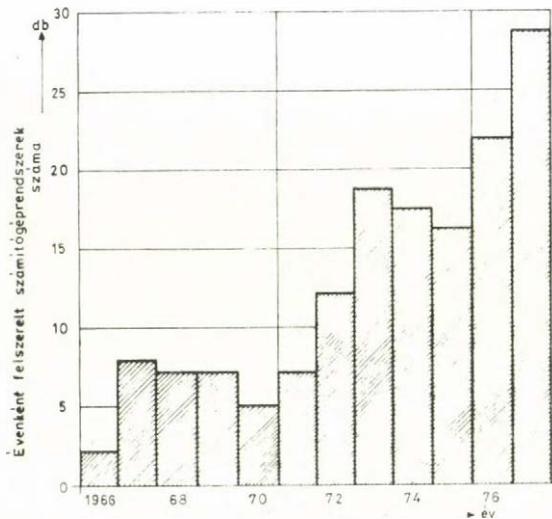
### 1.1 Hengerművek automatizálása

Milyen, vagy milyen lesz a közeljövőben az a "környezet", amelyben egy korszerű hurokemelő hajtásnak dolgoznia kell – ezt mutatja be az automatizált hengerművekről szóló egyre bővülő szakirodalom.

#### 1.1.1 A vaskohászat komplex automatizálása

A vaskohászat termelő berendezései igen nagy beruházási költségűek, jó kihasználtságukhoz mindig nagy gazdasági érdekek fűződtek. A gyártott termékekkel szemben állandóan fokozódnak a mennyiségi és minőségi követelmények, pl. nőnek a sorozatnagyságok, nagyobb a felhasználók igénye az anyagok kémiai összetételével, mérettartásával, felületkikészítésével stb. kapcsolatban. A növekvő volumenű termelés növekvő termékválasztékkal párosulva egyre nagyobb termelés-tervezési, készletgazdálkodási, terméknyilvántartási stb. problémákat vet fel. Az újabb világgazdasági helyzetben tovább nőtt a jelentősége az energia- és nyersanyagfelhasználás ésszerűsítésének.

Az említett követelményeket csak a vaskohászat komplex automatizálása útján lehet kielégíteni. Ma már világszerte széles körben terjed a vaskohászati **folyamatok** (pl. a nagykohók töltésének előkészítése, vasolvasztás, acélgyártás, öntés, előnyújtás, meleg-, hideghengerlés) számítógépes irányítása. Ugyancsak igen sok számítógépes **termelésirányító** rendszer van üzemben a vaskohászat területén, sőt, elterjedtségüket tekintve némi előnyben vannak a folyamatirányító rendszerekkel szemben. Az utóbbi pár évben a termelés- és folyamatirányító rendszerek összekapcsolódásáról, s ezzel összefüggésben többszintes, integrált termelés- és folyamatirányítási rendeltetésű számítógéprendszerekről érkeznek hírek. Ez a fejlődési tendencia tartósnak ígérkezik. A jelenlegi helyzetet és a fejlődés ütemét az 1.1 ábrával lehet érzékeltetni [1].



On-line számítógéprendszerek hat nyugat-európai acélipari társulásnál  
153 rendszer (246 számítógép)

1.1 ábra

Ez csak egy kiragadott példa. Kiragadott abból a szempontból is, hogy a számítógépes irányítás az automatizálásnak csak egyik oldala, mindamellett jellemző oldala, hiszen utal a vaskohászati folyamatok automatizáltságának más területeire is, olyanokra, amelyek a számítógépes irányítás előfeltételeit jelentik (pl. automatizált mérésadat gyűjtés, korszerű beavatkozó szervek stb.).

A továbbiakban csupán a folyamatirányítás kérdéseire szorítkozva a következőket állapíthatjuk meg:

- Ma még az egyes metallurgiai termelési folyamatok automatizáltsága erősen eltérő. Pl. a szinterelés és a folyamatos öntés esetében kezdeteinél tart, míg a nagykohók vagy a meleghengerművek esetében igen előrehaladott állapotban van és a számítógépes irányítás már-már általánosan alkalmazott gyakorlatnak számít, kiszorítva a huzalozott logikákat és a szimpla programozott irányítást [1].
- Ami az alkalmazott matematikai, irányításelméleti eszközöket illeti, az összkép szintén elég változatos. A kohászati folyamatoknak a legtöbb területen megvan a matematikai **folyamatmodellje** (vagy modelljei). Ezek általában viszonylag egyszerűek, így nem tudják figyelembe venni a folyamatokra ható összes

tényező hatását. Ezért minden olyan esetben, ahol a zárthurkú szabályozás alapját matematikai folyamatmodell alkotja, adaptációs algoritmusokra van szükség. Ezek egyszerűek és igen hatásosak. Az optimalizálási eljárások eléggé kifinomultak a kész-hengerművek esetében, kevésbé komplexek viszont az előnyújtó soroknál és a szorosan vett metallurgiai folyamatoknál. Ez sok egyéb tényező mellett összefügg azzal, hogy a hengerművek elég nagy mértékben ún. "fehér rendszerek"-nek tekinthetők, a folyamataik viszonylag jól megismerhetők, leírhatók.

### 1.1.2 Hengerművek automatizálása

A vaskohászatban érvényesülő általános tendenciákon belül a hengerművekkel kapcsolatban még külön elmondhatók a következők:

- A korszerű hengerlés nagy sebességgel történik: a 20-as években felépített első készsorok 3,3–5 m/sec-os sebességével szemben ma 20-30 m/sec-os sebességgel [2]. Ilyen nagy hengerlési sebesség mellett lehetetlen biztosítani a folyamatos, stabil hengerlést közvetlen emberi beavatkozással, az egyéb technológiai követelmények kielégítését nem is említve. (Ezek a technológiai előírások a hengerelt áru minőségi tulajdonságainak – egyenletes szövetszerkezet, szabványos méret, jó felületminőség stb. – biztosítására szolgálnak.) Szükséges tehát a folytatólagos készsorok teljes automatizálása, ennek minden következményével együtt: nagyobb teljesítményű, gyorsabb hajtások, korszerű mérőeszközök, valamint szabályozási és folyamatirányítási megoldások alkalmazásával.
- A hengersorok igen nagy termelési kapacitást képviselnek. Ennek érzékeltetésére két adatot említünk meg. Bizonyos megleghengersorok éves termelése ma már meghaladja a 6 millió tonnát és a hajtások összteljesítménye a 80 MW-ot [2]. Így néhány százalék nyersanyag vagy energiamegtakarítás, ill. a késztermék minőségének vagy kihazatalának csekély mértékű javulása is jelentős gazdasági eredménnyel jár. Magától értetődő cél a hengersorok állásidejének minimalizálása. Egyfajta optimalizációs feladatot jelent a hengerléstechnikai be-

rendezések kiméltése a berendezésekre adott határértékek lehető legjobb kihasználása mellett. A fenti célok kellő műszerezettség és megfelelő szabályozó rendszerek esetén a folyamatoptimalás hardware és software eszközeinek alkalmazásával érhetők el.

A vaskohászati automatizálást általában és az általánosítás igényével (pl. trend becslés) mutatják be az [1]-[7] munkák, míg konkrét automatizált acélművekről, ill. hengerművekről szól a [8]-[18] szakirodalom. Ez utóbbi cikkek alapján néhány példát mutatunk be acél-, ill. hengerművek számítógépes irányítására:

Üzem	Ország	Irodalom	A számítógépes irányítási rendszer funkciói
Chiba Works	Japán	[8]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a bramma útjának követése a kemencétől a tekercselőkig,</li> <li>• a durva- és készsor beállítása,</li> <li>• tekercselési hőmérséklet szabályozása,</li> <li>• adat-naplózás</li> </ul>
Anchor	Anglia	[9]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• termelés tervezés (első szint)</li> <li>• termelés koordináció (második szint)</li> <li>• folyamatirányítás (harmadik szint), itt:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a) kemence vezérlés</li> <li>b) bugasorok vezérlése</li> <li>c) durva- és készhengerek irányítása</li> <li>d) inga- és repülőollók irányítása</li> </ol> </li> </ul>
Sidmar	Franciaország	[10, 11]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• készsor szűréstervének meghatározása,</li> <li>• széles-szalag hőmérsékletének számítása,</li> <li>• tekercselési hőmérséklet számítása,</li> <li>• hajtó motorok felvett villamos teljesítményének számítása és egyenletes elosztása,</li> <li>• hengerlési erő, hengerek igénybevételek meghatározása,</li> <li>• előresietés (forward slip) számítása,</li> <li>• a szalag profiljának és síkfekvésének meghatározása,</li> <li>• a hengerek kopásának adaptációja tekercsről tekercsre,</li> <li>• adatnaplózás, termék osztályozás.</li> </ul>
SOLMER, Fos-sur-Mer	Franciaország	[12]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a bramma útjának követése a kemencétől a tekercselőkig,</li> <li>• szűrésterv számítása, sebesség-, pozíció- stb. alapjelek beállítása minden állványnál,</li> <li>• felgyorsítás vezérlése,</li> <li>• a szalag hűtésének irányítása a csévtelés előtt,</li> <li>• olló sebességének szabályozása,</li> <li>• készsor sebességének szabályozása,</li> <li>• résméretszabályozás (AGC),</li> <li>• hurokemelők pozíció- és áramszabályozása a készsoron,</li> <li>• tekercselők hajtásának irányítása,</li> </ul>

Üzem	Ország	Irodalom	A számítógépes irányítási rendszer funkciói
			<ul style="list-style-type: none"><li>● készsori állványok hengercseréjének irányítása.</li></ul>
Novolipetszk	Szovjetunió	[13]	<ul style="list-style-type: none"><li>● széles-szalag hengermű integrált folyamatirányítása, ezen belül<ul style="list-style-type: none"><li>a) automatikus szalag szélesség szabályozás a durva hengersonon,</li><li>b) a szalag állványok közötti vízhűtésének szabályozása a készsoron.</li></ul></li></ul>
VÖEST-ALPINE, Linz	Ausztria	[16]	<ul style="list-style-type: none"><li>● a bramma útjának követése a tekercs mérlegeléséig,</li><li>● adat regisztráció és kiértékelés,</li><li>● szűrésterv számítása a készsoron,</li><li>● a szalag hűtésének irányítása a csévelés előtt,</li><li>● modell-paraméterek adaptációja,</li><li>● az olló, készsor, hűtőpad és a tekerceselő beállítása és irányítása,</li><li>● aktuális gyártási adatok kijelzése vezérlőasztalokon a kezelő személyzet számára,</li><li>● adatnaplózás, üzemviteli adatforgalom lebonyolítása.</li></ul>
Smederevo	Jugoszlávia	[17]	<ul style="list-style-type: none"><li>● készsor beállítása, optimális szabályozó-alapjel képzés indulásnál, kifutó szalag hőmérséklet-szabályozása (első szint),</li><li>● valós idejű szabályozási korrekciók mért értékek alapján (második szint).</li></ul>
O.Sinigaglia Works	Olaszország	[18]	<ul style="list-style-type: none"><li>● termelés tervezés,</li><li>● folyamatirányítás, itt:<ul style="list-style-type: none"><li>a) kemence-irányítás</li><li>b) revetőrő irányítása</li><li>c) reverzáló- és készsor irányítása.</li></ul></li></ul>



## 1.2 Hurokemelő hajtások

### 1.2.1 A hurokemelő hajtás feladata

A meleghengerművi hurokemelő hajtások fejlődése során a hajtás fokozatos funkcióeltolódása következett be [19].

Eredetileg a hengerelt szalagot csak azokban a vészhelyzetekben emelte meg az operátor a hurokemelővel, amikor valamilyen oknál fogva időlegesen megbomlott az anyagáramlás egyensúlya a hurokemelőt közrefogó két szomszédos hengerállvány között (vész-puffer). Így azonban nem lehetett védekezni a szalagban ébredő esetleges túlzott húzófeszültségekkel szemben. A hajtás második fejlődési stádiumában, az előbb említett hátrány kiküszöbölése céljából, a szalagot már a normális hengerlési folyamat alatt is megemelve tartották a hurokemelővel (puffer).

Miután a fölemelve tartott hurokemelő állandóan érintkezik a szalaggal, így a hajtás alkalmassá vált a szalag mechanikai feszültségének közel állandó, kis értéken tartására, vagyis szabályozására. Ezt tekinthetjük a harmadik fejlődési stádiumnak (szalagfeszültség szabályozás). A feszültség szabályozás jelentősége a kohászatban közismert:

- a közel állandó szalagfeszültség kívánatos egyfelől metallurgiai szempontból, az egységes anyagszerkezet kialakítása érdekében,
- másfelől termelékenységi szempontból, ugyanis a **feszítetlen** szalag táncol, érinti az oldalvezetőket – ami a szükséges szélezés miatt anyaghulladékot okoz – vagy a szalag be is gyűrődhet (selejt), másrészt a szalag **túlzott megfeszítése** a vastagsági és szélességi méretek pontos tartását nehezíti, sőt a szalag el is szakadhat.

A szalagfeszültség szabályozása, a fentiekén túlmenően, közvetve is jelentősen hozzájárul a szalaghengerlés termelékenységének növeléséhez. Ez azon alapul, hogy a korszerű hurokemelő hajtás minimálisra csökkenti a folytatólagos hengersor állványai közötti interakciókat, mégpedig a gyors és lassú tranziensek esetében egyaránt. Gyors tranzienseket okoz – elsősorban a szalagfeszültségben – az automatikus résméret szabályozó (AGC) rendszer; azonban a hurokemelő hajtásnak az állványokat **szétcsatoló** hatása miatt ezek a tranziensek nemigen tudnak továbbterjedni s így az AGC berendezés, lényegében izolált környezetben működve, gyorsan korrigálni tudja a vastagsági hibákat. (Nem kívánatos, gyors tranzienseket okozhatnak mechanikai és villamos zavarok is – pl.



hidegfolt vagy zárvány a szalagban, a munkahengerek excentricitása, az állványhajtások tachogenerátorainak feszültség-pulzációja stb. – melyek tovaterjedését a hurokemelő hajtás szintén gátolja.) Egy-két nagyságrenddel lassúbb tranziensek indulnak pl. rászúrásnál (résméret változtatás) vagy a felgyorsítási üzemmódban, melynek célja a szalaghőmérséklet szabályozása vagy a termelés növelése ("speed-up" ill. "zoom" rolling). E lassúbb tranziensek esetében az anyagáramlás egyensúlyának többé-kevésbé tartós megbomlásáról van szó. A hurokemelők – miután állandóan érintkeznek a szalagfeszültség szabályozása során a hengerelt szalaggal – az anyagáramlás igen érzékeny detektorai is egyben a hengersoron s így a hurokszabályozók közreműködésével jelentős mértékben hozzájárulnak az egyes állványok közötti **szinkronizmus** fenntartásához, pl. a gyorsítások és lassítások idején. Ez utóbbi járulékos funkciói a hurokemelő hajtásnak (szétcsatolás, szinkronizálás) különösen nagy jelentőségre tesznek szert a korszerű, nagy sebességű hengerlésnél (lásd 1.1.2 pont).

Ugy tűnik, hogy a hurokemelő hajtás feladatkörének bővülése, ill. a kialakult feladatkörön belüli súlyponteltolódás a jövőben tovább folytatódik. Szakemberek a hagyományos vastagság szabályozás továbbfejlesztésének lehetőségét látják a hideghengerművekben alkalmazott szalagfeszültség szabályozás adaptálásában meleghengersorokra [3], amely esetleg akár helyettesítheti is a hagyományos AGC megoldást.

### 1.2.2 Irodalmi vonatkozások

A hurokemelő hajtás újabb és újabb funkciói egyre nagyobb statikus és dinamikus pontosságot és mindinkább automatikus üzemmódot követeltek meg a hajtástól. Ez a tendencia kifejeződik a hurokemelő hajtásokkal kapcsolatos munkák témaválasztékában és tárgyalásmódjában is.

A [20]-[23] cikkek leíró jellegűek; ismertetik megvalósított hurokemelő hajtások felépítését és működését. A [24] előadás már érinti a hajtás pontosságának és stabilitásának kérdését is. A [19] cikk közli a hurokemelő és a vele együttműködő hurokszabályozó rövid blokkvázlat analizisét. Megemlíti, hogy a dinamikai vizsgálat céljából egy Basic szimulációs program is készült és szimulációs eredményként megad néhány átmeneti függvényt.

A szerző, vizsgálatait alapján, először javasolja a hurok-lengések csillapítására a

hurokemelő motor fordulatszámával arányos negatív visszacsatolás alkalmazását. A [25] cikk már egy igen komplex, automatikus hurokemelő hajtást mutat be. Megadja a rendszert leíró egyenleteket és a linearizált rendszer blokkvázlatát. Először jelenik meg itt a szalagfeszültség mint szabályozott jellemző. Átviteli függvények segítségével tárgyalja a cikk a szalagfeszültség statikus és dinamikus hibáját. Kimutatja, hogy a [19]-ben javasolt csillapítás a szalagfeszültségben statizmust okoz, ami határt szab a lehetséges lengés-csillapításnak.

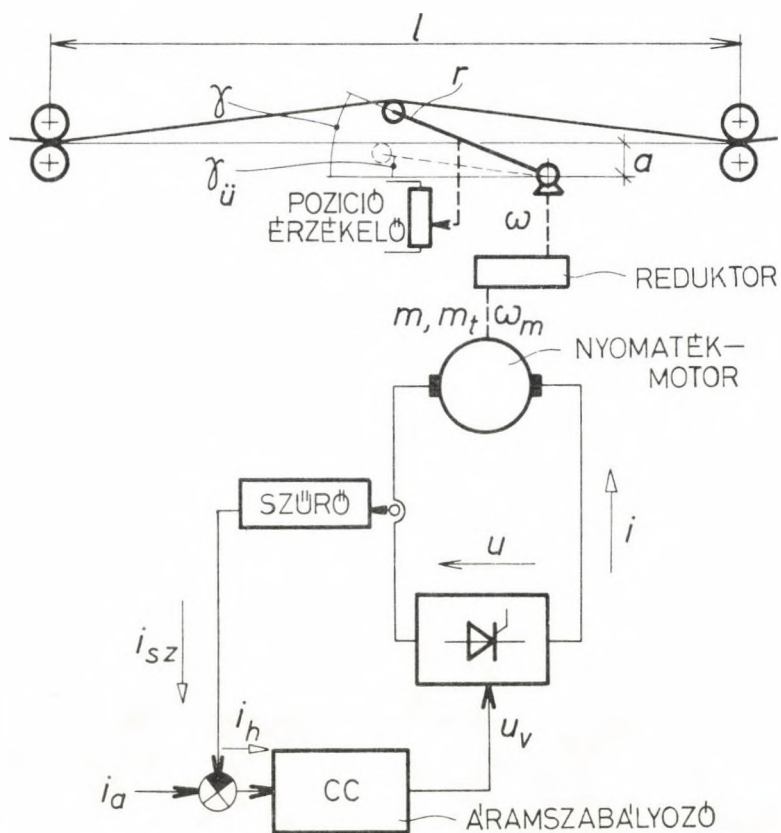
A [26]-[32] munkákban mindig a szalagfeszültség a hurokemelő hajtás szabályozott jellemzője. A [26]-[28]-ban a hurokemelő hajtás többállványos megleghenger-sor részeként szerepel, míg a [29]-[32]-ben magának a hurokemelőnek a vizsgálatáról van szó. A vizsgálatok az állapotter módszeren alapulnak: a szabályozott hurokemelő hajtás állapotter modelljének létrehozása után (amely 5-7 energiatárolós, nemlineáris modell) sor kerül a hajtás digitális szimulációjára. A [31] cikk részletesen ismerteti azt az eljárást, amellyel a hurokemelő motort tápláló áramirányító speciális tulajdonságait (hullámos kimenő feszültség, esetleges szaggatott áramvezetés, szabályozási késés) is figyelembe lehet venni. A digitális szimuláció segítségével megvalósítható a hajtás nagyjelű vizsgálata, követhető a hurokemelő teljes munkaciklusa: a hurokemelő kar felemelkedése a kívánt pozícióba, majd lesüllyedése. Így pl. jól megfigyelhető a [19]-ben említett szalagfeszültség statizmus, amelynek kiküszöbölésére a [28]-[29] munkák javasolnak egy megoldást. Ugyancsak jól megfigyelhető, hogy a hurokemelő kar felemelkedése során, a karnak a hengerelt szalaghoz ütközése után, jelentős szalagfeszültség-csúcs alakul ki [26]. Ennek eliminálására található egy javaslat a [29, 32]-ben. A digitális szimuláció természetesen alkalmas a hajtás kisjelű vizsgálatára is [31]. Erre a célra még előnyösen alkalmazható a munkaponti linearizálás, majd a kapott lineáris rendszer sajátértékeinek elemzése is [30, 32]. Így elsősorban a hurokemelő hajtás stabilitás vizsgálata végezhető el.

Miután a modern szabályozott hurokemelő hajtás végeredményben egy modell-referenciás adaptív rendszer, e rendszerek elméletét a jövőben várhatóan be fogják vonni a hajtással kapcsolatos vizsgálatokba. Másfelől, a hardware oldaláról, várható a mikroprocesszoroknak a hurokemelő hajtás irányításában való alkalmazása. A hurokemelő hajtással foglalkozó szakirodalomban tehát valószínűleg a fenti kérdések fognak újabb irányokat képviselni.

## 2. RENDSZEREGYENLETEK

### 2.1 Általános egyenletek

A vizsgált hurokemelő geometriai elrendezése és a hajtás villamos kapcsolása alapképzésben a 2.1 ábrán látható.



2.1 ábra

Az ábra alapján a következő egyenletek írhatók fel a rendszerre:

$$u = R i + L \frac{di}{dt} + k\phi \omega_m \quad , \quad (2.1)$$

$$\omega_m = \frac{d\gamma}{dt} \text{ red,} \quad (2.2)$$

$$k\phi i = \theta \frac{d\omega_m}{dt} + m_t, \quad (2.3)$$

$$i_h = i_a - i_{sz} \quad (2.4)$$

ahol R és L az armatúrakör eredő ellenállása, ill. induktivitása,  $k\phi$  gépállandó,  $\omega_m$  a motor szögsebessége,  $\theta$  a motor tengelyére redukált tehetetlenségi nyomaték,  $m_t$  a motor terhelő nyomatéka, red pedig a reduktor áttétele.

## 2.2 Az armatúrakör egyenletének kiegészítése

Feltételezve, hogy a tirisztoros tápegység és gyújtó áramköre AEI erősítési tényezőjű lineáris elem, továbbá a CC áramszabályozó  $A_I$  arányos tagot és  $T_I$  integrálási idejű integráló tagot tartalmazó PI-szabályozó, a motor kapocsfeszültségének  $u$  középértéke a következő:

$$u = AEI \left( A_I i_h + \frac{1}{T} \int i_h dt \right) = AEI u_v, \quad (2.5)$$

ahol  $u_v$  a gyújtóáramkör vezérlő feszültsége.

Az áramszabályozási kör funkcionálisan megszakadhat két esetben: az áramirányító teljes kivezérlésekor (pl. erős gyorsítás esetén) vagy ha az  $i$  armatúraáram negatívvá akarna válni (pl. fékezéskor). Ezek az esetek a hurokemelő hajtás nagyjelű vizsgálata szempontjából fontosak, amikor vizsgáljuk a hurokemelő karnak a nyugalmi helyzetéből az előírt  $\gamma_a$  pozícióba történő felemelkedése (és fordítva) **teljes folyamatát**.

A rendszer fenti struktúraváltozásai az egyenletekben diszkontinuitásokhoz vezetnek. Ezek alapját a következő korlátozások képezik:

$$-U_{v1} \leq u_v \leq U_{v2}, \quad (2.6)$$

$$0 \leq i, \quad (2.7)$$

ahol  $-U_{v1}$  és  $U_{v2}$  a CC áramszabályozó kimenő feszültségének alkalmas "megfogásai".

## 2.3 A mozgásegyenlet kiegészítése

### 2.3.1 A tehetetlenségi nyomaték változása

A  $\theta$  redukált tehetetlenségi nyomaték részben folytonosan változik a  $\gamma$  pozícióval, részben ugrásszerűen változik a  $\gamma_{\ddot{u}}$  pozícióban, amikor a hurokemelő kar – felemelkedése során – ütközik a hengerelt szalaggal. Ugyanitt a hurokemelő kar szögsebessége ugrásszerűen lecsökken az ütközés következtében, ill. az addig feszítetlen szalagban elkezdődik a  $\sigma$  szalagfeszültség kialakulása, továbbá a motor  $m_t$  terhelő nyomatéka ugrásszerűen megnő (lásd 2.3.2 pontot). Tehát a hajtásrendszernek a  $\gamma_{\ddot{u}}$  pozícióban megváltozik a struktúrája, aminek az egyenletekben további diszkontinuitások felelnek meg.

2.3.1.1 A folytonos  $\theta$ -változás jelentőségének felméréséhez a motor – munkavégző mechanizmus teljesítmény – mérlegéből indulunk ki.

$$\omega_m m = \frac{dW}{dt} + \omega_m m_t \quad (2.8)$$

ahol  $W$  a mozgó részek mozgási energiája,  $m$  pedig a motor  $k\phi$ -i hajtónyomatéka.  $W$  a motor, a reduktor és a hurokemelő mechanizmus állandó  $\theta_m$  tehetetlenségi nyomatékához kapcsolódó mozgási energiából, valamint a hengerelt szalag pozíciófüggő  $\theta_{sz}(\gamma)$  tehetetlenségi nyomatékához kapcsolódó mozgási energiából tevődik össze:

$$W = \frac{\theta_m}{2} \omega_m^2 + \frac{\theta_{sz}(\gamma)}{2} \omega^2 \quad (2.9)$$

A (2.8) egyenletet  $\omega_m$ -mel osztva a következő egyenlet adódik:

$$m = \frac{1}{\omega_m} \frac{dW}{dt} + m_t \quad (2.10)$$

Az  $\frac{1}{\omega_m} \frac{dW}{dt}$  kifejezés az ún.  $m_d$  dinamikai nyomatékot adja meg:

$$m_d = \frac{1}{\omega_m} \frac{dW}{dt} \quad (2.11)$$

$m_d$  a (2.9) egyenlet felhasználásával két tag összegeként írható fel:



$$m_d = \left( \theta_m + \frac{\theta_{sz}(\gamma)}{\text{red}^2} \right) \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{d\theta_{sz}(\gamma)}{d\gamma} \frac{\omega_m^2}{2 \text{red}^3} \quad (2.12)$$

A (2.12) egyenletben a második tag három ok miatt is kicsi. A  $\theta_{sz}(\gamma)$  változása a  $\gamma$  pozíció függvényében lassú (lásd később);  $\omega_m$  kicsi, mivel a hurokemelő hajtás alacsony fordulatszámú (10-20  $\frac{\text{ford}}{\text{perc}}$ ), nyomatékmotoros hajtás; a nevezőben az áttétel a harmadik hatványon szerepel. Ezért számításainkban ettől a tagtól eltekintünk, bár figyelembevétele semmi nehézséget nem okozna, viszont a számítógép-idő felhasználást növelné.

A fenti elhanyagolással  $m_d$ -t a (2.10) egyenletbe helyettesítve, majd ezt a (2.3) mozgásegyenlettel összevetve adódik:

$$\theta = \theta_m + \frac{\theta_{sz}(\gamma)}{\text{red}^2} \quad (2.13)$$

A vizsgált hurokemelő hajtásnál két DP 82-es típusú egyenáramú nyomatékmotor van egy tengelyen (ikermotor), melyek mindegyikének  $17 \text{Ws}^3$  a tehetetlenségi nyomatéka. A hozzájuk kapcsolódó hurokemelőnek  $\theta_h = 11,25 \text{Ws}^3$  a tehetetlenségi nyomatéka, redukálás nélkül. (Egy motorhoz  $\frac{\theta_h}{2}$  tartozik!) Az áttételek nagyságát a konkrét hétállványos meglehengersor esetében az egyes hurokemelőknél az I.táblázat tartalmazza.  $\theta_m$ -re a hengersor mentén a

$$\theta_m = 17 + \frac{11,25}{2 \text{red}^2}, \text{Ws}^3 \quad (2.14)$$

kifejezés adódik.

A szalag  $\theta_{sz}(\gamma)$  tehetetlenségi nyomatékának meghatározásánál, jó közelítéssel, haladó mozgásnak forgó mozgásra való átszámításáról van szó. A mozgási energiák azonossága alapján:

$$\frac{\theta_{sz}(\gamma)}{2} \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{m_{sz}}{3} v_{sz}^2 \quad (2.15)$$

ahol  $v_{sz}$  a szalag függőleges elmozdulásának sebessége a hurokemelő kar által alátámasztott ponton. (Ez a pont gyakorlatilag az állványtávolság felezőpontja, lásd a 2.5 ábrát is.)

$m_{sz}$  a szalag tömegének a fele az adott állványközben:



$$m_{SZ} = \frac{b \cdot h \cdot l}{2} \rho \quad , \quad (2.16)$$

itt  $b$  a szalag szélessége (a vizsgált esetben 155 cm),  $h$  a szalag vastagsága az adott állványközben (értékeit pl. lágy acél hengerlésének esetében, a konkrét szűrősterv alapján, szintén az I.táblázat tartalmazza),  $\rho$  az acél sűrűsége.

Hurokemelő sorszáma	1.	2.	3.	4.	5.	6.
red	4,20	3,75	3,35	3,30	3,15	2,15
h, cm	2,47	1,55	1,00	0,68	0,485	0,365

I. táblázat

A (2.15) egyenletben  $m_{SZ}$  3-al való osztása azt fejezi ki, hogy a szalag tömege nem koncentráltan, hanem egyenletesen elosztva jelentkezik az állványközben és az elemi tömegek sebessége középtől az állványok felé haladva  $v_{SZ}$ -ről egyenletesen nullára csökken.  $v_{SZ}$ -re fennáll:

$$v_{SZ} = r \cdot \omega \cdot \cos\gamma \quad . \quad (2.17)$$

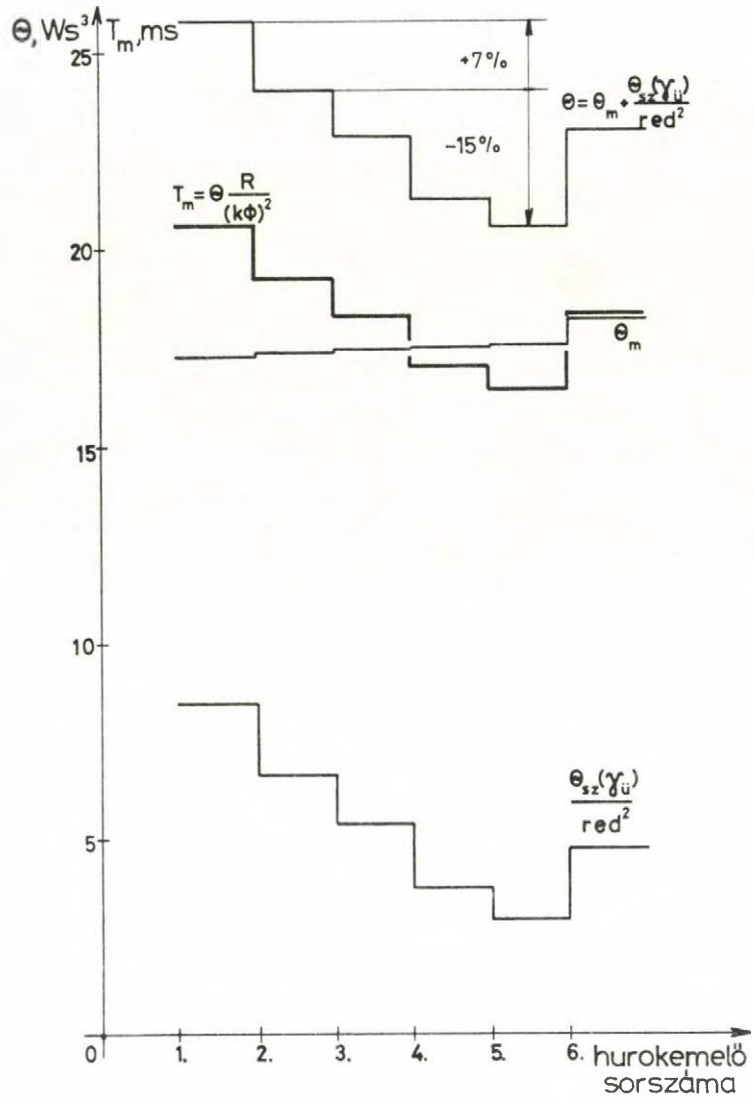
Igy a (2.15) és (2.17) egyenletek segítségével:

$$\theta_{SZ}(\gamma) = \frac{m_{SZ}}{3} r^2 \cos^2 \gamma \quad . \quad (2.18)$$

$\theta_{SZ}(\gamma)$  értéke a  $\gamma = \gamma_{\ddot{u}}$  pozícióban a legnagyobb, ettől kezdve csökken, pl. a  $\gamma = 30^\circ$  eléréséig mintegy 20%-kal.

A nagyságrendi viszonyok érzékeltetésére bemutatjuk a 2.2 ábrát, ahol  $\theta_{SZ}(\gamma)$  a  $\gamma_{\ddot{u}}$  pozícióban számított értékével szerepel.

Látható, hogy  $\theta$  az adott hengernél és az adott szűrőstervnél a hengernél elég kis ingadozást mutat, mivel  $\theta$ -ban dominál  $\theta_m$ . Egy közbenső  $\theta$  értékhez, pl. a 2. hurokemelő tehetetlenségi nyomatékához viszonyítva, az ingadozás +7 és -15% között van a  $\gamma_{\ddot{u}}$  pozícióban (tehát pl. a  $\gamma_a = 30^\circ$ -os munkapontban ennél kisebb). Tekintettel arra, hogy mind a hat hurokemelő motor egyforma, így villamos paramétereik is, a



2.2 ábra

motorok  $T_m$  elektromechanikai időállandói a hengesor mentén szintén csak a  $\theta$  által meghatározott kis mértékben térnek el egymástól. A 2.2 ábrán  $T_m$ -et is feltüntettük ( $R = 0,02\Omega$ ,  $k\phi = 5 \text{ Vs}$ ).

2.3.1.2 Az ütközés pillanatáig a (2.3) mozgásegyenletben  $\theta = \theta_m$ -mel számolunk, utána  $\theta = \theta_m + \frac{\theta_{sz}(\gamma)}{red^2}$  -el.

Feltételezve, hogy a hurokemelő kar rugalmatlanul ütközik a hengerelt szalaghoz, a tömegviszonyokból meghatározható, hogy ütközés után a kar milyen  $\omega$  szög-

sebességgel folytatja a mozgását.

A  $\theta_m$ -mel egyenértékű  $m$  tömeg a hurokemelő oldalán, a mozgási energiák azonossága alapján, a következő formában kapható meg:

$$m = \frac{rd^2 \theta_m}{r^2} \quad (2.18)$$

Alkalmazva az impulzusmegmaradás elvét, a kar ütközés utáni  $\omega$  szögsebességére jó közelítéssel felírható:

$$\omega = c \omega_{\ddot{u}} \quad (2.19)$$

ahol

$$c = \frac{m}{m + \frac{m_{sz}}{2}} \quad (2.20)$$

$\omega_{\ddot{u}}$  pedig a kar ütközés előtti szögsebessége.  $m_{sz}$  2-vel való osztása itt is a szalag tömegének nem koncentrált, elosztott voltából származik.  $c$  értékei a vizsgált hengersonon, a példaként választott szűréstervnél a következők:

Hurokemelő sorszama	1.	2.	3.	4.	5.	6.
$c$	0,563	0,622	0,672	0,745	0,789	0,706

II. táblázat

A közelítés jósága a nagyobb sorszámú hurokemelők felé haladva nyilvánvalóan csökken, ui. a (2.20) képlet merev testek ütközésére érvényes, azonban a vékonyabb lemezek egyre kevésbé tekinthetők merevnek.

### 2.3.2 A hajtás $m_t$ terhelő nyomatéka

A (2.3) egyenletben szereplő  $m_t$ -re elemi mechanikai megfontolások után a következő egyenlet írható fel:★

$$m_t = [G + (HA + HU\sigma + CS \frac{d\sigma}{dt}) (r \sin\gamma - a)] \frac{r \cos\gamma}{red} . \quad (2.21)$$

Itt  $G$ -vel a hurokemelő saját  $G_h$  súlyából és – ütközés után – a szalag felének  $G_{sz}$  súlyából származó nyomatékkomponenst vettük figyelembe:

$$G = \frac{G_h}{2} , \quad 0 \leq \gamma \leq \gamma_{\ddot{u}} \quad (2.22)$$

illetve

$$G = \frac{1}{2} (G_h + G_{sz}) , \quad \gamma_{\ddot{u}} < \gamma .$$

(A teljes terhelőnyomatéknak a fele jut egy motorra!)

$$G_{sz} = \frac{b h l}{2} \gamma_{Fe} , \quad (2.23)$$

ahol  $\gamma_{Fe}$  a hengerelt acél fajsúlya.

$HA$ -val a hajlításból származó nyomatékkomponenst lehet figyelembe venni:

$$HA = 2 \frac{b h^3 E}{l^3} , \quad (2.24)$$

ahol  $E$  a rugalmassági modulus.

$HU$  a szalagfeszítés ("húzás") nyomatékszükségletére utal:

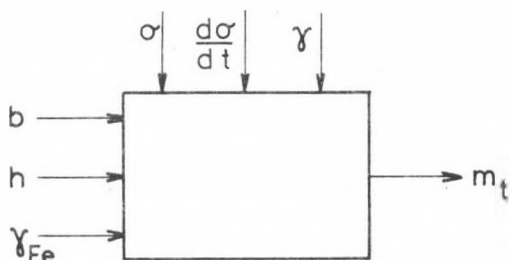
$$HU = 2 \frac{b h}{l} . \quad (2.25)$$

$CS$ -vel a belső anyagsúrlódást lehet figyelembe venni. Miután a viszkózus súrlódóerő sebességgel arányos,  $CS$  ezért van szorozva  $\frac{d\sigma}{dt}$  -vel.★★

★ Itt is felhasználjuk, hogy a hurokemelő kar jó közelítéssel középen támasztja alá a hengerelt szalagot.

★★ Minthogy  $\sigma$  a szalag hosszváltozásával áll kapcsolatban, ezért  $\frac{d\sigma}{dt}$ -vel kifejezhető a hosszváltozás sebessége.

A (2.21) egyenletet csak azért részleteztük, hogy rámutathassunk:  $m_t$  egy olyan több-bemenetű "doboz" kimenő jelének tekinthető, melynek bemenő jelei részben az adott szűréstervre jellemzők ( $b$ ,  $h$ ,  $\gamma_{Fe}$ ), részben a folyamatból vett változók ( $\sigma$ ,  $\frac{d\sigma}{dt}$ ,  $\gamma$ ) (lásd. 2.3 ábrát).



2.3 ábra

Az egyes nyomatékkomponensekkel kapcsolatban a következő megjegyzéseket kell tenni:

- (a) A (2.23)-ból látható, hogy a szalagsúlyt az egyszerűség kedvéért az 1 állványtávolsággal számítjuk, holott a hurokemelő kar emelkedésével változik a szalag hossza az állványközben, így  $G$  pozíciófüggő. Az említett szalaghossz-változás figyelembevétele növelheti a feszültség-szabályozás statikus pontosságát.
- (b) A hajlítás nyomatékszükségletét néha elhanyagolják a meleghengrelés hőmérsékletére hivatkozva [19].
- (c) A belső anyagsúrlódás figyelembevétele lehetőséget ad energiavesztés (csillapítás) reprezentáló tag bevitelére a szalagfeszítés matematikai modelljébe. Ezzel eddig a hurokemelő hajtásokkal foglalkozó szakirodalomban nem találkoztunk. (Természetesen a viszkoelasztikus anyagmodellt a kontinuum mechanika tárgyalja [35].) Figyelmet érdemel itt, hogy állandósult állapotban ez a nyomatékkomponens nulla, ui.  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ .

A nyomatékmotor áramának szabályozása – a dinamikai követelményektől most eltekintve – arra irányul, hogy a terhelő nyomaték és a motor hajtó nyomatékának egyensúlya a hengrelési technológia által előírt  $\sigma_a$  szalagfeszültségnél jöjjön létre (függetlenül a  $\gamma$

pozíciótól). A motor terhelő nyomatékának pontos ismerete tehát nem csak a hurokemelő hajtás vizsgálata, hanem a motor megfelelő áramszabályozása szempontjából is fontos lenne. Márpedig láttuk, hogy az egyes nyomatékkomponensek meghatározása több-kevesebb bizonytalanságot, ill. elhanyagolást tartalmaz. A bizonytalanságok súlyának megbecslésében segít a III.táblázat. Itt a húzás nyomatékszükségletét, mint a legpontosabban számítható s egyben szabályozott nyomatékrészt adjuk meg a többi nyomatékrészhez viszonyítva, százalékosan, a hurokemelők sorszámának és  $\gamma$ -nak a függvényében. (A konkrét hengersor- és szűrősterv-adatok ugyanazok, mint korábban,  $\gamma_a$  értékei pedig rendre: 2, 3, 4, 5, 6 és 7,5 N/mm<sup>2</sup>.)

No	$\gamma$			
	16°	20°	30°	40°
1.	15,1	38,4	77,1	100,0
2.	23,3 <sup>★</sup>	63,4	144,0	105,0
3.	30,8	86,4	210,0	311,0
4.	37,6	106,0	265,0	403,0
5.	43,5	124,0	312,0	479,0
6.	52,2	149,0	377,0	581,0

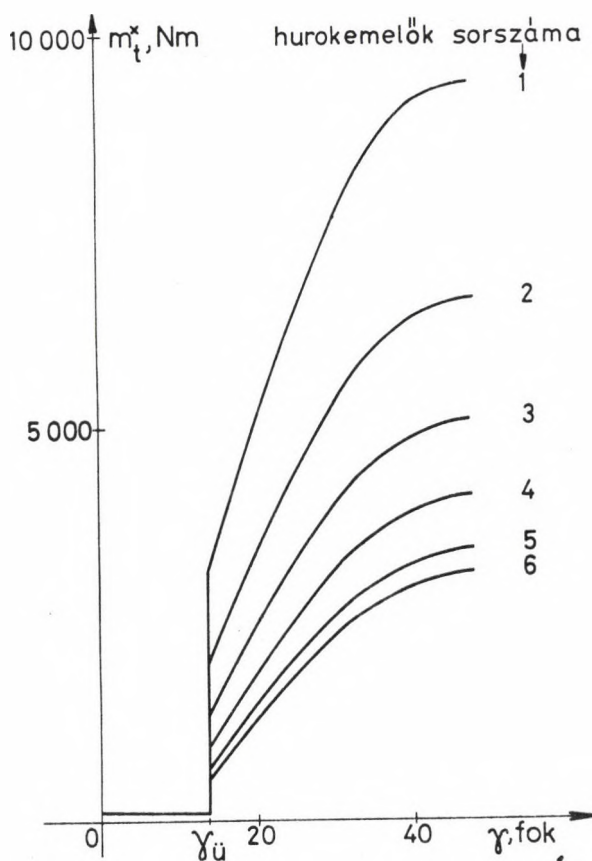
III. táblázat

Ha a húzás nyomatékszükséglete pl. 23,3 % és a többi nyomatékrész pl.  $\pm 20$  % pontossággal határozható csak meg, akkor ez  $\frac{\pm 20}{0,233} = \pm 85,8$  %-os statikus  $\sigma$ -hibát eredményezhet az előirt  $\sigma_a$ -hoz képest. Vagyis a jelen esetben a nyomatékszámítások bizonytalansága feltranszformálódva jelentkezik a szabályozott nyomatékrész közvetítésével a szabályozott  $\sigma$  szalagfeszültségben. Megjegyezzük azonban, hogy a  $\gamma$  pozíció előirt munkaponti értéke általában  $\gamma_a = 30^\circ - 40^\circ$ , ez a tartomány mértékadó a  $\sigma$ -szabályozás statikus pontossága szempontjából. Ebben a tartományban pedig a húzásból származó nyomatékkomponens már a 2.hurokemelőtől kezdve túlsúlyban van a többihez képest.

Végül  $m_t$  pozíciófüggésének bemutatására, valamint a nagyságrendi viszonyok érzékeltesére a hengersor mentén, bemutatjuk a 2.4 ábrát. Itt  $m_t^x$ -t a (2.26) egyenlet szerint számítottuk:

$$m_t^x = [G + (HA + HU \sigma_a)(r \sin \gamma - a)] r \cos \gamma \quad (2.26)$$





2.4 ábra

Vagyis a terhelőnyomaték nincs redukálva, a szalagfeszültség  $\sigma_a$  munkaponti értékeit vettük és a hurokemelő kar nyugalomban van ( $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ ).

Redukálás után egy kiválasztott pozícióban, pl.  $\gamma = 30^\circ$ -nál megvizsgálva a terhelőnyomatékokat azt találjuk, hogy azok, pl. a 2.hurokemelőhöz viszonyítva csak +29 és -41 % között szórnak (annak ellenére, hogy a konkrét szűréstervnél a  $h$  lemezvastagság 6,8:1 arányban változik az 1. és a 6. hurokemelők között). A 2.3.1 pontban már láttuk, hogy a  $\theta$  redukált tehetetlenségi nyomatékok is közel esnek egymáshoz az egyes hurokemelőknél. Így minőségileg helyes képet kapunk mind a hat hurokemelőre akkor is, ha részletesebb vizsgálatainkat egyetlen hurokemelőre korlátozzuk. Ez a reprezentáns hurokemelő ebben a dolgozatban a 2-es sorszámú, mint amelyik minden szempontból eléggé középhelyzetet foglal el a többi között.

## 2.4 Rugalmas szalagfeszítés modell

### 2.4.1 Általános megfontolások

A kidolgozott szalagfeszítés modell a hengerelt anyagban az állványközben ébredő  $\sigma$  húzófeszültség és a hurokemelő kar  $\gamma$  pozíciója, valamint az állványközben a szalagfelhalmozódás  $\Delta v(t)$  sebessége között teremt kapcsolatot. A modell létrehozásánál a rugalmas alakváltozás Hooke-törvényéből indultunk ki:

$$\sigma = \epsilon E, \quad (2.27)$$

ahol  $\epsilon$  a relatív megnyúlás,  $E$  a rugalmassági modulus. A hengerelt anyagnak a húzás hatására létrejövő alakváltozásait más szerzők is rugalmasnak (arányosnak) tekintik [19, 25, 33, 34]. Ez óvatos megközelítés mind a keletkező szalagfeszültség nagysága, mind egy esetleges zárthurkú szalagfeszültség-szabályozási rendszer stabilitása szempontjából, ui. nyilvánvaló, hogy az adott magas hengerlési hőmérsékleten az alakváltozások (megnyúlások) egy része nem rugalmas, hanem képlékeny alakváltozás. A képlékeny alakváltozásokat részben figyelembe lehet venni az újszerű CS  $\frac{d\sigma}{dt}$  taggal  $m_t$  képletében (lásd a (2.21) egyenletet).

A Hooke-törvény alkalmazása a fentiekén túlmenően mérnöki szempontból helyes lehet azért is, mert ismeretes, hogy a képlékeny alakváltozásra **szerkezetileg** hasonló egyenlet érvényes [36].

Ugy tűnik, hogy az  $E$  paramétert identifikáló, adaptív hurokemelő irányítási rendszer alkalmazásával az egyszerű rugalmas szalagfeszítés modell a szalagfeszítésnek jó modellje lehet. Ennek elbírálása azonban a jövő feladatai közé tartozik s kohászok és irányítástechnikusok szoros együttműködését igényli.

Ebben a dolgozatban a számszerű vizsgálatokban [37] alapján az  $E = 5 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ -es értéket használjuk.  $E$ -re nézve a hurokemelővel foglalkozó szakirodalomban viszonyítási alapunk nincs, ui. a szerzők nem adják meg azt az értéket, amely mellett számításaik, vizsgálataik érvényesek.

## 2.4.2 A szalagfeszítés modellje

A szalag rugalmasságának feltételezésével mondhatjuk, hogy a hurokemelő kar adott  $\gamma$  szögállásánál a  $\Delta l$  szalaghossz növekedés az  $l$  állványtávolsághoz képest két részből tevődik össze: az egyik rész a feszítetlen szalag felhalmozódásából származik az adott állványközben, a másik rész a szalag feszítés hatására bekövetkező rugalmas megnyúlásából ered:

$$\Delta l = \int_0^l \Delta v(t) dt + \frac{\sigma}{E} l \quad (2.28)$$

Tekintve, hogy minden hurokemelőre érvényes egy  $\Delta l = \Delta l(\gamma)$  függvény, amely az adott geometriai elrendezésre jellemző, így a  $\gamma$ ,  $\sigma$  és  $\Delta v(t)$  közötti összefüggést megadó szalagfeszítés modell a (2.28) egyenlettel elvileg ismert. Célszerű azonban (2.28)-at átalakítani. Deriváljuk az idő szerint, majd kissé átrendezve kapjuk:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{E}{l \text{ red}} \frac{d \Delta l(\gamma)}{d\gamma} \omega_m - \frac{E}{l} \Delta v(t) \quad (2.29)$$

A (2.29) egyenletet tekintjük a rugalmas szalagfeszítés modelljének. Ez a (2.28)-al szemben, melyben  $\sigma$  egy adottsággként szerepel, egyfelől jól visszaadja a szalagfeszültség keletkezésének fizikai folyamatát. Azt ti., hogy a  $\sigma$  megváltozása a hurokemelő motor  $\omega_m$  szögsebességétől és a szalagfelhalmozódás  $\Delta v(t)$  sebességétől függ (a szalagfeszítés mint fizikai folyamat). Másfelől a (2.29) egyenlet éppen a túlzott szalagfeszültség lengések elkerülésének lehetőségére mutat rá.

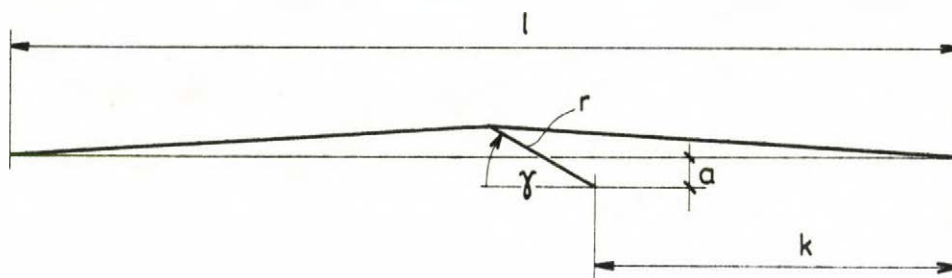
A jó minőségű  $\sigma$ -szabályozás feltétele (vagyis, hogy a "zavarások" ellenére  $\frac{d\sigma}{dt} \approx 0$  legyen) ugyanis az, hogy  $\omega_m$ -t a  $\Delta v(t)$  un. zavaró jelnek megfelelően változtassuk. Ez automatikusan teljesül, ha negatívan visszacsatolunk az áramszabályozó bemenetére  $A \frac{d\sigma}{dt}$ -vel (A-val a kívánt körerősítés állítható be).  $\frac{d\sigma}{dt}$ -t a (2.29) egyenletnek megfelelően képezzük (a szalagfeszítés mint referencia modell, az irányítás része).

A (2.29) egyenlet magyarázatot ad arra is, miért jár statizmussal a  $\sigma$ -lengések csillapítása a [19]-ben javasolt módon, vagyis amikor csak a motor fordulatszámáról (kapocsfeszültségéről) csatolnak vissza negatívan.

### 2.4.3 Geometriai viszonyok: a $\Delta l(\gamma)$ függvény

A vizsgált hurokemelő típusnál a  $\Delta l(\gamma)$  függvényre a következő kifejezés érvényes (lásd a 2.5 ábrát is):

$$\Delta l(\gamma) = \sqrt{(k+r\cos\gamma)^2 + (r\sin\gamma-a)^2} + \sqrt{(1-k-r\cos\gamma)^2 + (r\sin\gamma-a)^2} - l \quad (2.30)$$



2.5 ábra

A  $\Delta l(\gamma)$  függvényt gyakorlati célokra (pl. a hajtás modellezése, ill. szabályozása) célszerű egyszerűbb kifejezéssel közelíteni. Az Hermite-féle interpolációs eljárást alkalmazva, a közelítő interpolációs polinomot a következő alakban keressük:

$$\Delta l_n(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n, \quad x = \gamma - \gamma_{\bar{u}} \quad (2.31)$$

$n$ -et 2-re választva három feltételi egyenlet szükséges, amelyek legyenek a következők:

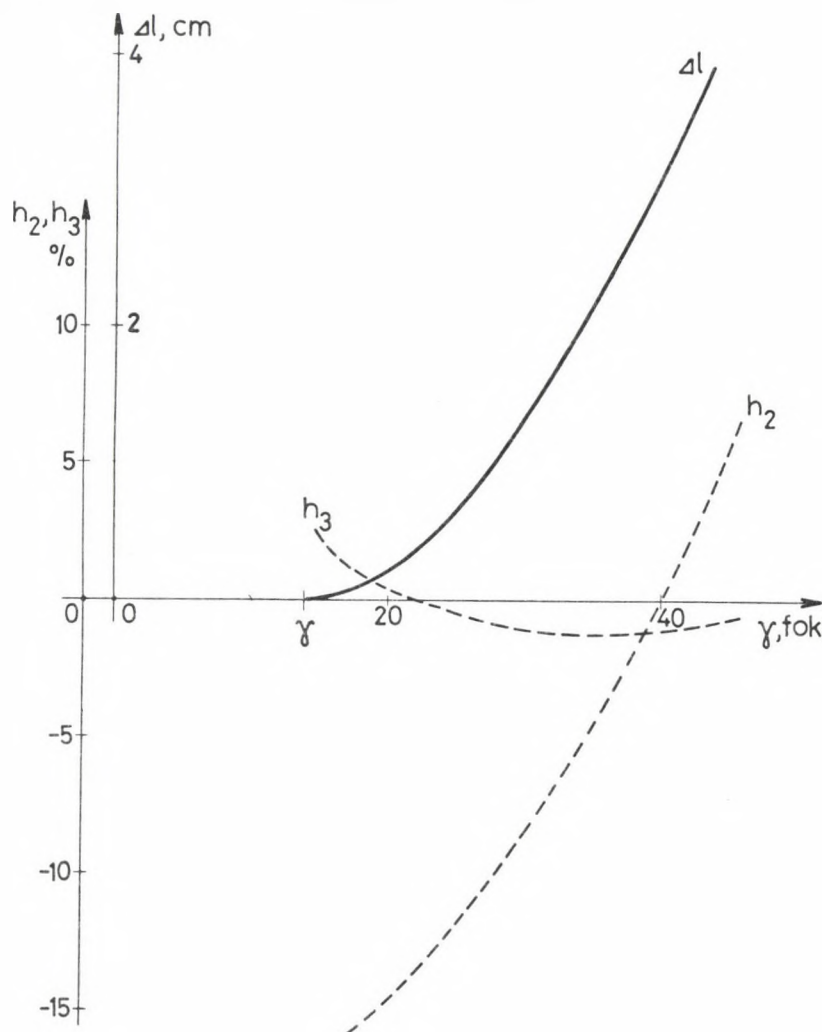
$$\Delta l_2(0) = 0 \quad (2.32)$$

$$\Delta l_2'(0) = 0 \quad (2.33)$$

$$\Delta l_2(40^\circ - \gamma_{\bar{u}}) = \Delta l(40^\circ - \gamma_{\bar{u}}) \quad (2.34)$$

(2.31)–(2.34) alapján  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  értékei meghatározhatók. Legyenek a geometriai adatok a következők:  $l = 580$  cm,  $k = 220$  cm,  $r = 75$  cm,  $a = 18$  cm. Így  $a_0 = a_1 = 0$  és  $a_2 = 4,61 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cm}}{\text{fok}^2}$  adódik. A 2.6 ábrán felrajzoltuk  $\Delta l(\gamma)$ -t.  $\Delta l_2(\gamma)$  görbéje igen közel haladt volna az ábrán a pontos görbéhez, ezért többet kifejezhetünk a pontos görbétől való relatív eltéréseinek bemutatásával (lásd a  $h_2$  vonalat). A használt hibaszámítási képlet:

$$h_2 = \frac{\Delta l_2(\gamma) - \Delta l(\gamma)}{\Delta l(\gamma)} \cdot 100, \% . \quad (2.35)$$



2.6 ábra

Megvizsgálva a harmadfokú közelítést is, azt találtuk, hogy a közelítés hibája jelentősen csökken (ezt mutatja a  $h_3$  görbe a 2.6 ábrán). A hurok feszítéssel kapcsolatban már eddig megemlített bizonytalanságok, elhanyagolások ismeretében azonban kérdéses, érdemes-e a pontosabb közelítést alkalmazni. Ebben a dolgozatban csak a másodfokú közelítést használjuk.

A rugalmas szalagfeszítésre vonatkozó (2.29) egyenletet, a  $\Delta l_2(\gamma)$  közelítés segítségével átalakítva, a továbbiakban a következő formában használjuk:

$$\frac{d\sigma}{dt} = E O (\gamma - \gamma_{\ddot{u}}) \omega_m - E 2 \Delta v(t) , \quad (2.36)$$

ahol

$$EO = \frac{2Ea_2}{l \text{ red}} \text{ és } E2 = \frac{E}{l} \cdot$$

## 2.5 Szabályozási kérdések

Ez a pont a (2.4) egyenlet kiegészítését tartalmazza.

### 2.5.1 Áramalapjel képzése

Az  $i_a$  áramalapjel a folyamatból vett jelekből ( $\gamma$ ,  $\omega_m$ ,  $\Delta v$ ) és a szűrésterv adataiból ( $b$ ,  $h$ ,  $\gamma_{Fe}$ ,  $\sigma_a$  stb.) automatikusan áll elő. Két részből tevődik össze. A "statikus" áramalapjel-résszel a hajtás munaponti áramát állítjuk be, a "dinamikus" áramalapjel-rész pedig a szalagfeszültség lengések csillapítására szolgál (lásd a 2.3.2 és a 2.4.2 pontokat):

$$i_a = [G + (HA + HU \sigma_a) (r \sin \gamma_k - a)] \frac{r \cos \gamma_k}{\text{red}} \frac{1}{k\phi} - A \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.37)$$

Itt  $\gamma_k$  a  $\gamma$ -ból késleltetéssel adódik:

$$\gamma = \gamma_k + T_t \frac{d\gamma_k}{dt} \quad (2.38)$$

$T_t$  annak az egytárolós arányos tagnak az időállandója, amellyel a  $\gamma$  pozíciójelet formáljuk. Erre a hurokemelő hajtás bekapcsolása utáni kezdeti szalagfeszültség-csúcs eliminálása érdekében van szükség. (Állandósult állapotban  $\gamma_k = \gamma$ , tehát a  $\sigma$ -szabályozás statikus pontosságát  $\gamma$  késleltetése nem érinti.)

A  $\gamma$  pozíció-jel késleltetése egyenértékű a "statikus" áramalapjel-rész késleltetésével, relaxációjával. Ismeretes, hogy olyan szabályozásoknál, ahol egyszerre cél a pontos érték-tartás és a jó követés, az alapjelet nem célszerű ugratni [39]. Ennek ellenére a fenti megoldást hurokemelő hajtásoknál eddig nem alkalmazták.



### 2.5.2 Ellenőrzőjel képzése

A 2.1 ábrán látható, hogy nincs simító fojtó a motor armatúrakörében a hajtás gyorsaságának fokozása érdekében. Így az  $i$  armatúraáram meglehetősen hullámos, szabályozási célra szűrni kell.

A (2.4) egyenletben szereplő  $i_{sz}$  szűrt áramot  $i$ -ből egyszerű szűréssel kapjuk:

$$i = i_{sz} + T_{sz} \frac{di_{sz}}{dt} \quad (2.39)$$

ahol  $T_{sz}$  a szűrés időállandója.

### 2.6 A 2.fejezet összefoglalása

A szabályozott hurokemelő hajtásra – az egyszerűség kedvéért most a  $\gamma > \gamma_{ü}$  tartományra, a folytonos áramvezetés esetére és az áramirányító vezérelhető üzemállapotára szorítkozva – összefoglalóan az alábbi egyenletek írhatók fel:

$$AEI \left( A_I i_h + \frac{1}{T_I} \int i_h dt \right) = Ri + L \frac{di}{dt} + k\phi \omega_m \quad (2.40)$$

$$\omega_m = \frac{d\gamma}{dt} \text{red} \quad (2.41)$$

$$k\phi i = \theta \frac{d\omega_m}{dt} + m_t \quad (2.42)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = EO (\gamma - \gamma_{ü}) \omega_m - E2 \Delta v(t) \quad (2.43)$$

$$\gamma = \gamma_k + T_t \frac{d\gamma_k}{dt} \quad (2.44)$$

$$i = i_{sz} + T_{sz} \frac{di_{sz}}{dt} \quad (2.45)$$

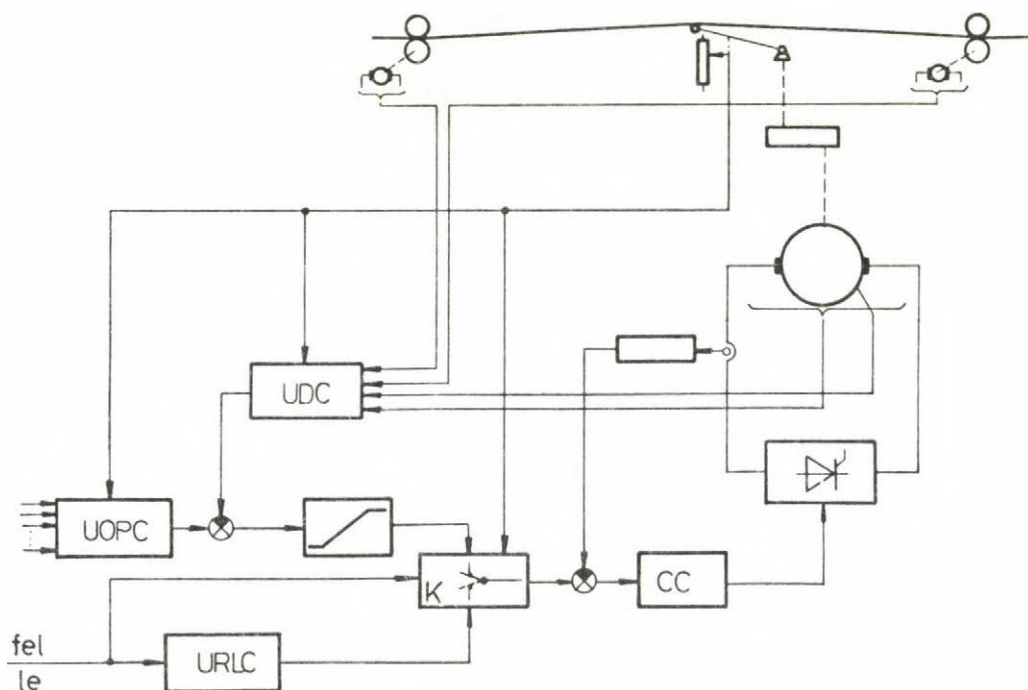
$$m_t = [G + (HA + HU\sigma + CS \frac{d\sigma}{dt}) (r \sin \gamma - a)] \frac{r \cos \gamma}{\text{red}} \quad (2.46)$$

$$i_h = [G + (HA + HU \sigma_a) (r \sin \gamma_k - a)] \frac{r \cos \gamma_k}{\text{red } k\phi} - A \frac{d\sigma}{dt} - i_{sz} \quad (2.47)$$

Bemutattuk, hogy az  $M_t$  terhelőnyomaték igen összetett, pozíció( $\gamma$ )- és sebességfüggő ( $\omega_m$ ) nyomaték.

Bevezettük a rugalmas azalagfeszítés modelljét, melynek segítségével egyfelől számítható a hajtás terhelése (folyamat-oldali alkalmazás), másfelől hatékonyan felhasználható a szalagfeszítés lengések csillapítására (irányítás-oldali alkalmazás).

Közvetve, egyenletek és leírás formájában, megadtuk a hurokemelő hajtás automatikus irányítási rendszerének továbbfejlesztett struktúráját. A választott megoldást most a funkcionális egységek feltüntetésével, blokkvázlat formájában is bemutatjuk a 2.7 ábrán.



2.7 ábra

Az UOPC munkapont számító egység a hajtás munkaponti áramalapjel-részét képezi, az UDC dinamika számító egység a dinamikus áramalapjel-részt állítja elő az ismertetett módon.

A 2.7 ábrán fel kellett tüntetni – legalább utalásszerűen – néhány gyakorlati részletet is a szabályozás megvalósításának jobb áttekinthetősége érdekében. Ilyen pl., hogy  $\Delta v$  -t a hurokemelőt közrefogó állványhajtások tachométer generátorainak segítségével képezzük, míg  $\omega_m$  érzékelését tachometrikus kapcsolással oldjuk meg. A K kapcsoló egy logikai kapcsolást szimbolizál, amely más-más áramalapjelet kapcsol az áramszabályozó bemenetére akkor, ha a hurokemelő kar a hengerlési sík alatt van ( $\gamma < \gamma_{ü}$ ), ill. fölött van ( $\gamma > \gamma_{ü}$ ). Az URLC

emelés-süllyesztés számító egység a hurokemelő karnak a nyugalmi helyzetből történő fel-emelése, ill. leeresztése idejére biztosítja az áramalapjelet. Az alapjelképző és egy időzítő egyidejű helyes beállításával elérhető, hogy a hurokemelő kar a bekapcsolási szalagfeszültség-csúcs szempontjából kedvező  $\omega_{\ddot{u}}$  szögsebességgel rendelkezzen a szalag elérésének pillanatában. (A hajtás irányítási rendszerének részleteit pontosan [29] tartalmazza.)

### 3. NAGYJELŰ VIZSGÁLAT SZIMULÁCIÓVAL

#### 3.1 A hajtás állapotter modellje

Bevezetjük a következő állapotváltozókat:

$$x_1 = i, \quad x_2 = \gamma, \quad x_3 = \omega_m, \quad x_4 = \sigma, \quad x_5 = \int i_h dt, \quad x_6 = \gamma_k, \quad x_7 = i_{sz}.$$

A (2.40)–(2.47) egyenletek alapján felírhatók az alábbi állapot-egyenletek:

$$\dot{x}_1 = [-R x_1 - k\phi x_3 + (AEI \frac{x_5}{T_l} + A_I i_h)] \frac{1}{L}, \quad (3.1)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_3}{red}, \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{k\phi x_1 - m_t}{\theta}, \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_4 = EO (x_2 - \gamma_{\ddot{u}}) x_3 - E2 \Delta v(t), \quad (3.4)$$

$$\dot{x}_5 = i_h, \quad (3.5)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{x_2 - x_6}{T_t}, \quad (3.6)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{x_1 - x_7}{T_{sz}}, \quad (3.7)$$

ahol

$$m_t = [G + (HA + HU x_4 + CS \dot{x}_4) (r \sin x_2 - a)] \frac{r \cos x_2}{red}, \quad (3.8)$$

$$i_h = [G + (HA + HU \sigma_a) (r \sin x_6 - a)] \frac{r \cos x_6}{red k\phi} - A \dot{x}_4 - x_7. \quad (3.9)$$

Bár az áramirányítót a telítődési határok között lineáris elemnek tekintjük, a (3.1) - (3.9) állapotegyenlet-rendszer nemlineáris.

A hurokemelő hajtás nagyjelű vizsgálata megkívánja, hogy az állapottér modell a hajtás minden üzemállapotában, a hurokemelő kar teljes munkatartományában érvényes legyen. Ennek érdekében figyelni kell az áram irányváltásának, az áramirányító telítődésének és a kar szalaggal való ütközésének bekövetkezését (un. állapot-eseményeket) és módosítani kell az állapotegyenlet-rendszert az új üzemállapotnak megfelelően. Az események bekövetkezésének pillanatában (szimulációs terminológiával: esemény-idő) az  $x_3$  állapotváltozó, ill. az  $\dot{x}_1$ ,  $\dot{x}_2$ ,  $\dot{x}_3$ ,  $\dot{x}_4$ ,  $\dot{x}_5$  állapotváltozó-deriváltak közül az adott eseményhez kapcsolódók az idő függvényében ugrás jellegű szakadást, diszkontinuitást mutatnak. (Természetesen  $x_3$  ugrása annak következménye, hogy a kar és a szalag ütközését pillanatszerűnek idealizáltuk.)

A fenti állapot-eseményekhez rendre a  $J_i$ ,  $J_u$  és  $J_\gamma$  egész típusú logikai változókat rendeljük, melyekre fennáll:

$$\begin{aligned} 0 < i \text{ esetén } J_i &= 1, \text{ egyébként } J_i = 0 \\ -U_{v1} < u_v < U_{v2} \text{ esetén } J_u &= 1, \text{ egyébként } J_u = 0 \\ \gamma_u < \gamma \text{ esetén } J_\gamma &= 1, \text{ egyébként } J_\gamma = 0. \end{aligned}$$

E változók segítségével az állapottér modell a következőképpen egészíthető ki:

(a) A (3.1) egyenlet helyett a (3.10) egyenletet kell alkalmazni:

$$\dot{x}_1 = J_i \left[ -R x_1 - k\phi x_3 + AEI \left( \frac{x_5}{T_1} + A_I i_h \right) \right] \frac{1}{L} \quad (3.10)$$

Ezzel elérhető, hogy abban az esetben, amikor az áram pozitív ( $J_i=1$ ), visszakapjuk a (3.1) egyenletet, akkor pedig, amikor negatív áram folyik az armatúrákörben ( $J_i=0$ ) – ami az egy készlet félvezető áramirányító miatt fizikailag lehetetlen – akkor  $\dot{x}_1 = 0$ .

(b) Az áramirányító telítődésének figyelembevétele a következő kiegészítésekkel érhető el:

$$\dot{x}_1 = J_i \left[ -R x_1 - k\phi x_3 + AEI \left( \frac{x_5}{T_1} + A_I J_u i_h \right) \right] \frac{1}{L} \quad (3.11)$$

és

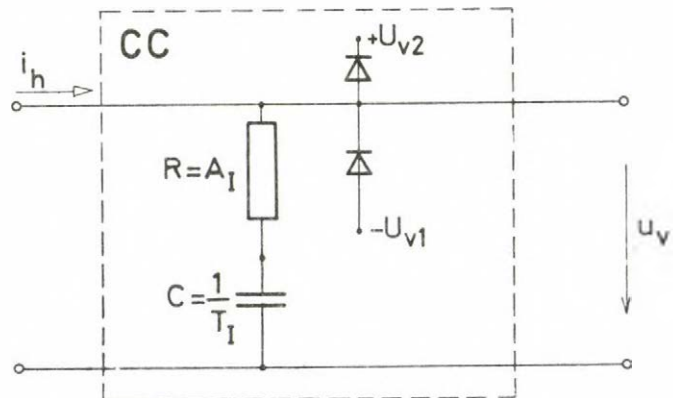
$$\dot{x}_5 = J_u i_h \quad (3.12)$$

Ezáltal tulajdonképpen a tirisztoros tápegység gyújtókörének  $u_v$  vezérlőfeszültségét módosítottuk (lásd a (2.5) egyenletet is):

$$u_v = \frac{1}{T_I} \int i_h dt + A_I J_u i_h \quad (3.13)$$

A telítődési határok között ( $J_u=1$ ) visszakapjuk a (3.10) és (3.5) egyenleteket. Ha  $u_v$  túlhaladná az  $U_{v2}$ , ill.  $-U_{v1}$  értékeket ( $J_u=0$ ), akkor megáll az  $u_v$  vezérlőfeszültség változása és ezzel együtt a tápegység AEI  $u_v$  kimenő feszültsége is a telítési értéken marad.

Áramkörileg a fenti megoldás egyenértékű egy passzív R-C elemekből álló áramszabályozó kimenő feszültségének megfogásával (3.1 ábra):



3.1 ábra

- (c) A hurokemelő kar szalaghoz ütközésekor egyszerre több módosításra van szükség az állapotegyenlet-rendszerben. Az ütközés pillanatában  $x_3$ -t át kell számítani a  $c$  faktoral, melynek kifejezését a (2.20) egyenlet tartalmazza:

$$x_{3(+)} = c x_{3(-)} \quad , \quad \gamma = \gamma_{\bar{u}} \quad (3.14)$$

ahol  $x_{3(+)}$  az ütközés utáni,  $x_{3(-)}$  az ütközés előtti értéke az  $x_3$  állapotváltozónak. Ezáltal  $\dot{x}_2$  a (3.2) egyenletben szintén ugrik.  $\dot{x}_3$  a terhelés és a tehetetlenségi nyomaték ugrása miatt is ugrik (lásd a (3.3) egyenletet):



$$m_t = \left\{ \frac{G_h}{2} + J_\gamma \left[ \frac{G_{sz}}{2} + (HA + HU_{x_4} + CS\dot{x}_4) (r \sin x_2 - a) \right] \right\} \frac{r \cos x_2}{red} \quad (3.15)$$

és

$$\theta = \theta_m + J_\gamma \frac{\theta_{sz}(x_2)}{red^2} \quad (3.16)$$

$\dot{x}_4$ -ra a (3.4) egyenlet helyett (3.17) lesz érvényes:

$$\dot{x}_4 = J_\gamma [EO(x_2 - \gamma_{\ddot{u}}) x_3 - E2 \Delta v(t)] \quad (3.17)$$

$i_h$  pedig a következőképpen módosul:

$$i_h = I_k - x_7, \quad t_0 \leq t < t_0 + \tau \quad (3.18)$$

illetve

$$i_h = \left\{ \frac{G_h}{2} + J_\gamma \left[ \frac{G_{sz}}{2} + (HA + HU_{\sigma_a}) (r \sin x_6 - a) \right] \right\} \frac{r \cos x_6}{red \cdot k\phi} - A\dot{x}_4 - x_7,$$

$$t_0 + \tau \leq t.$$

Itt  $I_k$  az az állandó áram, amellyel  $\tau$  ideig gyorsítjuk a hajtást, miután az a kar felemelésére vonatkozó "fel" parancsot kapott a  $t_0$  időpontban. (A kar leeresztését az egyszerűség kedvéért nem tárgyaljuk most, elvileg nem tartalmaz újat.)

Összefoglalva: a hurokemelő hajtásra a fenti kiegészítések után a következő állapotter modellt adódik:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}, t) \quad (3.19)$$

$$\left. \begin{array}{l} \underline{x}_0 = \underline{x}(t_0) \\ \underline{J}_0 = \underline{J}(t_0) \end{array} \right\} \text{ -- kezdeti feltételek}$$

ahol

$$\underline{x}^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7] \quad \text{– állapot vektor}$$

$$\underline{u}^T = [I_K, \Delta v, \sigma_a] \quad \text{– bemenő vektor}$$

$$\underline{J}^T = [J_i, J_u, J_\gamma]$$

$\underline{f}$  – nemlineáris vektorfüggvény.

### 3.2 Numerikus szimuláció

A (3.19) nemlineáris állapot-egyenletet csak numerikus úton lehet megoldani [41]. Tekintettel arra, hogy a diszkontinuitások miatt un. kombinált, folytonos-diszkrét szimulációt kell alkalmazni [42] a számos numerikus integráló eljárás közül könnyű indíthatósága alapján egylépéses módszert, egy negyedrendű Runge-Kutta-eljárást választottunk [43]. A szimulációs program FORTRAN nyelven CDC 3300-as számítógépre készült el. (Dinamikus rendszerek szimulációjának általános kérdéseiről lásd [44]-et.)

Az állapot-események megkeresésére, vagyis a pontos esemény-idő meghatározására a kidolgozott szimulációs programban az egyszerű felezéses eljárást alkalmaztuk.

A (3.19) egyenlet numerikus integrálása állandó  $h$  lépésnagysággal folyik, miközben minden lépés után ellenőrizzük, hogy nem következett-e be állapot-esemény a lépés megtétele alatt. Ha az integrálási lépés végén adódó állapotváltozók közül akárcsak egy nem felel meg a rendszer azon állapotának, amelyet  $\underline{J}$  értéke jellemez, akkor a lépés eredményét elvetjük.  $\frac{h}{2}$  lépésnagysággal újból integrálunk, majd ismét ellenőrzés következik. Ezt az eljárást addig kell folytatni, amíg az ellenőrzés eredménye az lesz, hogy az adott  $\frac{h}{2^m}$  nagyságú előrelépés esetén nem ugrunk át állapot-eseményt (itt  $m$  a felezések száma). Az integrálás  $\frac{h}{2^{m+1}}$  nagyságú lépéssel folytatódik. Akkor mondjuk, hogy meghatároztuk az esemény-időt, ha a figyelt  $i$ ,  $u_\gamma$  vagy  $\gamma$  változók valamelyike  $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_u$ , ill.  $\epsilon_\gamma$  pontossággal megközelíti az adott állapot-eseményhez tartozó határértéket. Ekkor  $\underline{J}$  megfelelő elemét megváltoztatjuk, un. jelváltás történik. A rendszer megváltozott állapotának megfelelő (3.19) egyenletet ezután ismét  $h$  lépésnagysággal integráljuk tovább.

A (3.19) állapotegyenlet numerikus integrálásának eredményeképpen megkapjuk az állapotváltozók (és a belőlük számított jelek, mint pl.  $u_\gamma$ ) időfüggvényét. A szimuláció könnyebb kiértékelhetősége érdekében a vizsgálni kívánt időfüggvényeket a szimulációs program-

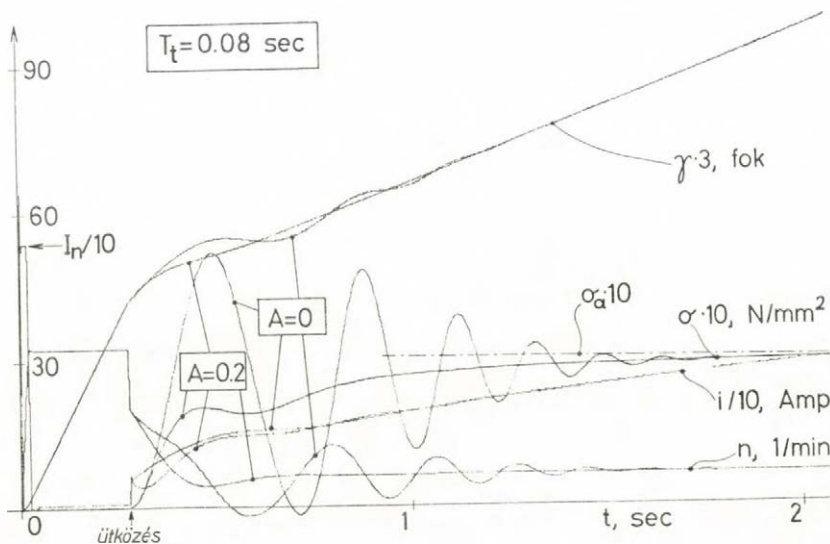
hoz csatolt rajzolóprogrammal plotteren kirajzoltatjuk. Ilyen rajzok segítségével vizsgálható a szabályozott hurokemelő hajtás dinamikája, ill. – kellően hosszú ideig folytatva az integrálást – a statikus pontossága.

### 3.3 Minőségvizsgálat szimulációval

#### 3.3.1 Két szimulációs példa

A 3.2 ábrán a hurokemelő hajtás néhány jellemző mennyiségének időfüggvényét mutatjuk be egy plotterrajz segítségével a hajtás indulási folyamatainak szemléltetésére..

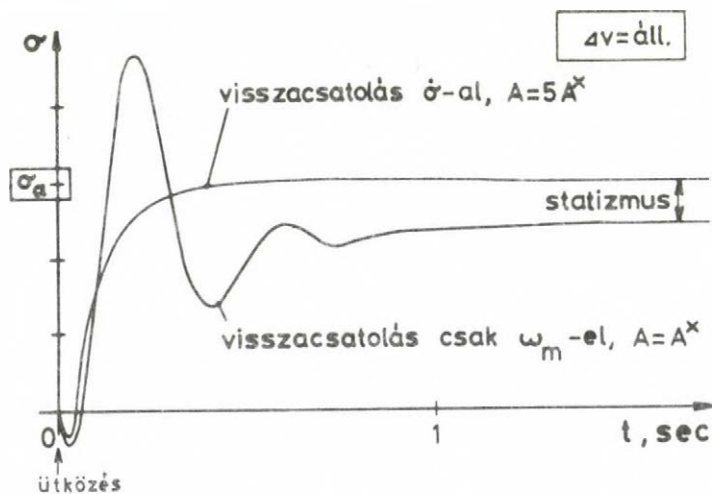
A motor  $I_K = I_n = 540$  A névleges árammal gyorsul, közben a motorfordulatszám jó közelítéssel lineárisan nő. Majd az  $i_a$  áramalapjel s vele az  $i$  armatúraáram is lecsökken (lásd a (3.18) egyenletet), a motor állandó fordulatszáma mellett a hurokemelő kar  $\gamma$  pozíciója lineárisan nő. Az ütközés pillanatában jelentős fordulatszám csökkenés következik be. Az  $i$  armatúraáram az alapjel ugrást követve hirtelen megnő s megkezdődik a  $\sigma$  szalagfeszültség kialakulása is. Tipikus zavarójelként  $\Delta v$  -t sebességugrás függvénynek tekintettük. Látható, hogy a hurokemelő kar folytonos emelkedése ellenére a szalagfeszültség, megfelelő paraméterválasztás esetén, hamar eléri  $\sigma_a$  előírt értékét, majd azt pontosan tartja a hatékony csillapítás következtében. Az ábrán egyúttal szemléltetni tudjuk azt az esetet is, amikor nincs visszacsatolás  $\dot{\sigma}$  -al ( $A=0$ ). Ekkor, változatlan egyéb feltételek mellett, a szalagfeszültség erősen leng, leng a motorfordulatszám is és a  $\gamma$  pozícióban is lengés tapasztalható.



3.2 ábra

A 3.2 ábra módot ad arra, hogy kitérjünk a modellverifikáció kérdésére. Ismeretes, hogy egy fizikai folyamat valósághű modellezése érdekében nem elégséges a folyamat lényegi összefüggéseit tartalmazó matematikai modell létrehozása. A modellt működtetni kell a digitális számítógépen bizonyos numerikus módszerek, programozási eljárások segítségével. Eközben – pl. egy fizikailag stabilis folyamatot labilitásra hajlamos numerikus eljárással integrálva – könnyen hamis képet kaphatunk. Szükséges tehát minél több oldalról meggyőződnünk a kapott szimulációs eredmények helyességéről. Ha az ellenőrző vizsgálatok azt mutatják, hogy a szimulációs eredmények reálisak, akkor a matematikai modellen túlmenően a szimulációs program is helyes. Ezen az alapon az, hogy a 3.2 ábrán a  $\sigma$  szalagfeszültség a  $\sigma_a$  előírt értékhez tart, ha nem is bizonyítja, de hihetővé teszi, hogy a szimulációs program – legalábbis a hurokemelő hajtás statikájára nézve – helyes.

Itt hasonlítjuk össze még egyszer egy szimulációs példa segítségével a 2.4.2 pontban javasolt szalagfeszültség csillapítási megoldást a [19]-ben említett módszerrel (3.3 ábra).



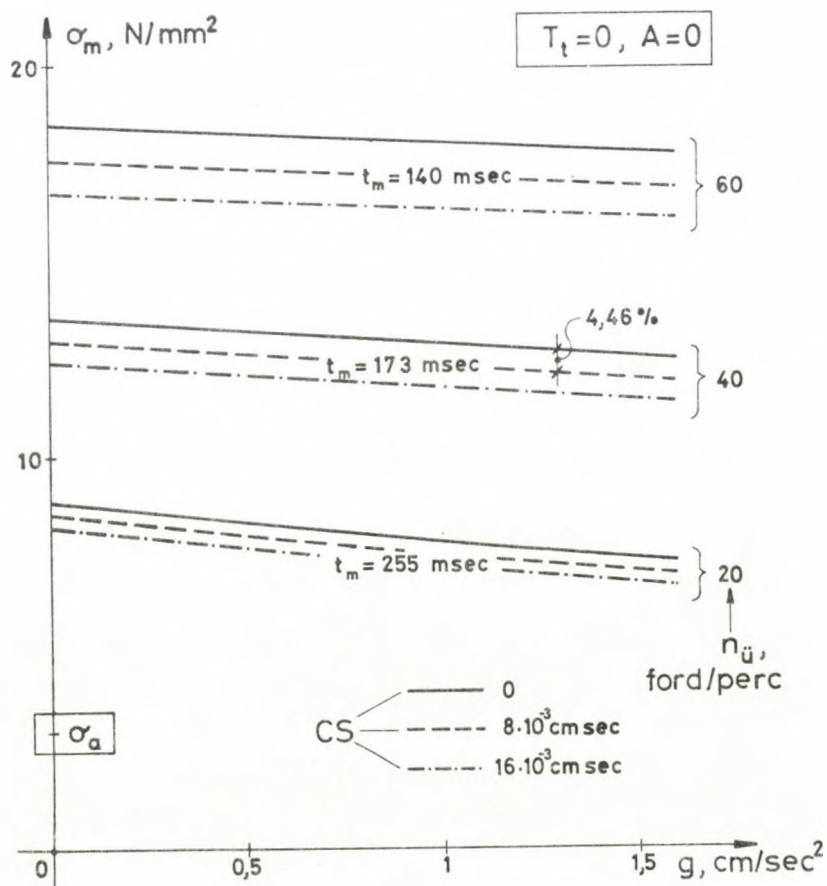
3.3 ábra

Az ábra jól szemlélteti a csak motorfordulatszámra történő visszacsatolás elégtelenségét. Az  $A$  csillapítási együtthatót növelni kellene a lengések miatt, akkor azonban a statizmus rohamosan tovább nőne ( $A=5A^*$ -hoz már kb. 100%-os statizmus tartozik). Ugyanakkor az általunk javasolt módszer gyakorlatilag nem jár statizmussal, az  $A=5A^*$  érték minden korlátozás nélkül beállítható, s mint az ábra mutatja, hatékony lengéscsillapításra vezet.

### 3.3.2 A bekapcsolási szalagfeszültség-csúcs vizsgálata

A hurokemelő hajtások irányítására ezidáig alkalmazott eljárások mellett a hengerelt szalagban, a hurokemelő karnak a szalaghoz való ütközése után, átmenetileg a munkaponti szalagfeszültség 3-5 -szörösét is elérő bekapcsolási szalagfeszültség-csúcs alakult ki. A kidolgozott szimulációs program segítségével lehetővé vált e jelenség részletes tanulmányozása: melyek a keletkező  $\sigma_m$  feszültség-csúcsot meghatározó tényezők, ill. milyen mértékben csökkenthető  $\sigma_m$  a feszültséglengek csillapítására javasolt eljárással.

Az elemzés nagyszámú bekapcsolás szimulációjával történt. Ezúttal a folyamatot nem a hurokemelő kar nyugalmi helyzetéből, hanem  $\gamma = \gamma_{\bar{u}}$  pozíciójából indítottuk, miközben az integrálás kezdeti feltételei között változtattuk a kar  $n_{\bar{u}}$  ütközési fordulatszámát. Zavarójelnek a  $\Delta v = gt$  sebességugrás függvényt tekintettük, s itt  $g$ -t szintén változtattuk. A szimulációt minden alkalommal a bekapcsolási feszültség-csúcs kialakulásának  $t_m$  időpontjáig folytattuk. Időfüggvényeket ez alkalommal nem rajzoltunk ki, hanem  $\sigma_m$ -t és  $t_m$ -et irattunk csak ki, ami a programnak egy maximum-kereső programrészlettel történő bővítésével vált lehetségessé. A kapott eredményeket a 3.4 és 3.5 ábrák mutatják.



3.4 ábra



**3.3.2.1** A bekapcsolási feszültség-csúcsot először a **csillapítás nélküli** esetre vizsgáltuk ( $A=0$ ). A 3.4 ábrából kitűnik, hogy  $\sigma_m$  az  $n_{\ddot{u}}$  ütközési fordulatszámától döntő mértékben függ, s már alacsony fordulatszámánál is többszöröse a  $\sigma_a$  munkaponti szalagfeszültségnek. Itt, a bekapcsolási feszültségek  $A=0$  esetre vonatkozó vizsgálatánál tudunk visszatérni alkalmas módon egy, a hajtás  $m_t$  terhelő nyomatékával kapcsolatban nyitva maradt kérdésre. Eddig nem közöltük, hogy a hurokemelő hajtás analízise során milyen értéket adtunk a belső anyagsűrűdást figyelembe vevő CS együtthatónak (lásd a 2.3.2 pontot). Most azonban, a szimulációs programot CS különböző értékeivel is lefuttatva s a kapott eredményeket a 3.4 ábrán együtt ábrázolva, könnyen alátámaszthatjuk CS értékére vonatkozó választásunkat.

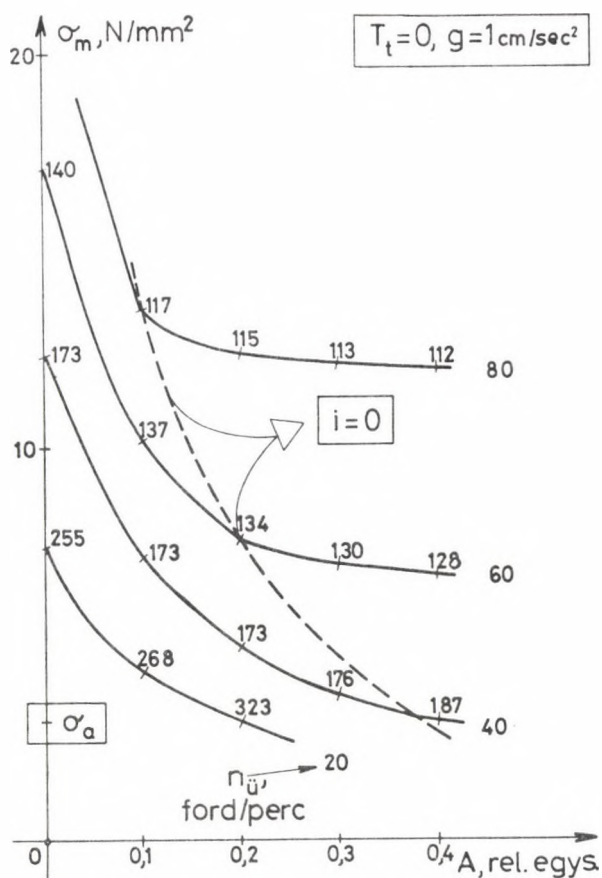
Közelebbi támpont hiányában azt a feltételt szabtuk CS értékére nézve, hogy a bekapcsolási szalagfeszültség-csúcsot ne csökkentse 5%-nál nagyobb mértékben. A 3.4 ábrából látható, hogy ez a feltétel  $CS=8 \cdot 10^{-3}$  cm sec mellett teljesül. A jelen dolgozatban a vizsgált hurokemelő hajtással kapcsolatos megállapítások, ill. közölt ábrák – értelemszerűen a 3.4 ábra kivételével – CS fenti értéke mellett érvényesek.

A 3.4 ábrán, mint a hajtás egy jellemző dinamikai adatát,  $t_m$  értékét is feltüntettük. Ez görbecsoportonként 1-2 msec-os pontossággal állandó, csak az  $n_{\ddot{u}}$  ütközési fordulatszámától függ.

**3.3.2.2** A 3.5 ábra mutatja, hogy a szalagfeszültség deriváltjával a 2.4.2 pontban javasolt módon történő negatív visszacsatolás a  $\sigma_m$  bekapcsolási feszültség-csúcsot radikálisan csökkenti, legalábbis  $A$  kis értékeinél. (Az  $A$  erősítési tényező normalizálásának alapja  $A_n = 10 \frac{cm^3}{V}$ .) Különösen a nagyobb  $n_{\ddot{u}}$  fordulatszámokra vonatkozó görbéknel jól látszik, hogy  $A$  növelése bizonyos érték fölött (lásd a töréspontokat összekötő szaggatott vonalat) alig van hatással  $\sigma_m$ -re. Ez érthető, hiszen a hurokemelő motor pozitív forgásiránya mellett fékezni – mozgási energiát kivenni a rendszerből – nem lehet, bármilyen gyorsan zárjuk is le az áramirányítót. Ehhez az armatúrakörben negatív áramnak kellene folyni, ami a félvezetős táplálás miatt nem lehetséges. Egyedüli törekvésünk az lehet, hogy eleve ne vigyünk be túl sok energiát a rendszerbe az ütközés után, amit később azután nem tudunk visszanyerni. Erre szolgál a statikus áramalapjel-rész relaxációja (lásd a 2.5.1 pontban). Ennek a kérdésnek sokoldalú elemzése, tulajdonképpen a  $T_t$  időállandó optimalizálása, az 5.féjezetben található.

A 3.5 ábrán a görbéket  $t_m$ -mel paramétereztük, az értékek msec-ban értendők. Az  $n_{\ddot{u}} = 20$  ford/perc -es görbe esetében az látható, hogy a bekapcsolási tranziens a csillapítás növelésével egyre jobban elhúzódik, végül a szalagfeszültség már aszimptotikusan éri el állandó-





3.5 ábra

sult értékét,  $u_i$  se feszültség túllendülés, se lokális maximum nincs, a görbe  $A=0,25$  tájékán megszakad. Az  $n_{\ddot{u}} = 40$  ford/perc görbe azt mutatja, hogy a motor szabályozható marad csaknem a teljes  $A=0-0,4$  tartományban, csupán  $\sigma_m$ -et kell tudni valamilyen módon tovább csökkenteni. Bár a görbe így is eléri a  $\sigma_a$  értéket, szimulációs tapasztalatainkból tudjuk, hogy  $A > 0,2$  fölött a tranziensek elhúzódnak, a hajtás lelassul, így ez a görbe szakasz nem tekinthető mértékadónak. Bebizonyosodott, hogy  $n_{\ddot{u}} \approx 40$  ford/perc esetén,  $T_t$  alkalmas megválasztásával,  $A = 0,1 - 0,2$ -es erősítésnél a bekapcsolási szalagfeszültség-csúcs eliminálható; ezt mutatja a 3.2 ábra is, melynek  $\Lambda \neq 0$  esetre vonatkozó görbéi az előbbi feltételek mellett készültek. ( $n_{\ddot{u}} = 60$  ford/perc esetén,  $A = 0,1$  és  $0,2$  erősítéseknél és  $T_t$  optimális értékénél 120, ill. 106 %-os szalagfeszültség túllendülés tapasztalható.)

## 4. AZ ÁRAMIRÁNYÍTÓ PONTOS MODELLEZÉSE

### 4.1 Ujszerű áramirányító modell

#### 4.1.1 A pontos modell szabályozástechnikai jelentősége

A meleghengerművi hurokemelő hajtással szemben támasztott egyik legfontosabb dinamikai követelmény a gyors működés. Ezt a célt szolgálja a vizsgált hurokemelő hajtásnál az ikermotor alkalmazása, az armatúraköri simító fojtó elhagyása, valamint a reduktor is.

A gyorsválaszú egyenáramú hajtásokban azonban az áramirányítók alkalmazása speciális szabályozástechnikai problémákat vet fel, melyek az áramirányítók sajátos tulajdonságaiból fakadnak. A telítődésről és az egyenirányú áramvezetésről már volt szó. A gyorsműködésű hajtásokban számolni kell két további sajátossággal is, mégpedig a kimenő feszültség hullámosságával, valamint azzal, hogy tirisztoros gyújtás csak diszkrét időpillanatokban következhet be. Ezek a speciális áramirányító-tulajdonságok hullámos armatúra áramot – esetleg szaggatott áramvezetést – és bizonyos szabályozási késést eredményeznek. Ismeretes, hogy szaggatott áramvezetés esetén az áramirányító erősítése lecsökken, továbbá az armatúrakör átviteli tényezője jellegében is megváltozik. Az áram hullámossága miatt pedig gondolni kell a szubharmonikus lengések veszélyére.

#### 4.1.2 Az ismert módszerek áttekintése

Az áramirányító modellezés ma már szinte önálló tudományterület. Kiterjedt irodalmából csak néhány munkát sorolunk most fel [45-52].

A sokféle áramirányító modellezési eljárás egy lehetséges felosztása a **félvezetők modellezése** alapján történhet. E szerint a módszerek két fő csoportba oszthatók.

- Ha a félvezetőket kétértékű ellenállásnak tekintjük, akkor az áramirányító kap-

csolását egyetlen egyenletrendszerrel lehet leírni, minthogy topológiája nem változik. Itt pontossági és stabilitási problémák léphetnek fel az időállandók több nagyságrendű eltérései miatt. Nagy teljesítményszinteken általában bizonyos kompromisszumra van szükség a félvezetők nyitóirányú feszültségese és záróirányú szivárgó árama között.

- Ha a félvezetőket ideális kapcsolóknak tekintjük, akkor a különféle kapcsolási állapotokhoz külön egyenletrendszer tartozik, mivel a topológia változik. Ez a félvezető modellezés általában megköveteli a lehetséges kapcsolási állapotok gondos számbavételét és a nekik megfelelő áramköri egyenletek felírását, vagy a módszerek egy részénél jelentős mennyiségű mátrixműveletet igényel.

A fenti eljárásoknak többféle továbbfejlesztett változatát hozták létre az egyes alapszabványok korlátainak, hátrányainak kiküszöbölésére s még ma is újabb és újabb eljárások születnek. Az áramirányító szimuláció eddigi fejlődésére visszatekintve összefoglalóan megállapítható, hogy a kidolgozott módszerekre elsősorban áramköri szemléletmód jellemző. Szabályozástechnikai szempontból azonban az áramirányító **hatásai** fontosak, áramköri felépítése és működése közömbös. Villamos hajtások vizsgálatánál a pontos áramirányító modell csak egy eszköz a szabályozástechnikus számára, melynek segítségével egy-egy önmagában is bonyolult, 6-10 energiatárolós szabályozott hajtás dinamikai analizise kellő pontossággal elvégezhető. Következésképpen az áramirányító modellel szemben követelmény, hogy a teljes rendszermodellnek csak kis részét tegye ki, egyszerű algoritmusú legyen és ne igényeljen sok számítási időt. Ellenkező esetben ugyanis a szabályozott hajtás vizsgálata elkerülhetetlenül háttérbe szorul. Más szóval, mint ez gyakran történik, az áramirányító modellezése némileg öncélúvá válik, míg a hozzá csatlakozó hajtással kapcsolatban a szerzők feltevésekkel, egyszerűsítésekkel élnek. (Ezek közül leggyakoribb bizonyos időtartamra az állandó motorfordulatszám, ill. gyújtásszög feltételezése.)

#### 4.1.3 Az algoritmikus módszer ismertetése [31]

4.1.3.1 A meleghengerművi hurokemelő hajtás vizsgálata során használt pontos áramirányító modellhez a (3.19) állapottér-egyenlet egyszerű bővítésével jutunk el. Előtte azonban

néhány szokásos **megszorítást** teszünk:

- A félvezetőket ideális kapcsolóknak tekintjük.
- A fedés jelenségét ez alkalommal elhanyagoljuk.
- A félvezetőket védő R-C elemek hatását nem vizsgáljuk.
- A betápláló hálózatot impedanciamentesnek vesszük (un. végtelen hálózat).

4.1.3.2 Az áramirányítót modellezése során, a szabályozástechnikai megközelítés-módot érvényesítve, "fekete doboznak" tekintjük, azaz eltekintünk konkrét kapcsolásától. Azonban figyelembe vesszük az egyenirányított feszültség **hullámosságát**. Ennek kifejezésére eggyel növeljük a bemenő  $\underline{u}$  vektor elemeinek számát:

$$\underline{u}_s = \begin{bmatrix} \underline{u} \\ u_\alpha \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

ahol  $\underline{u}_s$  a kibővített bemenő vektor,  $u_\alpha$  pedig az áramirányító kimenő feszültségének pillanatértéke.

Ebben a tekintetben a módszer némileg hasonlít Nieniewskinek a félvezetős táplálású egyenáramú motor szimulációjára alkalmazott eljárásához [49]. Azonban módszerének zárt-hurkú szabályozási rendszerben való alkalmazása nem volt kidolgozva [50].

4.1.3.3 Tekintve, hogy a **gyújtásszög** vezérlő rendszer növeli a diszkontinuitások számát, így  $\underline{J}$  elemeinek számát is növeljük eggyel:

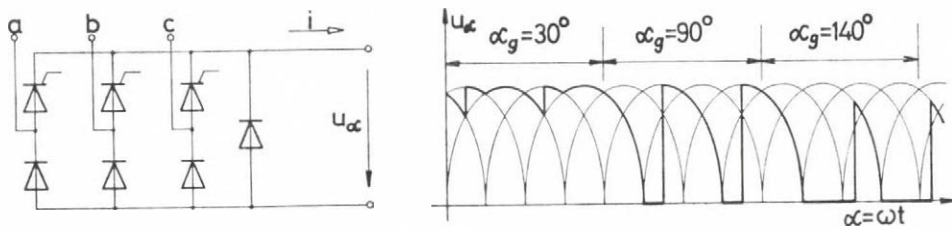
$$\underline{J}_s = \begin{bmatrix} \underline{J} \\ J_\alpha \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Itt  $J_\alpha$  megmutatja, hogy történt-e tirisztoros gyújtás vagy sem.

Mielőtt bemutatnánk egy konkrét áramirányító esetében  $u_\alpha$  és  $J_\alpha$  meghatározását, megállapíthatjuk, hogy a tett megszorítások mellett a pontos modell nem igényel további állapotváltozókat, vagyis nem növeli az állapotegyenletek számát. Azonban, ha pl. a fedés lényeges szerepet játszana egy adott hajtásban, akkor a több energiatárolónak megfelelően, természetesen, több állapotváltozó jellemezné a rendszert. A fedés figyelembevétele nem módosítja a módszer alapgondolatát.

4.1.3.4 Bár a vizsgált hurokemelő hajtásban teljesen vezérelt hid-egyenirányító táplálja a nyomatékmozgató, a kidolgozott áramirányító modellezési eljárást féligvezérelt hidkapcsolású egyenirányító esetére mutatjuk be részletesen. Ennek egyszerűen az az oka, hogy a féligvezérelt egyenirányító kimenő feszültségének hullámformája a változatosabb, modellezési szempontból a féligvezérelt egyenirányító esetként – mutatis mutandis – mintegy magában foglalja a teljesen vezérelt hidkapcsolást is.

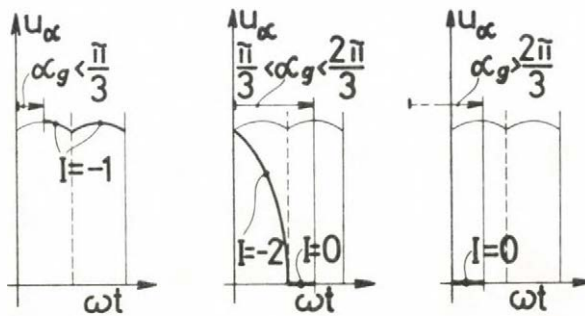
A 4.1 ábrán a féligvezérelt hid-egyenirányító vázlata, valamint különböző  $\alpha_g$  gyűjtásszögek mellett a kimenő feszültsége látható.



4.1 ábra

A modell létrehozásánál kihasználtuk azt a tényt, hogy az áramirányító működésében  $\frac{2\pi}{3}$  radiános periodicitás figyelhető meg: a tirisztorokat legkorábban (azaz  $\alpha_g = 0$  gyűjtásszöggel) csak  $120^\circ$ -onként gyűjthetjük be.

A 4.2 ábrán bemutatjuk az egyes hullámforma típusokat, amelyek előfordulhatnak ezen  $\frac{2\pi}{3}$  radiános intervallumok alatt, melyek kezdete mindig a tirisztorok természetes kommutációjának helye.



4.2 ábra

A különböző hullámforma-darabok jelölésére az I egész változót használjuk, amely a -1, -2 és 0 értékeket veheti fel. Be lehet látni, hogy  $u_\alpha$  felírható a következő formában:



$$u_a = U_{VM} \sin [\omega t - (M+I) \frac{\pi}{3}] \quad , \quad \text{ha } I = -2, -1 \quad (4.3)$$

és

$$u_a = 0 \quad , \quad \text{ha } I = 0 \quad ,$$

ahol  $M$  a szimuláció fizikai idejének  $\frac{\pi}{3}$  egységeiben történő számítására szolgál ( $M=0,1,2,3,\dots$ ),  $U_{VM}$  pedig a vonali feszültség csúcserőke.

A (4.3) egyenlet kifejezi, hogy a szinuszhullámot, melynek bizonyos része  $u_a$ -t adja, időről-időre léptetni kell  $\frac{\pi}{3}$ -al, mégpedig  $M$  és  $I$  aktuális értékétől függően.  $M$  kizárólag a fizikai időre vonatkozik, s értékét a természetes kommutációnak megfelelő pillanatokban növeljük. Ellenben  $I$  értéke megváltozhat a természetes kommutáció pillanataiban, ill. tirisztor-gyújtáskor is.

A vizsgált áramirányító esetére a IV. táblázat mutatja  $I$  egymás után felvehető értékeit. A szaggatott nyíl szerint tirisztor-gyújtás hatására változik  $I$ , míg a folytonos nyíl szerint a természetes kommutáció pillanataiban  $I$  érték-változása  $\frac{2\pi}{3}$ -os ciklikusságot mutat. A táblázatban feltüntettük az egyik ciklusból a másikba való átmenet esetét is, azaz  $M$  páratlan-páros átmenetét.

		M		
		páros	páratlan	páros
I	0	0	0	0
	-2	-2	-2	-2
	-1	-1	-1	-1

IV. táblázat

Végeredményben, ha  $I \neq 0$ , úgy tekinthetjük, hogy  $I$  a monoton növekvő  $M$ -re szuperponálódva fejt ki hatását. Előfordul, hogy mindkét változónak úgy módosul az értéke, hogy a szinuszhullám  $\frac{\pi}{3}$ -os léptetése nem következik be ( $I$  -1-ről -2-re változik, és  $M$  értéke nő eggyel).

A továbbiakban a tirisztor-gyújtásoknak, mint állapot-eseménynek a kezelését mutatjuk be.

A gyújtásszög vezérlő rendszert az un. gyújtási törvény jellemzi. A példa kedvéért ez legyen a következő:

$$\alpha_g = \pi \left( 1 - \frac{u_v}{10} \right) \quad ; \quad 0V \leq u_v \leq 10V \quad . \quad (4.4)$$



(A (4.4) egyenlet helyett alkalmazhatjuk az inverz-koszinusz gyújtási törvényt is, ha a hajtás konkrét megvalósítása úgy kívánja; ez a modellezés elvét nem érinti.)

Az áramirányító pontos modellezésére kidolgozott eljárásban a gyújtások észlelése az  $\alpha_g$  gyújtásszögnek egy  $\alpha_{tr}$  transzformált szöggel való összehasonlításán alapul.  $\alpha_{tr}$  a fizikai folyamat valós idejét képviseli, de mindig az utolsó gyújtáshoz szinkronizálva. Lényegében az időkoordinátának a tirisztor-gyújtások pillanatában végrehajtott transzformációjáról van szó. A transzformációs egyenlet a következő:

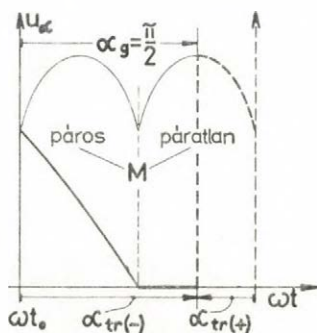
$$\alpha_{tr} = \omega t - J_a \frac{\pi}{3} . \tag{4.5}$$

Itt  $J_a$  értéke a féligvezérelt híd-egyenirányító esetében az V.táblázat szerint változik (a szaggatott és folytonos nyilak jelentése ugyanaz, mint a IV.táblázatnál).

		M				
		páros	páratlan	páros	páratlan	....
$J_a$	-2					
	0	→	0	→	0	
	2	↘	2	→	2	2
				4	4	⋮

V. táblázat

A  $J_a$  hatásmechanizmusának szemléltetésére tekintsük a következő példát (4.3 ábra).



4.3 ábra

Tegyük fel, hogy  $\alpha_g = \frac{\pi}{2}$ . A tirisztorgyújtás pillanatában I ugrik 0-ról -1-re (lásd az M=páratlan oszlopot a IV.táblázatban) és  $J_a$  pl. 0-ról 2-re ugrik (V.táblázat

2.oszlop). Ez egyfelől  $u_a$  (4.3) egyenlet szerinti megváltozását vonja maga után, másfelől azt eredményezi, hogy  $a_g$ -t a továbbiakban nem  $a_{tr(-)}$ -al, hanem  $a_{tr(+)}$ -al kell összehasonlítani, mely utóbbi értéke az adott pillanatban – s egy darabig még ez után is – negatív. Tekintve, hogy  $0 \leq a \leq \pi$ , még egy tirisztor-gyújtás a vizsgált  $\frac{2\pi}{3}$  radiános periódus alatt nem történhet, mivel az

$$a_g = a_{tr} \tag{4.6}$$

gyújtási feltétel legközelebb csak akkor teljesülhet, ha  $a_{tr(+)}$  pozitívvá válik a (4.5) egyenletben szereplő  $\omega t$  tag folytonos növekedése következtében. Ilyenformán a  $J_a$  megváltozása valóban  $\frac{2\pi}{3\omega}$ -val való idő-transzformációnak felel meg  $a_{tr}$ -ben (lásd a szaggatott  $u_a$  tengelyt a 4.3 ábrán).

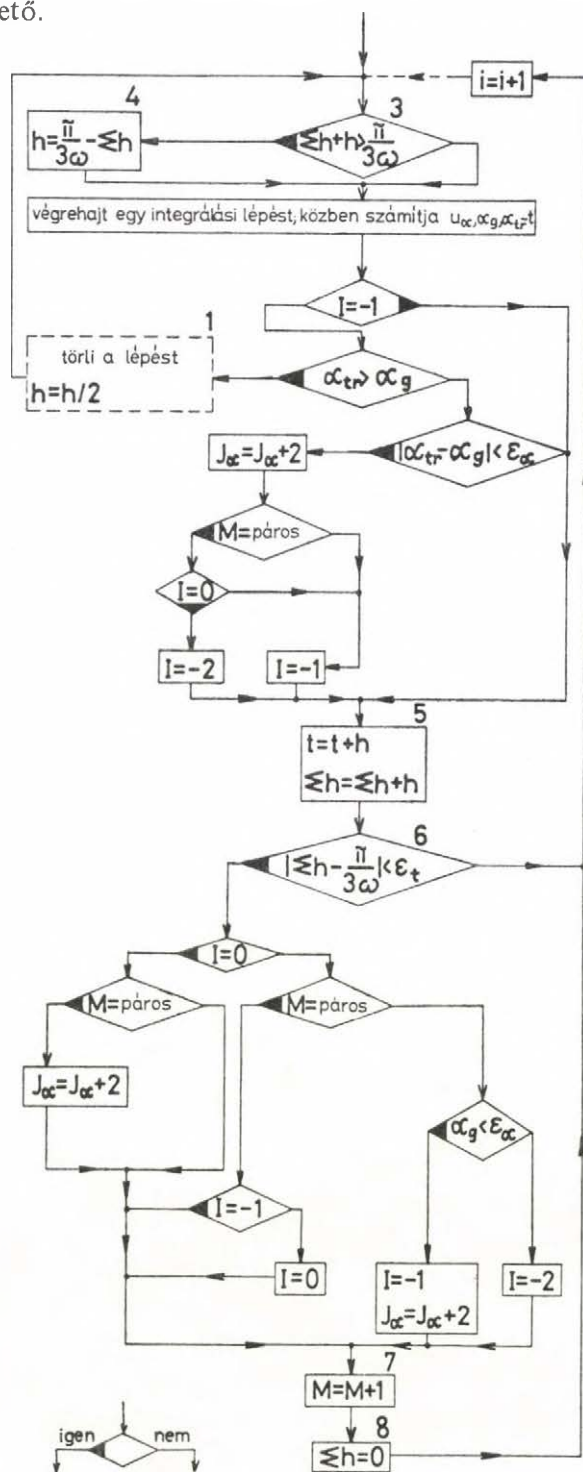
Látható, hogy a pontos áramirányító modell létrehozásához néhány igen egyszerű egyenletre van csupán szükség. A módszerre legjellemzőbb az a két táblázat, amelyben két logikai változó – jelen esetben az  $I$  és  $J_a$  – értékeit foglaljuk össze. Ezeket a táblázatokat az áramirányító kimenő feszültségének és a lehetséges tirisztor-gyújtások időpontjának ismeretében egy áramirányító típusra egyszer kell létrehozni. A szimuláció során a táblázatokat algoritmizálni kell; s miután a táblázatoknak önmagukban semmilyen szemléletes jelentése sincsen, csupán egy megvalósítandó algoritmust jelölnek ki, ezért hívhatjuk az áramirányító pontos modellezésére használt fenti eljárást **algoritmikus módszernek**.

4.1.3.5 A 4.4 ábrán a hurokemelő hajtás szimulációjára használt programnak azt a részét mutatjuk be **blokkdiagram** formájában, amely a féligvezérelt híd-egyenirányítót modellezi. Az ábra az  $i$ -edik integrálási lépés végrehajtására vonatkozik. Lényegében a (4.3)-(4.6) egyenletek és a IV–V.táblázatok algoritmizálását tartalmazza. A szaggatott vonallal jelölt 1-es blokk nem specifikus az áramirányító modellre, már az eredeti programnak is részét képezte. Azt fejezi ki, hogy az állapot-események idejének megkeresésére a felezési eljárást alkalmaztuk (lásd korábban a 3.2 pontot).

A természetes kommutáció időpontjai a fizikai folyamat kitüntetett pillanatait, mint azt  $I$ -vel és  $J_a$ -val kapcsolatban láttuk. Jelöljük ezeket a diszkrét értékeket  $t_M$ -el. Ezekben az időpontokban időtől függő események, ún. idő-események következnek be. *Nota bene* az eseményidőt nem kell külön meghatározni. Valahányszor a  $\Sigma h$  segédváltozóra fennáll, hogy

$$\Sigma h = \frac{\pi}{3\omega} \quad (4.7)$$

mindannyiszor pontosan egy-egy  $t_M$  időpontnál tart a szimuláció, hacsak  $\Sigma h$  nullázása is rendszeresen  $t_M$  időpontokban történik (lásd az 5-8 blokkokat). A 3-as feltételvizsgálat a 4-es értékadó utasítással kiegészítve biztosítja, hogy a (4.7) egyenlet minden alkalommal iteráció nélkül teljesíthető.



4.4 ábra

## 4.2 Pontos minőségvizsgálat szimulációval

Bár az áramirányító pontos modellezésére használt algoritmikus módszer a maga kategóriájában igen egyszerű, természetesen jóval időigényesebb az áramirányítót a telítődési határok között konstans átviteli tényezővel közelítő eljárásnál, amelyről a 3.fejezetben volt szó. A zárt szabályozási körben alkalmazható, tetszőlegesen változó gyűjtásszögre érvényes algoritmikus módszer ugyanis hálózati periódusként átlagosan három tirisztor-gyűjtás időpontjának iteráció útján történő megkeresését igényli. (Ez egyébként felhívja a figyelmet az állapot-események idejének meghatározására használt iterációs eljárás hatékonyságának jelentőségére; ebből a szempontból a szimulációs programunkban alkalmazott felezési eljárás nem a legmegfelelőbb.) Ugyanakkor az áramirányító  $u_a$  kimenő feszültségének kellő pontosságú lekövetése érdekében a  $h$  integrálási lépésméretet felére,  $h=0,5$  msec-ra csökkentettük. Végeredményben a szimuláció közepes sebességére a CDC 3300-as számítógépen 1 sec fizikai idő/3,3-3,5 perc számítógép idő adódik. Egy-egy futás gépideje magába foglalja az eredményül kapott időfüggvények kirajzoltatásának előkészítését is, vagyis a plotter-rutinok használatát, az off-line rajzolás időszükségletét természetesen nem.

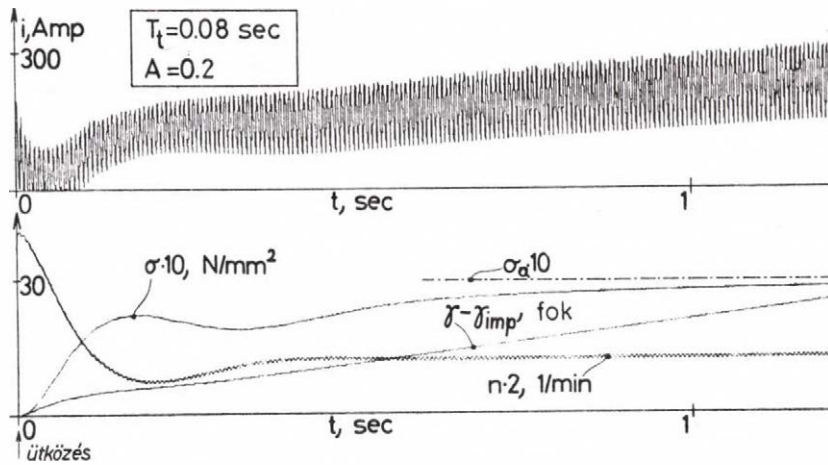
A fentiek miatt a pontos áramirányító modellt tartalmazó szimulációs programot nagymennyiségű, automatikusan végzett számításokra nem használtuk. Segítségével a hurokemelő hajtás szabályozó struktúrájára, szabályozó-paramétereire egyéb módszerekkel nyert eredményeket ellenőriztük.

### 4.2.1 A hajtás indulási folyamatai

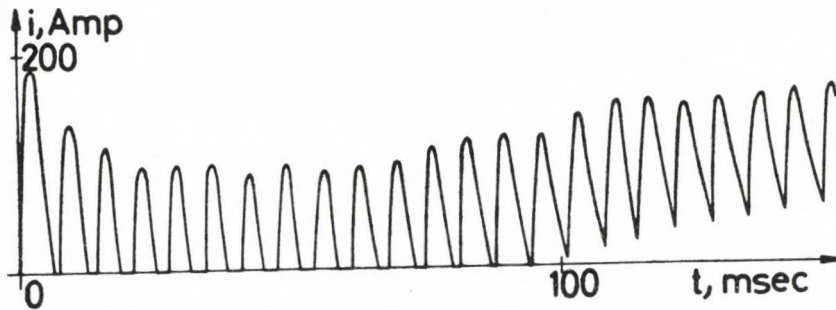
A pontos módszerrel szimulálva a hurokemelő kar felemelkedésének folyamatát, a hajtás jellemző mennyiségeire az ütközés után a 4.5 ábrát kapjuk.

A szabályozó-paraméterek és egyéb feltételek (zavarójel, ütközési fordulatszám stb.) megegyeznek a 3.3.1 pont első szimulációs példájában alkalmazottakkal, így az ábra közvetlenül összevethető a 3.2 ábra  $A \neq 0$  esetre vonatkozó jeleivel. Az áramot kivéve igen jó egyezés tapasztalható a megfelelő jelek között. A pontos módszerrel az áram pillanatértékét kapjuk meg s ez meglehetősen hullámos, azonban középértéke láthatóan szintén jól követi az áramra a 3.2 ábrán mutatott időfüggvényt.

Annak ellenére, hogy simító fontó nincs az armatúrakörben, szaggatott áramvezetés az ütközés után csak rövid ideig tapasztalható. (E kezdeti időszak a 4.6 ábrán kinagyítva



4.5 ábra



4.6 ábra

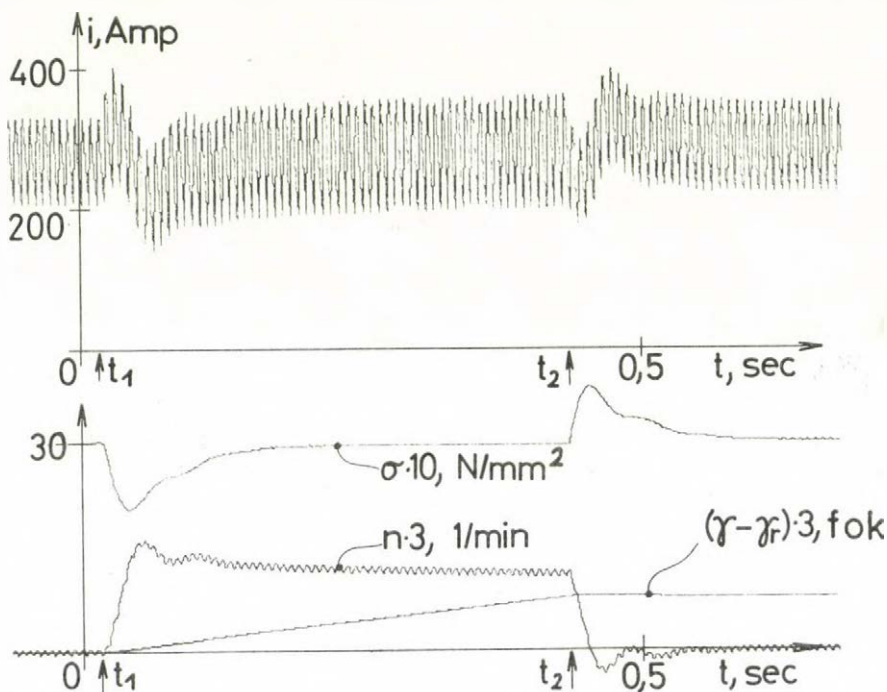
látható.) Ennek az az oka, hogy az áramirányítót csökkentett feszültségről tápláljuk ( $U_{VM} = 50V$ ). Ez megtehető, mivel a nyomatékmotor fordulatszáma még felgyorsuláskor is igen alacsony marad az  $n_n = 425 \frac{\text{ford}}{\text{perc}}$ -es névleges értékhez képest (más szóval, a motor belső feszültsége jóval kisebb  $U_n = 220 V$ -os névleges kapocsfeszültségénél). Az áram azonban még így is igen hullámos marad, ha a példa kedvéért választott féligvezérelt híd-egyenirányítóval tápláljuk a motort. A valóságos helyzet jobb, ugyanis teljesen vezérelt híd-kapcsolás esetén a legkisebb rendszámú áram-felharmonikus kétszeres frekvenciájú, azaz 300Hz-es.

Megjegyezzük, hogy  $U_{VM}$  növelése nem csak az áram hullámosságát fokozza, hanem bizonyos értéken túl szubharmonikus lengést okoz. Szimulációs vizsgálataink során markáns formában jelentkeztek  $\frac{150}{4}$ ,  $\frac{150}{5}$  és  $\frac{150}{6}$  Hz-es állandósult lengések.



### 4.2.2 Munkaponti tranziensek

A pontos szimulációs módszer, mellyel követhető a hurokemelő kar felemelkedésének teljes folyamata, természetesen alkalmas a munkaponti tranziensek pontos ellenőrzésére is. Erre mutat példát a 4.7 ábra.



4.7 ábra

Az ábrán a rendszerválaszok a  $\Delta v$  zavarójel egységugrás típusú változásának esetére láthatók. Kezdetben a hurokemelő kar az előírt szöghelyzetben áll (ez a példában  $\gamma_a = 30^\circ$ ) és biztosítja az előírt  $\sigma_a = 3\text{N/mm}^2$ -es munkaponti szalagfeszültséget. A  $t_1$  időpillanatban  $\Delta v$  nulláról  $1\text{ cm/sec}$  konstans értékre ugrik, majd a  $t_2$  pillanatban ismét nullává válik. Magát a fenti eljárást dinamikus rendszerek mérésel történő minőségvizsgálatára alkalmazzák; az ábrából kiderül, hogy a pontos rendszermodellen ez minden nehézség nélkül utánozható. Az eredményt illetően megállapíthatjuk, hogy a választott szabályozó-struktúra és szabályozó-paraméter beállítás mellett – ami ugyanaz, mint a 4.2.1 pontban – az egyes jelekben jelentős túllendülések nincsenek, a szabályozási idő meglehetősen kicsi, a szalagfeszültség mindkétszer lengések nélkül felveszi eredeti értékét.



## 5. DINAMIKAI VIZSGÁLAT AZ s-TARTOMÁNYBAN

### 5.1 Linearizálás munkapont körüli kis változásokra

#### 5.1.1 A rendszeregyenletek linearizálása

A megleghengerművi villamos hurokemelő hajtás vizsgálata nem lenne teljes egy sokoldalú dinamikai, elsősorban stabilitás vizsgálat nélkül. Eközben természetesen következtetések vonhatók le a hajtás minőségi tulajdonságaira is, bár nemlineáris rendszereknél ezek az indítástól és a jelek amplitudójától is függnének.

Nemlineáris rendszerek dinamikai vizsgálatára általánosan alkalmazott módszer a munkapont(ok) körüli kis változásokra vonatkozó linearizálás, majd az ezt követő lineáris rendszer-analízis. A hurokemelő hajtás dinamikai vizsgálatánál az arányos áramirányító-közelítést tartalmazó (3.1)-(3.9) állapotegyenletekből indulunk ki. Az egyszerűség kedvéért nem vezetünk be új jelölést a munkapont kis környezetében változó jelekre. Így a (3.4), (3.8) és (3.9) egyenletek, linearizálás után, a következőképpen írhatók fel:

$$\dot{x}_4 = d_1 \Delta v + d_2 x_2 + d_3 x_3 \quad (5.1)$$

$$m_t = d_4 x_4 + d_5 \dot{x}_4 + d_6 x_2 \quad (5.2)$$

$$\dot{i}_h = d_7 x_6 + d_8 \dot{x}_4 + d_9 x_7 \quad (5.3)$$

ahol  $d_1, d_2, \dots, d_9$  a megfelelő parciális deriváltak az adott munkapontban:

$$d_1 = \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial \Delta v} = -E2 \quad (5.4)$$

$$d_2 = \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial x_2} = EO X_3 \quad (5.5)$$

$$d_3 = \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial x_3} = EO (X_2 - \gamma_{ii}) \quad (5.6)$$

$$d_4 = \frac{\partial m_t}{\partial \dot{x}_4} = HU (r \sin X_2 - a) \cos X_2 \frac{r}{\text{red}} \quad (5.7)$$

$$d_5 = \frac{\partial m_t}{\partial \dot{x}_4} = CS (r \sin X_2 - a) \cos X_2 \frac{r}{\text{red}} \quad (5.8)$$

$$d_6 = \frac{\partial m_t}{\partial x_2} = \left\{ (HA+HUX_4+CS\dot{X}_4)r \cos^2 X_2 - \right. \\ \left. - [ G + (HA+HUX_4+CS\dot{X}_4) (r \sin X_2 - a) ] \sin X_2 \right\} \frac{r}{\text{red}} \quad (5.9)$$

$$d_7 = \frac{\partial i_h}{\partial x} = \left\{ (HA+HU\sigma_a) r \cos^2 X_6 - \right. \\ \left. - [ G + (HA+HU\sigma_a) (r \sin X_6 - a) ] \sin X_6 \right\} \frac{r}{k\phi_{\text{red}}} \quad (5.10)$$

$$d_8 = \frac{\partial i_h}{\partial \dot{x}_4} = - A \quad (5.11)$$

$$d_9 = \frac{\partial i_h}{\partial x_7} = - 1 \quad (5.12)$$

(itt a nagybetűs állapotváltozók munkaponti értékeket jelölnek).

Valójában a (3.3) egyenlet nem csak az (5.2) egyenletben már linearizált  $m_t$  miatt nemlineáris, hanem  $\theta$  pozíciófüggése miatt is. Ez a pozíciófüggés azonban a vizsgált  $\gamma$  tartományban kicsi, mint azt a 2.3.1.1 pontban láttuk. Így itt a linearizálással elérhető pontosságnövekedésből származó előny jelentéktelen ahhoz a hátrányhoz képest, amit a rendszer még bonyolultabbá válása jelentene (törtfüggvény deriváltjáról volna szó!).

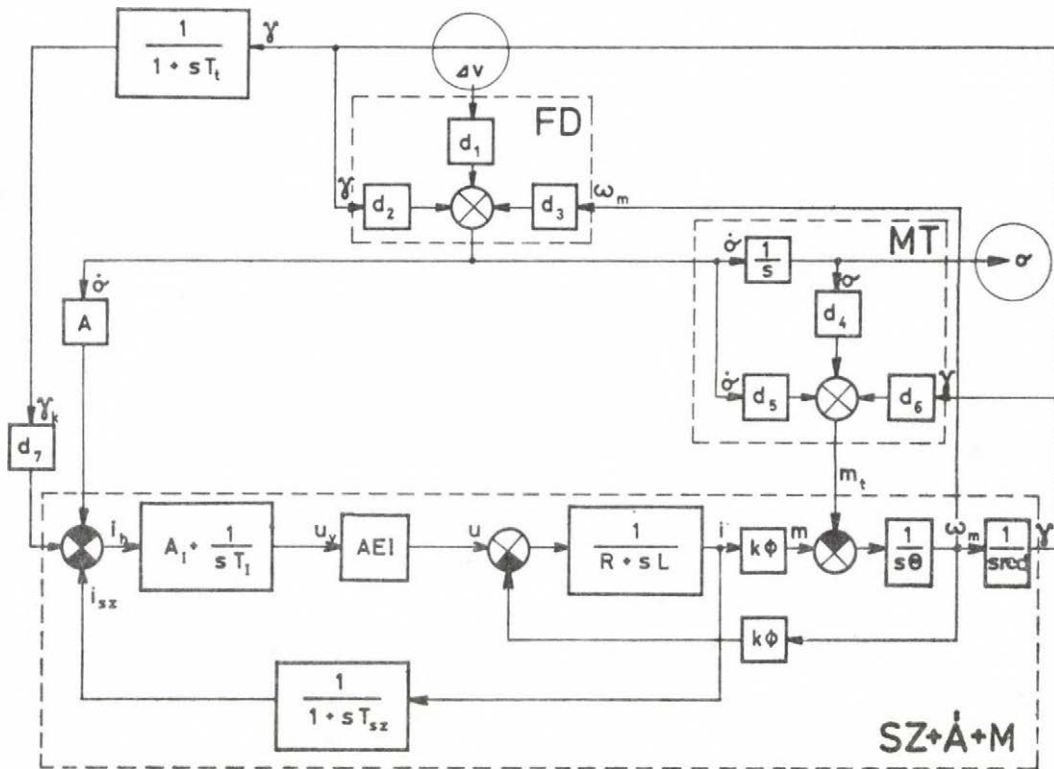
### 5.1.2 Kisjelű blokkvázlat

A linearizálással keletkező rendszert blokkvázlat formájában szemlélteti az 5.1 ábra. Az ábrán a  $d_8$  és  $d_9$  deriváltak konkrét kifejezésükkel szerepelnek, mivel az  $A$  paramétert kiemelten szeretnénk kezelni, míg a  $d_9$ -re adódó -1 egy negatív visszacsatolással egyenértékű. Továbbá az ábrán a szemléletesség kedvéért visszatértünk az állapotváltozók eredeti fizikai jelentéséhez.

A SZ+Á+M jelű nagyobb egység egy áramszabályozóval ellátott áramirányítóról táplált külső gerjesztésű egyenáramú motor jellegzetes blokk-struktúráját tartalmazza [39, 40,

53].

Feltűnő viszont, hogy a szabályozott jellemző nem a motor kimenő mennyiségei közül kerül ki, hanem a motor terheléséhez kapcsolódik (az ábrán bekarikázott  $\sigma$ ). A terhelőnyomaték-változást az MT egység képezi; ez tulajdonképpen az (5.2) egyenlet megfelelője. Az FD jelű blokkvázlat-rész a szalagfeszültség deriváltját állítja elő; ez az egység az (5.1) egyenletnek felel meg. Hangsúlyozzuk, hogy a blokkvázlatban valójában két FD egységnek kellene lenni: az egyik a szalagfeszítési folyamat helyett állna, a másik pedig a szalagfeszültség-deriváltat irányítási célból előállító kapcsolás helyett (lásd korábban a 2.4.2 pontot). A két egység per definitionem egyforma s így összevonhatók.



5.1 ábra

## 5.2 Dinamikai vizsgálat gyök-helygörbe módszerrel

### 5.2.1 Sajátértékek meghatározása

Az 5.1 ábrából látható, hogy az automatikus irányítású hurokemelő hajtás 7 energiatárolós, többhurkos, meglehetősen bonyolult szabályozási rendszert alkot. Így a rendszer stabilitás vizsgálata az egyszerűbb, pl. a Bode- vagy Nyquist-féle eljárásokkal nem végezhető el [54]. (A minőségi jellemzők meghatározása szempontjából az említett módszerek egyébként sem túl kedvezőek.) Ma azonban, a nagyteljesítményű számológépek korában, a számítógép-könyvtárakban könnyen hozzáférhető mátrixalgebrai és numerikus módszerek segítségével nem okoz gondot még ilyen (sőt ennél bonyolultabb) esetben sem a zárt rendszer pólusainak közvetlen meghatározása s a gyök-helygörbe felrajzolása. A gyök-helygörbéből könnyen következtethetünk a hajtás minőségi jellemzőire is [55].

Továbbra is az eddig alkalmazott állapotteres tárgyalásmódot követjük. A munkaponti linearizálással keletkező lineáris állapotegyenlet-rendszer tömör formában egyetlen vektor-differenciálegyenlettel írható fel:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A}\underline{x} + \underline{b}\Delta v, \quad (5.12)$$

ahol

$$\underline{b}^T = \left[ -\frac{AEI \cdot A_1 \cdot Ad_1}{L}, 0, -\frac{d_1 d_5}{\theta}, d_1, -Ad_1, 0, 0 \right],$$

a rendszer  $\underline{A}$  Jacobi-mátrixa pedig

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{AEI \cdot A_1 \cdot A \cdot d_2}{L} & -\frac{k\Phi + AEI \cdot A_1 \cdot A \cdot d_3}{L} & 0 & \frac{AEI}{L \cdot T_1} & \frac{AEI \cdot A_1 \cdot d_7}{L} & -\frac{AEI \cdot A_1}{L} \\ 0 & 0 & \frac{1}{red} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k\Phi}{\Theta} & -\frac{d_6 + d_5 \cdot d_2}{\Theta} & -\frac{d_5 \cdot d_3}{\Theta} & -\frac{d_4}{\Theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & d_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -A \cdot d_2 & -A \cdot d_3 & 0 & 0 & d_7 & -1 \\ 0 & \frac{1}{T_t} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_t} & 0 \\ \frac{1}{T_{sz}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{sz}} \end{bmatrix}.$$

Figyelmünket az

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A} \underline{x} \quad (5.13)$$

homogén differenciálegyenletre, ill. az A mátrixra fordítjuk. Tudjuk, hogy az A rendszermátrix sajátértékei megegyeznek a zárt rendszer operátoros átviteli függvényének pólusai-  
val, vagyis a gyök-helygörbe keresett pontjaival [56]. Az A mátrix  $\lambda_i$  sajátértékei ki-  
elégítik a

$$\det(\lambda \underline{E} - \underline{A}) = 0 \quad (5.14)$$

un. karakterisztikus egyenletet. Ezért a sajátértékek egyféleképpen megkereshetők a fenti determináns kifejtésével (így az un. karakterisztikus polinomhoz jutunk), majd a karakterisztikus egyenlet gyökeinek **gyökkereső** rutinok segítségével történő számítógépes meghatározásával. Másrészt az A mátrix hasonlósági transzformációkat tartalmazó **sajátérték-kereső** rutinok segítségével diagonalizálható, a keletkező diagonálmátrix átlójában pedig éppen a meghatározandó  $\lambda_i$  sajátértékek állnak.

A tévedések elkerülése érdekében az A rendszermátrix sajátértékeit párszor mindkét úton meghatároztuk, az MTA CDC 3300-as számítógépének programkönyvtárából véve a szükséges szubrutinokat. (A kapott eredmények természetesen pontosan megegyeznek.)<sup>\*</sup>

### 5.2.2 Az Y(s) hurokátviteli függvény

Mielőtt rátérnénk a gyök-helygörbék bemutatására, röviden érintjük a rendszer hurokátviteli függvényének kérdését. E kitérőnek több oka van.

a) Ahhoz, hogy az Y(s) hurokátviteli függvény felírható legyen, az 5.1 ábra kisjelű blokkvázlatát feltétlenül át kell alakítani, s ez kezdetben a blokkvázlat egyszerűsödésének irányában hat. (A későbbi átalakítások során ugyan a blokkok száma tovább csökken, azonban átviteli tényezőjük egyre bonyolultabbá válik.) A blokkvázlat-analízisnek a mérnöki

---

<sup>\*</sup> Nagy mennyiségű számításokra a sajátértékkereső rutinokat használtuk; a Függelékben is csak ezek vannak felsorolva.

gyakorlatban hagyományai vannak, a körerősítés, a szabályozás típuszáma, stb. fogalmak igen megszokottak.

b) Az  $Y(s)$  hurokátviteli függvény zárushelyeinek ismerete megkönnyíti a gyök-helygörbék felrajzolását.

c)  $Y(s)$  ismeretében képezhető az

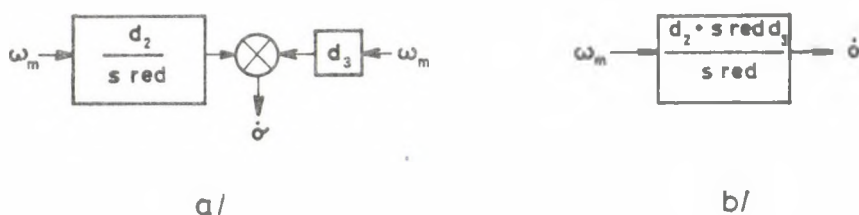
$$Y(s) + 1 = 0 \tag{5.15}$$

karakterisztikus egyenlet is, melynek gyökei szintén a zárt rendszer pólusait adják. Ez tehát egy újabb ellenőrzési lehetőséget nyújt a pólusok (a gyök-helygörbe) meghatározásának helyességére nézve.

5.2.2.1 Rögtön ez utóbbi pontnál maradva, a következőket tapasztaltuk. Az  $Y(s)$  hurokátviteli függvény nevezőjének fokszáma nagyobb lehet, mint a rendszer energiatárolóinak száma; ezzel összefüggésben hamis gyök léphet fel az (5.15) egyenlet megoldása során. Ennek az a magyarázata, hogy az 5.1 ábra átalakítása többféleképpen is elvégezhető, vagy ami ezzel egyenértékű,  $Y(s)$  többféleképpen is levezethető. Bizonyos átalakítások közben bővíthet az  $Y(s)$  nevezője egy gyöktényezővel. Természetesen egyidejűleg a számlálója is bővíül, míg azonban a számláló megmarad gyöktényező alakban, a nevezőre egy polinom adódik, s így a "többlet" gyöktényező (vagyis a hamis gyök) megtalálása nem könnyű.

Az 5.1 ábrán látható kisjelű blokkvázlatnak olyan átalakítását mutatjuk be a továbbiakban, amikor  $Y(s)$  nevezője, a rendszerben található 7 energiatárolónak megfelelően, hetedfokú lesz.

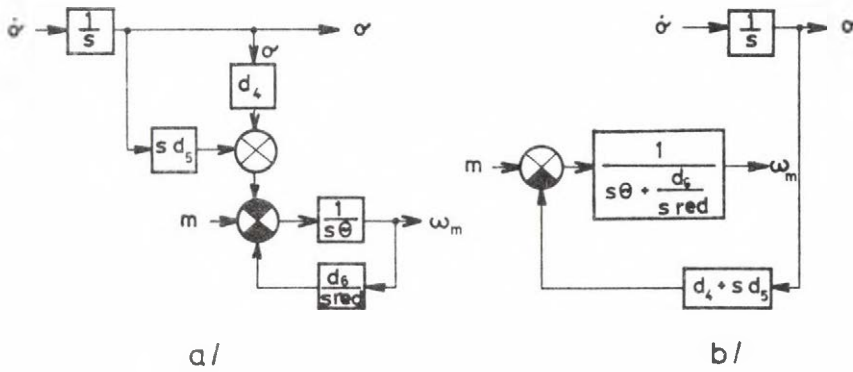
Először az FD jelű egységet alakítjuk át (5.2 ábra).



5.2 ábra

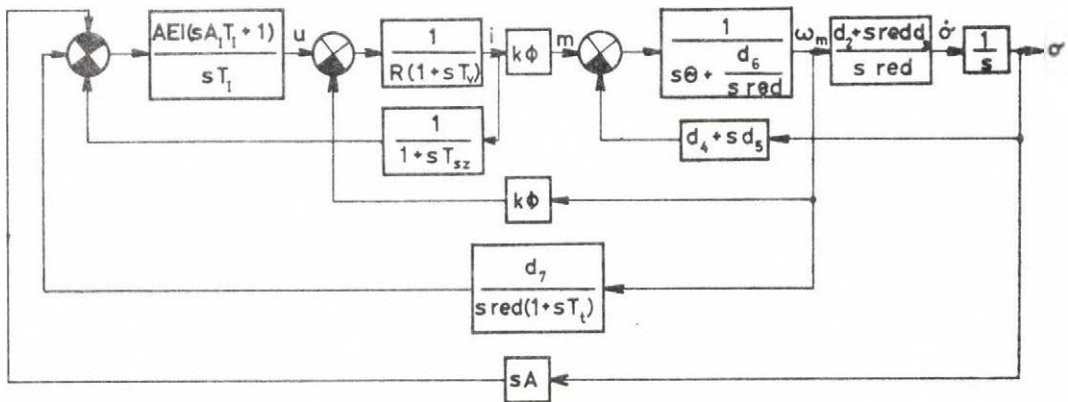


A  $d_1$ -es tag nem része a huroknak, ezért nem szerepel az 5.2 ábrában. Ezután az MT jelű egységet bontjuk szét, hogy részben összevonhassuk a motorral (5.3 ábra).



5.3 ábra

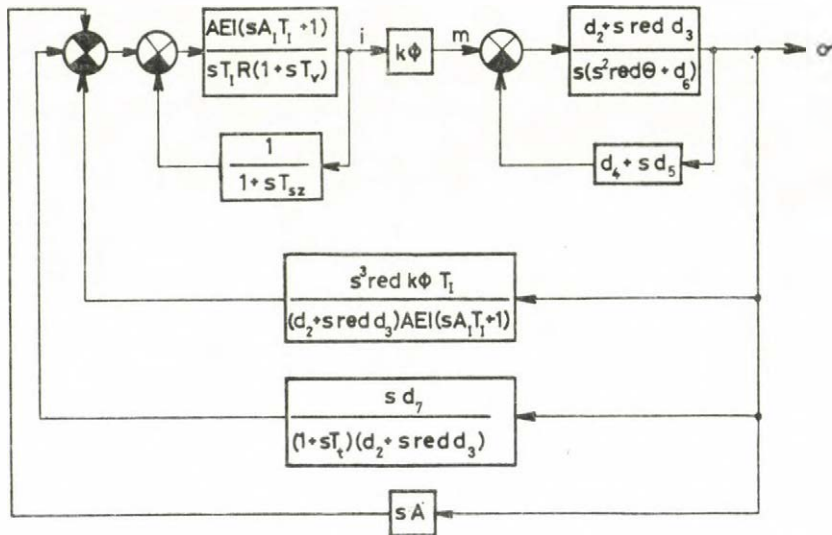
Az 5.2.b és 5.3.b ábrák segítségével a teljes rendszer felrajzolható az 5.4 ábrán látható módon. (Itt az L/R villamos időállandóra a szokásos  $T_v$  jelölést alkalmaztuk.)



5.4 ábra

Végül a keresztcsatolások megszüntetésével kapjuk az 5.5 ábra blokkvázlatát. Megfigyelhető itt, hogy az előrevezető ágban lévő két, negatív visszacsatolást tartalmazó tagban vagy csak villamos, vagy csak mechanikai paraméterek szerepelnek. Kimutatható, hogy bizonyos szabályozóparaméterek mellett, ill. bizonyos munkapontokban a fenti két tag

hurokátviteli függvényének lesznek konjugált komplex pólusai. Vagyis azt mondhatjuk, hogy az 5.5 ábrán látható kisjelű blokkvázlat előrevetítő ágában sorbakapcsolódik két lengő jellegű tag, amelyek közül az egyik a hurokemelő hajtás villamos, másik pedig mechanikai dinamikus tulajdonságaira jellemző.



5.5 ábra

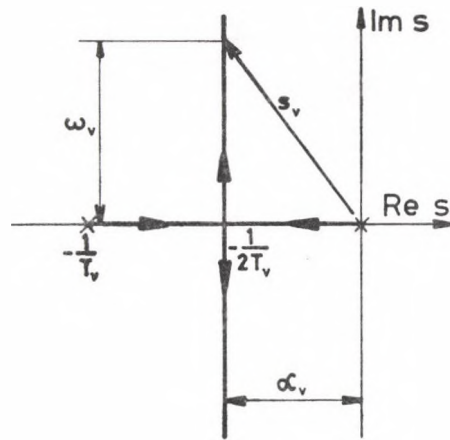
5.2.2.2 A villamos paramétereket tartalmazó tagot, amely a hajtás áramszabályozó körének felel meg, érdemes kissé részletesebben megvizsgálni. Tekintsünk olyan kompenzációt, amikor

$$A_1 T_1 = T_{sz} \quad (5.16)$$

Ekkor a tag  $Y_v(s)$  hurokátviteli függvénye

$$Y_v(s) = \frac{AEI}{RT_1 T_v} \frac{1}{s(s + \frac{1}{T_v})} \quad (5.17)$$

melyhez az 5.6 ábrán látható gyök-helygörbe tartozik.



5.6 ábra

Az  $s_v$  komplex gyök-helygöbe pontokra az

$$s_v = -a_v + j\omega_v \quad (5.18)$$

jelölést alkalmazva, a gyökök valós részére

$$a_v = \frac{1}{2T_v} \quad (5.19)$$

adódik, míg a képzetes részre, az

$$|Y_v(s_v)| = 1 \quad (5.20)$$

un. abszolútérték-feltétel felhasználásával,

$$\omega_v = \sqrt{2a_v \frac{AEI}{RT_I} - a_v^2} \quad (5.21)$$

Ha olyan kompenzációt választunk az áramszabályozó körben, hogy a  $T_v$  villamos időállandó essen ki, vagyis

$$A_I T_I = T_v \quad (5.22)$$

akkor  $a_v$  (5.19) képletében kell csak  $T_v$  helyébe  $T_{sz}$ -t helyettesíteni. Tekintettel arra, hogy a vizsgált hurokemelő hajtásnál  $T_v = 10$  msec (adott érték) és pl.  $T_{sz} = 1$  msec (vá-

lasztott érték), így a PI kompenzáció alkalmas megválasztásával az áramszabályozó körhöz tartozó villamos póluspár valós része  $a_v = 50-500 \frac{1}{\text{sec}}$  között változtatható. Látni fogjuk, hogy a teljes zárt szabályozási rendszerben a villamos lengési hajlam fokozódik a  $\gamma$  pozíció és az A erősítés növekedésének függvényében, azonban a fenti  $a_v$ -tartomány tág lehetőséget biztosít arra, hogy a villamos póluspárt – szükség esetén – eléggé eltávolíthassuk az imaginárius tengelytől.

Másfelől, az (5.21) egyenlet alapján megállapíthatjuk, hogy a villamos lengések frekvenciája szintén jól kézben tartható AEI és  $T_I$  segítségével.

5.2.2.3 Az 5.5 ábra blokkvázlatának előrevezető ágában lévő másik, mechanikai paramétereket tartalmazó tag dinamikai tulajdonságai erősen munkapontfüggőek. Ha olyan munkapontot tekintünk, amikor a motor áll ( $X_3=0$ ), akkor  $d_2=0$  az (5.5) egyenlet szerint. Ekkor a tag  $Y_m(s)$  hurokátviteli függvénye a következő:

$$Y_m(s) = \frac{d_3 d_5}{\theta} \frac{s + \frac{d_4}{d_5}}{s^2 + \frac{d_6}{\text{red}\theta}} \quad (5.22)$$

Az (5.7), (5.8) egyenletekből látható, hogy a  $\frac{d_4}{d_5}$  hányadosból a pozíciófüggő tényezők kiesnek. Értéke a példaként választott hengersori és szűréstervi adatok mellett:

$$\frac{d_4}{d_5} = \frac{HU}{CS} \cong 100 \frac{1}{\text{sec}} \quad (5.23)$$

A  $\frac{d_6}{\text{red}\theta}$  hányados a  $\gamma = \gamma_{\ddot{u}}$  pozícióban érdekes elsősorban, mert a  $K'_m = \frac{d_3 d_5}{\theta}$  hurok-tényező itt lesz nulla (lásd az (5.6) egyenletet), a tag gyök-helygörbéje az általa meghatározott pólusokból indul:

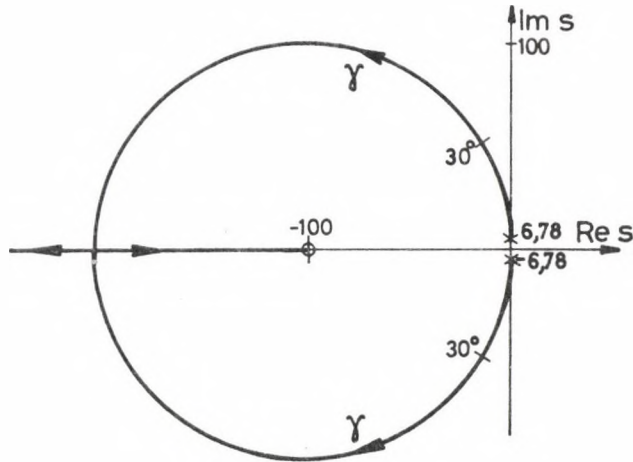
$$\left. \frac{d_6}{\text{red}\theta} \right|_{\gamma_{\ddot{u}}} = 46 \frac{1}{\text{sec}^2} \quad (5.24)$$

(Értéke egyébként fokozatosan változik, s pl. a  $\gamma = 30^\circ$ -os pozícióban  $28 \frac{1}{\text{sec}^2}$  lesz.)

A fentiek alapján  $Y_m(s)$ -re jó közelítéssel írhatjuk:

$$Y_m(s) = K'_m \frac{s+100}{s^2+46} = K'_m \frac{s+100}{(s-j6,78)(s+j6,78)}, \quad (5.25)$$

melyhez az 5.7 ábrán látható gyök-helygörbe tartozik.



5.7 ábra

A mechanikai tag tehát a  $\gamma = \gamma_{\ddot{u}}$  pozícióban alacsony frekvenciával csillapításmentesen leng, a pozíció növekedésével a lengés frekvenciája kezdetben rohamosan nő (a hengerelt szalag egyre merevebb rugóként viselkedik), később a lengések csillapítása is fokozódik. Be-látható, hogy a gyök-helygörbének az a szakasza, amely nem a valós tengelyben fut egy olyan kör részére, melynek sugara  $\sqrt{100^2 + 6,78^2} = 100,23 \frac{1}{\text{sec}}$ . A mechanikai lengések  $a_m$  csillapítására, ill.  $\omega_m$  lengési frekvenciájára az abszolútérték-feltétel segítségével az

$$a_m = \frac{d_3 d_5}{2\theta}, \quad (5.26)$$

illetve

$$\omega_m = \sqrt{200 a_m - a_m^2 + \frac{d_6}{\text{red}\theta}} \quad (5.27)$$

kifejezések adódnak. Az 5.7 ábrába bejelöltük a  $\gamma = 30^\circ$ -nak megfelelő pólusokat. Látható, hogy számunkra elsősorban a gyök-helygörbe induló szakaszának van jelentősége.

5.2.2.4 Az 5.5 ábra kisjelű blokkvázlatának átalakítását nem részletezzük tovább, ugyanis a keletkező tagok egyre bonyolultabb átviteli függvényeiből szemléletes fizikai tar-

talom már nem olvasható ki. Az  $Y(s)$  eredő hurokátviteli függvény a következő lesz:

$$Y(s) = \frac{A \cdot AEI \cdot k\phi \cdot \text{red } d_3 T_t A_I T_I T_{SZ}}{a_0 s^7 + a_1 s^6 + a_2 s^5 + a_3 s^4 + a_4 s^3 + a_5 s^2 + a_6 s + a_7} \cdot \frac{s \left(s + \frac{d_2}{\text{red } d_3}\right) \left(s + \frac{1}{T_t}\right) \left(s + \frac{1}{A_I T_I}\right) \left(s + \frac{1}{T_{SZ}}\right)}{\quad} \quad (5.28)$$

A fenti hurokátviteli függvény  $z_0, z_1, \dots, z_4$  zérusaira tehát fennáll:

$$z_0 = 0, \quad z_1 = -\frac{d_2}{\text{red } d_3}, \quad z_2 = -\frac{1}{T_t}, \quad z_3 = -\frac{1}{A_I T_I}, \quad z_4 = -\frac{1}{T_{SZ}} \quad (5.29)$$

Az  $a_1, \dots, a_6$  együtthatók bonyolult kifejezéseit nincs értelme itt felsorolni. Csak annyit jegyzünk meg, hogy az 5.2.2 (c) pontban említett ellenőrzést elvégeztük, s összehasonlítva az (5.15) karakterisztikus egyenletnek az (5.28) egyenlet behelyettesítésével adódó alakját az (5.14) egyenletnek a determináns kifejtésével adódó alakjával, a megfelelő együtthatók egyezését tapasztaltuk.

Ellenben megadjuk  $a_0$ -t, ui. kiemelve a nevezőből megkaphatjuk a  $K'$  hurok-tényezőt:

$$a_0 = T_v T_{SZ} \theta \text{ red } T_t T_I R, \quad (5.30)$$

illetve

$$K' = \frac{A \cdot AEI \cdot k\phi \cdot \text{red } d_3 T_t A_I T_I T_{SZ}}{a_0} = \frac{A \cdot AEI \cdot k\phi \cdot d_3 A_I}{T_v \theta R} \quad (5.31)$$

Továbbá megadjuk  $a_7$ -t, ui. kiemelve a nevezőből, valamint  $Y(s)$  számlálóját  $1+sT$  alakú tényezőkből álló szorzattá alakítva, megkaphatjuk a  $K$  körerősítést:

$$a_7 = AEI \cdot d_2 d_4, \quad (5.32)$$

illetve

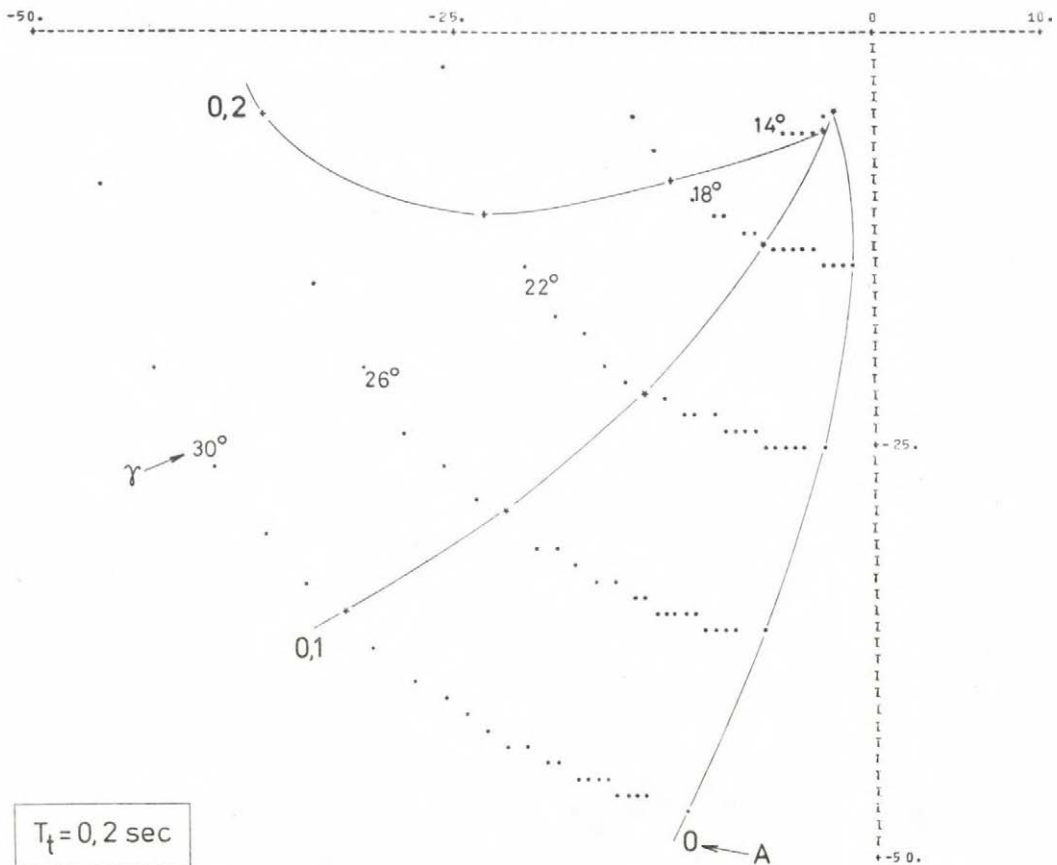
$$K = \frac{A \cdot k\phi}{d_4} \quad (5.33)$$



### 5.2.3 Eredmények

Mint az 5.2.1 pontban említettük, az automatikus irányítású hurokemelő rendszer gyök-helygörbéit az A rendszermátrix sajátértékeinek számítógép segítségével történő megkeresése útján határoztuk meg. Célunk a rendszer dinamikai tulajdonságai munkapont-függésének kimutatása, valamint a szabályozó paraméterek dinamikai hatásának tanulmányozása volt. A fő figyelmet a munkaponti mennyiségek közül a  $\gamma$  pozícióra, a szabályozó paraméterek közül pedig az A erősítésre és a  $T_t$  időállandóra fordítottuk.

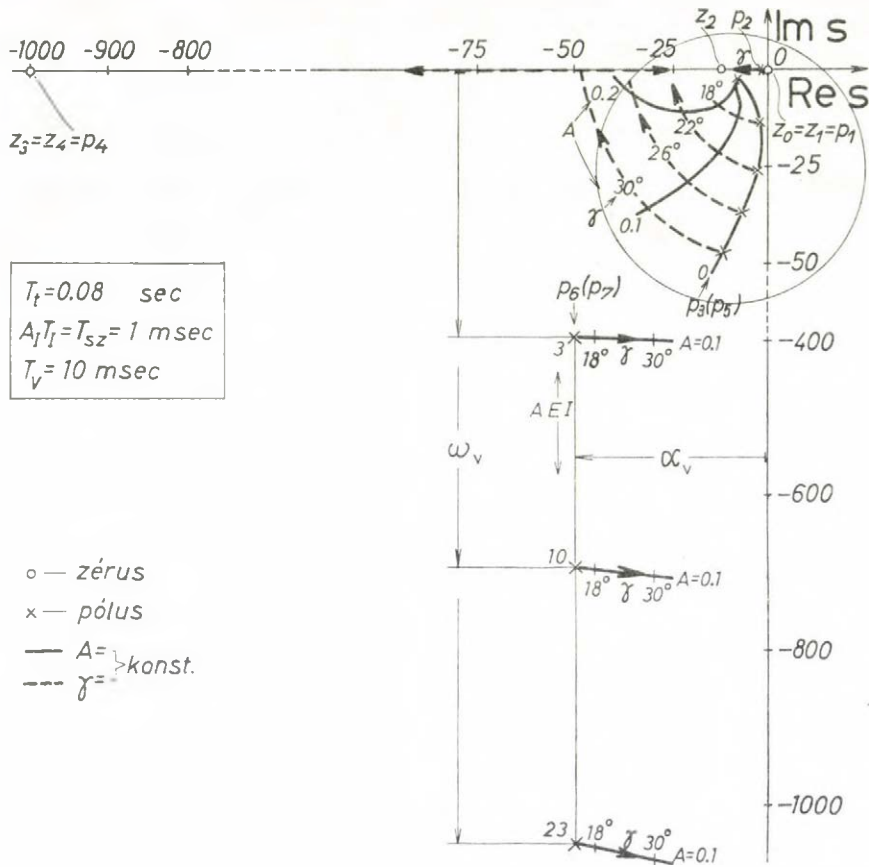
A feladat megoldására írt program futtatásával kapott numerikus eredmények között tájékozódni igen nehéz, a gyök-helygörbéket a vizsgált összes paraméter kombinációra felrajzolni pedig igen hosszadalmas. Az eredmények gyors áttekinthetősége érdekében gépi úton rajzoltatjuk ki az előre kiválasztott, a vizsgált paraméterek által legjobban befolyásolt gyök-helygörbe részletet. E célra a CDC 3300-as számítógép 136 karakter rekordhosszúságú sornyomtatójának felbontóképessége megfelelő. A printer-rajzok alapján gyorsan beállítható a szabályozó, ill. kiválaszthatók azok az esetek, amelyeket a numerikus eredmények segítségével részletesebben szükséges analizálni. Az 5.8 ábrán egy ilyen printer-rajzot mutatunk be.



5.8 ábra

(Az A=állandó pontokat magyarázatképpen összeköttöttük.) Az ábra A=0 -ra vonatkozó pontsora az 5.2.2.3 pontban tárgyalt mechanikai tag gyök-helygörbéjének induló szakaszát idézi (lásd az 5.7 ábrán a negatív képzetes részt). Az A paraméter növekvő értékeinél az eredeti kör természetesen erőteljesen deformálódik.

Rátérve az eredmények értékelésére, tekintsük először az 5.9 ábrát, amelynek segítségével átfogó képet nyerhetünk a rendszerről.



5.9 ábra

Az állapotváltozók munkaponti értékei

$$X_3 = \dot{X}_4 = 0, \quad X_4 = 3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad X_2 = X_6 = \gamma_{\ddot{u}} \div 30^{\text{O}} \quad (5.34)$$

voltak, vagyis állandósult állapotból indultunk ki. A  $p_3(p_5)$  és a  $p_6(p_7)$  pólusok két konjugált komplex póluspárt alkotnak (zárójelben a pozitív képzetes részű tagra utalunk).

Látható, hogy a pólusok és a zérusok három csoportra különülnek el az adott hurokemelő hajtás és az adott szabályozó-paraméter megválasztás esetében.

A bekarikázott részről később lesz szó. Most csak megállapítjuk, hogy a jelölt s-tartományban futnak a görbék legközelebb az imaginárius tengelyhez. Így az erősen  $\gamma$  - függő  $p_3(p_5)$  póluspárból kiinduló, a hajtás mechanikai lengéseit tükröző görbék határozzák meg elsősorban a rendszer dinamikai tulajdonságait. Vagyis ez a gyök-helygörbe részlet szolgáltatja a zárt rendszer un. domináns póluspárját.

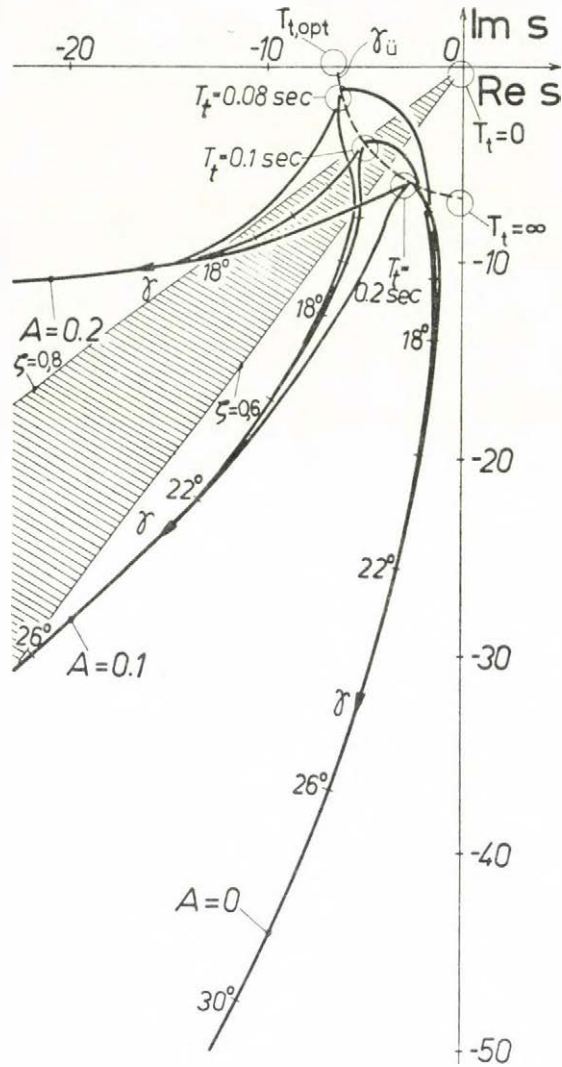
A  $p_6(p_7)$  póluspár az áramszabályozó kör villamos lengéseit adja vissza. Az AEI átviteli tényezőt változtatva a póluspár pontosan az 5.6 ábrán mutatott pályán fut, az (5.19) és (5.21) képletek is érvényesek. A póluspár a munkaponttól független. A belőle kiinduló ágak ellenben mind  $\gamma$ , mind  $A$  növekedésére (az ábra ez utóbbit ábrázolási nehézségek miatt nem tartalmazza!) az imaginárius tengely felé tartanak, a villamos lengések csökkenő csillapodására utalva. Ez azonban nem okoz szabályozási problémát, mert  $p_6(p_7)$  – a villamos tagról az 5.2.2.2 pontban mondottak szerint – könnyen távolabb helyezhető az imaginárius tengelytől.

Végül a harmadik csoport tagjai nagy abszolút értékűknél fogva alig befolyásolják a rendszer viselkedését. Itt hívjuk fel a figyelmet arra, hogy az  $\underline{A}$  Jacobi-mátrix sajátértékei az ábra tanúsága szerint több nagyságrendet szórnak, vagyis a rendszer un. stiff típusú. Ez a rendszer numerikus szimulációja során kap nagyobb jelentőséget. Sok számítógépidő takarítható meg azáltal, ha a rendszer stiff természetéhez igazodó speciális numerikus integráló eljárást alkalmazunk szimulációjára [58]. Ennek hiányában viszont – mint a 3.fejezetben ismertetett nagyjelű szimuláció esetében is – a választható legnagyobb lépésmagyságot a legkisebb időállandó (legnagyobb sajátérték) szabja meg ( $h=1$  ms-nál nagyobb lépésmagyságot nem használtunk).

Az 5.10 ábrán az 5.9 ábra bekarikázott részlete kinagyítva látható. Az ábra alapján a  $T_t$  időállandóval kapcsolatban két megállapítás kínálkozik.

- Egyfelől  $T_t$  optimumot mutat (az adott hurokemelőnél  $T_{t,opt} = 0,079$  sec): ekkor a görbék a valós tengelyből indulnak ki.  $T_t = \infty$  -nél a görbék a képzetes tengelyből lépnek ki, mégpedig az 5.7 ábrán mutatott pólusoknak megfelelő helyen.  $T_t = 0$  -nál pedig az origóból indulnak ki. (E két utóbbi megállapítás az 5.5 ábra blokkvázlata segítségével is ellenőrizhető.) A hurokemelő kar emelkedésének kezdetén nagy csillapítású és kis lengési hajlamú un. követő típusú

szabályozásra van szükségünk: a  $\sigma$  szalagfeszültség lehetőleg túllendülés nélkül kövesse a kezdeti  $\sigma_a$  alapjelugrást. Ezt a feltételt legjobban a  $T_{t,opt}$  időállandóval lehet kielégíteni.



5.10 ábra

- Másfelől  $T_t$ -nek az ütközés után csak néhány fokig (kb.  $\gamma = 18^\circ$ -ig) van észrevehető hatása a rendszer dinamikájára. Ez igen kedvező, mert így szabad kezünk van a hajtás dinamikai tulajdonságainak más követelmény szerint, más paraméterrel történő beállításában a  $\gamma$  pozíció nagyobb értékeinél.

E más (és az előbbivel némilag ellentétes) követelmény a hurokemelő hajtástól jó értéktartást követel meg a hurokemelő kar előírt  $\gamma_a$  pozíciója környezetében. Más szóval a  $\sigma$  szalagfeszültség gyorsan, akár kisebb túllendüléssel is, nyerve vissza eredeti  $\sigma_a$  értékét, ha attól valamilyen zavarás következtében eltávolodott. Az 5.10 ábra megmutatja, hogy e követelmény kielégítése biztosítható, miután az A erősítéssel a görbék futása az s-sík ábrázolt negyedében szinte tetszés szerint befolyásolható.

Lengő tag minőségi tulajdonságai a  $\zeta$  csillapítási tényezővel szoros kapcsolatban állnak. Követő szabályozásokban általában a  $\zeta = 0,6-0,8$  -as érték beállítására kell törekedni. Értéktartó szabályozásokban ennél kisebb csillapítási tényezőre van szükség, néha még  $\zeta = 0,2$  is elfogadható [54].

A különféle csillapítási tényezőknek az s-síkon egy-egy egyenes felel meg. Az egyenesek mentén a komplex s  $a$  valós és  $\omega$  képzetes része az alábbi összefüggés szerint változik:

$$\zeta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + \omega^2}} \quad (5.35)$$

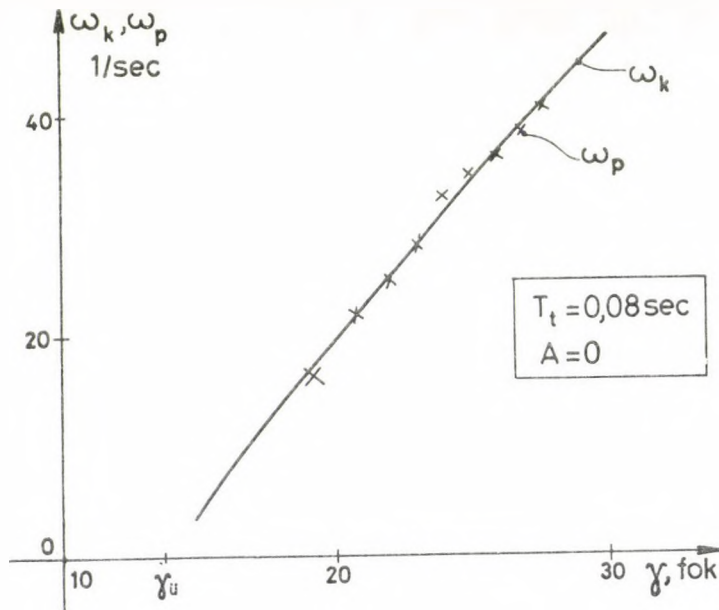
Az 5.10 ábrába bejelöltük a  $\zeta = 0,6-0,8$  -as tartományt. Az ábra is alátámasztja azt a szimulációs tapasztalatot, hogy  $A > 0,2$  erősítés beállítása esetén a rendszer nagyon lelassul (lásd korábban a 3.3.2.2 pontot). Ugy tűnik, hogy A optimális értékét  $A=0,1$  körül kell keresni.

### 5.3 Modellverifikáció a domináns póluspár alapján

A 3.3.1 pontban hangsúlyoztuk a modellhelyesség igazolásának fontosságát. Láttuk, hogy a lineáris áramirányító-közelítést alkalmazó szimulációs rendszermodell helyessége statikus szempontból hihető. A domináns póluspár ismeretében a modell helyessége most már dinamikai szempontból is ellenőrizhető.

Az 5.10 ábra  $A=0$  és  $T_f=0,08$  sec paraméterekre vonatkozó gyök-helygörbájéből leolvastuk a különböző  $\gamma$  pozíciókhoz tartozó lengési körfrekvenciákat és berajzoltuk az 5.11 ábrába ( $\omega_k$  jelű görbe). Majd kiértékeljük a lengési körfrekvencia szempontjából a

3.2 ábra  $A=0$  paraméterhez tartozó szalagfeszültség időfüggvényét. A lengés periódusidejét a szomszédos feszültségcsúcsok közötti időtartammal, az egyre növekvő  $\gamma$  pozíciót pedig az adott időtartam alatti átlagértékével vettük azonosnak. A kapott értékeket szintén be-  
rajzoltuk az 5.11 ábrába ( $\omega_p$  jelű pontsor). A két görbe összevetése csak egy gyors, köze-  
lítő ellenőrzést tesz lehetővé. Hiszen pl.  $\omega_p$  nem a nyugalomban levő rendszer belengeté-  
sével adódik, márpedig  $\omega_k$  erre vonatkozik (lásd az (5.34) munkaponti értékeket. Azon-  
kívül  $\theta$  pozíciófüggését a szimulációnál figyelembe vettük, a rendszer 5.1.1 pontbeli li-  
nearizálásánál viszont nem. A 3.2 ábra  $\sigma$ -időfüggvényének kiértékelése is közelítő jellegű.  
Mindazonáltal a hurokemelő hajtás szimulációjával adódó  $\omega_p$  lengési körfrekvencia nem  
tér el számottevően  $\omega_k$ -tól. Ennek alapján az alkalmazott szimulációs modell helyessége  
dinamikai szempontból is hihető.



5.11 ábra



## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A meleghengerművi széles-szalag gyártó kész-hengersorok teljes automatizálásának igénye világviszonylatban általánosnak mondható. Ezt az igényt a mind termelékenyebb gyártási eljárások keresése kelti fel, minthogy a nagysebességű, a hengerelt szalaggal szemben támasztott fokozott minőségi követelményeket kielégítő hengerlés korszerű mérőeszközök, beavatkozó szervek, valamint szabályozási és folyamatirányítási megoldások nélkül elképzelhetetlen.

A teljesen automatizált meleghengerekben kulcsszerep jut az állványok között elhelyezkedő hurokemelőknél. Feladatuk a szalag kis értékű és közel állandó mechanikai húzófeszültséggel történő hengerlésének biztosítása minden zavaró hatás ellenére.

Jó minőségű hurokemelő hajtás létrehozásához jelentős gazdasági érdekek fűződnek. A feszítetlen szalag ugyanis táncol, érinti az oldalvezetőket, ami a szükséges szélezés miatt anyaghulladékot okoz, vagy a szalag be is gyűrődhet (selejt). A szalag túlzott megfeszítése pedig a vastagsági és szélességi méretek pontos tartását nehezíti, sőt a szalag el is szakadhat. A közel állandó szalagfeszültség kívánatos metallurgiai szempontból is, az egységes anyagszerkezet kialakítása érdekében.

A hurokemelő hajtás műszaki paramétereivel kapcsolatos elvárások meghatározásánál döntő körülmény, hogy a korszerű hengerlés nagy sebességgel történik: a 20-as években felépített első folytatólagos készsorok 3,5–5 m/sec-os sebességével szemben ma 20–30 m/sec-os sebességgel. Ez egyfelől azt eredményezte, hogy a hurokemelő hajtásra ható zavaró hatások felerősödtek. Másrészt ezek kompenzálása a nagy hengerlési sebesség miatt közvetlen emberi beavatkozással már lehetetlen. Tehát a hurokemelő hajtásnak gyors működésűnek és automatikus irányításúnak kell lennie.

Gyors működésű hurokemelő hajtás közvetve jelentős mértékben hozzájárul a szalaghengerlés termelékenységének növeléséhez. Az egyes állványok közötti interakciókat csökkentő hatásánál fogva végső soron szinkronizálja a hengersort (részben a hurokszabályozók közreműködésével), s lehetővé teszi a folyamatos, stabil hengerlést nagy sebességgel.

A kérdés jelentőségéhez mérten a hurokemelő hajtásokkal kevés publikáció foglalkozik. Ezek nagy része is leíró jellegű, s csak egy-két cikk vállalkozik részletesebb analízisre. Jellemző,

hogy a szalagfeszültség szabályozott mennyiségként csupán egyetlen cikkben szerepel [25].

Az értekezés megleghengerművi villamos hurokemelő hajtás sokoldalú vizsgálatáról számol be. Elsősorban az automatikus irányítású hurokemelő rendszer kvalitatív tulajdonságait tárgyalja. Bemutatja azt a rugalmas szalagfeszítés modellt, amely kettős értelemben is a vizsgálatok alapjául szolgál. Segítségével egyrészt modellezhető a hurokemelő hajtás terhelése, a szalagfeszültség származtatásánál a szomszédos állványok zavaró hatását is figyelembe véve. Másrészt módot ad a hajtás automatikus irányítási rendszerének továbbfejlesztésére [28, 29, 30, 32].

A hurokemelő kar felemelkedése során, a szalagban a kar szalaghoz ütközése után kialakuló szalagfeszültség-csúcs tanulmányozása alapján az értekezés felhívja a figyelmet az ütközési fordulatszám jelentőségére. A bekapcsolási szalagfeszültség-csúcs eliminálása céljából az értekezés javaslatot tartalmaz az egyenáramú nyomatékmotorral működő hajtás áramalapjelének relaxációjára. A választott szabályozóstruktúra, az adott hurokemelő berendezés és egy példaként választott szűrésterv esetére munkaponti linearizálással vizsgálja a rendszer dinamikai tulajdonságait és rámutat a szabályozó-paraméterek beállításának szempontjaira.

Az értekezés az állapotteres tárgyalásmódot követi. Megadja a hurokemelő hajtás hét energiatárolós nemlineáris állapotter modellt. A rendszer nagyjelű szimulációs vizsgálata az állapotter-egyenlet numerikus integrálása útján történik. Részletesen foglalkozik a dolgozat azal az esettel, amikor a nyomatékmotort tápláló áramirányító az állapotter modellben nincs idealizálva arányos rendszer-komponensként, hanem pontosan van leképezve. Erre az esetre az értekezésben a szakirodalomból eddig ismeretlen szimulációs eljárás található [31]. A szabályozott hurokemelő hajtás kisjelű vizsgálata a gyök-helygörbe módszerrel történik, a rendszer Jacobi-mátrixa sajátértékeinek számítógépes meghatározása útján. Az értekezés kitér az alkalmazott szimulációs modell verifikációjának kérdésére is.

## F Ü G G E L É K

### I. A hurokemelő motor adatai

Tipus: 2db DP 82-es motor, egy tengelyen  
Motoronként:  $P_n = 106$  kW  
 $U_n = 220$  V  
 $I_n = 540$  A  
 $n_n = 425$  ford/perc  
 $GD^2 = 68$  kpm<sup>2</sup>

### II. Az A Jacobi-matrix sajátértékeinek meghatározásánál használt könyvtári szubrutinok:

SUBROUTINE BALANFO  
SUBROUTINE ORTHESF  
SUBROUTINE ORTRANSF  
SUBROUTINE HQR2FO  
SUBROUTINE EXC  
SUBROUTINE CDIVF  
SUBROUTINE RANRED  
SUBROUTINE HOMOG

Megtalálhatók az MTA CDC 3300-as számítógépének NUM-COSY programkönyvtárában.

## IRODALOM

- [1] Heidepriem, J., Digital Computer Applications in the Iron and Steel Industry, Proc. of the 5th IFAC/IFIP Int. Conference, Haga, 1977, 753-767.
- [2] Lindhoff, D., Integrierte Prozessautomatisierung im Walzwerk-Fertigungsleittechnik und Prozessoptimierung in Warmbreitbandstrassen, Siemens-Zeitschrift 51 /1977/ Hef 9, 748-751.
- [3] MacAlister, A.F., Eades, C.G., Current trends in modern hot-strip mill automation, GEC Journal of Science and Technology, Vol.44, No.3 /1978/ 123-135.
- [4] Coche, L., Les techniques sidérurgiques des années 1990 à 2000, C.I.T., Vol.36, No.1 /1979/ 45-53.
- [5] Anhaus, H., Schmidt, R., Antirebstechnik und Prozessautomatisierung in Hütten- und Walzwerken, Technische Mitteilungen 68 /1975/ Heft 11, 427-431.
- [6] Егоров, Е.П., Стефанович, В.Л., Электропривод и автоматика новых тонколистовых станов горячей прокатки, Сталь, № 5 /1978/ 471-476.
- [7] Long, L.C., Steel Mill Automation, Progress and Prognosis, Ironmaker and Steelmaker, Vol.4, No.3 /1977/ 35-38.
- [8] Kurotsu, R. et al., Computer control System of a Hot Strip Mill and Operation Results, Kowasaki Steel Techn. Report, Vol.3, No.3 /1971/ 295-311.
- [9] Davies, J.A., Integrated production control of a steelworks, GEC Journal of Science and Technology, Vol.40, No.2 /1973/ 46-51.
- [10] Economopoulos, M. et al., Computer Control of the Hot Strip Mill at Sidmar, C.R.M. Reports, No.37 /1973/ 23-35.
- [11] Adriaensen, D. et al., L'automatisation du train à larges bandes de SIDMAR, C.I.T., Vol.35, No.1 /1978/ 77-100.
- [12] Bertrand, A., Parmentier, D., L'automatisation du train a larges bandes de SOLMER, C.I.T., Vol.35, No.2 /1978/ 301-311.
- [13] Druzhinin, N.N. et al., Integrated process control system for a continuous wide strip mill with the application of a digital control computer, World Electrotechnical Congress, Moszkva, 1977, 6.szekció

11.előadás /23 old./

- [ 14 ] Maffei, M., Systeme multi-calculateurs pour la commande de laminoirs à bandes, World Electrotechnical Congress, Moszkva, 1977, 6.szekció 12.előadás /19 old./
- [ 15 ] Seyfried, H., Process automation of hot strip mills, World Electrotechnical Congress, Moszkva, 1977, 6.szekció 13.előadás /19 old./
- [ 16 ] Langer, U., Haider, H., Automation Warmbreitbandstrasse der VÖEST-ALPINE in Linz, Berg- und Hüttemännische Monatshefte 122 /1977/ Heft 5, 159-176.
- [ 17 ] Furth, B.P., Čarapič, M., Comparison of two on-line algorithms for finishing mill temperature control, Preprints of the 5th IFAC-IFIP Int.Conf. on Digital Computer Applications to Process Control, The Hague, 1977, 233-239.
- [ 18 ] Belgrano, F., Retrofitting a Process Control Computer to the Cornigliano Hot Strip Mill with an Integrated MIS System, Preprints of the 5th IFAC/IFIP Int.Cong. on Digital Computer Applications to Process Control, The Hague, 1977, 721-731.
- [ 19 ] Price, J.C., The Hot Strip Mill Looper System, IEEE Trans. Ind.Appl., /9/ 5 /1973/ 556-562.
- [ 20 ] Kollek, W.E., Bar and Strip Mill Loopers, Iron and Steel Engineer, October /1961/ 125-132.
- [ 21 ] Heindel, A., Regeleinrichtungen für Hauptantriebe und Schlingenheberantriebe von Breitband-Fertigstrassen, Siemens-Z. 40 /1966/ Heft 11, 795-799.
- [ 22 ] Young, W.J., Continuous hot mills, AEI Engineering, Metal Industries Supplement /1967/ 68-72.
- [ 23 ] Engelhardt, W., Schlingenheber und deren Antriebe an Fertigstrassen von Breitbandwalzwerken, Siemens-Z. 47 /1973/ 89-90.
- [ 24 ] Kiss, P., Meleghengeművi tirisztoros hurokfesztítő hajtás és hurok-szabályozás, 1. Erősáramu Elektronika Konferencia, Budapest, 1970. 1.szekció 9.előadás /10 old./
- [ 25 ] Пистрак, М.Я., Каретников, В.Ф., Система автоматического регулирования натяжения полюсы непрерывного листового стана с электро-механическими петледержателями, Электричество, № 2 /1976/ 78-82.
- [ 26 ] Ballók, I., Bencze, J., Weiner, Gy., dr.Bausz, I., Kalavszky, D., Meleghengersor számítógépes rendszervizsgálata, Automatizálás, 1 /1979/ 4-12.
- [ 27 ] Д-р Баус, И., Калавски, Д., Симуляция на ЭВМ системы регулирования привода многоклетьевого широкополосного стана горячей прокатки, VI.



Международная конф. стран-членов СЭВ и СФРЮ по автоматизации производственных процессов и управления в чёрной металлургии, Budapest, 1979, III/9-es előadás /44 old./.

- [ 28 ] Bausz, I., Kalavszky, D., Ballók, I., Bencze, J., Weiner, Gy., Digital Modelling of a Seven-Stand Hot Rolling Strip Mill. Simulation Results, Proc. of the 9th IMACS /AICA/ Cong. on Simulation of Systems, Sorrento, 1979, 447-455.
- [ 29 ] Kapcsolási elrendezés meleghengerművi villamos hurokemelő hajtás irányítására, Benyújtott szabadalom, 1979.
- [ 30 ] Kalavszky, D., Computer-Aided Study of Small and Large Signals in an Electrical Looper Control System, Abstracts of the IFAC Workshop on Computer-Aided Control Systems Design, Baku, 1980, 20-22.
- [ 31 ] Kalavszky D., A Novel Approach to the Digital Simulation of Converter-Fed Controlled Drives, Int. Journal of Modelling and Simulation, 3 /1980/ /megjelenés alatt/.
- [ 32 ] Kalavszky, D., Meleghengerművi hurokemelő hajtás vizsgálata. 4. Erős-áramu Elektronika Konferencia, Budapest, 1981, 2.kötet, 235-244.
- [ 33 ] Buxbaum, A., Plaetrich, H., Minimalzugregelung für kontinuierliche Warmwalzstrassen, Techn. Mitt. AEG-TELEFUNKEN, /66/6/1976/. 255-261.
- [ 34 ] Toshikazu, Y. et al., Hybrid Simulation of Tension Control System for Hot Tandem Mills, Proc. of the 8th AICA Congress, Delft, /1976/, 747-753.
- [ 35 ] Dr. Béda, Gy., Kontinuum mechanika I., Tankönyvkiadó, 1980, J 4-963.
- [ 36 ] Dr. Gillemot, L., Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1967.
- [ 37 ] Goldenblat, I.I., Szilárdsági számítások a gépészetben. Testek nagy hőmérsékleten, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1969.
- [ 38 ] Dr. Kozmann, Gy., Műszaki lengéstan, Tankönyvkiadó, 1967, J 4-476.
- [ 39 ] Schönfeld, R., Villamos hajtások kézikönyve, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- [ 40 ] Rácz, I., Villamos hajtások, Tankönyvkiadó, Budapest, 1971.
- [ 41 ] Dr. Csáki, F., Fejezetek a szabályozástechnikából. Állapotegyenletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [ 42 ] Kalavszky, D., Kombinált folytonos-diszkrét rendszerek – és szimulációjuk, Szimulációs vita III. /1979/ 5-6. /Hozzászólás a Neumann János Számítógéptudományi Társaság szimulációs vitájához. Kézirat./
- [ 43 ] Ralston, A., A First Course in Numerical Analysis, McGraw-Hill, 1965.



- [ 44 ] Tóth, K., A rendszermodellezés számítástechnikája. A rendszermodellezés matematikai módszerei II-IV, KSH NSZOTK, Budapest, 1976.
- [ 45 ] Lakatos, L., Hálózati kommutációju félvezetőket tartalmazó villamos hálózatok számítógépes szimulációja, Egyetemi doktori disszertáció, Budapest, 1977.
- [ 46 ] Dr.Magyar, P., dr.Lakatos, L., Áramirányítós rendszerek szabályozása, Tankönyvkiadó, 1978, J 5-1300.
- [ 47 ] Davat, B., Etude, mise au point et applications d'une méthode de simulation globale de convertisseurs statiques connectés à des charges électriques complexes, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP Toulouse, 1979.
- [ 48 ] Metz, M., Marty, P., Foch, H., Trannoy, B., Simulation des convertisseurs statiques et des ensembles convertisseurs-machines électriques, AIM Int. Meeting on Semi-conductors for Power Applications, Liège, 1980.
- [ 49 ] Nieniewski, M.J., Marleau, R.S., Digital Simulation of an SCR-Driven DC Motor, IEEE Trans. on Ind. Appl., IA-14, No.4 /1978/, 241-246.
- [ 50 ] Nieniewski, M.J., Digital Computer Analysis of the SCR DC Drive Dynamics, Prace Instytutu Elektrotechniki, Vol.26, No.106 /1978/, 5-77.
- [ 51 ] Dr.Rácz, I., Tirisztoros villamosgép-kapcsolások számítása mátrixokkal, 1.Erősáramu Elektronika Konferencia, Budapest, 1970, 2.1-es előadás /27 old./.
- [ 52 ] Magyar, F., Adalék a teljesítményelektronikai áramkörök számításához, 4.Erősáramu Elektronika Konferencia, Budapest, 1981 /9 old./.
- [ 53 ] Dr.Rácz, I., Automatizált villamos hajtások, Tankönyvkiadó, 1973, J 5-776.
- [ 54 ] Dr. Csáki, F., Bars, R., Automata, Tankönyvkiadó, Budapest, 1972.
- [ 55 ] Dr. Csáki, F., Szabályozások dinamikája. Lineáris szabályozáselmélet, Akadémiai Kiadó, 1970.
- [ 56 ] Athans, M., Falb, P.L., Optimal Control, McGraw-Hill, 1966.
- [ 57 ] Rózsa, P., Lineáris algebra és alkalmazásai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
- [ 58 ] Strehó, M., Stiff típusú közönséges differenciálegyenletek megoldásáról, MIA SZTAKI Tanulmányok 48 /1976/, 67 old.

MTA SZTAKI TANULMÁNYOK

1983 – 1984

- 140/1983 Operation Research Software Descriptions, Vol.1. (Szerkesztette: Prékopa András és Kéri Gerzson.)
- 141/1983 Ngo The Khanh: Prefix-mentes nyelvek és egyszerű determinisztikus gépek
- 142/1983 Pikler Gyula: Dialógussal vezérelt interaktív gépészeti CAD rendszerek elméleti és gyakorlati megfogalmazása
- 143/1983 Márkus Zsuzsanna: Modellelméleti és univerzális algebrai eszközök a természetes és formális nyelvek szemantikaelméletében
- 144/1983 Publikációk 81 (Szerkesztette: Petróczy Judit.)
- 145/1983 Telcs András: Belső állapotú bolyongások
- 146/1983 Varga Gyula: Numerical Methods for Computation of the Generalized Inverse of Rectangular Matrices
- 147/1983 Proceedings of the joint Bulgarian-Hungarian workshop on "Mathematical Cybernetics and data Processing" (Szerkesztette: Uhrin Béla)
- 148/1983 Sebestyén Béla: Fejezetek a részecskefizikai elektronikus kísérleteinek adatgyűjtő, -feldolgozó rendszerei köréből
- 149/1983 L.Keviczky, J.Hethéssy: A general approach for deterministic adaptive regulators based on explicit identification
- 150/1983 IFIP TC.2 Working Conference "System Description Methodologies" May 22-27. 1983. Kecskemét (Szerkesztette: Knuth Előd)
- 151/1983 Márkus Zsuzsanna: On First Order Many-Sorted LOGIC
- 152/1983 Operations Research Software Descriptions, Vol.2. (Szerkesztette: Prékopa András és Kéri Gerzson)
- 153/1983 T.M.R.Ellis: The automatic generation of user-adaptable application-oriented language processors based on quasi-parallel modules
- 154/1983 Publikációk 82 (Szerkesztette: Petróczy Judit)

- 155/1984 Deák István, Hoffer János, Mayer János, Németh Ágoston, Potecz Véla, Prékopa András, Straziczky Beáta: Termikus erőműveken alapuló villamosenergia-rendszerek rövidtávú, optimális, erőművi menetrendjének meghatározása hálózati feltételek figyelembevételével
- 156/1984 Radó Péter: Relációs adatbáziskezelő rendszerek összehasonlító vizsgálata
- 157/1984 Ho Ngoc Luat: A geometriai programozás fejlődései és megoldási módszerei
- 158/1984 Proceedings of the 3rd International Meeting of Young Computer Scientists (Szerkesztette: Demetrovics J. és Kelemen J.)
- 159/1984 Bertók Péter: A system for monitoring the machining operation in automatic manufacturing systems
- 160/1984 Ratkó István: Válogatott számítástechnikai és matematikai módszerek orvosi alkalmazása (kandidátusi értekezés)
- 161/1984 Hannák László: Többértékű logikák szerkezetéről





