



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA**

Doktori értekezés

**Recirkulációt tartalmazó vegyipari rendszerek
szabályozhatóságának vizsgálata**

Szerző: Horváth Marcell, okl. vegyészmérnök

Témavezető: Dr. Mizsey Péter, az MTA doktora

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

2010

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Mizsey Péternek munkámhoz nyújtott értékes segítségéért, szakmai irányításáért, támogatásáért, és jelen dolgozat elkészítéséhez szükséges valamennyi eszköz messzemenő biztosításáért.

Köszönöm a Varga József Alapítvány és a Sanofi-Aventis ZRt. támogatását.

Köszönöm a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszéke dolgozóinak munkámhoz nyújtott valamennyi segítségét.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	2
1. 1. <i>Motiváció</i>	2
1. 2. <i>A munka céljai</i>	2
1. 3. <i>Eszközök, számítási módszerek</i>	3
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
2. 1. <i>A recirkuláció általános leírása</i>	4
2. 2. <i>Dinamikus vizsgálatok</i>	6
2. 3. <i>Az irányítástechnikai vizsgálatok eszközei</i>	7
2. 4. <i>Recirkuláció-kompenzáció</i>	10
2. 5. <i>A recirkuláció kvantitatív hatásai</i>	12
2. 6. <i>Szabályozhatósági kérdések</i>	13
2. 7. <i>A folyamattervezés és a szabályozhatóság összefüggései</i>	16
2. 8. <i>Direkt kompenzáció</i>	18
2. 9. <i>Szabályozási struktúra tervezése</i>	20
3. A RECIRKULÁCIÓ SZABÁLYOZÁSI LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA	26
3. 1. <i>A recirkuláció hatásának általános vizsgálata</i>	26
3. 2. <i>Recirkulációs rendszerek matematikai modelljei</i>	27
3. 3. <i>A recirkuláció átviteli tényezőjének és időállandójának hatása</i>	28
3. 4. <i>A recirkuláció hotidejének hatása</i>	31
3. 5. <i>Recirkulációs rendszerek szabályozási kérdései</i>	32
3. 6. <i>P szabályozó alkalmazása</i>	32
3. 7. <i>PI szabályozó alkalmazása</i>	33
3. 8. <i>Recirkuláció-kompenzátor és alkalmazása</i>	35
3. 9. <i>Adaptív szabályozás recirkulációs rendszerekre</i>	39
4. SZABÁLYOZÁSI STRUKTÚRÁK DEKOMPONÁLHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA	44
4. 1. <i>Recirkuláció többváltozós rendszerekben</i>	44
4. 2. <i>szabályozhatósági indexek</i>	44
4. 3. <i>Általános dekomponálhatósági vizsgálatok</i>	46
4. 3. <i>A dekomponálhatósági vizsgálatok célja</i>	47
4. 5. <i>Egyszerű rendszerek dekomponálása</i>	48
4. 5. 1. <i>Legkedvezőbb struktúrák meghatározása</i>	50
4. 5. 2. <i>Legkedvezőbb struktúrák meghatározása recirkulációs esetekben</i>	51
5. VIZSGÁLATOK IPARI RENDSZERBEN	52
5. 1. <i>A vizsgált ipari rendszer adatai</i>	53
5. 1. 1. <i>A konverzió hatása</i>	54
5. 2. <i>Összetétel-szabályozások</i>	55
5. 2. 1. <i>Vizsgálatok a stacionárius tartományban</i>	56
5. 2. 2. <i>Dinamikus vizsgálatok</i>	59
5. 2. 3. <i>Vizsgálatok az idő-tartományban</i>	63
5. 2. 4. <i>Vizsgálatok a frekvencia-tartományban</i>	64
5. 3. <i>Új frekvenciafüggő szabályozhatósági indexek</i>	68
6. DEKOMPONÁLHATÓSÁGI VIZSGÁLATOK IPARI RENDSZERRE	71
6. 1. <i>Bevezetés</i>	71
6. 2. <i>Az egyedi kolonnák hatásának vizsgálata</i>	72
6. 3. <i>A teljes rendszer vizsgálata</i>	74
7. ÖSSZEFOGLALÁS	82
8. ÚJABB TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	85
9. PUBLIKÁCIÓS LISTA	87
10. JELÖLÉSJEGYZÉK	88
11. IRODALOMJEGYZÉK	91

1. BEVEZETÉS

1. 1. Motiváció

A folyamatok hatékonyságának növelése, költségeinek csökkentése mára a vegyipari folyamat tervezés kulcsfontosságú szempontjaivá váltak. Számos esetben azonban e két tervezési szempont nem függetleníthető egymástól, és a megtervezni kívánt rendszerek kialakításakor együttesen kell figyelembe venni a velük szemben támasztott követelményeket. A vegyiparban az egyik leggyakrabban alkalmazott műveletcsoport a komponens-elválasztás, melynek legnagyobb volumenű megvalósítása továbbra is forráspont-különbözőségek alapján működő desztillációs rendszerekben történik. Ezen rendszerek gyakran tartalmaznak anyag-, és/vagy energia-recirkulációt, részben technológiai, részben hatékonysági megfontolások miatt – sok folyamat pedig nem is valósítható meg recirkuláció alkalmazása nélkül.

Hasonlóan fontos szempont a termék minősége, mellyel szemben egyre szigorúbb követelményeknek kell megfelelnie a gyártástechnológiáknak. A minőség vegyipari rendszerek esetén elsősorban a termék összetételének pontosságát jelenti, melynek előírt értéken tartásáért megfelelően kialakított szabályozókörök felelősek. A hagyományos összetétel-szabályozó körök jellemzően az anyag-, és/vagy az energiamérlegbe történő beavatkozással biztosítják a kívánt terméktisztaságot. Recirkuláció alkalmazása esetén a rendszerbe szabályozástechnikai értelemben pozitív visszacsatolás kerül, mely káros hatással van a folyamat szabályozhatóságára, és ezen hatások kiküszöbölése érdekében módosítani kell a szabályozókörök struktúráján és beállításain. Recirkulációt tartalmazó rendszerek esetén a rendszer belső összefüggéseinek száma megnő, a visszavezetett áramok miatt a szabályozókörök egymással is kölcsönhatásba léphetnek – azon túl is, hogy desztilláló oszlopok összetétel-szabályozása esetén a desztillátum, vagy a fenéktermék összetételének megváltoztatása eleve a másik termékösszetételre is hatással van: a desztilláló oszlopok szabályozása jellemzően többváltozós folyamat. Az így kapott MIMO (Multiple Input – Multiple Output) rendszerek mérete tehát a hagyományos 2×2 -esnél (2 bemenő, 2 kimenő változó) nagyobbra nő, ez pedig szélesebb körű szabályozhatósági és dekomponálhatósági vizsgálatokat kíván.

1. 2. A munka céljai

Jelen dolgozat egyik fő célja a recirkuláció rendszerfüggetlen tárgyalása, általános szempontok alapján történő kvantitatív analízise és hipotetikus rendszereken keresztül újabb

szabályozási lehetőségek vizsgálata, a recirkuláció hatásának kvantifikálása. Másik fő célja ezzel összefüggésben a recirkulációs rendszerekre tervezett szabályozási struktúrák tervezési feladatában a dekompozíció lehetőségének vizsgálata, melyhez a rendszerek frekvencia-tartományban és az idő-tartományban mutatott viselkedését egyaránt felhasználtam. Az előbbi két vizsgálati szempont által kijelölt munka végső célja a recirkuláció szabályozási lehetőségének és a szabályozási struktúratervezés dekomponálhatóságának részletes vizsgálata nagyipari struktúrára, mely rendszer jelen dolgozatban az etilbenzol előállítására használt vegyipari rendszer. Ez az ipari technológia két recirkulációt is tartalmaz (különböző anyagáramokkal), ezért ideális rendszernek bizonyult a fenti vizsgálatokra.

1. 3. Eszközök, számítási módszerek

A recirkuláció hatását a rendszerek stacionárius és dinamikus viselkedésére az előzetes vizsgálatok során a Matlab [1] segítségével tanulmányoztam, mely vizsgálatok során a különböző paraméterek (átviteli tényező, időállandó, holtidő, stb.) hatását kvantitatív módon jellemeztem. Szintén a Matlab segítségével megvizsgáltam a hipotetikus recirkulációs rendszerek szabályozási lehetőségét P, PI-szabályozókkal, megvizsgáltam a recirkuláció-kompenzáció és az adaptív szabályozás lehetőségeit is.

Az ipari rendszert különböző folyamatszimulátorok segítségével modelleztem, részletesen vizsgáltam a stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban. Az stacionárius vizsgálatokat az AspenPlus [2] folyamatszimulátorban végeztem, az eredményeket pedig VisualBasic [3] segítségével dolgoztam fel és ezen alkalmazás segítségével írtam eljárásokat a különböző stacionárius szabályozhatósági indexek kiszámítására. A dinamikus vizsgálatok futtatása az AspenDynamics-ban [4] történt, a frekvencia-tartományban pedig ezen alkalmazás CDI (Control Design Interface) nevű modulja segítségével kaptam eredményeket. A CDI a felépített rendszer állapotter-modelljéből számított állapotmátrixokat, melyeket a Matlab segítségével dolgoztam fel és így kaptam meg a rendszer frekvenciafüggő szabályozhatósági mutatóit frekvenciafüggvények formájában, melyeket logaritmusos diagramban ábrázoltam. A stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban végzett vizsgálatok eredményei alapján szabályozási struktúrákat terveztem, melyek tervezési feladatára vonatkozó dekomponálhatóság igazolása volt a vizsgálatok fő célkitűzése. Ezt kétváltozós függvények 3D ábrázolásával, és a kapott függvényfelületek elemzésével végeztem. A szabályozási struktúrák működését és stabilitását az idő-tartományban végzett vizsgálatokkal verifikáltam, az AspenDynamics segítségével.

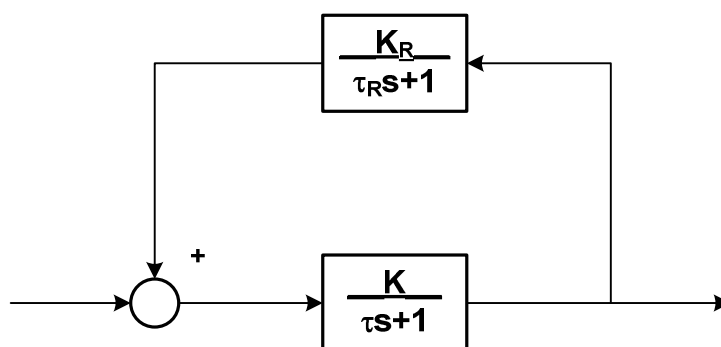
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A témában végzett kutatásaim kiindulópontja a recirkuláció általános leírása, elvként történő jellemzése volt. Az elsődleges vizsgálatokat követően a recirkulációs rendszerek dinamikájával, a kompenzáció lehetőségeivel, majd szabályozási kérdéseivel kapcsolatos kutatások eredményeit tekintetem át. Végül komplex szabályozási struktúrák kialakításával, a tervezés dekomponálhatóságával és a recirkuláció mindezekre gyakorolt hatásával kapcsolatban folytattam kutatást az irodalomban, és dolgoztam fel a rendelkezésre álló releváns eredményeket.

2. 1. A recirkuláció általános leírása

A recirkuláció által felvetett alapvető problémákat és kérdéseket W. L. Luyben háromrészes cikksorozata ([5], [6], [7]) széleskörűen tekinti át, jól összegzi a recirkulációs rendszerek szabályozhatósági vizsgálatának eredményeit, mely vizsgálatok során kaszkád-, és recirkulációs rendszerek egyaránt a vizsgálatok tárgyát képezték. A publikációsorozat eredményei igen lényegesek jelen dolgozat szempontjából, ezért Luyben munkáinak feldolgozásával kezdem az irodalmi áttekintést.

Egyszerű recirkulációs rendszerekből kiindulva, melyek folyamata és recirkulációs ága egyaránt leírható egytárolós, elsőrendű tagként, a szerző részletesen vizsgálta a recirkuláció átviteli tényezőjének hatását a stabilitásra különböző időállandók mellett, dinamikus vizsgálatok eredményeit elemezte, és említést tett negatív visszacsatolású recirkulációs rendszerekről, melyek ritkák ugyan, de léteznek. A vizsgálatok kiindulópontjaként használt rendszer vázlata az **1. ábrán** látható.



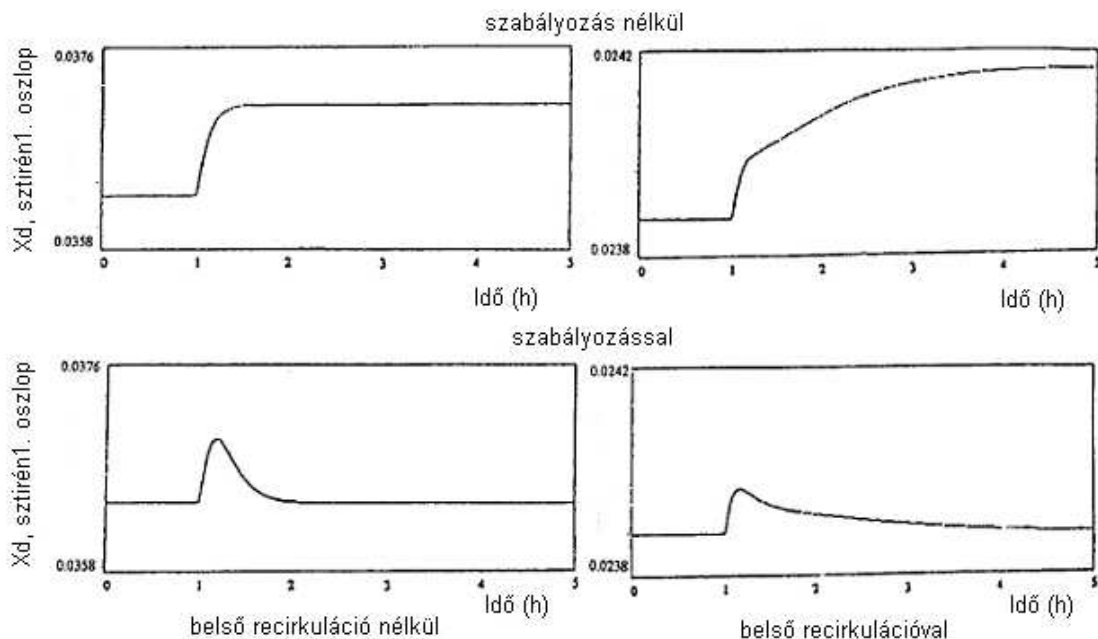
1. ábra: recirkulációs rendszer reprezentációja Luyben szerint

Eredményeiből kitűnik, hogy a recirkuláció átviteli tényezőjének növekedésével mind kedvezőtlenebb irányba tolódik a rendszer dinamikája, és a karakterisztikus egyenlet gyökei egyre távolabbra kerülnek az eredeti gyököktől. Az időállandó növekedése lassabb működésű rendszereket eredményez, amint az várható is. Részletesen vizsgálta emellett a recirkuláció és a folyamat paramétereinek különböző értékei esetén a teljes rendszert is. Az előzőekben vizsgált nyílt láncú rendszert zárt láncban, szabályozással ellátva is modellezte, a szabályozókörök karakterisztikus egyenleteiből jelleggörbéket ábrázolt a valós számsíkon, majd mindezen vizsgálatokat kiterjesztette egy reaktor és egy desztilláló oszlopot tartalmazó többváltozós rendszerre, melyet a Ziegler-Nichols-módszer szerint hangolt szabályozókörökkel látott el. A vizsgálatok valós ipari példa nélkül, hipotetikus rendszerek modelljei alapján történtek. A fenti hangolási módszer az eredeti koncepció szerint akkor tekinthető elfogadhatónak, ha megvalósul a legalább 50%-os amplitúdóviszony a kimenő jel lengése során. Ugyanezt a struktúrát recirkulációval is megvizsgálva javaslatokat tett, és különböző mérési módszerek fejlesztését javasolta a hólabda-effektus elkerülésére. A hólabda-effektus olyan öngerjesztő változást jelent zavarás hatására, melynek során valamely áram összetétele, vagy maga az áram oly mértékben feldúsul, vagy megnő, hogy megakadályozza a rendszer normális működését, így a termékösszetételek elfogadhatatlanok lesznek. A publikációsorozat második közleményében [6] különböző folyamattervezési eljárások összehasonlítására került sor, egy elsőrendű, $A \rightarrow B$ típusú kémiai reakciót megvalósító, folyamatosan kevert tartályreaktort tartalmazó rendszerre - a teljes rendszer egy reaktor/sztripper konfiguráció. A reaktor és az oszlop méretezésének változtatásával keresett optimális megoldást, stacionárius jellemzők, valamint a különböző alternatívák szabályozhatósági tulajdonságait vizsgálta és hasonlította össze. Szabályozhatósági szempontból optimálisnak egy olyan elrendezést talált, melyben nagy méretű reaktor, és kis méretű sztrippelő oszlop szerepelt, bár gazdaságossági szempontok alapján a nagy méretű reaktor kevésbé kedvező. A sorozat harmadik közleményében [7] a korábbi vizsgálatokat kiterjesztette egy konszekutív kémiai reakciót tartalmazó folyamatra, ahol a reakció $A \rightarrow B \rightarrow C$ alakú, melyben a fő termék a B komponens, a kevésbé értékes pedig a C. Az optimális reaktorméret ezen rendszer esetében lényegesen kisebb, mint a korábban vizsgált esetben, mert a C komponens koncentrációját alacsony értéken kell tartani. A rendszer nagy anyagáramú recirkulációt tartalmaz, melynek dinamikája rendkívül erős hatással bír a teljes rendszer dinamikájára. A betáplálási áram zavarásának hatása a legnagyobb a rendszer stabilitására: 5%-os zavarás a betáplálásban 100%-os változáshoz vezethet a recirkulációs áram nagyságában. Az ilyen jellegű, nagymértékben erősített zavarások hatásának

kiküszöbölése céljából történt vizsgálatok eredményeként azt az általános konklúziót állapította meg a szerző, hogy a recirkulációs kör valamely anyagáramát mindenképp szabályozni kell. Külön vizsgálta a reakciókinetika hatását, és költségelemzést is végrehajtott. A részletes dinamikus vizsgálatok mellett célszerű lett volna a frekvencia függvényében is vizsgálni a rendszert, erre ebben a közleményben nem került sor, ettől függetlenül a publikációsorozat fontos és alapvető munka a recirkulációs rendszerek kutatásában.

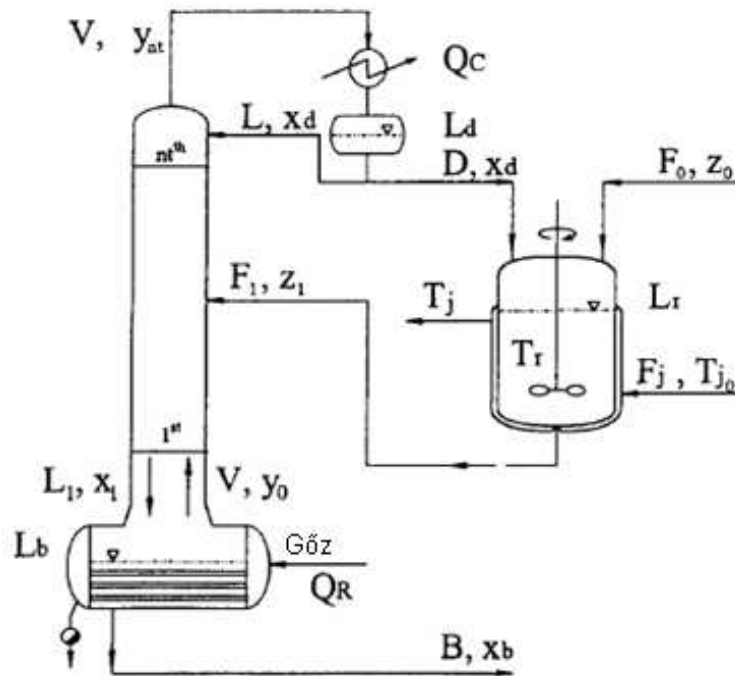
2. 2. Dinamikus vizsgálatok

Az előzőekben láthattuk, hogy a recirkulációs áram(ok) szabályozása elengedhetetlen a hólabda-effektus elkerülésére. Fő következtetése az volt, hogy a recirkulációs áram szabályozása szükségszerű a hólabda-effektus elkerülésére. Hasonló következtetésre jutott P. Mizsey és I. Kalmár [8], melyben a recirkuláció okozta dinamikus változások tanulmányozása mellett a recirkuláció káros hatásainak kiküszöbölésére kerestek alternatívákat. A vizsgált átvitelifüggvény-modell elsőrendű holtidős folyamatként értelmezte mind a folyamatot, mind annak recirkulációját, illetve megvizsgálták ugyanezen rendszert harmadrendű modell és harmadrendű recirkuláció esetén is. A folyamat és a recirkuláció is tartalmazott negatív visszacsatolású szabályozókört. Stabilitási tartományokat térképeztek fel, majd megvizsgálták a sztirén előállítására használt kétkolonnás rendszer dinamikáját, és részletesen elemezték az ugrászavarások dinamikus hatásait. A szabályozás nélküli, és szabályozóval ellátott rendszer ugrásválaszai a **2. ábrán** láthatók.



2. ábra: A sztirén előállítására használt rendszer ugrásválaszai szabályozással és szabályozás nélkül [5]

A szerzők ezt követően részletesen megvizsgálták egy elválasztó rendszert, mely egy folyamatosan kevert kémiai tartályreaktorból és egy desztilláló oszlopból állt. A rendszer felépítése a **3. ábrán** látható.



3. ábra: A reaktort és desztilláló oszlopot is tartalmazó recirkulációs rendszer vázlata

A recirkulációs rendszerek kutatásával kapcsolatban azért is lényeges ez a közlemény, mert a reaktor termékét visszavezették a desztilláló oszlopba, így jelen esetben egy reaktor-kolonna-felépítésű recirkulációs rendszerrel állunk szemben, melynek különböző megvalósítási formái széles körben elterjedtek a vegyiparban. A rendszert recirkulációval, recirkuláció nélkül, nyílt, és zárt láncban is elemezték, elsősorban dinamikus viselkedés alapján, ahol a szabályozókörök hangolási algoritmusai a Ziegler-Nichols-módszert követték. Az eredmények W. L. Luyben munkáihoz hasonlóan azt mutatták, hogy a recirkulációs áram szabályozása szükséges.

2. 3. Az irányítástechnikai vizsgálatok eszközei

Az irányítástechnika alapvetően jelekkel dolgozik, az alkalmazott blokkok jelátvivő tulajdonsága tehát elsődleges fontosságú azok tárgyalásánál. A jelek feldolgozása lehetséges mind az idő-, mind a Laplace-tartományban, utóbbi azonban a matematikai kezelhetőség érdekében lényegesen célszerűbb.

Egy adott irányítástechnikai blokk kimenetét átviteli függvényének ismeretében határozhatjuk meg, melynek definíciója:

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} \quad (1)$$

ahol y a kimenő jel, x a bemenő jel, s pedig a Laplace-operandusz.

Lényeges formula a karakterisztikus egyenlet, melyet olyan módon kapunk az átviteli függvényből, hogy a Laplace-operanduszt tartalmazó tagokat azonos átalakításokkal a nevezőbe gyűjtjük, majd a nevező zérushelyeit vizsgáljuk. A zérushelyek, mint póluspontok elhelyezkedése a komplex számsíkon információt ad a rendszer stabilitásáról. Ismeretes a Routh-Hurwitz-féle stabilitási kritérium, mely szerint a zárt szabályozó kör akkor stabil, ha karakterisztikus egyenletének valamennyi együtthatója pozitív és az együtthatókból képzett Hurwitz-féle determináns, valamint annak főátló szerinti valamennyi al-determinánsa nagyobb zérusnál [9]. A Hurwitz-féle determináns (a -val jelölve az együtthatókat):

$$\Delta = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 \\ 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Szabályozási struktúrák vizsgálhatók a stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban. Stacionárius esetben kizárólag a vizsgáló zavarásokra adott válaszok végértékei lényegesek, az időfüggő tranziens viselkedés nem. A stacionárius szabályozhatóság előrejelzése stacionárius szabályozhatósági indexek nyújtanak segítséget [10], melyek definíciója alább látható.

A különböző szabályozott és módosított jellemzők változásainak hányadosából képzett mátrix a stacionárius átviteli tényezők mátrixa:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_{c1}}{\Delta x_{m1}} & \frac{\Delta x_{c2}}{\Delta x_{m1}} \\ \frac{\Delta x_{c1}}{\Delta x_{m2}} & \frac{\Delta x_{c2}}{\Delta x_{m2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Amelyben az első törtben Δx_{c1} jelöli az első számú szabályozott jellemző megváltozását, mely a Δx_{m1} első számú módosított jellemző megváltoztatásának hatására következik be. A mátrix többi ragja analóg módon mutatja az összefüggést a különböző módosított jellemzők és a hatásukra megváltozó szabályozott jellemzők között. A mátrix transzponáltjának a mátrixszal képzett szorzata $A^T \cdot A$, mely szorzatmátrix sajátértékei λ_1 , és λ_2 . Ezen sajátértékek négyzetgyökei a rendszer szinguláris értékei:

$$\sigma_1 = \sqrt{\lambda_1} \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\lambda_2} \quad (5)$$

A szinguláris értékekből a következő stacionárius szabályozhatósági indexek határozhatók meg [10]:

$$\text{- kondíciós szám: } CN = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (6)$$

$$\text{- Niederlinski-index: } NI = \frac{\det[A]}{a_1 a_2} \quad (7)$$

$$\text{- Morari-féle belső szabályozhatósági index: } MRI = \sigma_{\min} \quad (8)$$

$$\text{- relatív erősítési tényező főátlójának elemei: } RGA_{11} = \frac{\left(\frac{\partial y_1}{\partial x_1} \right)_{x_2}}{\left(\frac{\partial y_1}{\partial x_1} \right)_{y_2}} \quad (9)$$

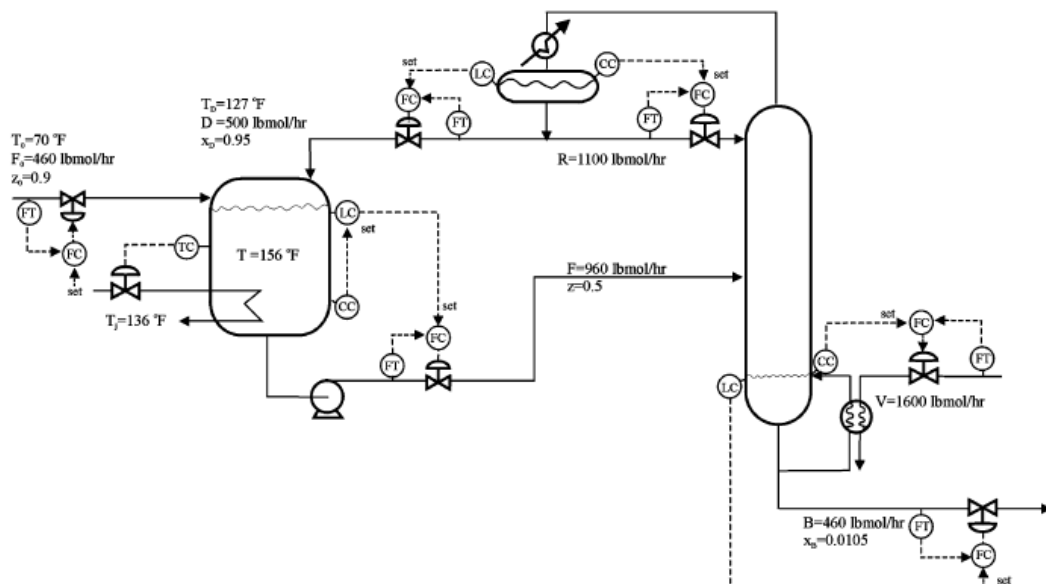
Ezen mutatók meghatározásával különböző lehetséges szabályozási struktúrák összehasonlíthatóvá válnak.

Az idő-tartományban ugrászavarások alkalmazhatók a rendszer dinamikus viselkedésének feltérképezésére, a minősítések alapja pedig ebben az esetben jellemzően valamely, szabályozási hibával kapcsolatos mennyiség, vagy egyéb, a szabályozás minőségét kvantifikáló jellemző.

A frekvencia-tartományban alkalmas a rendszer frekvenciafüggő viselkedésének leírására széles frekvencia-tartományban, a kvantifikációt pedig különböző frekvenciafüggő szabályozhatósági indexek segítik, melyek a stacionárius indexekből eredeztethetők. Mindezen tartományokban vizsgálva a rendszert, olyan kép- és adathalmaz gyűjthető, mely jól reprezentálja a feltételezett szabályozási struktúrák viselkedését és megbízható eszközt kínálnak azok megtervezéséhez.

2. 4. Recirkuláció-kompenzáció

A recirkulációs rendszerek kutatásában fontos és alapvető közlemény O. Taiwo munkája [11], mely bemutatja a recirkuláció-kompenzátor működési elvét, tervezésének szempontjait, és amely elsőként adott garantált stabilitást a bemenő jelek széles tartományában. A kompenzáció lehetőségét később jelen dolgozat keretében is megvizsgáltam. Taiwo munkájának nyomán később W. L. Luyben, S. Skogestad és társaik egy, a [8] közleményben bemutatotthoz hasonló struktúra esetén vizsgálták részletesen recirkulációval ellátott reaktor-szeparátor típusú rendszer szabályozhatósági kérdéseit [12]. A **4. ábrán** látható rendszer egy folyamatosan kevert tartályreaktort és egy desztilláló oszlopot tartalmaz, szabályozókörökkel ellátva.



4. ábra: Reaktort és desztilláló oszlopot is tartalmazó recirkulációs rendszer vázlata

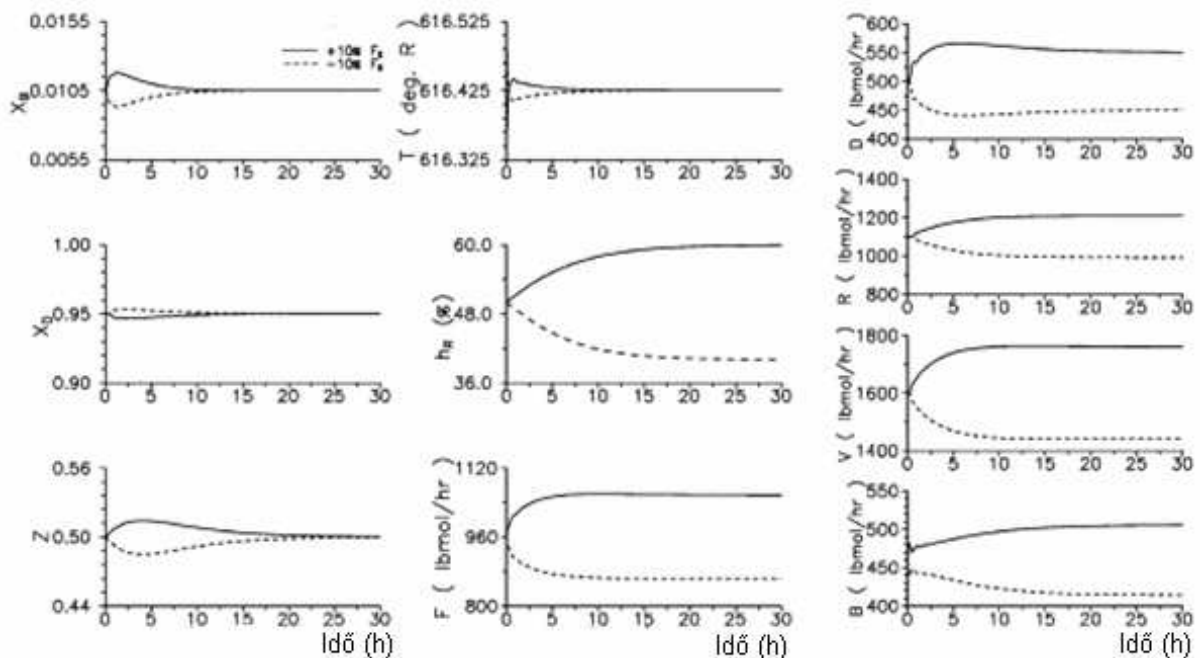
A kémiai reakciókra felírt összefüggések közül ebben az esetben a hólabda-effektus alapja jól látható a (10) komponensmérlegről:

$$B = \frac{kV_R}{(z_0 - x_B)} \frac{x_B - x_D RR}{1 + RR} = \frac{kV_R}{(z_0 - x_B)} z = kV_R \frac{RR}{1 + RR} \quad (10)$$

ahol k a reakciósebességi állandó, B a fenéktermék árama, V a folyadék-holdup a reaktorban, RR pedig a recirkulációs arány (D/B). A konvencionális gyakorlat, mely szerint a reaktor

hőmérsékletét és a holdup mennyiségét állandó értéken tartjuk, csak egyetlen szabad változót hagy arra, hogy kézben tartsuk a termékáramokat: a recirkulációs arányt. Miután ez a változó (RR) szerepel mind a számlálóban, mind a nevezőben, csak nagy mértékű változások eredményezhetnek változásokat a termékáramokban. Pontosan ez a felelős a hólabda-effektusért, és szignifikáns hatása lehet, ha a recirkulációs arány meghaladja az 5 értéket. A szerzők különböző vizsgálatokat végeztek arra vonatkozóan, hogy a rendszer milyen mértékben képes a zavarások hatásait kezelni, ezzel a rendszerre telepített szabályozókörök működésére vonatkozóan minőségi információk nyerhetők.

Ezen nemlineáris dinamikus vizsgálatok során a betáplálási áram nagyságában alkalmaztak zavarásokat, melyek eredményei **5. ábrán** láthatók.

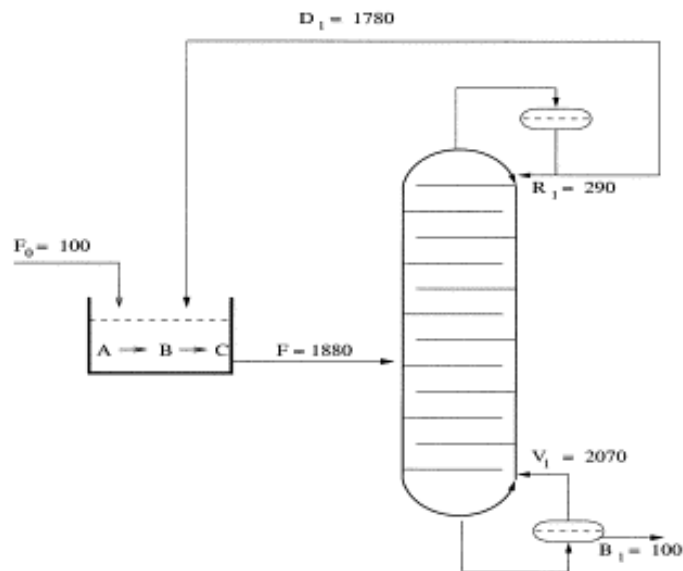


5. ábra: Dinamikus vizsgálatok reaktor/szeparátor rendszerben

Ugrászavarások alkalmazásával a rendszer dinamikus viselkedéséről kaphatunk információt, és a kimenő jelek időfüggvényeinek identifikációjával meghatározhatók a rendszert felépítő elemek irányítástechnikai modelljei, melyek a szabályozókörök tervezéséhez lényeges segítséget jelentenek. A részletes dinamikus vizsgálatok eredményeiből az látszik, hogy a rendszer eredő viselkedése megfelelően közelíthető elsőrendű taggal, a frekvencia-tartományban azonban itt sem történtek vizsgálatok. A közleményben analitikus levezetést közölnek a „hólabda-effektusra”, mely utal a szabályozás szükségességére.

2. 5. A recirkuláció kvantitatív hatásai

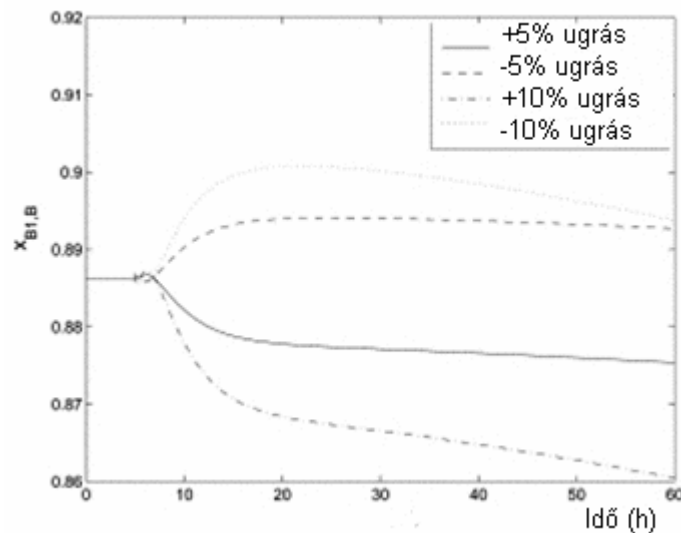
Recirkulációs rendszerek vizsgálata során az esetek többségében nem csak kvalitatív, de kvantitatív eszközökkel is el kell végezni a recirkuláció hatásainak leírását. Láthattuk, hogy a recirkulált anyagáramok megjelenése miként hat a rendszerek dinamikus viselkedésére, azonban további összefüggések felírása szükséges a recirkulált extenzív áramok nagysága és az általuk kifejtett hatás összefüggésében. P. Daoutidis és A. Kumar közleményében [13] a recirkulációban részt vevő anyagáramok nagyságának és a szabályozhatósági tulajdonságok változásának összefüggéseit vizsgálta. A vizsgálatok során azt találták, hogy kis recirkulációs anyagáramok gyenge kölcsönhatásokat eredményeznek az egyedi folyamatok között, míg nagy recirkulációs anyagáramok esetén egy “felhasadás” történik az időtartományban, melynek eredményeként az egyedi folyamatok dinamikus tulajdonságai a kis időállandójú tartományba, míg a teljes rendszer dinamikája a “lassabb” tartományba kerül, ahol a kölcsönhatások erősebbek és jellemzően nemlineárisak. A vizsgálatokat az **6. ábrán** látható rendszerben hajtották végre, mely hasonló a korábban feldolgozottakhoz: egy kémiai reaktort és egy desztilláló oszlopot tartalmaz; a reaktorban konszekutív reakció zajlik.



6. ábra: Reaktor és desztilláló oszlop, a reaktorban konszekutív reakcióval

A munkában hangsúlyozták a recirkulációnak a folyamatok dinamikájára gyakorolt kedvezőtlen hatását, a zavarásokra vonatkozó érzékenység nagymértékű növekedését, a teljes rendszer válaszait jelentősen lelassítja, valamint erősen nemlineárisá teszi a teljes

folyamatokat leíró modelleket. A szerzőpáros említést tett korábbi munkákról, melyek recirkulációs rendszereket elemeztek és javaslatokat tettek szabályozási struktúra kiválasztására. Ismét bevezették a korábban már alkalmazott recirkulációs arány fogalmát, különböző differenciálegyenletek formájában kezelték a modellt. A **7. ábrán** a vizsgált rendszer válaszai láthatók különböző nagyságú és irányú zavarásokra.



7. ábra: A konsekutív kémiai reakciót tartalmazó reaktorból és a desztilláló oszlopból álló rendszer ugrásválaszai

A szerzők elemezték az időskálán történő szeparációt, és ehhez mérten fejlett, elosztott szabályozásokat terveznek: felügyelő szabályozás létesül a teljes rendszerre, a lassabb dinamikával rendelkező tartományban. Ezen nemlineáris szabályozó tervezése alacsony rendű állapotter-reprezentáció segítségével történt. Az áramokkal, mint módosított jellemzőkkel történő szabályozások jelen esetben a módosított jellemzők két csoportjába oszthatók, melyek közül a nagyobbak a “gyorsabb” időskálával kapcsolatos szabályozásokkal kapcsolatosak, míg a kisebbek a teljes rendszerre vonatkozó szabályozási céloknál kerültek felhasználásra.

2. 6. Szabályozhatósági kérdések

Recirkulációt tartalmazó rendszerek szabályozása esetén alapvető probléma, hogy a recirkuláció jelenléte irányítástechnikai szempontból pozitív visszacsatolásnak minősül. A rendszerben ilyen módon jelen lévő pozitív visszacsatolás hatásainak enyhítésére, vagy bizonyos esetekben maradéktalan kiküszöbölésére hatékony segítséget nyújt a modellbázisú

szabályozás alkalmazása, melyet egyszerű formában jelen dolgozatban később alkalmaztam is.

C. Scali és R. Antonelli részletesebben vizsgálták [14] recirkulációs rendszerek szabályozhatóságát, összehasonlítva hagyományos PI-szabályozókkal ellátott rendszereket modellbázisú szabályozásokkal ellátottakkal, abban az esetben, amikor a recirkulációs rendszer tartalmaz recirkuláció-kompensátort, és abban az esetben is, amikor nem. Megvizsgálták, hogy mely esetekben szükséges olyan kompenzátor adaptálása, amely teljes egészében képes a recirkuláció okozta hatások kiküszöbölésére, mind alapjel-változásokra, mind külső zavarásokra.

A modellbázisú (IMC) szabályozóra az alábbi összefüggések vonatkoznak kompenzátorral ($R_{\text{kompenzátorral}}$) és anélkül ($R_{\text{kompenz.nélkül}}$) a visszacsatolt szabályozóra:

$$R_{\text{kompenz.nélkül}} = (s + 1)^2 \frac{F}{1 - F} \quad (11)$$

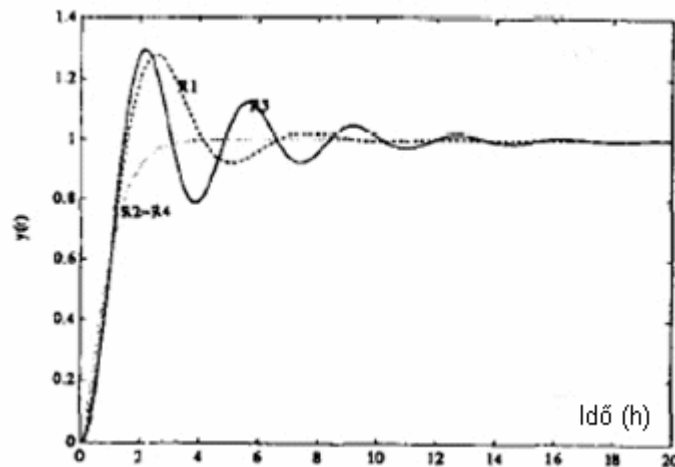
$$R_{\text{kompenzátorral}} = \frac{(s + 1)^2 (\tau_r s + 1) - K_r}{(\tau_r s + 1)} \frac{F}{1 - F} \quad (12)$$

Ezzel kapcsolatban az említett közleményben két esetet vizsgáltak meg részletesen:

$$\#1 : K_R = -2, t_r = 0,1 \quad (13) \quad (14)$$

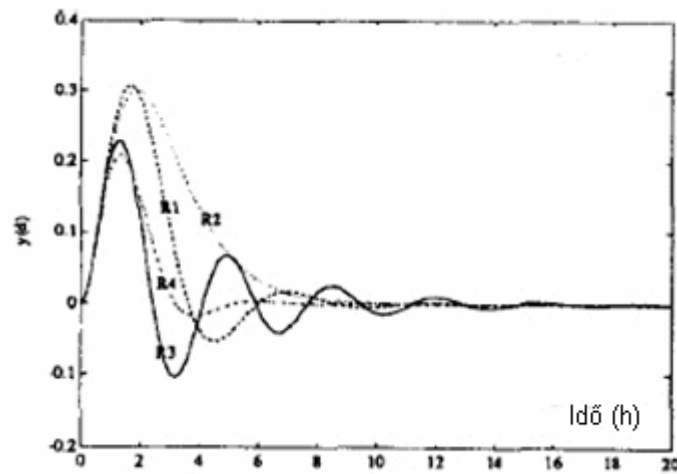
$$\#2 : K_R = 4, t_r = 1 \quad (15) \quad (16)$$

A 8. ábrán az első esetre láthatók az alapjel-zavarások hatásainak időfüggvényei.



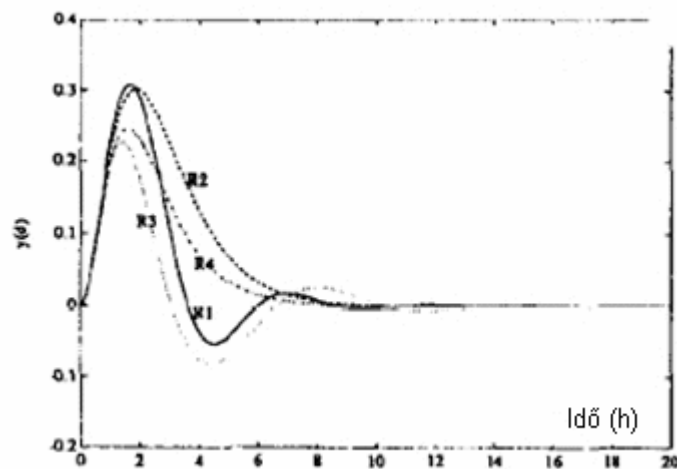
8. ábra: Alapjel-zavarások

A **9. ábrán** látható diagram az #1 esetben mutatja a rendszer különböző válaszait a zavarásokra.



9. ábra: Zavarás-válaszok az #1 esetben

A **10. ábrán** látható diagram az #2 esetben mutatja a rendszer különböző válaszait a zavarásokra.

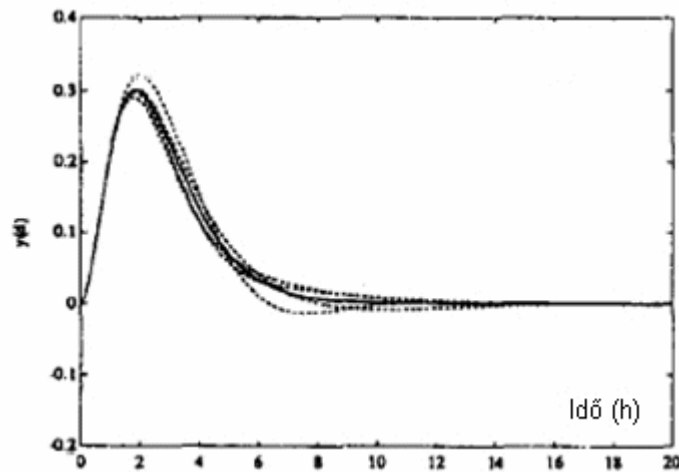


10. ábra: Zavarás-válaszok a #2 esetben

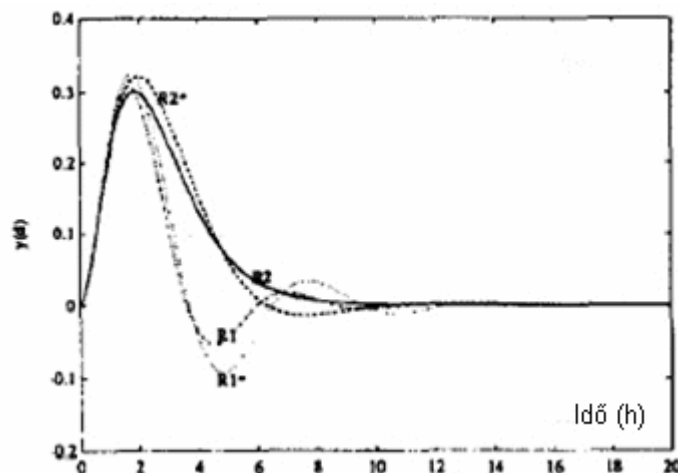
A szerzők megvizsgálták a kompenzátor robusztusságát is. Ezzel együtt egy egyszerű bizonytalansági függvényt vezettek be, mely a recirkuláció átviteli függvényének két paraméterét módosítottan vette figyelembe:

$$K_r = \hat{K}_r \pm \delta \quad \tau_r = \hat{\tau}_r \pm \delta \quad (17)$$

A zavarások hatásának tekintetében abban az esetben, amikor a kompenzátor adaptációja megfelelőnek bizonyult, jó eredményeket értek el, ahogy az a **11. és 12. ábrákon** is látható.



11. ábra: Zavarásokra adott válasz recirkuláció-kompenzáció esetén



12. ábra: Zavarásokra adott válasz recirkuláció-kompenzáció esetén

PI szabályozó alkalmazása esetén a relatíve egyszerű működési algoritmusának köszönhetően korlátokba ütköztek a recirkulációs folyamatban nyílt láncban tapasztalható negatív póluspontok miatt, míg az IMC-rendszerű szabályozással ellátott rendszerben ilyen jellegű korlátok nem tapasztalhatók, az alapjel-zavarások kapcsán sem.

2. 7. A folyamattervezés és a szabályozhatóság összefüggései

A flowsheeting-technikák és a szabályozhatósági kérdések integrálására vonatkozóan az 1990-es évektől publikáltak analitikus jellegű munkákat, céljuk elsősorban egy hierarchikus megközelítés kidolgozása volt, melyben helyet kap a teljes folyamat megtervezése és a teljes szabályozási struktúra kialakítása is, előre definiált prioritási elvek alapján.

Dimian és társai munkája [15] a problémát nagy méretű rendszerek esetén vizsgálták, melyeknél szignifikáns recirkulációs hatások is tapasztalhatók. Különböző folyamattervezési struktúrákat javasoltak, és különböző recirkulációs elrendezések előnyeit és hátrányait elemezték. Vashbinder és Hoo [16] részben folytatva ezen elvek kidolgozását, részletesen tanulmányozták a szabályozási struktúrák szintézisének, és a rendszerszintű tervezés integrációjának lehetőségeit. Kidolgoztak egy új dekompozíciós módszert ezen feladatokhoz, mely egységműveletek kiválasztásán alapult, és a módosított Analitikus Hierarchikus Megközelítést (AHP) alkalmazta. Ezen rendszerszintű dekomponálási eljárás lehetővé tette a tervezési célfüggvények rangsorolását, működéssel kapcsolatos korlátok felállítását, és alternatív dekomponálási lehetőséget adott. Ez a módszer azonban nem szolgáltatott információt két fontos eljárásról: a szabályozási struktúratervezés alkalmazásának lehetőségeiről, és az általuk szolgáltatott eredmények kiértékeléséről.

Az eredeti AHP-modell egy néglépéses műveletcsoportot takart, melynek elemei:

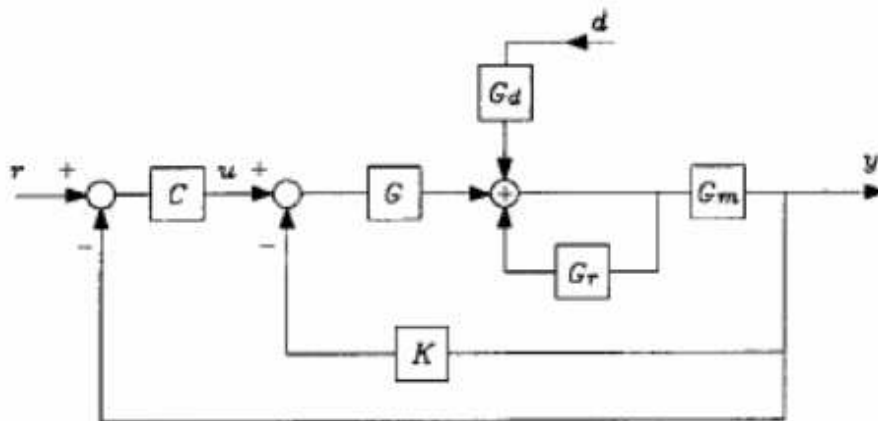
- megbecsüljük és kiválasztjuk a partikuláris folyamat-dekomponálások lehetőségeit (tervezési célfüggvények és működési feltételek segítségével)
- a célok mentén szisztematikusan prioritási sorrendet állítunk fel
- a szabályozásokkal kapcsolatos célfüggvényekre szintén prioritás
- az egymással versengő, kedvező alternatívák közül választunk

Ugyanez a módszer egy háromszintű közelítést javasol a szabályozásokra: az aktív szabályozások, a fejlettebb szabályozások és a “regulatory control” szintjein. A módosított AHP során a döntéshozatali mechanizmusban először rangsorolták a bemenetek, és az állapotok relatív fontosságát, majd feltérképezték az állapotok közötti kölcsönhatásokat. A tervezési célok és az üzemeltetési paraméterek identifikálása után dekomponálható a teljes folyamat kisebb egységekre, modulokra, melynek során minden lehetséges alternatívát identifikáltak, megvizsgáltak, meghatározták a releváns tervezési, működési célokat, majd állandósult állapotú modellt fejlesztettek. Ezt követően fejlesztették a dinamikus modellt is, melynek során feltérképezték a modulok komplexitását viselkedés szempontjából, és strukturális, logikai, matematikai szempontokból (differenciálegyenletek, stb.). A dinamikus állapotok identifikálása során zavarás-érzékenységi vizsgálatokat végeztek a rendszeren. A szerzőpáros részletesen vizsgálta ezen elvek alkalmazhatóságát egy DME-t előállító rendszer továbbfejlesztett változatára, mely recirkulációt is tartalmazott. Megvizsgálták a moduláris

dekomponálás lehetőségeit, részben kombinatorikai alapokon, részben a Luyben-féle “9-lépés” elve alapján (1990) [10], melyek segítségével a teljes rendszerre nézve legkedvezőbb szabályozási struktúrát meghatározták. Az elemzésből hiányolható az összehasonlító vizsgálat a dekomponált és a teljes rendszerre vonatkozóan valamely kvantitatív jellemző segítségével.

2. 8. Direkt kompenzáció

Claudio Scali és Fausto Ferrari a recirkulációs áramok hatását vizsgálták rendszerek szabályozhatóságára [17], [18], és a direkt recirkuláció-kompenzáció stabilitás-, és hatékonyságnövelő lehetőségeit tanulmányozták. Az általam részletesebben vizsgált [18] közleményben kidolgoztak egy kétszintű dekomponálási eljárást, melynek segítségével külön kezelhető a rendszer recirkuláció nélkül, és maga a recirkuláció is – ehhez hasonlóan a rendszerre tervezett szabályozási struktúrát is két részre osztották: a folyamatra tervezett szabályozóra, és a recirkuláció-kompenzátorra. Ez a fajta struktúra jóval egyszerűbb szabályozótervezést tett lehetővé. A szerzőpáros által először megvizsgált, recirkuláció-kompenzátorral ellátott rendszer vázlatát a **13. ábrán** látható.



13. ábra: Recirkuláció-kompenzátorral ellátott rendszer

Az ábrán G jelöli a folyamatot, C a szabályozót, K a kompenzátor-kört. A zavarásra vonatkozó átviteli függvényt G_d írja le, G_r a recirkulációra vonatkozó átviteli függvény, G_m pedig egy, a kimenetet késleltető tag. Nyílt láncban, recirkuláció jelenlétében a módosított jellemzők (u), és a zavarások (d) hatása a kimenő jelekre (y) az alábbi alakban adható meg:

$$y(u, d) = G_m G u + G_m G_d d \quad (18)$$

$$y(u, d) = G_m G' u + G_m G'_d d \quad (19)$$

$$G' = (I - G_r)^{-1} G; \quad G'_d = (I - G_r)^{-1} G_d \quad (20)$$

Ezekből a kifejezésekből a korábbi kutatások eredményeihez hasonlóan szintén látható, hogy a recirkuláció jelenléte megváltoztatja a folyamat dinamikáját, ezért a recirkulációs áramok figyelembe vétele kifejezetten szükségeszerű recirkulációs rendszerek tervezésénél, még akkor is, ha egyébként egyszerű rendszerrel van dolgunk, ugyanis ilyen esetekben sem egyszerű a recirkuláció hatását előre jelezni, a recirkulációs folyamatok erős nemlinearitása miatt. A recirkulációs rendszerek káros hatásainak kiküszöbölésére a szerzők itt is recirkuláció-kompensátort javasoltak eszközként, amely a **13. ábrán** is látható. Reirkuláció-kompensátor jelenlétében a rendszer kimenő jelei az alábbiak szerint módosulnak:

$$y(u) = G_m G' (I + K G_m G')^{-1} u \quad (21)$$

$$y(d) = G_m G'_d (I + K G_m G')^{-1} d \quad (22)$$

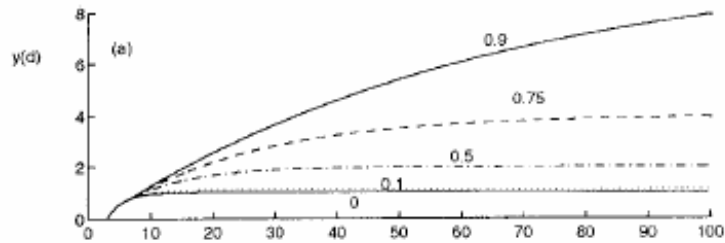
A kompenzátor struktúrája képes annak garantálására, hogy a válaszok nem különböznek recirkulációs, és recirkulációmentes esetben. Ez a (18), (19) és (22) egyenletekből látható, melyekből a következő összefüggés adódik:

$$\tilde{K} = \tilde{G}^{-1} \tilde{G}_r \tilde{G}_m^{-1} \quad (23)$$

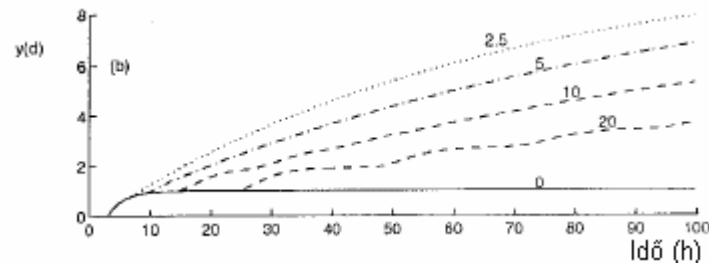
ahol a módosított K érték a kompenzátor nominális jellemzője. Pozitív jellemzője a kompenzátornak, hogy nem igényel további méréseket, köszönhetően annak, hogy hagyományos, visszacsatolt úton működik. Abban az esetben, ha a (23) egyenletben leírt struktúra fizikailag megvalósítható, és nem tapasztalhatók modellezési hibák, a kompenzátor alkalmazásával a recirkuláció hatásai teljes egészében kiküszöbölhetők, valamint a C-vel jelölt szabályozó megtervezhető, beállítható annak megfelelően, mintha nem lenne jelen recirkuláció. A szerzők a teljes rendszer átviteli függvényére az alábbi adták meg:

$$G' = \frac{G}{1 - G G_r^0} = \frac{K_p (\tau_r s + 1) e^{-\theta_p s}}{(\tau_p s + 1)(\tau_r s + 1) - K_r K_p e^{-(\theta_r + \theta_p) s}} \quad (24)$$

amelyben r jelöli a recirkulációt, p a folyamatot, θ a holtidőt, K az átviteli tényezőket. Jelen átviteli függvények segítségével nyílt láncú vizsgálatokat végeztek ezen holtidős rendszeren, a kapott válaszfüggvényeket **14.** és a **15. ábra** mutatja.



14. ábra: A recirkulációs rendszer ugrásválasza különböző K_r értékek esetén



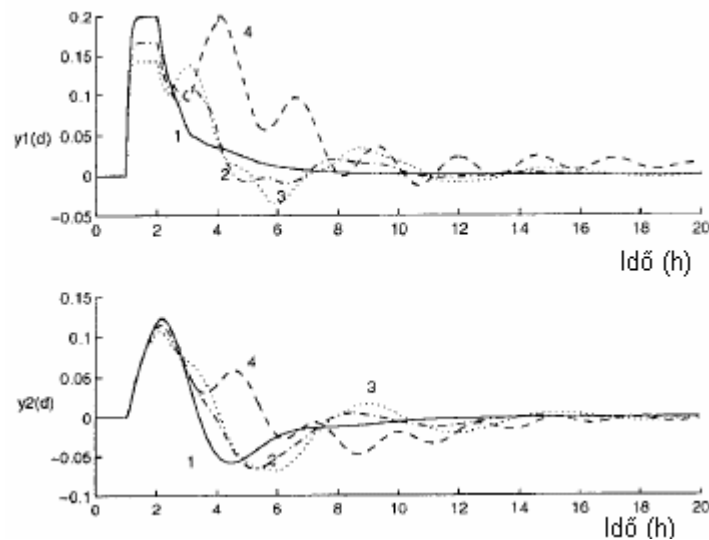
15. ábra: A recirkulációs rendszer ugrásválasza különböző Θ_r értékek esetén

A szabályozásokhoz PI-algoritmust használtak a szerzők, a folyamat (G) pedig FOPTD-jellegű blokk volt (First Order Plus Time Delay), a szabályozó hangolása a Ziegler-Nichols-módszert követte. A nyílt láncú rendszer viselkedésével kapcsolatban több eset lehetséges a paraméterek függvényében, melyek a recirkuláció jelenlétével állnak kapcsolatban, és a recirkuláció-kompenzáció hatékonyságát mutatják. Az alkalmazott paraméterek különböző értékei mellett szemléletes formában tették láthatóvá a matematikai formulák tartalmát. Felmerül, hogy adaptív szabályozással tovább lett volna javítható a rendszer viselkedése, erre azonban nem terjedtek ki a vizsgálatok.

2. 9. Szabályozási struktúra tervezése

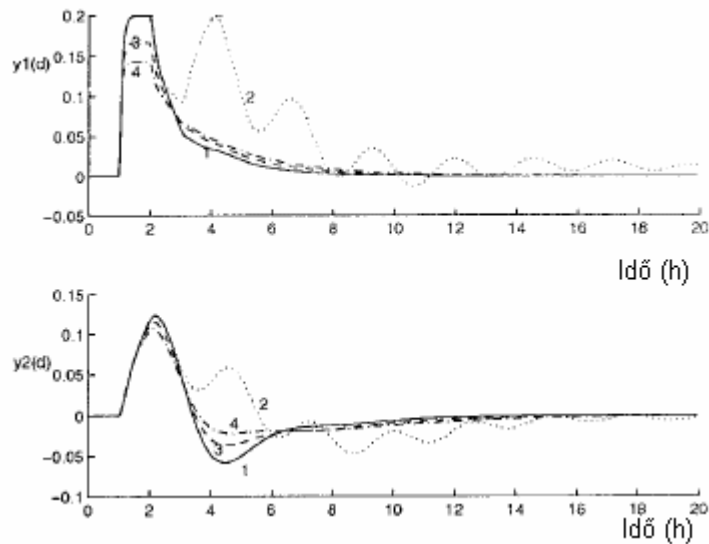
Annak érdekében, hogy a recirkuláció-kompenzáción alapuló szabályozási struktúra előnyei láthatóak legyenek, a szerzők összehasonlítást végeztek a két szabályozott jellemzőt tartalmazó rendszeren kompenzátor alkalmazásával (C_1) és anélkül (C_2). A visszacsatolt szabályozót mindkét esetben diagonális PI-algoritmussal közelítették, a hangolási metódus a lehető legegyszerűbb módon az együtt működő folyamatok diagonális elemeit vette

figyelembe. Abban az esetben, amikor nem került sor kompenzátor alkalmazására, a szabályozót (C') a recirkulációs rendszerre tervezték (G'). Ekkor a két C'_{ii} szabályozó a két G'_{ii} elemen alapult, melyek relatíve komplex dinamikával rendelkeznek. Ziegler-Nichols-módszert használtak a körök behangolására. Kompenzátor alkalmazása esetén a C szabályozási struktúrát a recirkulációt nem tartalmazó G rendszerre végezték el, K recirkuláció-kompenzátor alkalmazásával. Ebben az esetben a C_{ii} elemek a G_{ii} elemekből adódnak, melyeknek lényegesen egyszerűbb dinamikájuk van (FOPTD), ami lehetővé teszi az egyszerű PI-szabályozásnak megfelelő hangolási algoritmus alkalmazását. A recirkuláció-kompenzátor a (12) egyenletből adódóan egy 2×2 -es mátrix, melynek a speciális recirkulációs struktúrából adódóan csak egy, zérustól különböző eleme van. Ez a struktúra $\Theta_r > \Theta_m$ esetben képes a recirkuláció hatásának teljes kompenzálására, és csak kis mértékben teszi bonyolultabbá a szabályozási struktúrát. A kapott eredmények általánosíthatóságát Ferrari és munkatársai tovább vizsgálták [18], mely munkában a vizsgált, reaktorokat tartalmazó rendszer zárt láncú vizsgálatának eredményei a **16. és a 17. ábrán** láthatók.



16. ábra: A 2×2 -es rendszer zárt láncú vizsgálatának eredményei

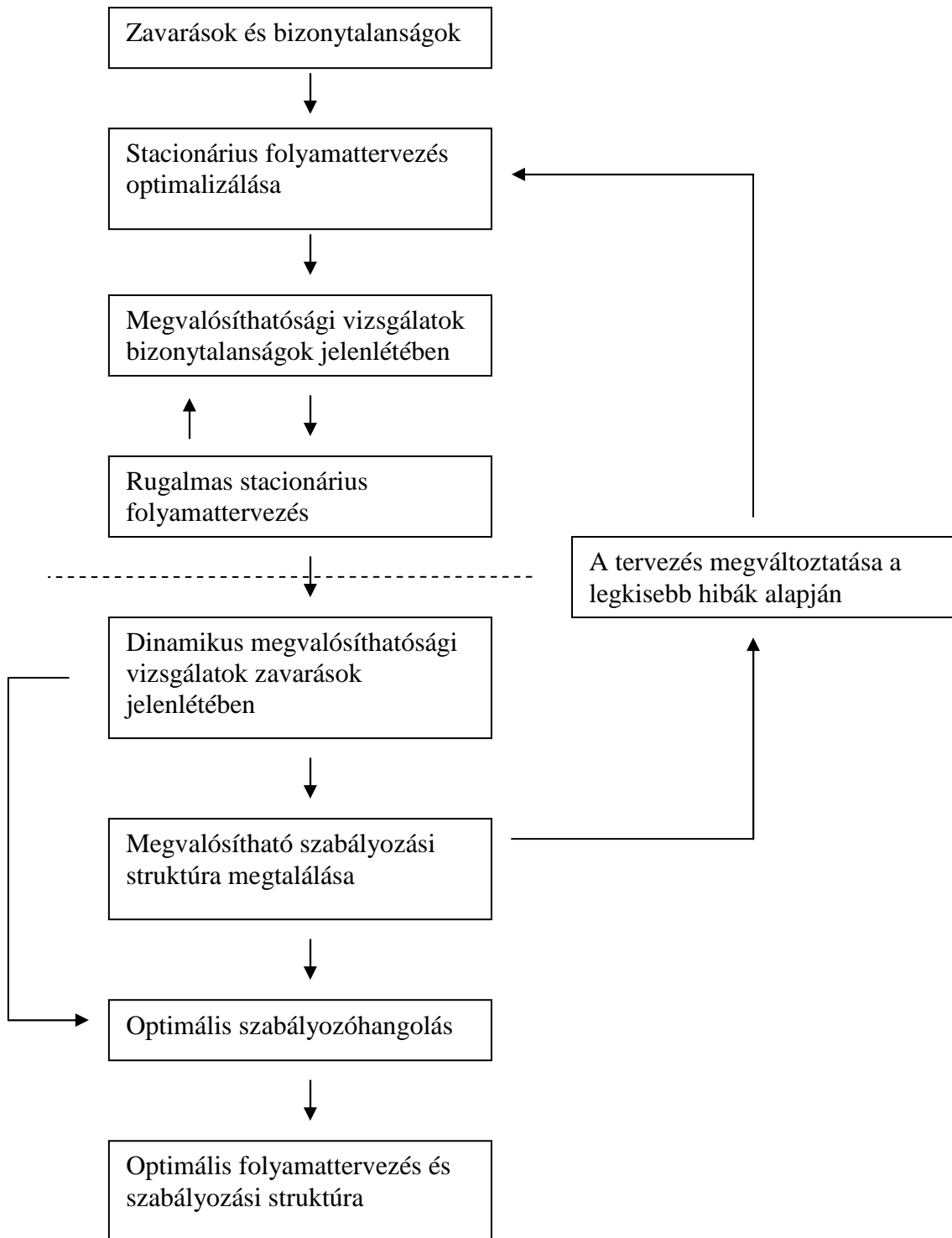
A **16. ábrán** látható eredmények y_1 és y_2 válaszait mutatják zavarásokra, recirkuláció jelenlétében, C és C' esetén. Az 1 jelű görbe a tökéletes kompenzátor esetét ábrázolja, a 2 és a 3 C esetét mutatja a recirkulációs áram (R) megváltozásakor annak 20%-os, és 50%-os esetében. A 4-es számú görbe C' -t reprezentálja, és azt az esetet, amikor nincs kompenzátor.



17. ábra: A 2×2 -es rendszer zárt láncú vizsgálatának eredményei

A **17. ábrán** látható esetben az 1 jelű görbe szintén a tökéletes kompenzátort reprezentálja, a 2 a C' esetet, kompenzátor nélkül, a 3-4 görbék pedig adaptív kompenzátor esetén mutatják a 20%-os, majd 50%-os recirkulációs áram-változás hatására a kimenő jelek változását. A szerzők jelen munkába tovább vizsgálták a fenti elvek alkalmazhatóságát nagyobb méretű és komplexebb felépítésű rendszerekre.

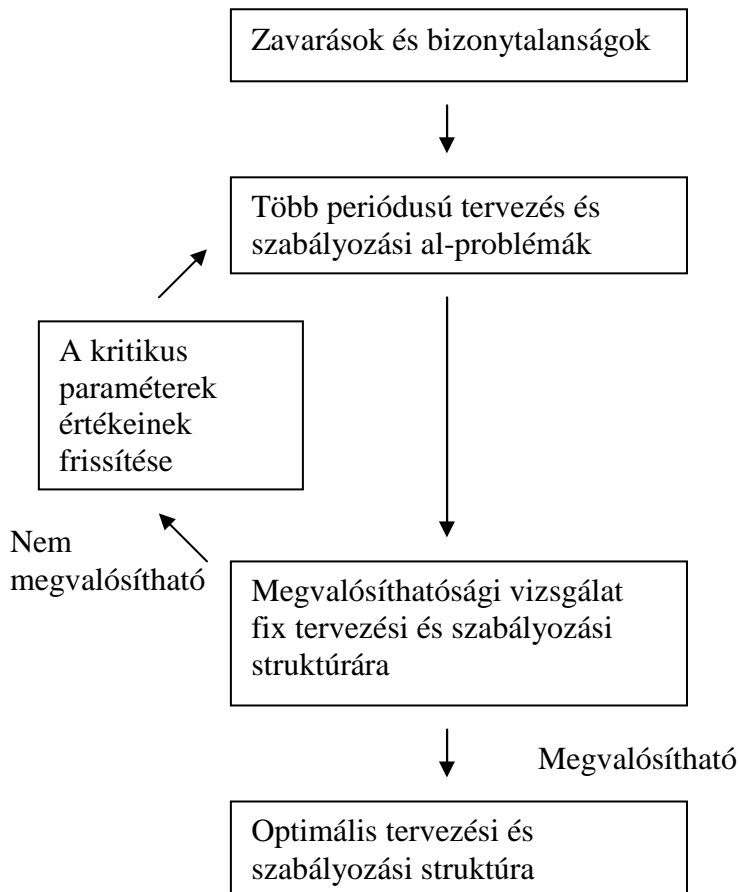
Georgiadis és társai egy többlépéses eljárást javasoltak a folyamattervezésre [33], rigorózus oszlopban történő reaktív desztilláció szabályozására. A stacionárius tartományban szekvenciális folyamattervezést javasoltak, melynek kiterjesztett stratégiáját a **18. ábrán** látható módon határozták meg. A zavarások és a bizonytalanságok figyelembevételével stacionárius optimalizálás történt, melyet dinamikus megvalósíthatósági vizsgálatok követtek, majd a megvalósítható szabályozási struktúrát térképezték fel, végül kidolgozták az optimális hangolásokat és a teljes optimális szabályozási struktúrát.



18. ábra: A szekvenciális tervezés és szabályozás stratégiája Georgiadis szerint

Az előzőekben vázolt közelítés abban az esetben állja meg a helyét, ha a folyamattervezés és a folyamatirányítás között nincsenek érdemi kölcsönhatások. Ez a megközelítés jól alkalmazható azon rendszerekre, melyekre ez a feltétel fennáll, azonban nem minden rendszer

ilyen, sőt, a magasabb komplexitású rendszerek általában nem ilyenek. Ezen bonyolultabb struktúrájú rendszerekre dolgoztak ki egy másik közelítést, az ún. szimultán struktúrát tervezésre és szabályozásra. Ennek vázlata a **19. ábrán** látható.



19. ábra: A szimultán tervezés és szabályozás stratégiája Georgiadis szerint

Ez egy alapvetően iteratív jellegű tervezési javaslat, melynek egy, a fentieknél egyszerűbb változatát sikerrel alkalmazták a közleményben vizsgált reaktív desztillációhoz. A szekvenciális és a szimultán tervezés hatását egyebek mellett a reaktív desztillációs oszlop kondenzátorának nyomásszabályozása kapcsán is megvizsgálták, szintén sikerrel.

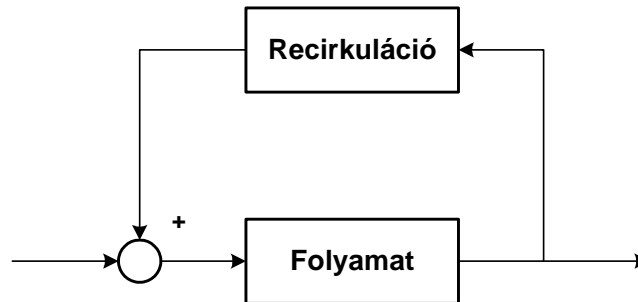
A recirkulációt tartalmazó vegyipari rendszerek témakörében megjelent irodalom részletesen vizsgálta a recirkuláció hatásait, kompenzálásának, szabályozásának lehetőségeit, és mindezeket többváltozós rendszerek esetén is. A struktúratervezés dekomponálhatósága is megtalálható az irodalomban, a hozzá szükséges vizsgálati eszközök azonban különböznek azoktól, amelyeket jelen doktori dolgozatomban alkalmaztam. Jelen munkámban a szabályozhatóság különböző tartományokban (stacionárius-, idő-, és frekvencia-) leírható

minőségi jellemzőit, a szabályozhatósági indexeket, azok függvényeit, és ezen indexekből számított módosított, más munkákban nem alkalmazott formáit használtam fel optimális szabályozási struktúrák feltérképezésére, azok ellenőrzésére, elméleti és ipari rendszerek esetén egyaránt, valamint mindezek időtartományban történő verifikálására, stabilitásuk ellenőrzésére. A kifejezetten recirkulációt tartalmazó rendszerek szabályozási struktúrái tervezési feladatának dekomponálhatóságával az irodalomban még nem foglalkoztak, csak folyamatok és rendszerek dekomponálásával. A frekvencia-tartományban végzett vizsgálatok az irodalomban nagyobb számban energiaintegrált rendszerekre lelhetőek fel, kifejezetten a recirkuláció hatását ezekkel az eszközökkel a rendelkezésre álló irodalomban még nem vizsgálták, ezért tűztem ki munkám egyik céljaként a frekvencia-tartományban végzett vizsgálatokat, majd azok segítségével dekomponálhatósági vizsgálatok elvégzését.

3. A RECIRKULÁCIÓ SZABÁLYOZÁSI LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA

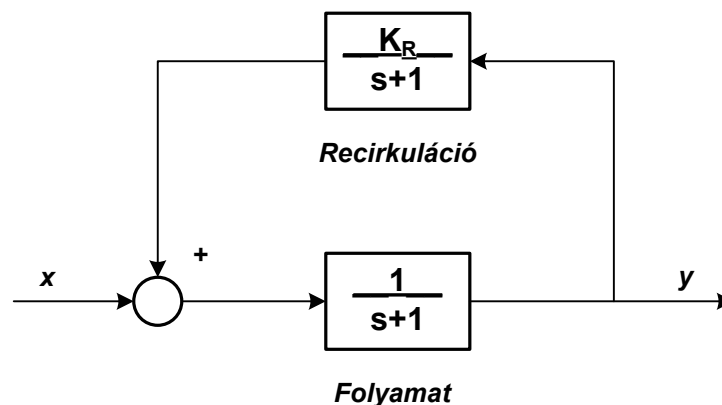
3. 1. A recirkuláció hatásának általános vizsgálata

Amint az irodalmi feldolgozásokból, valamint matematikai megfontolások alapján is látható, irányítástechnikai szempontból a recirkuláció pozitív visszacsatolásnak felel meg, melynek általános blokkvázlata a **20. ábrán** látható.



20. ábra: A recirkuláció blokkvázlata

A desztillációs oszlopok irányítástechnikai szempontból több bemenettel és több kimenettel rendelkező MIMO (multiple input, multiple output) - rendszerként írhatók le. Szabályozástechnikai modelljük kimenete a fej- és a fenéktermék összetétele, a bemenetek pedig az ezekhez választott módosított jellemzők. Folyamatszimulátorok segítségével tetszőleges recirkulációs rendszer modellezhető, szimulálható, ezért a legegyszerűbb recirkulációs rendszerek vizsgálatát folyamatszimulátorok, jelen esetben a Matlab segítségével kezdtem. A **21. ábrán** látható egyváltozós recirkulációs rendszer folyamata és recirkulációs ága is elsőrendű tag. Az átviteli függvények a blokkokban láthatók.



21. ábra: Egyszerű recirkulációs rendszer vizsgálata

A **21. ábrán** látható rendszer az egyik legegyszerűbb felépítésű recirkulációs rendszer, és az erre kapott eredmények nem általánosíthatók, azonban egyszerűbb vizsgálatokon keresztül jól bemutatható általa a recirkuláció jelenlétének hatása és annak kezelése.

3. 2. Recirkulációs rendszerek matematikai modelljei

A későbbiek során kiemelten fontos analitikus megközelítés érdekében felírtam a recirkulációs rendszerek matematikai modelljeit, melyek irányításelméleti megközelítésben tárgyalják azok viselkedését a Laplace-tartományban.

A **21. ábrán** látható, pozitív visszacsatolású rendszer még nem tartalmaz szabályozókört, ezért ún. nyílt láncú kör, melynek átviteli függvénye:

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{G_F}{1 - G_F G_R} \quad (25)$$

ahol G_F a folyamat, G_R a recirkuláció átviteli függvénye. Elsőként ezen rendszert vizsgáltam meg dinamikus szempontokból, miután a dinamikus analízis alapvető feltétel a recirkulációs rendszerek viselkedésének minősítéséhez. A dinamikus analízis során elsősorban a recirkulációs ág hatását vizsgáltam a teljes rendszer viselkedésére. A nyílt láncú stabilitásvizsgálatok során a folyamat (G_F), valamint a recirkuláció (G_R) átviteli függvényét elsőrendű tagnak tételeztem fel. Ezt anélkül tehetjük meg, hogy a modell veszítene általános érvényességéből, emellett igen sok, a mérnöki gyakorlatban létező rendszer identifikálható elsőrendű egytárolós, és elsőrendű holtidős tagként – a holtidő szerepét a későbbi vizsgálatok során figyelembe is vettem. A szimulációs vizsgálatok kimutatták, hogy sem a folyamat, sem a recirkuláció átviteli függvényének rendüisége nem befolyásolja számottevően a recirkulációs paraméterek hatását a teljes folyamat dinamikájára. Az előremenő ágat (a folyamatot) tehát egytárolós, elsőrendű tagként írtam le, mely rendelkezik egy átviteli tényezővel (K_F), és egy időállandóval (τ_F). A recirkulációs ág átviteli tényezője hasonló felfogásban K_R , időállandója τ_R .

A folyamat és a recirkulációs ág átviteli függvénye a (21) egyenletben láthatók.

$$G_F(s) = \frac{K_F}{\tau_F s + 1}, \quad G_R(s) = \frac{K_R}{\tau_R s + 1} \quad (26)$$

A (26) egyenletet behelyettesítve a (25)-be, kapjuk a teljes rendszer átviteli függvényét:

$$G_S = \frac{\frac{K_F}{\tau_F s + 1}}{1 - \frac{K_F}{\tau_F s + 1} \frac{K_R}{\tau_R s + 1}} = \frac{K_F (\tau_R s + 1)}{\tau_F \tau_R s^2 + (\tau_F + \tau_R) s + 1 - K_F K_R} \quad (27)$$

A rendszer karakterisztikus egyenlete:

$$\tau_F \tau_R s^2 + (\tau_F + \tau_R) s + 1 - K_F K_R = 0 \quad (28)$$

ebből a teljes rendszer stabilitásának szükséges és elégséges feltétele:

$$K_F K_R < 1 \quad \text{azaz} \quad K_R < \frac{1}{K_F} \quad (29)$$

3. 3. A recirkuláció átviteli tényezőjének és időállandójának hatása

Annak érdekében, hogy kimutathatóvá váljon a recirkulációs paraméterek hatása a stabilitásra, a (27) felhasználásával kifejezzük a rendszer eredő, vagyis a teljes rendszerre vonatkozó átviteli tényezőjét (K_S) és eredő időállandóját (τ_S):

$$K_S = \frac{K_F}{1 - K_F K_R} \quad (30)$$

$$\tau_S = \sqrt{\frac{\tau_F \tau_R}{1 - K_F K_R}} \quad (31)$$

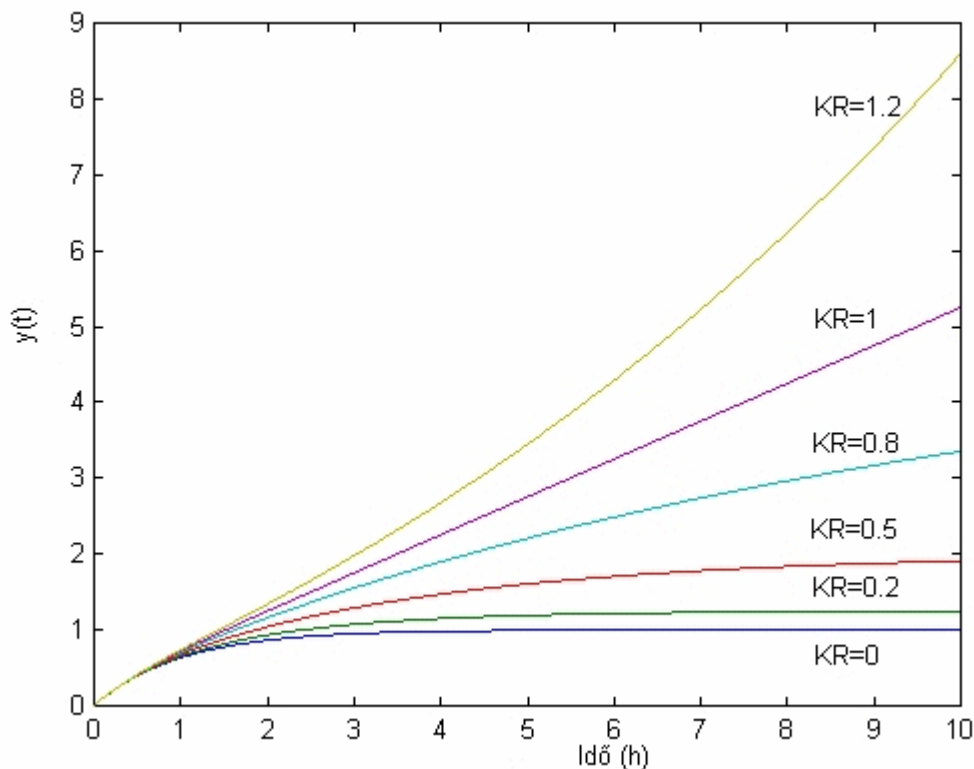
majd ugyanabból az egyenletből meghatározva a teljes átviteli függvény határértékeit a paraméterek 0 és végtelen értékei mellett:

$$\lim_{K_R \rightarrow 0} G_S = G_F \quad , \quad \lim_{K_R \rightarrow \infty} G_S = 0 \quad (32)$$

$$\lim_{\tau_R \rightarrow 0} G_S = \frac{K_F}{\frac{\tau_F}{1 - K_F K_R} s + 1} \quad , \quad \lim_{\tau_R \rightarrow \infty} G_S = G_F \quad (33)$$

A (32) és (33) egyenletekből látható, hogy a recirkuláció hatása csökken a recirkulációs ág átviteli tényezőjének kis értékei esetén és recirkulációs ág időállandójának nagy értékei esetén. A K_R nagy értékei instabilitást okoznak, igen nagy értékek esetén pedig a folyamat leállítására, használhatatlanságára kell számítani, τ_R kis értékei pedig csökkentik a folyamat rendjét.

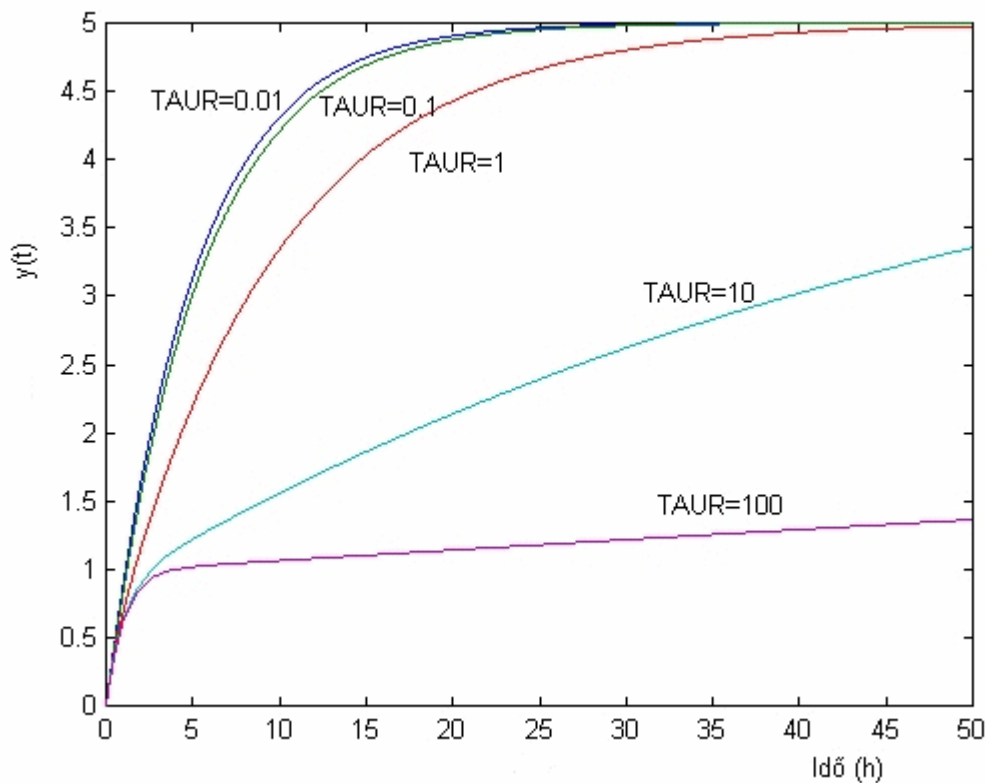
A vizsgált, alapvetően teoretikus rendszer dinamikus viselkedésének feltérképezéséhez dinamikus szimulációkat alkalmaztam, melyek során különböző zavarásokra adott válaszokat értékeltem ki. Így a recirkulációs és egyéb paraméterek hatása is láthatóvá vált. A **22.** és **23. ábrán** K_R és τ_R különböző értékeinek hatása látható a folyamat stabilitására. K_R hatásának vizsgálatakor a rendszer többi paraméterének értékét a következő konstans értékeken tartottam: $K_F = \tau_F = \tau_R = 1$.



22. ábra: A recirkuláció átviteli tényezőjének hatása a folyamat stabilitására

$$(K_F = \tau_F = \tau_R = 1)$$

τ_R hatásának vizsgálatakor a rendszer többi paraméterének értéke: $K_F = \tau_F = 1$, $K_R = 0.8$.



23. ábra: A recirkuláció időállandójának hatása a folyamat stabilitására

$$(K_F = \tau_F = 1, K_R = 0.8)$$

A vizsgálatok eredményeiből látható, hogy a recirkuláció átviteli tényezőjének hatása lényegesen erősebb, mert ez az eredő átviteli tényezőt is és a dinamikát is megváltoztatja (a teljes tartományban), míg a recirkulációs ág időállandója csak a tranziens szakaszban változtatja meg a rendszer viselkedését. A recirkuláció átviteli tényezője a fent megállapított értékek felett labilitást okoz. Ezen probléma kiküszöbölésére egy lehetőség a recirkuláció-kompenzátor alkalmazása, melyet részletesen vizsgálók a későbbiekben.

Az ezen egyszerű, két átviteli függvényvel leírható rendszerre az elméleti és szimulációs vizsgálatokból levonható fő következtetés az, hogy a recirkuláció egyik hatása, hogy „lassítja” a folyamatot, vagyis növeli a teljes rendszer időállandóját.

3. 4. A recirkuláció holtidejének hatása

Amennyiben a recirkulációs ág holtidőt tartalmaz, átviteli függvénye az alábbi formában közelíthető:

$$G_{RD}(s) = G_R e^{-\tau_{RD}s} \quad (34)$$

ahol τ_{RD} a recirkulációs ág időkéseése (holtideje). A (25) egyenlet ebben az esetben az alábbiak szerint módosul:

$$G_{SD}(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{G_F}{1 - G_F G_R e^{-\tau_{RD}s}} \quad (35)$$

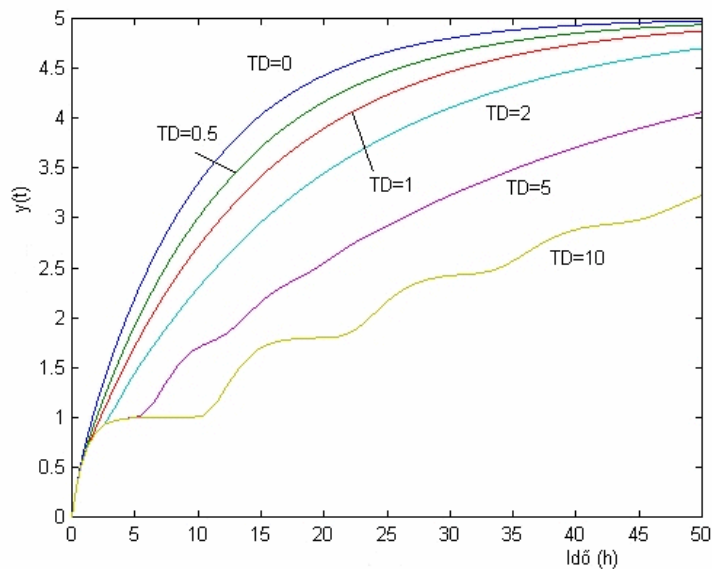
Ha a recirkulációt továbbra is elsőrendű tagként fogjuk fel, melyet most holtidővel terjesztünk ki, akkor a recirkuláció átviteli függvénye az alábbiak szerint alakul:

$$G_R = \frac{K_R e^{-\tau_{RD}s}}{\tau_R s + 1} \quad (36)$$

a teljes rendszeré pedig:

$$G_S = \frac{K_F (\tau_R s + 1)}{\tau_F \tau_R s^2 + (\tau_F + \tau_R)s + 1 - K_F K_R e^{-\tau_{RD}s}} \quad (37)$$

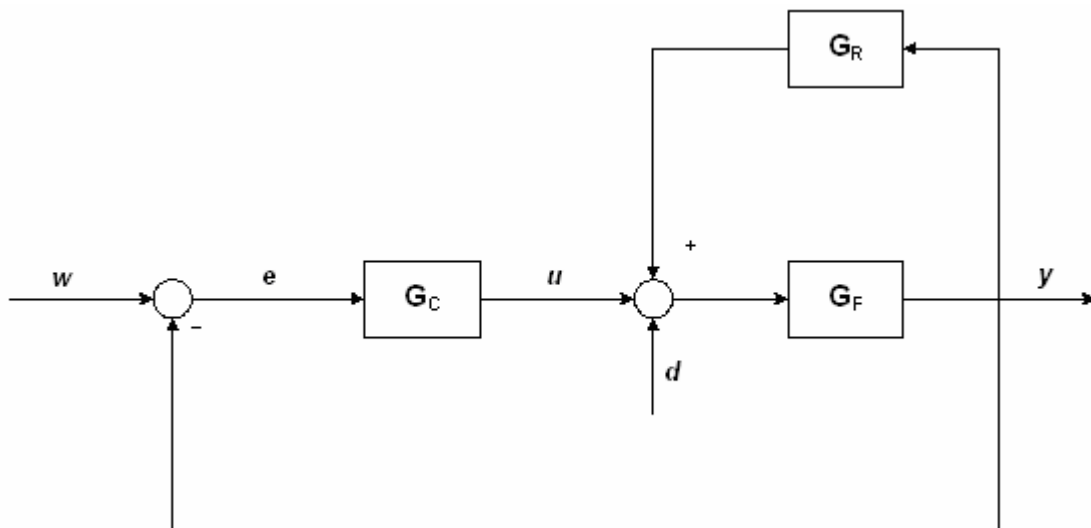
A holtidő hatását is megvizsgáltam a folyamat dinamikájára. A különböző kimeneti görbék a **24. ábrán** láthatók. A több, változatlan paraméter a szimuláció során: $K_F = \tau_F = \tau_R = 1$, $K_R = 0.8$.



24. ábra: A recirkuláció holtidejének hatása ($K_F = \tau_F = \tau_R = 1$, $K_R = 0.8$)

3. 5. Recirkulációs rendszerek szabályozási kérdései

Annak érdekében, hogy a recirkulációs ág által a teljes rendszer dinamikájára (stabilitás, szabályozhatóság és robosztusság) gyakorolt kedvezőtlen hatásokat megszüntessük, vagy legalább csökkentjük, szabályozóköroket kell alkalmaznunk. A legáltalánosabban alkalmazható zárt kör felépítése a **25. ábrán** látható.



25. ábra: Zárt szabályozókör recirkulációs rendszerhez

G_C jelöli az alkalmazott szabályozó átviteli függvényét, u jelöli a módosított jellemzőt, d a zavarást, e a szabályozási hibát, w pedig az alapjelet.

A (25) egyenletből adódó megfontolások alapján a szabályozott jellemző (y) és az alapjel (w) között a teljes rendszer átviteli függvénye:

$$G_w = \frac{G_C G_S}{1 + G_C G_S} = \frac{G_F G_C}{1 - G_F G_R + G_F G_C} \quad (38)$$

A későbbiekben a recirkuláció-kompenzáció vizsgálata során ezt az összefüggést felhasználom.

3. 6. P szabályozó alkalmazása

A rendszer szabályozhatósági vizsgálata során először P szabályozót választottam. A folyamatot és a recirkulációt továbbra is a (26) egyenletben megadott módon leírható átviteli tagokként fogtam fel. Miután P szabályozót alkalmaztam, annak átviteli függvénye maga az erősítési tényező: $G_C = K_C$.

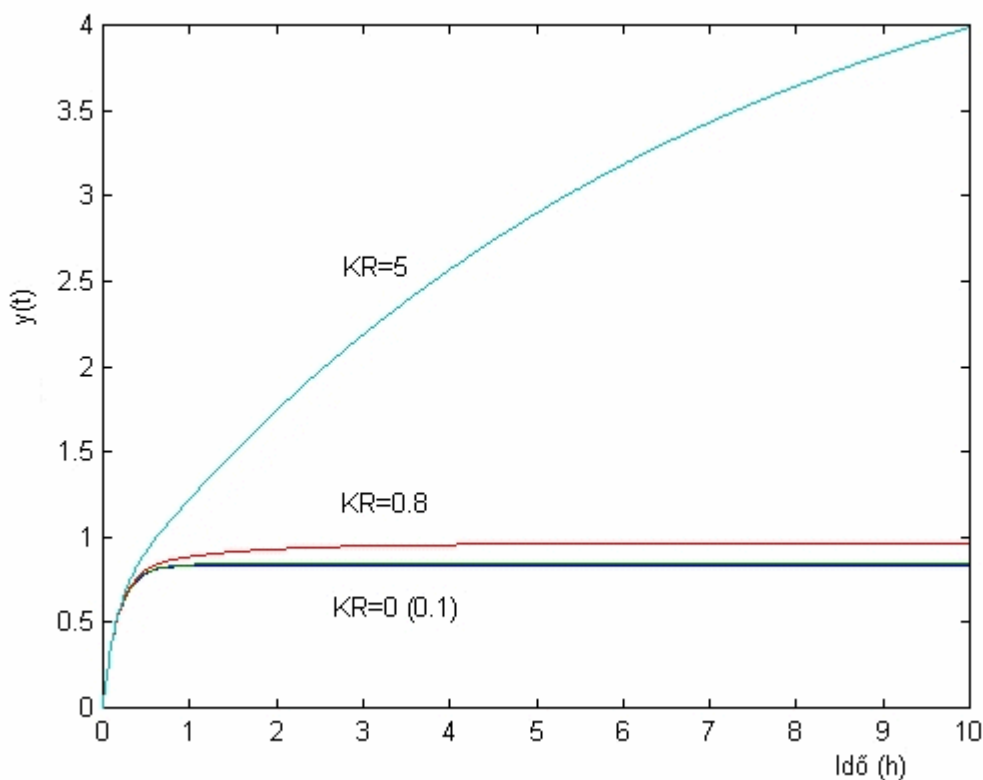
Az alapjelre vonatkozó teljes átviteli függvény a (38) felhasználásával:

$$G_w = \frac{K_C K_F \tau_R s + K_F K_C}{\tau_F \tau_R s^2 + s(\tau_F + \tau_R + K_C K_F \tau_R) + 1 - K_F K_R + K_C K_F} \quad (39)$$

Ebből és a karakterisztikus egyenletből adódóan a stabilitás szükséges és elégséges feltétele:

$$K_R < K_C + \frac{1}{K_F} \quad (40)$$

Összehasonlítva ezt a (29)-ben leírt stabilitási feltétellel, látható, hogy a P szabályozó alkalmazása lényegesen kedvezőbb annál, mintha nem alkalmaznánk szabályozót; a stabilitási tartomány jelentősen kiszélesedett. A kiszélesedés mértéke K_C -vel egyezik meg, adott esetben tehát igen nagy is lehet. A recirkuláció alkalmazásának kedvezőtlen hatása lényegesen csökkent, ez a **26. ábrán** látható. A szimulációs vizsgálatok során az alábbi egyéb paraméterekkel dolgoztunk: $K_F = \tau_F = \tau_R = 1$, $K_R = 0.8$, $w = 1$, $K_C = 5$.



26. ábra: A recirkuláció átviteli tényezőjének hatása a stabilitásra P szabályozó esetén
($K_F = \tau_F = \tau_R = 1$, $K_R = 0.8$, $w = 1$, $K_C = 5$)

3. 7. PI szabályozó alkalmazása

P szabályozó alkalmazásával a maradó eltérés nem küszöbölhető ki, ráadásul ez az eltérés az alapjeltől K_R növelésével egyre nő. Számos esetben azonban szükség van arra, hogy a

rendszer kimenő jele egy előírt állandó értéken maradjon, lehetőség szerint nagy pontossággal. Ebben az esetben PI szabályozót kell alkalmazni, mely a maradó eltérést kiküszöböli. Miután azonban a PI szabályozó átviteli függvénye tartalmaz olyan tagot (I), amelynek leírása csak a Laplace-operátor segítségével lehetséges, a PI szabályozó alkalmazása megváltoztatja a rendszer eredő rendűségét, ez pedig ahhoz vezet, hogy a zárt láncú rendszer lassabban reagál. A PI szabályozó átviteli függvénye:

$$G_C = \frac{K_C(T_I s + 1)}{T_I s} \quad (41)$$

valamint az eredeti elrendezés (26) alapján felírható karakterisztikus egyenlet az alábbi formát ölti:

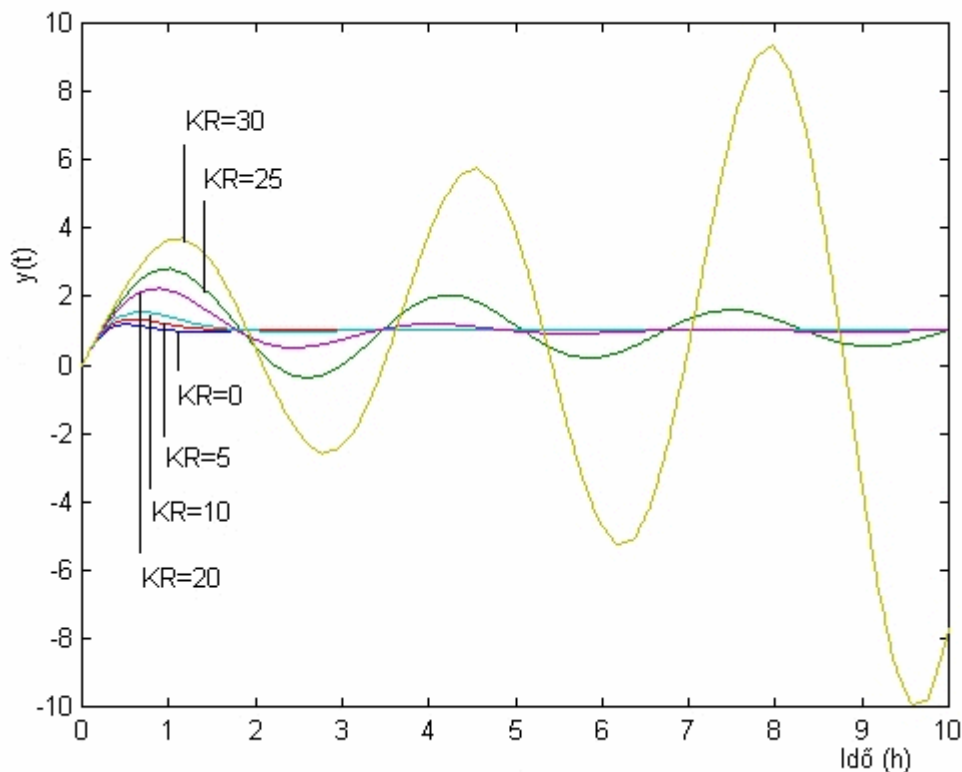
$$\tau_F \tau_R s^3 + (\tau_F + \tau_R + \tau_R K_F K_C) s^2 + (1 - K_F K_R + \frac{\tau_R K_C K_F}{T_I} + K_C K_F) s + \frac{K_C K_F}{T_I} = 0 \quad (42)$$

A (42) egyenletben a stabil működéshez „s” együtthatójának pozitívnak kell lennie. A stabilitási tartomány egyszerű felírásához néhány paramétert rögzítettem ($K_F = \tau_F = \tau_R = 1$, $K_C = 5$), ebben az esetben a stabilitási tartomány az alábbi heurisztikus formában adható meg:

$$T_I < \frac{30}{7K_R - 42} \quad (43)$$

ahol T_I az integrálási idő.

A **27. ábrán** a recirkuláció átviteli tényezőjének hatása látható a visszacsatolt rendszerre PI szabályozó alkalmazása esetén, a következő paraméterek állandó értéke mellett: $K_M = \tau_M = \tau_R = 1$, $w=1$, $K_C = 5$, és $T_I = 0.2$.



27. ábra: A recirkuláció átviteli tényezőjének hatása a rendszer stabilitására PI szabályozó esetén ($K_M = \tau_M = \tau_R = 1$, $w=1$, $K_C = 5$, $T_I = 0.2$)

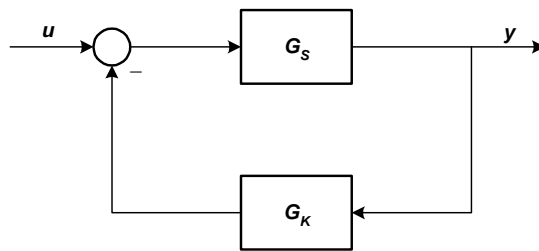
Az eddigi vizsgálatok eredményei analitikusan is és dinamikus szimulációk segítségével is kimutatták, hogy a recirkuláció jelenléte szignifikáns hatással bír a rendszerek viselkedésére, dinamikájára, szabályozhatóságára. Kimutattam a recirkulációs ág átviteli tényezőjének, időállandójának és holtidejének hatását a teljes folyamat dinamikájára, és levezettem a konvencionális szabályozásokkal (P, PI) ellátott rendszer stabilitási határait. A továbbiakban egy hatékonyabb lehetőség, a recirkuláció-kompenzáció lehetőségeit vizsgáltam meg.

3. 8. Recirkuláció-kompenzátor és alkalmazása

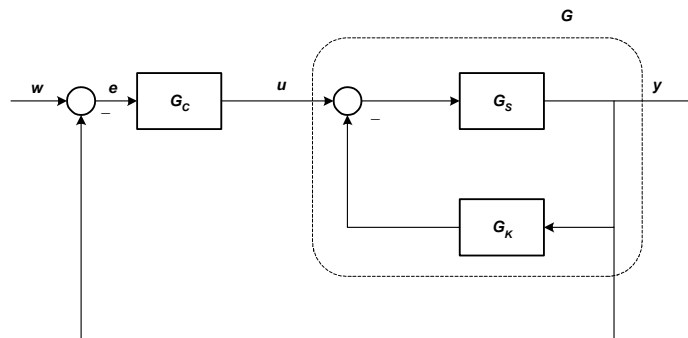
A recirkuláció káros hatásai még eredményesebben kezelhetők recirkuláció-kompenzátor alkalmazásával [11]. Blokkvázlata a **28. ábrán** látható, ahol s -sel jelöltem a recirkulációs rendszert, k -val pedig a kompenzátort. A G_S átviteli függvényt továbbra is a (25) egyenlet írja le, míg G_K a kompenzátor átviteli függvénye. A teljes, kompenzátorral is ellátott rendszer eredő átviteli függvénye tehát:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G_S}{1 + G_S G_K} \quad (44)$$

Ha a (44) egyenlettel megadott kompenzátor fizikailag megvalósítható, és nincsenek modellezési hibák, a recirkuláció káros hatásai teljes mértékben megszüntethetők, és a **29. ábrán** látható G_C átviteli függvénnyel leírható szabályozó recirkulációt nem tartalmazó rendszerhez tervezhető. A gyakorlatban ettől függetlenül csak abban az esetben várhatunk pontos működést a recirkuláció-kompenzátortól, ha a recirkulációs ág modellje pontosan ismert. Ezért a kompenzáció hatékonysága elmarad az elvárttól, ha a működési paraméterek, pl. a recirkulációs áram, időközben változnak.



28. ábra: Recirkuláció-kompenzátor



29. ábra: Recirkuláció-kompenzátor szabályozóval

A kompenzátorral ellátott rendszerekre is végeztem stabilitásvizsgálatot. Ezen vizsgálatok során a rendszert felépítő blokkok alapvetően a (26) és a (27) egyenletekben definiált elsőrendű tagok voltak. Így a kompenzátor eredő átviteli függvénye az alábbi formában adható meg:

$$G_K = \frac{K_K}{\tau_K s + 1} \quad (45)$$

A kompenzátor hatására jól látható a (46) egyenletből, mely az eredő átviteli függvényt mutatja.

$$G = \frac{G_F}{1 - G_F G_R + G_F G_K} \quad (46)$$

A kompenzátor, és maga a recirkuláció átviteli függvénye különbözőképpen viszonyulhatnak egymáshoz, ezen kívül további paraméterek egymáshoz viszonyított nagysága is befolyásolja a teljes rendszer viselkedését. Ezek alapján, figyelembe véve a rendszer paramétereinek számát, négy különböző eset képzelhető el (a (26) egyenletben alkalmazott jelölésekkel):

a) Ideális esetben: $G_K = G_R$, vagyis $G = G_S$

b) $G_K \neq G_R$: $\tau_R = \tau_K$, $K_R \neq K_K$, ekkor:

$$G = \frac{K_F(\tau_R s + 1)}{\tau_F \tau_R s^2 + (\tau_F + \tau_R)s + 1 - K_F K_R + K_F K_K} \quad (47)$$

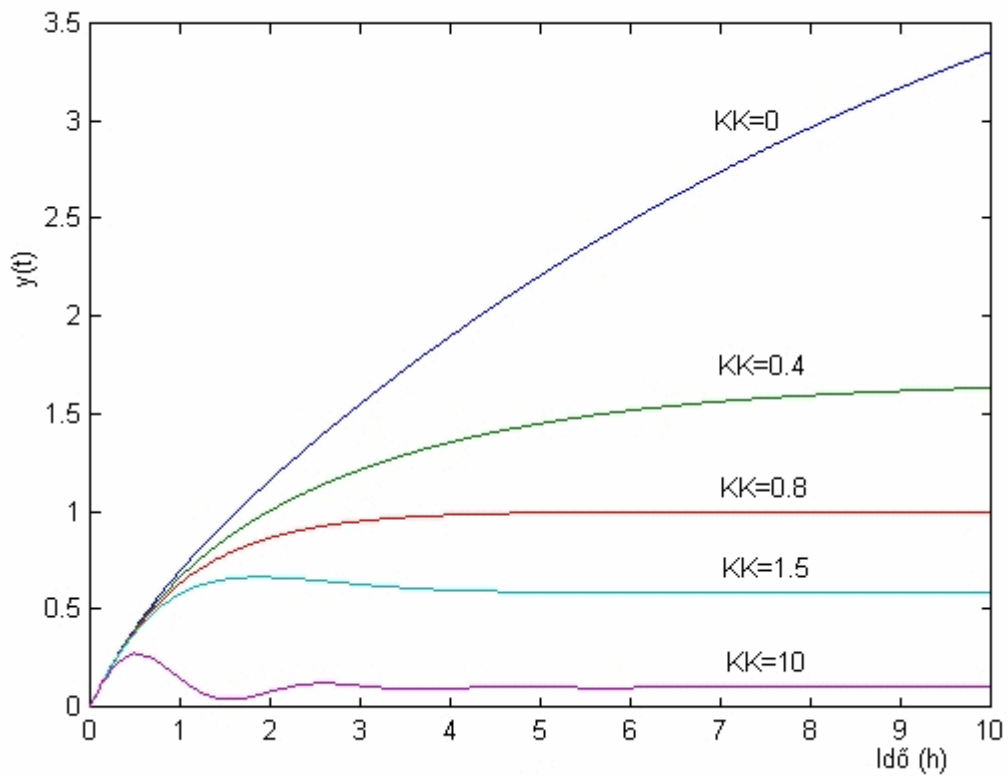
c.) $G_K \neq G_R$: $K_K = K_R$, $\tau_K \neq \tau_R$, ekkor:

$$G = \frac{K_F(\tau_R s + 1)(\tau_K s + 1)}{(\tau_F s + 1)(\tau_R s + 1)(\tau_K s + 1)} \quad (48)$$

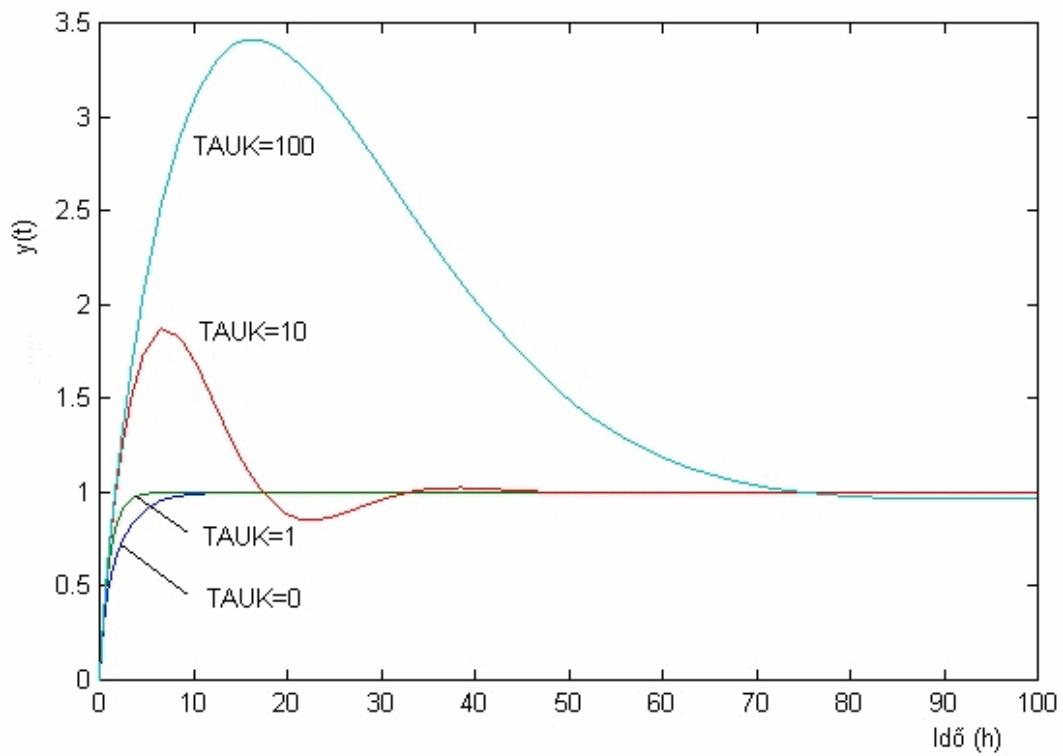
d.) $G_K \neq G_R$: $K_K \neq K_R$, $\tau_K \neq \tau_R$, ekkor

$$G = \frac{K_F(\tau_R s + 1)(\tau_K s + 1)}{(\tau_F s + 1)(\tau_R s + 1)(\tau_K s + 1) - K_F K_R + K_F K_K} \quad (49)$$

Amint az látható, a legrosszabb lehetséges eset a d., ahol a kompenzátor alkalmazása jelentősen megváltoztatja az eredő átviteli tényezőt és a rendszer rendjét, ezért rontja a teljes rendszer stabilitását is. Az ideális eset az a., ez azonban ritkán valósítható meg valós körülmények között. A leginkább megvalósítható esetek a b. és a c., melyek kapcsán a **30.** és **31. ábrákat** készítettem. Ezeken a recirkulációs kör és a kompenzátor kölcsönhatásának eredményeként a kompenzátor erősítésének (K_K) és a kompenzátor időállandójának (τ_K) hatása látható a teljes folyamat stabilitására az alábbi paraméterek állandó értéke mellett: $K_F = \tau_F = \tau_R = 1$, $K_R = 0.8$; és $\tau_K = 1$, $K_K = 0.8$



30. ábra: A kompenzátor erősítésének hatása a folyamat dinamikájára



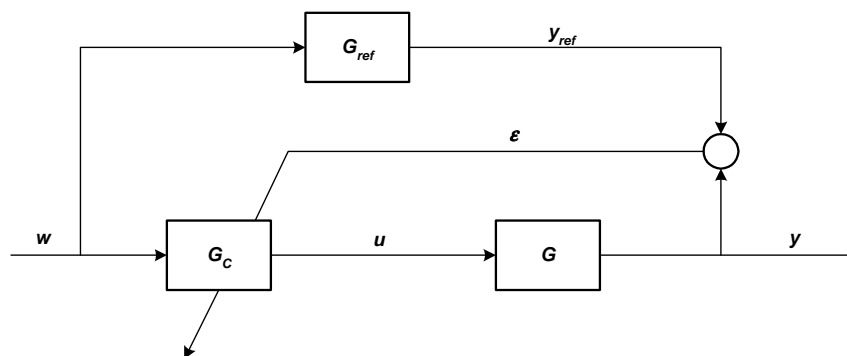
31. ábra: A kompenzátor időállandójának hatása a folyamat dinamikájára

Az ábrák a kompenzátorra levezetett összefüggésekkel összhangban a kompenzátorral ellátott rendszer lényegesen kedvezőbb dinamikus viselkedését mutatják.

3. 9. Adaptív szabályozás recirkulációs rendszerekre

A fenti analízisekből látható a recirkuláció-kompenzáció komoly előnye, ezzel együtt azonban az is, hogy a kompenzátor alkalmazása önmagában nem képes maradéktalanul megoldani a recirkuláció okozta problémákat. A recirkulációs kör és a kompenzációs modell közti modellillesztési problémák teljesebb körű megoldásához ki kell terjesztenünk a szabályozás megtervezését az adaptív és robusztus tervezésekre is. A robusztus tervezést elsőként Taiwo mutatta be 1986-ban [11], majd tíz évvel később Taiwo és Krebs. Jelen munkában a kompenzátor előnyeinek kiaknázása érdekében egy más megközelítést alkalmazok: az adaptív tervezést („adaptive gain scheduling”). A folyamat eredő átviteli tényezőjének beállításához nyílt láncú adaptív stratégiát alkalmaztam, melyhez a modellreferenciás adaptív szabályozás nyújtott segítséget (MRAC); ennek lehetőségeit Aström és Wittenmark vizsgálták elsőként 1989-ben. Az adaptív rendszer struktúrája a **32. ábrán** látható, G_{ref} jelöli a referenciamodellt, y_{ref} a kimenet, ε pedig a referenciahiba, az alábbi megadás alapján:

$$\varepsilon(t) = y - y_{ref} \quad (50)$$



32. ábra: Adaptív szabályozás

Ha a G_C átviteli függvénnyel leírható szabályozó egyetlen változó paramétere a K_C erősítési tényező, akkor a következő célfüggvénnyel rendelkező összefüggést tekintjük:

$$J(K_C) = \frac{1}{2} \varepsilon^2(t) = \min \quad (51)$$

Változtatható adaptív erősítést (γ) feltételezve:

$$\frac{dK_C}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial K_C} = -\gamma \varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial K_C} \quad (52)$$

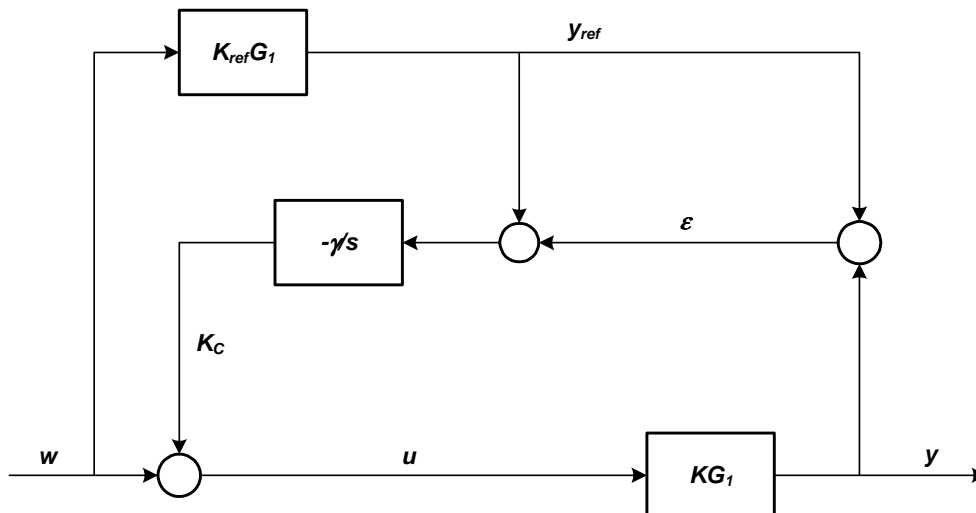
A $G(s) = KG_1(s)$ összefüggés érvényes olyan recirkulációs rendszerekre, melyekben a dinamikus hatásokat pontosan sikerült kompenzálni, a K -val jelölt stacionárius átviteli tényezőket azonban nem (mert ismeretlenek, vagy változnak). Célunk a teljes rendszer átviteli tényezőjének előírt értéken (K_{ref}) tartása. Ehhez a referenciamodellre az alábbi összefüggést tekintjük:

$$G_{ref}(s) = K_{ref} G_1(s) \quad (53)$$

Az adaptív módon kompenzált recirkulációs rendszer analíziséhez tételezzük fel a (26) és a (27) egyenletekben megadott elsőrendű tagokat, tételezzünk fel kompenzátort (47), és teljes rendszerre vonatkozó átviteli függvényvel analóg arányos szabályozást tételezzük fel, változtatható erősítéssel (K_C), így a (50), (51) és (52) egyenleteknek megfelelően az adaptív hangoláshoz a következő összefüggés adódik:

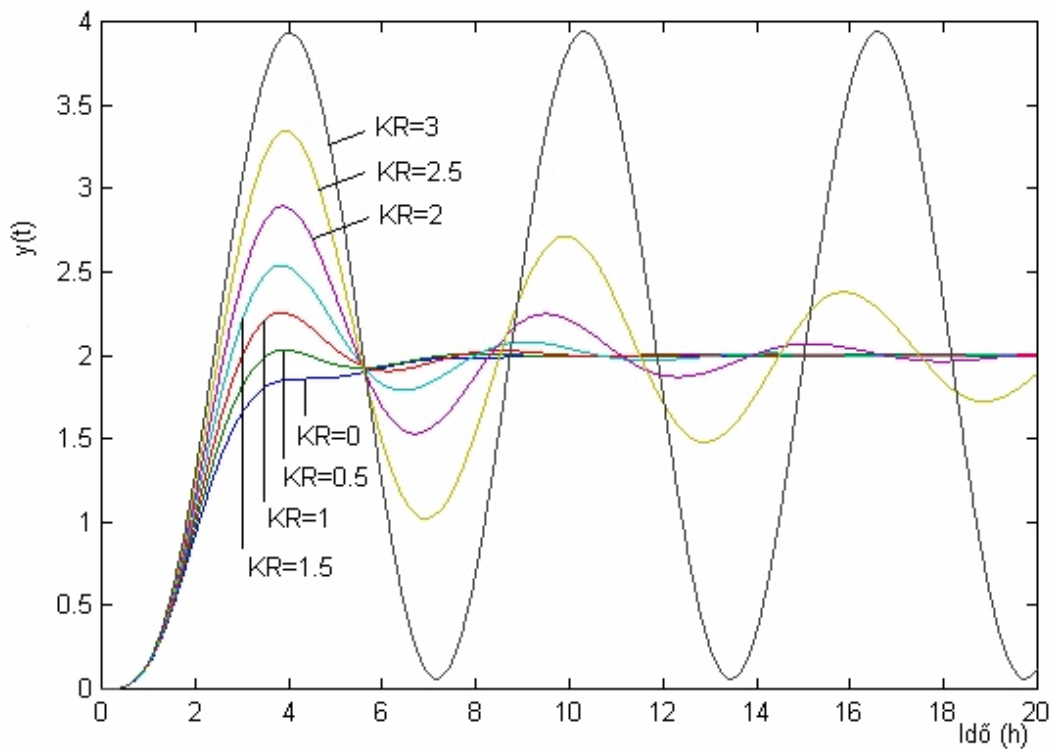
$$\frac{dK_C}{dt} = -\gamma' \frac{\partial \varepsilon}{\partial K_C} \varepsilon = -\gamma' \frac{K}{K_0} y_{ref} \varepsilon = -\gamma \cdot y_{ref} \varepsilon \quad (54)$$

A megvalósítható, alkalmazkodó szabályozás elvi vázlata a **33. ábrán** látható, ahol KG_1 reprezentálja a kompenzátorral ellátott recirkulációs rendszert.

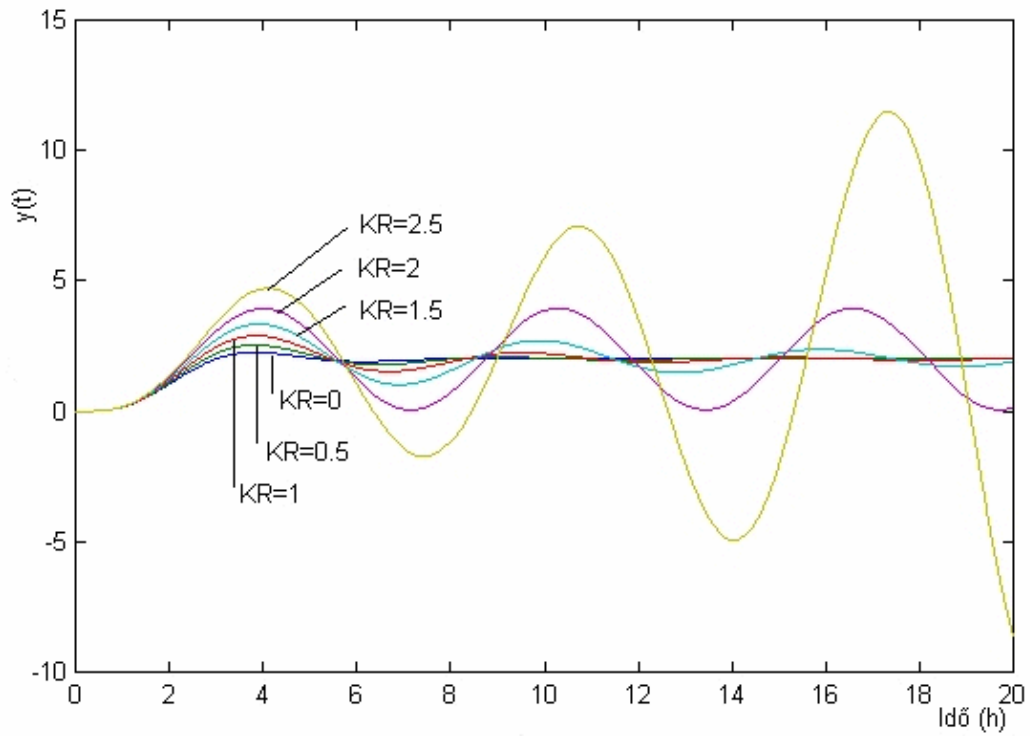


33. ábra: Az adaptív szabályozás megvalósítható, alkalmazható formája

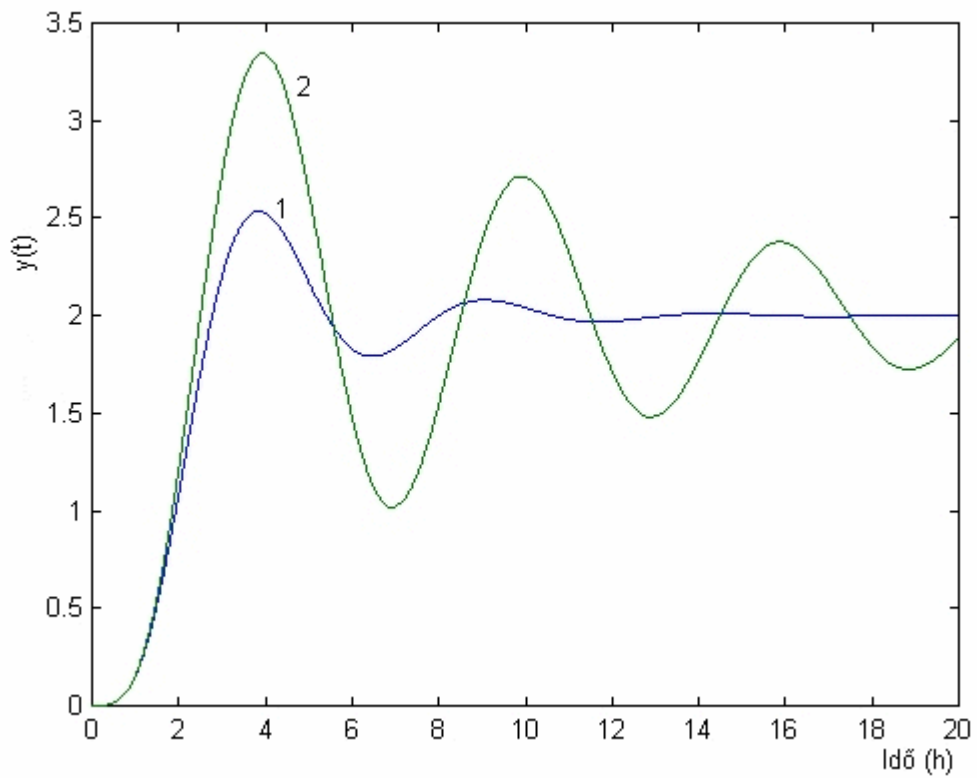
Különböző szimulációs kísérleteket végeztem az adaptív szabályozással ellátott rendszer viselkedésének feltérképezésére, K_R különböző értékei mellett – kompenzátorral, és anélkül. A **34. ábrán** kompenzátorral látható a rendszer kimenő jele, a **35. ábrán** anélkül. A görbék lefutásából látható, hogy kompenzátor jelenlétében az adaptív rendszer robosztusabb és stabilabb működést nyújt. Ezen eredmény még jobb láthatósága érdekében két kiválasztott válaszgörbét ábrázoltam, az egyik a kompenzátorral ellátott rendszer reprezentálja, a másik a kompenzátor nélkülit (**36. ábra**). Ez a szimuláció az alábbi paraméterek mellett került alkalmazásra: $K_F = \tau_F = \tau_R = K_K = \tau_K = 1$, $K_{ref} = 2$, és $\gamma = 1$.



34. ábra: Adaptív szabályozás különböző K_R értékek mellett, kompenzátorral



35. ábra: Adaptív szabályozás különböző K_R értékek mellett, recirkuláció-kompenzátor nélkül



36. ábra: Adaptív szabályozás kompenzátorral (1) és anélkül (2) ($K_R = 1.5$)

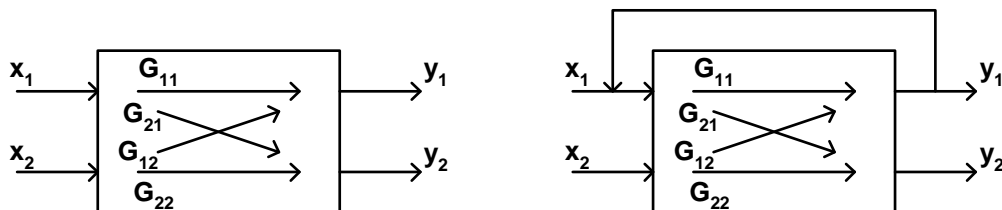
A fenti ábrákból megállapítható, hogy az adaptív szabályozás alkalmazása sikeres volt, a rendszer lényegesen robosztusabban viselkedik. A szabályozástechnika újabb eszközeinek segítségével a recirkuláció által okozott káros hatások jelentősen enyhíthetők. Eddigi vizsgálataim olyan rendszerekre szolgáltattak eredményeket, melyek egy bemenettel és egy kimenettel rendelkező egyváltozós rendszerek voltak, ezért a kialakítandó szabályozási struktúra is egy szabályozókört tartalmazott. Az iparban azonban ritkák a SISO (single input, single output) rendszerek, jellemzően több bemenettel és több kimenettel rendelkező MIMO (multiple input, multiple output) rendszerek alkalmazása történik. A nagyobb méretű rendszerek szabályozása is többváltozós feladattá válik, és minél nagyobb méretű struktúrák tervezése szükséges, annál nagyobb mértékben nő a tervezési probléma komplexitása, és a teljes rendszerre nézve legkedvezőbb struktúra kiválasztásához szükséges szimultán vizsgálatok száma. Nagyobb méretű struktúrák esetén felmerül a struktúratervelés feladatának dekomponálhatósága, mint lehetőség, és mint ellenőrizendő, bizonyítandó lehetőség, melynek célja a szabályozási struktúra kialakítása feladatának egyszerűsítése, gyorsítása. Ennek részleteivel foglalkozom a 4. fejezetben.

4. SZABÁLYOZÁSI STRUKTÚRÁK DEKOMPONÁLHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

4.1. Recirkuláció többváltozós rendszerekben

Többváltozós (MIMO: multiple input - multiple output) rendszerek esetén több módosított és több szabályozott jellemzővel dolgozunk, ahol minden módosított jellemző hatással lehet minden szabályozott jellemzőre. Ezen hatás mértékét és előjelét a rendszer belső kölcsönhatásai határozzák meg, melyeket megváltoztatni a legtöbb esetben nem tudunk.

A legegyszerűbb (legkisebb méretű) többváltozós rendszer 2×2 -es, a jelölés szerint két módosított és két szabályozott jellemzővel rendelkezik. A **37. ábrán** egy 2×2 méretű MIMO-rendszer látható. A bemenő jeleket x , a kimenőket y jelöli, a különböző átviteli függvényeket G . Ezek az átviteli függvények együttesen a teljes blokkot reprezentáló átviteli függvény mátrixként is felírhatók (\underline{G}). Mellette, a **39. ábrán** ugyanez a rendszer látható, recirkulációval. A többváltozós problémát először elvi oldalról közelítem, ezért a legegyszerűbb, 2×2 -es méretű rendszerek képezik a vizsgálatok tárgyát, és a recirkuláció kvantitatív jellemzése során csak az egyik kimenő ágból alkalmaztam visszavezetést.



37. ábra és 38. ábra: A vizsgált 2×2 -es méretű MIMO-rendszer, recirkulációval és anélkül

4.2. Szabályozhatósági indexek

A szabályozási struktúrák megtervezését immár számos elméleti és gyakorlati eszköz segíti, ezzel összefüggésben elmondható, hogy amennyiben a recirkuláció megjelenése megváltoztatja a rendszerre jellemző szabályozhatósági paraméterek értékeit, akkor a recirkuláció megjelenése valószínűleg meg fogja változtatni a szabályozási struktúrát, tehát recirkulációs rendszerek szabályozása esetén más módosított jellemző - szabályozott jellemző párosítások javasolhatók.

A fenti, egyszerű elméleti rendszerek vizsgálatához elsőként egy egyszerű elméleti eszközt, az RGA-t választottam (Relative Gain Array). Ez a mutató a szabályozókörök közötti kölcsönhatás mértékéről ad felvilágosítást. Az RGA mutató értékeit összehasonlítottam a recirkulációmentes és a recirkulációt tartalmazó rendszerek esetén. Az értékek bármely kimutatható különbözősége arra utal, hogy a recirkuláció hatással van a szabályozási struktúrára és képes annak megváltoztatására. Az említett RGA mutató definíciója a (55) és (56) egyenletekben látható.

$$\lambda_{11} = \frac{\left(\frac{\partial y_1}{\partial x_1}\right)_{x_2}}{\left(\frac{\partial y_1}{\partial x_1}\right)_{y_2}} \quad (55)$$

$$RGA = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Az $a = \frac{\partial y}{\partial x}$ hányadosokat a rendszer stacionárius átviteli tényezőinek nevezzük és megfelelő indexeléssel látjuk el, attól függően, hogy mely szabályozott és mely módosított jellemzők kapcsolatát fejezik ki. A λ értékek, így az RGA is a stacionárius átviteli tényezőkből közvetlenül is meghatározhatók. Recirkuláció nélküli esetben:

$$\lambda_{11, \text{nincs recirk.}} = \frac{a_{11}}{a_{11} - \frac{a_{12}a_{21}}{a_{22}}} = \frac{a_{11}a_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \quad (57)$$

Abban az esetben, ha a rendszer recirkulációt tartalmaz, a stacionárius átviteli tényezők az alábbi alakban számíthatók:

$$\left(\frac{\partial y_1}{\partial x_1}\right)_{x_2} = \frac{a_{11}}{1 - a_{11}} \quad (58)$$

$$\left(\frac{\partial y_1}{\partial x_1}\right)_{y_2} = \frac{a_{11} - \frac{a_{12}a_{21}}{a_{22}}}{1 - a_{11} + \frac{a_{12}a_{21}}{a_{22}}} = \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}{a_{22} - a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21}} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{11, \text{recirkulációval}} &= \frac{a_{11}}{1 - a_{11}} \left(-\frac{a_{11}a_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} + \frac{a_{22} + a_{12}a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \right) = \\ &= \frac{a_{11}}{1 - a_{11}} \left(-\lambda_{11, \text{recirk. nélkül}} + \frac{a_{22} + a_{12}a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \right) \end{aligned} \quad (60)$$

A fentiekből látható, hogy a recirkulációval ellátott rendszer stacionárius átviteli tényezői különböznek a recirkulációmentes rendszer tényezőitől (a különbség mértékét a (60) egyenlet adja meg). Ez a tény azt mutatja, hogy a recirkuláció megjelenése közvetlen hatással van a rendszer szabályozhatósági paramétereinek legalább egyikére, ezért szabályozási struktúra tervezése nem kivitelezhető recirkulációval kapcsolatos vizsgálatok nélkül. A későbbiekben ezt a kérdést további vizsgálatokkal és eredményekkel egészítem ki.

4. 3. Általános dekomponálhatósági vizsgálatok

Többváltozós, több blokkból álló rendszerek esetén a szabályozási mátrix (a megfelelő szabályozott és módosított jellemzőket összerendelő táblázat) igen nagy is lehet, mert minden szabályozott jellemző és minden módosított jellemző lehetséges kölcsönhatását figyelembe kell venni. A valóságban azonban bizonyos kölcsönhatások vagy nagyon gyengék, vagy az adott módosított jellemző a rendszer struktúrájából adódóan nincs hatással az adott szabályozott jellemzőre, ennek ellenére előfordulhat, hogy (például recirkuláció jelenléte esetén) több kapcsolat jön létre a jellemzők között. A szabályozott és a módosított jellemzők kapcsolatainak száma tehát számos körülménytől, paramétertől függ és a rendszer viselkedését, dinamikáját, szabályozhatóságát egyértelműen befolyásolja.

Ahhoz, hogy kedvező szabályozási struktúrát tudjunk tervezni egy rendszerhez, elvben ismernünk kell az összes lehetséges szabályozott és módosított jellemző párosításának eredményét, azonban ez a lehetséges párosítások nagy száma miatt sokszor szimulációs nehézségeket vet fel és ipari rendszerek esetén komoly költségvonzata is lehet a sok lehetséges struktúra tesztelésének. Felmerül tehát a kérdés, hogy lehetséges-e egy komplex szabályozási struktúra megtervezésének feladatát egyszerűsíteni, és ha igen, miként. Az egyszerűsítés során felmerülő kíváncsi, hogy hagyjuk el azokat a párosításokat, melyeknek nincs hatása egymásra, vagy igen kicsi, valamint a nagyobb méretű szabályozási struktúrákat

kisebbségek együtteseként fogjuk fel, és így tervezzük hozzájuk szabályozási struktúrát. A struktúratervezési feladat ilyen értelemben történő felbontását **dekomponálásnak** nevezzük, megvalósíthatósági vizsgálatait pedig dekomponálhatósági vizsgálatoknak. Dekomponálhatósági vizsgálatoknak mind recirkulációmentes, mind recirkuláció(ka)t tartalmazó rendszerekben van létjogosultsága, mert mindkét esetben lehetséges, hogy a rendszer különböző elemei kölcsönhatásba kerülnek más elemekkel, így megváltoztathatják egymás legkedvezőbb szabályozási struktúráját. Ennek ellenére elsősorban recirkulációs rendszerekben lényeges a vizsgálatok elvégzése, mert ilyen rendszerekben fordul elő leginkább, hogy a rendszer különböző blokkjainak összes szabályozott jellemzője kapcsolatban áll egymással a recirkulációs áram(ok)nak köszönhetően.

4. 4. A dekomponálhatósági vizsgálatok célja

Ha egy rendszer dekomponálhatósági vizsgálatai azt igazolják, hogy a szabályozási struktúra megtervezésének feladata dekomponálható, akkor a teljes rendszer egy adott szempont szerinti legkedvezőbb szabályozási struktúrája felépíthető az egyedi blokkok külön-külön számított, saját, lokálisan legkedvezőbb struktúráiból. Ebben az esetben a teljes rendszer legkedvezőbb struktúrájának megtervezése jelentősen kevesebb szimulációt, időt, és költséget igényel, ezért nagyobb méretű, recirkulációt tartalmazó vegyipari rendszerek szabályozásának megtervezésekor semmiképpen sem hagyhatók figyelmen kívül a dekomponálhatósági vizsgálatok. Az **1. táblázatban** néhány példán keresztül a teljes rendszer legkedvezőbb szabályozási struktúrájának megtervezéséhez szükséges alrendszer-analízisek számát mutatom be, a rendszer méretének és dekomponálhatóságának függvényében.

A rendszer mérete	A vizsgálandó struktúrák száma	
	ha nem dekomponálható	ha dekomponálható
2 db 2×2-es rendszer	4	4
2 db 3×3-as rendszer	9	6
...		
3 db 3×3-as rendszer	27	9
3 db 6×6-os rendszer	216	18

1. táblázat: A dekomponálhatósági vizsgálatok szükségessége

Az **1. táblázatból** kitűnik, hogy a teljes rendszer szabályozási struktúrájának megtervezéséhez sokkal több egyedi rendszert kell vizsgálni, ha a rendszer nem dekomponálható, hiszen ebben az esetben minden párosítást ellenőriznünk kell. Nagyobb méretű, és több blokkból álló rendszerek esetén ez a különbség igen nagyra válhat, ezért

mindenképp indokolt, hogy dekomponálhatósági vizsgálatokat végezzünk a struktúratervezés előtt.

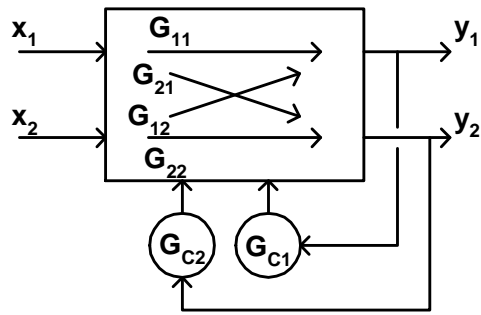
4. 5. Egyszerű rendszerek dekomponálása

Az alábbiakban néhány egyszerű rendszert választottam dekomponálhatósági vizsgálatok alapjául. A cél a dekomponálhatóság igazolása, vagy annak kimutatása, hogy a vizsgált rendszerek szabályozási struktúrái nem dekomponálhatóak. 2×2 méretű rendszereket vizsgáltam, ismert átviteli függvény mátrixokkal. A **39.**, **40.**, **41.**, és **42. ábrákon** láthatók a vizsgált rendszerek, melyeket a dinamikus tartományban vizsgáltam. Az alábbi eseteket vettem figyelembe:

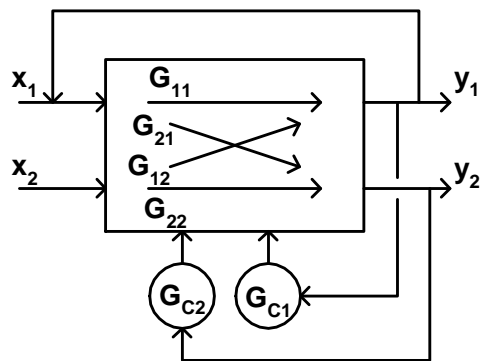
- 2×2 -es rendszer recirkuláció nélkül (**39. ábra**)
- 2×2 -es rendszer recirkulációval (**40. ábra**)
- két 2×2 -es rendszer recirkuláció nélkül (**41. ábra**)
- két 2×2 -es rendszer recirkulációval (**42. ábra**)

Azokat az eseteket, melyekben a blokkok egymással is közvetlen kapcsolatban állnak, azért választottam ki, mert ezekben a recirkuláció egynél több blokkot is átfog, és ez a felépítés gyakori ipari rendszereknél. Reaktort és elválasztó oszlopokat egyaránt tartalmazó rendszereknél különösen, ahol valamely termék(ek)et jellemzően visszavezetjük a reaktorba. Ilyen esetekben először meg kell vizsgálni, hogy a recirkuláció megváltoztatja-e a felépítő elemek valamely szempont szerint legkedvezőbbnek nyilvánítható szabályozási struktúráját. Ezen tervezési feladatok során pedig kiemelt jelentőséget kap a dekomponálhatóság vizsgálata.

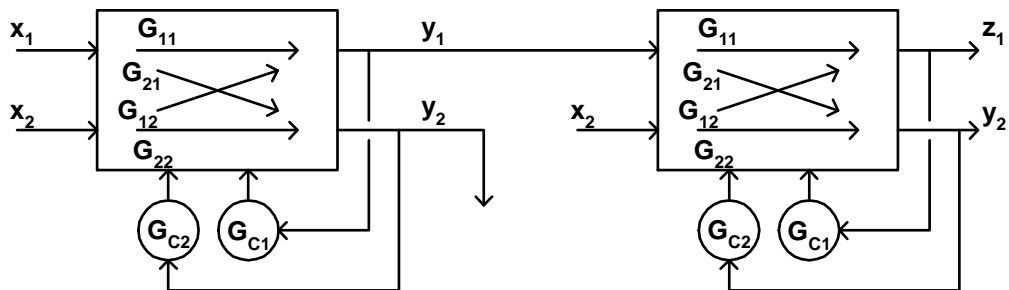
Jelen dekomponálhatósági vizsgálatokat az ún. „load rejection”-eredmények alapján értelmeztem, vagyis a behangolt és működő szabályozókörök adott mértékű zavarás utáni hibaintegrálját mértem meg, és ezen IAE (Integral Absolute Error) értékek alapján rangsoroltam és hasonlítottam össze a különböző szabályozási struktúrákat.



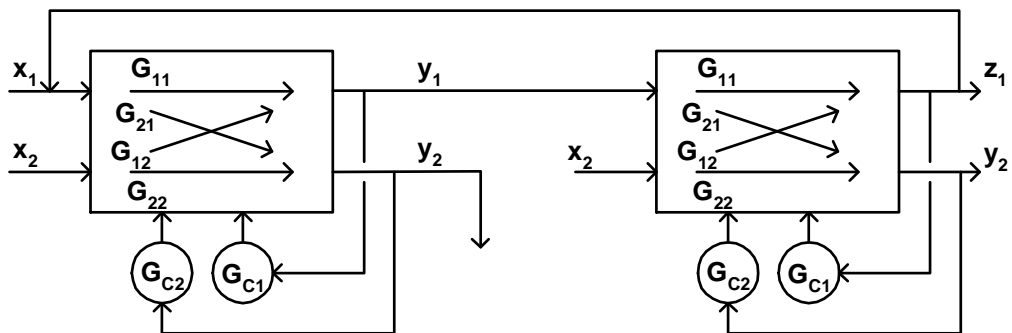
39. ábra: 2×2-es MIMO-rendszer recirkuláció nélkül



40. ábra: 2×2-es MIMO-rendszer recirkulációval



41. ábra: Két összekapcsolt 2×2-es MIMO-rendszer recirkuláció nélkül



42. ábra: Két összekapcsolt 2×2-es MIMO-rendszer recirkulációval

A dekomponálhatósági vizsgálatok során különböző átviteli függvény-mátrixokkal dolgoztam, ezek a **2. táblázatban** láthatók. A mátrixokat a rendszer blokkjaiba importáltam, majd meghatároztam, hogy mekkora hibaintegrállal dolgoznak a szabályozókörök. A szabályozókörök hangolásához itt a hagyományos Ziegler-Nichols-módszert használtam.

$$G_1 = \begin{bmatrix} \frac{10}{10s+1} & \frac{1}{1s+1} \\ \frac{1}{1s+1} & \frac{10}{10s+1} \end{bmatrix} e^{-0,1s} \quad G_2 = \begin{bmatrix} \frac{10}{1s+1} & \frac{1}{100s+1} \\ \frac{1}{100s+1} & \frac{10}{1s+1} \end{bmatrix} e^{-0,1s} \quad G_3 = \begin{bmatrix} \frac{10}{0,1s+1} e^{-1s} & \frac{1}{10s+1} e^{-0,1s} \\ \frac{1}{10s+1} e^{-0,1s} & \frac{10}{0,1s+1} e^{-1s} \end{bmatrix}$$

2. táblázat: Az elméleti rendszerek vizsgálatához használt átviteli függvény-mátrixok

4. 5. 1. Legkedvezőbb szabályozási struktúrák meghatározása

A **2. táblázat** függvény mátrixait behelyettesítve alapvetően két bekötés (jel-összeköttetés) képzelhető el a szabályozások struktúrájában a szabályozott és a módosított jellemzők között. A direkt párosítás („direct pairing”, DP) és a keresztirányú párosítás („cross pairing”, CP). Direkt párosítás esetén az első szabályozott jellemzőt az első módosított jellemzővel szabályozzuk, keresztirányúnál a második szabályozott jellemzőt az első módosított jellemzővel, az elsőt pedig a másodikkal. A szabályozóköröket behangolás után szintén a “load rejection” segítségével minősítettem, melynek során a korábban alkalmazott 1% mértékű zavarást a rendszerbe vezetve mértem a szabályozott jellemzők által mutatott IAE-értékeket. A szimulációkat mindhárom átviteli függvény mátrix esetén elvégeztem, az eredményeket a **3. táblázat** és a **4. táblázat** tartalmazza.

Struktúra	IAE recirkuláció	IAE
	nélkül	recirkulációval
G ₁ (DP)	0,362	0,892
G ₁ (CP)	0,37	0,88
G ₂ (DP)	0,432	1,03
G ₂ (CP)	0,44	1,1
G ₃ (DP)	0,54	1,34
G ₃ (CP)	0,545	1,38

3. táblázat: A hipotetikus 2×2-es rendszer IAE-értékei

(a 39. ábra és a 40. ábra szerint kapcsolásban)

A **3. táblázat** jól mutatja a recirkuláció hatását: az első átviteli függvény mátrix esetén (G_1) a recirkuláció megváltoztatja a legkedvezőbb szabályozási struktúrát. Recirkuláció nélkül a direkt bekötés a kedvezőbb, recirkulációval a fordított. A másik két átviteli függvény mátrix esetén nem okozott változást a recirkuláció.

4. 5. 2. Legkedvezőbb struktúrák meghatározása recirkulációs esetekben

Ugyanezt a vizsgálatsorozatot elvégeztem a két összekapcsolt 2×2 -es rendszer esetére is. Valamennyi lehetséges párosításra mértem az IAE értékét, melyeket a **4. táblázatban** ábrázoltam.

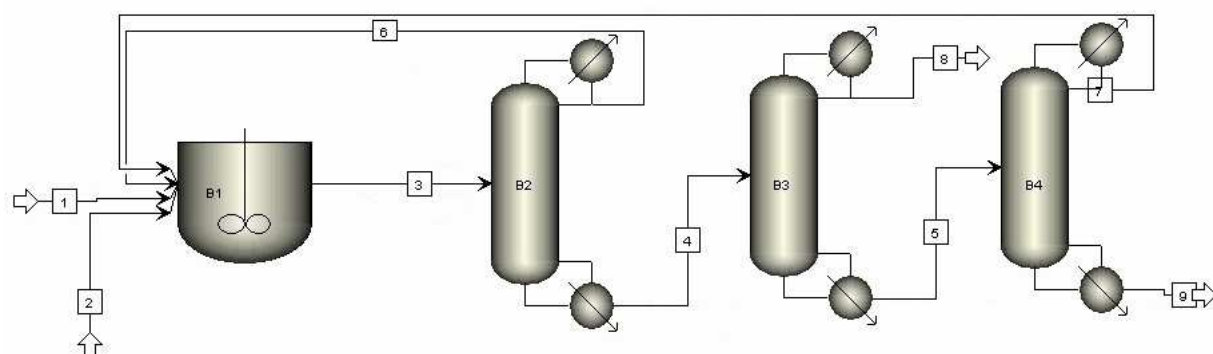
Struktúra	IAE recirkuláció	IAE
G_1 (DP), G_2 (DP)	0,552	1,595
G_1 (DP), G_2 (CP)	0,569	1,587
G_1 (CP), G_2 (DP)	0,573	1,583
G_1 (CP), G_2 (CP)	0,58	1,588
G_1 (DP), G_3 (DP)	0,672	1,762
G_1 (DP), G_3 (CP)	0,68	1,82
G_1 (CP), G_3 (DP)	0,682	1,712
G_1 (CP), G_3 (CP)	0,688	1,755
G_2 (DP), G_3 (DP)	0,735	1,95
G_2 (DP), G_3 (CP)	0,742	1,977
G_2 (CP), G_3 (DP)	0,75	1,912
G_2 (CP), G_3 (CP)	0,759	2,015

4. táblázat: A hipotetikus 2×2 -es rendszer IAE értékei (a 41. és a 42. ábra szerinti kapcsolások esetén)

Minden esetben azt tapasztaltam, hogy recirkuláció alkalmazása esetén a teljes rendszerre nézve az IAE-értékek alapján legkedvezőbb szabályozási struktúra a **3. táblázat** recirkulációs oszlopában szereplő blokkok szabályozási struktúráiból áll elő. Ez azt is jelenti, hogy a legkedvezőbb szabályozási struktúrát azon struktúrák együttes alkalmazásával érhetjük el, amelyek az egyedülálló, de recirkulációval ellátott blokkok szabályozási struktúrái voltak. Ezen vizsgálatok során ez a tény azt igazolja, hogy a szabályozási struktúra tervezési feladata a két blokkot tartalmazó recirkulációs rendszer esetén is dekomponálható, vagyis a teljes rendszerre vonatkozó szabályozási struktúra felépíthető a két különálló blokk átviteli függvény mátrixainak ismeretében.

5. VIZSGÁLATOK IPARI RENDSZERBEN

A vizsgált hipotetikus rendszerekben sikeresen igazoltam a szabályozási struktúra tervezési feladatának dekomponálhatóságát. Ahhoz azonban, hogy az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságát tanulmányozhassuk, valódi, ipari rendszereket is részletesen meg kell vizsgálni. Jelen dolgozatban a részletes ipari méretű vizsgálatok tárgyául egy etilbenzolt gyártó, többkolonnás, kémiai reaktort is tartalmazó vegyipari rendszert választottam, melynek technológiai leírása és jellemző termékösszetételei, valamint alkalmazott recirkulációinak adatai rendelkezésre állnak [19]. A rendszert ugyanebben a formában alkalmazzák az iparban is nagytisztaságú etilbenzol előállítására. Recirkulációs vizsgálatokra különösen alkalmas a rendszer, mert két recirkulációs áramot is tartalmaz – jelentősen különböző anyagárammal –, mely áramok egymástól függetlenül megszüntethetők, és mindegyik hiányában tovább üzemeltethető a rendszer, így különböző recirkulációs esetekben vizsgálható. Az ipari technológia vázlatát a **43. ábrán** látható. A benne található recirkulációk miatt a felépítés analógiát mutat a **20. ábrán** látható, lényegesen egyszerűbb rendszerrel.



43. ábra: A vizsgált ipari rendszer

A B1 jelű folyamatosan kevert tartályreaktor két külső betáplálási árama a bemenő benzol és etilén, a reaktorból kilépő elegy tartalmaz el nem reagált benzolt, valamint termékként etilbenzolt, tovább alkilezett termékként pedig dietil-, és trietil-benzolt. Az első desztilláló oszlop (B2) választja le a benzolt, melyet a 6 jelű áramon keresztül visszavezetnek a kémiai reaktorba, a fenéktermék (4) pedig az alkilezett szénhidrogéneket tartalmazza. A B3 jelű oszlop választja le a főtermékként az etilbenzolt nagy, legalább 99,9%-os tisztasággal, a fenéktermékben (5) pedig dietil-, és trietil-benzol távozik, melyeket a B4 jelű, harmadik desztilláló oszlop választ el egymástól. A dietil-benzolt ezen kolonna fejből a 7 jelű áramon

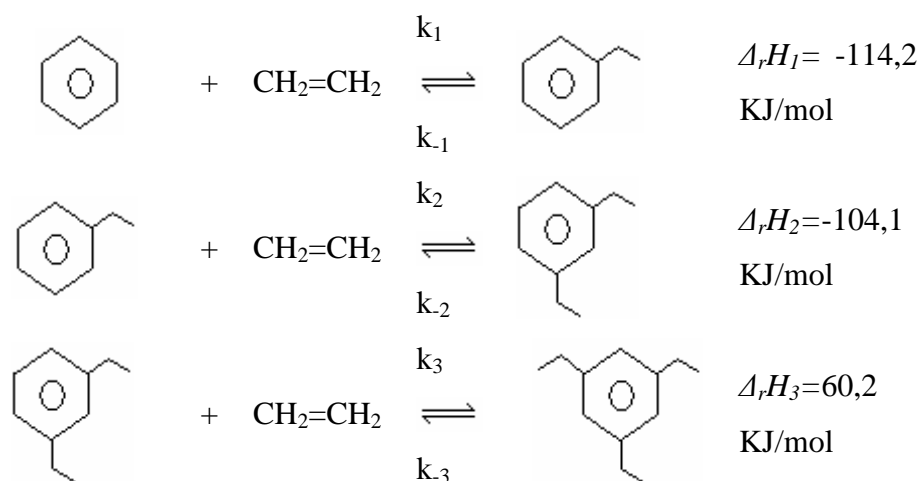
keresztül szintén visszavezetjük a reaktorba. Az anyagáramok nagysága az **5. táblázatban** látható.

5. 1. A vizsgált ipari rendszer adatai

Áram	fő komponens(ek)	áram [kmol/h]
1	Benzol (C ₆ H ₆)	41
2	Etilén (C ₂ H ₄)	47
3	Benzol, Etilbenzol, Dietil-benzol, Trietil-benzol	584,5
4	Etilbenzol, Dietil-benzol, Trietil-benzol	80
5	Dietil-benzol, Trietil-benzol	42
6	Recirkuláltatott Benzol	504,5
7	Recirkuláltatott Dietil-benzol	38,8
8	Etilbenzol	38
9	Trietil-benzol	3

5. táblázat: A vizsgált recirkulációs rendszer anyagáramai stacionárius üzemállapotban

A B1 jelű folyamatosan kevert tartályreaktorban 10 bar nyomást és 180⁰C-os hőmérsékletet alkalmazunk. A katalizátor alumínium-klorid (AlCl₃), melynek hatását egyelőre nem vizsgáltam. A tartályreaktorban a **6. táblázatban** látható kémiai reakciók zajlanak, közülük az első két alkilezési reakció exoterm, a harmadik endoterm hőszínezetű.



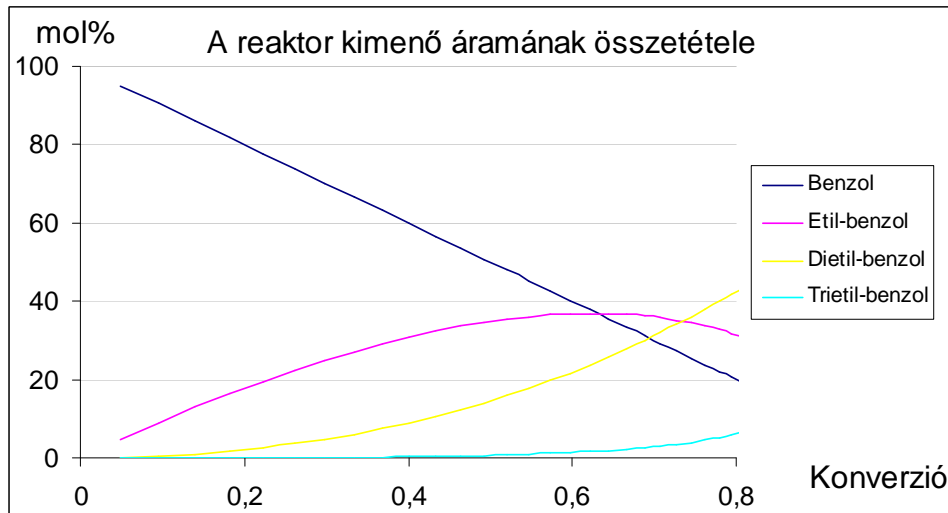
6. táblázat: A kémiai reaktorban zajló reakciók

A rendszer tehát két recirkulációt tartalmaz: egyfelől az első kolonna fejterméke (benzol) kerül visszavezetésre a reaktorba, másfelől a harmadik kolonna fejtermékét (diethyl-benzol) is visszavezetjük a hatékonyság további növelése céljából. Az ipari megvalósításhoz hű szimulációk során sok időt igényelt a pontos áramok és működési paraméterek beállítása, mert a dupla recirkuláció jelentősen megnövelte a rendszer belső összefüggőségét, ezért a stacionárius modellt megoldó matematikai összefüggések konvergencia-tartománya szűk volt. Ezzel együtt sikerült biztosítani, hogy a matematikai modell megoldása sikeres legyen, de a stacionárius állapotban modellezett recirkulációs rendszerben nem módosíthatók a paraméterek olyan széles tartományban, mint egy hasonló felépítésű, de recirkulációt nem tartalmazó elválasztó rendszer esetében.

5. 1. 1. A konverzió hatása

A tartályreaktor termékösszetétele a konverziótól függ, a termékáramban a **44. ábrán** látható módon az etilbenzol (főtermék) koncentrációjának maximuma van.

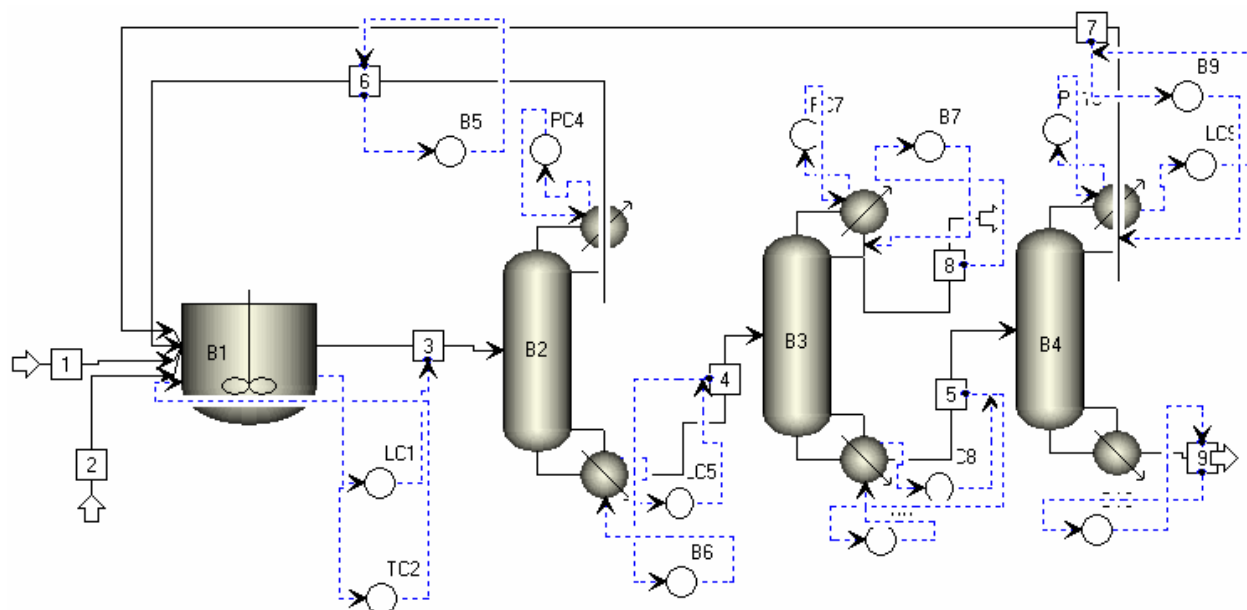
62%-os konverzió mellett maximális az etilbenzol termelése, azonban egyéb, elsősorban költségközpontú okok miatt az iparban 28%-os konverzióval dolgoznak, így a szimulációk során én is ekkora konverziót alkalmaztam. Az alacsonyabb konverzió ugyanakkor azzal is magyarázható, hogy a második recirkulációs áram diethyl-benzolt juttat a reaktorba, ami további etilbenzolt termel.



44. ábra: A reaktor kimenő áram-összetételének változása a konverzióval

5. 2. Összetétel-szabályozások

Annak érdekében, hogy a desztillátum, valamint a fenéktermék-áramok az előírt, megfelelő összetételűek legyenek, szabályozóköröket kell a rendszerre telepíteni. A kolonnák és a reaktor stabil működéséhez emellett szükségesek egyéb szabályozások is, pl. szint-, nyomás-, emellett a reaktor esetén hőmérséklet-szabályozás. A szabályozókörök hangolását az alkalmazott folyamatszimulátor, az Aspen Dynamics segítségével végeztem. A **45. ábrán** a vizsgált rendszer látható a megfelelő szabályozókörökkel ellátva. A folyamatosan kevert tartályreaktoron szint-, és hőmérséklet-szabályozó kör van, a kolonnákon összetétel-szabályozások, valamint nyomás- és szintszabályozások működnek. A folyamatos fekete vonalak mutatják az anyagáramokat, a szaggatott kék vonalak pedig a jelvezetékeket.



45. ábra: A vizsgált ipari rendszer szabályozóköreivel

Irányítástechnikai szempontból jelen rendszer komplex felépítésű: minden blokkján több, egymással kölcsönhatásban lévő szabályozóköri működik, mind az anyag-, mind a hőmérségbe egyidejűleg történik beavatkozás a szabályozások által, és a kettős recirkuláció is jelentősen növeli a kimutatható interakciók számát. A nagytisztaságú elválasztáshoz azonban elengedhetetlen a megfelelően működő, jól hangolt szabályozóköri létrehozása, ezért annak érdekében, hogy ez elvégezhető legyen, részletesen meg kell vizsgálni a rendszer dinamikus viselkedését, és ezen vizsgálatok eredményei alapján felépíteni a megfelelő struktúrájú szabályozókörieket. A vizsgálatokat különböző eszközökkel a stacionárius, a dinamikus, és a frekvenciatartományban is elvégeztem.

5. 2. 1. Vizsgálatok a stacionárius tartományban

A stacionárius vizsgálatok során a rendszer időbeli viselkedésének tanulmányozásától eltekintünk: zavarások, vagy a bemenő jelek megváltozása után kizárólag a kimenő jelek végértékeit vizsgáljuk, függetlenül attól, milyen időfüggvény szerint érték el az adott értéket. Ezen vizsgálatok célja a szabályozóköri közötti kölcsönhatások stacionárius elemzése a stacionárius szabályozhatósági indexek segítségével, és a recirkuláció által a szabályozhatósági jellemzőkre gyakorolt hatás kimutatása.

A vizsgálatok során az irodalmi részben tárgyalt stacionárius szabályozhatósági indexet definícióit használtam fel, azok értékeit határoztam meg a különböző kolonnákra oly módon, hogy azok lehetséges módosított jellemzőit 1%-kal ugrásszerűen megváltoztattam, majd megmértem a kimenő jelek, azaz a megfelelő termékösszetételek értékét az újabb stacionárius állapot beállása után. A vizsgálatok nyílt láncban történtek, összetétel-szabályozások nem működtek a rendszer blokkjain. Minden esetben meghatároztam a stacionárius átviteli mátrixot, abból pedig a sajátértékeken keresztül a megfelelő stacionárius szabályozhatósági mutatókat. Az eredményeket a **7. táblázatban** foglaltam össze. D-Q párosítás alatt egy olyan szabályozási struktúrát értünk, melyben a fejtermék összetételét a desztillátum-eltávolítással (D), míg a fenéktermék összetételét az üstfűtéssel szabályozzuk. A vonatkozó módosított jellemzők rövidítései a Jelölésjegyzékben megtalálhatók.

Struktúra		Recirkuláció nélkül			Recirkulációval		
		1. oszlop	2. oszlop	3. oszlop	1. oszlop	2. oszlop	3. oszlop
D-Q	<i>CN</i>	1875	4300	5900	732	502	382
	<i>NI</i>	1,115	0,99	0,11	1,034	0,98	1,3
	<i>MRI</i>	0,0023	0,0003	0,0001	0,00036	0,002	0,002
	<i>RGA</i>	0,897	1,01	9,75	0,967	1,021	0,77
D-BR	<i>CN</i>	3,73	526	48	8,39	502	376
	<i>NI</i>	1,27	1,47	2,21	1,016	0,98	1,23
	<i>MRI</i>	460	0,0027	0,011	112	0,002	0,002
	<i>RGA</i>	0,79	0,679	0,45	0,985	1,021	0,807
L-B	<i>CN</i>	1,001	2,733	1,04	1,0008	2,83	1,003
	<i>NI</i>	0,976	0,56	1,21	1,133	0,414	4,81
	<i>MRI</i>	16,8	3,69	0,319	0,409	0,00079	0,56
	<i>RGA</i>	1,025	0,797	0,826	0,882	2,415	0,207
L-Q	<i>CN</i>	1,001	3,8	5,55	1,0003	4,125	4,896
	<i>NI</i>	1,116	5,17	5,474	1,306	9,64	3,98
	<i>MRI</i>	20,3	0,46	1,25	18,9	1,25	0,99
	<i>RGA</i>	0,896	0,194	0,182	0,766	0,104	0,25
L-BR	<i>CN</i>	20,28	2,56	3,66	25,37	4,14	2,505
	<i>NI</i>	20,36	-3,66	0,13	-2,32	-3,39	0,614
	<i>MRI</i>	0,0569	0,796	0,145	0,0416	0,094	0,00895
	<i>RGA</i>	0,05	1,569	7,66	-0,432	-0,295	1,627
R-Q	<i>CN</i>	25,04	1,367	2,956	30,9	5,74	3,428
	<i>NI</i>	-1,6	3,966	0,044	-30	-123	-0,77
	<i>MRI</i>	0,01	0,15	0,275	0,0389	0,626	0,34
	<i>RGA</i>	-0,61	1,03	22,41	-0,033	-0,008	-1,29
R-B	<i>CN</i>	1,001	1,72	1,013	1,0002	1,003	1,03
	<i>NI</i>	0,975	-18	2,3	1,04	0,609	10,8
	<i>MRI</i>	16,6	0,155	0,33	0,409	0,52	0,322
	<i>RGA</i>	1,026	0,053	0,435	0,962	1,641	0,093

7. táblázat: A stacionárius szabályozhatósági indexek értékei

A táblázat adatai alapján megállapítható a stacionárius adatok alapján legkedvezőbbnek bizonyult szabályozási struktúra, és kimutatható a recirkuláció hatása. A szabályozási struktúra megállapításához az alábbi szempontokat tekintetem mérvadónak:

- a kondíciós szám értéke minél közelebb essen 1-hez
- a Niederlinski-index legyen pozitív
- az MRI-szám minél távolabb legyen a szingularitásnak megfelelő zérustól
- az RGA értéke közel legyen 1-hez

Amennyiben a különböző stacionárius indexek eltérő indikációt adnak egy szabályozási struktúrára, akkor a Niederlinski-indexet tekintetem mérvadónak, bár ez az eset kevés alkalommal fordult elő: a különböző mutatók jellemzően koherens módon jeleztek kedvezőnek egy-egy struktúrát.

A fenti követelmények alapján a stacionárius tartományban legkedvezőbb szabályozási struktúrák:

	1. oszlop	2. oszlop	3. oszlop
Recirkuláció nélkül	L-Q	R-Q	L-B
Recirkulációval	L-Q	R-B	L-B

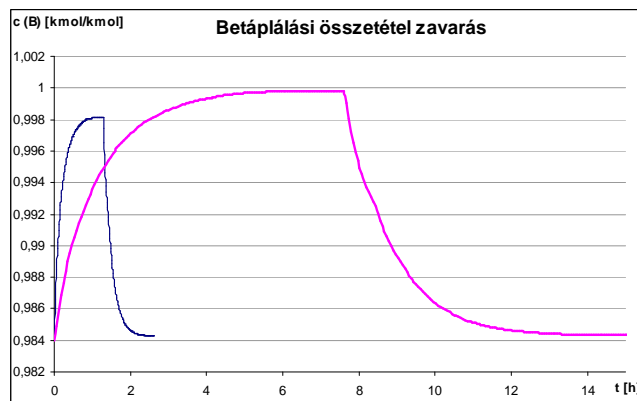
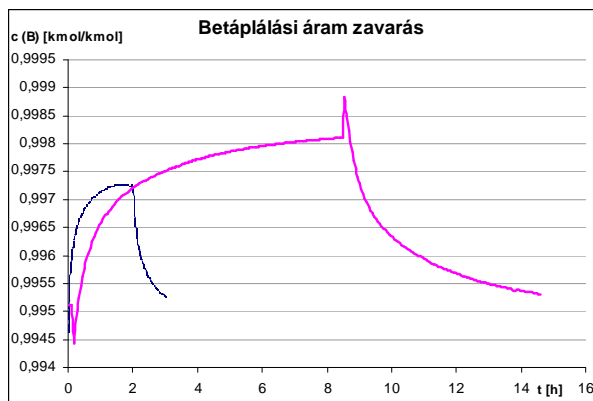
8. táblázat: Legkedvezőbb szabályozási struktúrák a stacionárius tartományban

A **8. táblázat** adataiból kiolvasható, hogy a recirkuláció megjelenése a szabályozhatósági jellemzőket kedvezőtlenül befolyásolja, ezért a recirkulációs rendszerek közelebb vannak a szinguláris viselkedéshez, és erősebb kölcsönhatásokat mutatnak. A negatív Niederlinski-indexek pedig instabilitásra hajlamosabb megjelenésére hívják fel a figyelmet. A recirkuláció legjelentősebb hatása a második oszlop legkedvezőbb struktúrájának megváltozása recirkulációs esetben: míg recirkuláció nélkül R-Q a kedvező szabályozási struktúra, addig recirkuláció esetén R-B. A stacionárius vizsgálatok eredményei segítséget nyújtanak a kedvezőtlen struktúrák kiszűréséhez, azonban kizárólag a stacionárius vizsgálatok alapján nem hagyhatók figyelmen kívül struktúrák, mert ezen vizsgálatok nélkülözik mind az idő-, mind a frekvencia-tartománybeli vizsgálatokat, ezért nem tekinthetők teljes értékűeknek. A stacionárius vizsgálatok leginkább kiindulási vizsgálatoknak tekinthetők, melyek a későbbi részletes vizsgálatok eredményeinek verifikálására kiválóan használhatók. Ahhoz azonban,

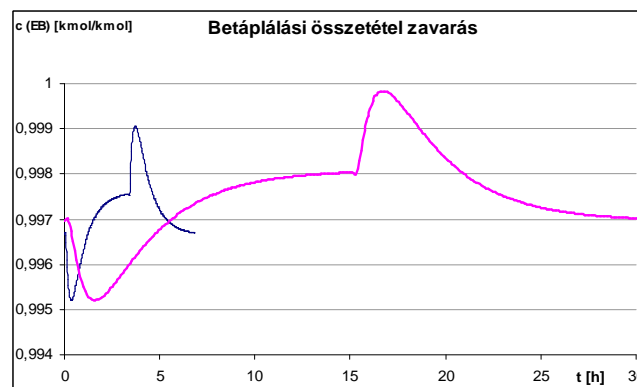
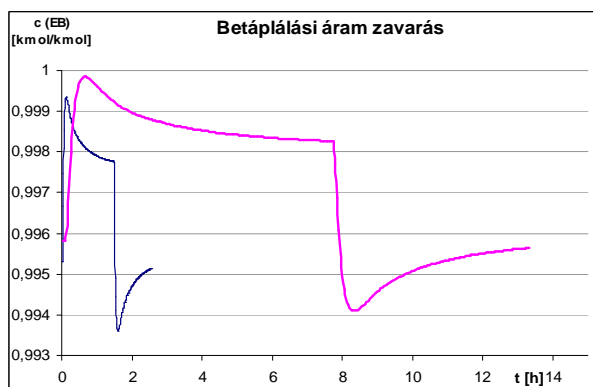
hogy a rendszer viselkedéséről, stabilitásáról részletesebb eredményeket kapjunk, meg kell vizsgálni a rendszer időbeli és frekvencia-tartománybeli viselkedését is.

5. 2. 2. Dinamikus vizsgálatok

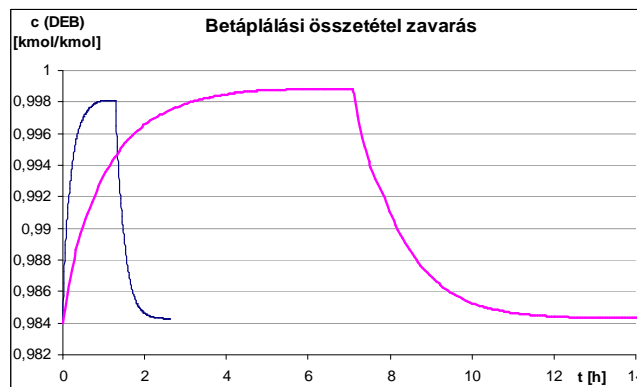
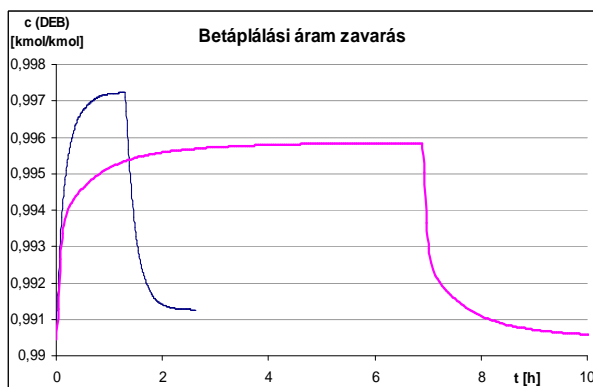
A dinamikus vizsgálatok az időtartományban zajlanak, céljuk a rendszerek viselkedésének időbeli leírása. Elsősorban ugrászavarások hatását vizsgáljuk itt, vagyis valamely zavarás, vagy módosított jellemző pillanatszerű megváltoztatásának hatását a kimenő jelekre. A kimenő jeleknek az idő függvényében történő regisztrációja történhet nyílt és zárt láncban egyaránt. Az ugrászavarások mértékének meghatározását linearitás-vizsgálatok előzték meg, melyek során azt vizsgáltam, hogy az egyes oszlopok esetén mekkora a megengedhető legnagyobb zavarás, melyet alkalmazva a kimenő és a bemenő jel változása lineáris korrelációt mutat. Ez az érték kolonnánként eltért, de azt tapasztaltam, hogy 1%-os zavarás alkalmazásával minden esetben a lineáris tartományban maradnak a válaszok, így a dinamikus vizsgálatokat 1%-os nagyságú zavarásokkal, és módosítottjellelmű-ugrásokkal végeztem. A zavarások jellemzően betáplálási áram-zavarások, betáplálási összetétel-zavarások és alapjel-zavarások voltak, a módosított jellemzőket pedig az oszlopokon alkalmazott módosított jellemzők közül választottam. A nyílt láncú vizsgálatok célja a rendszer válaszgörbéinek tanulmányozása, esetleges inverz válaszok és túllendüléssel válaszok felvétele, valamint rendszer-identifikáció, melynek segítségével elvégezhető a szabályozókörök megfelelő, a recirkuláció jelenlétét is figyelembe vevő hangolása. A szabályozókörök telepítése után zárt láncú vizsgálatokat végeztem, amelyek segítségével a már működő szabályozókörök minősítésére és dekomponálhatósági vizsgálataira nyílt lehetőség. A **46., 47. és 48. ábrákon** különböző zavarások hatása látható a különböző kolonnák kimeneteire. A **46. ábrán** az első oszlop fejtermék-összetételének változása látható recirkulációval (lila) és anélkül (kék) egyrészt betáplálási áram, másrészt betáplálási összetétel-zavarás esetén.



46. ábra: Betáplálási áram és betáplálási összetétel zavarásának hatása az első oszlop fejtermékének összetételére



47. ábra: Betáplálási áram, és betáplálási összetétel zavarásának hatása a második oszlop fejtermékének összetételére, reciklációval (lila) és recikláció nélkül (kék)



48. ábra: Betáplálási áram, és betáplálási összetétel zavarásának hatása a harmadik oszlop fejtermékének összetételére, reciklációval (lila) és recikláció nélkül (kék)

A **47. ábrán** a második oszlop fejtermék-összetételének válasza látható betáplálási áram és betáplálási összetétel-zavarásokra, reciklációval (lila) és enélkül (kék). A **48. ábrán** a

harmadik kolonna fejtermék-összetételének látható a fentiekkel megegyező zavarásokra. Valamennyi zavarás és valamennyi módosított jellemző hatását megvizsgáltam a dinamikus tartományban. A recirkuláció hatása mindenütt szignifikáns volt, elsősorban az időállandók tekintetében. Az átviteli tényezőket jóval kevésbé változtatták meg a visszavezetett anyagáramok. A **46., 47. és 48. ábrákon** látható zavarás-vizsgálatok eredményeiben két különböző jellegű válaszgörbe látható: a **48. ábrán** szokványos tárolóként viselkedik az oszlop, a **47. ábra** első felén (áram-zavarás) túllendüléssel válasz figyelhető meg, melynek során a kiindulási és a végérték között egy keskeny szakaszon a kimenő jel kilép az előbbi két jel által körülzárt tartományból. A második felén (összetétel-zavarás) inverz válasz látható, melynek sajátossága, hogy a kimenő jel a zavarás megtörténte után a végértékkel ellentétes irányba indul, és csak egy későbbi szakaszban közelít a végérték felé. A második oszlop jellemző viselkedését okozhatják az igen magas tisztasági követelményeknek megfelelően konfigurált paraméterek. A **9. táblázat** a különböző recirkulációs esetekben az üstfűtés, mint módosított jellemző ugrászavarásának hatását mutatja a különböző kolonnák termékösszetételeire átviteli tényezők (A) és időállandók (T) formájában.

Üstfűtés hatása		1. oszlop		2. oszlop		3. oszlop	
		A (%/%)	T [h]	A (%/%)	T [h]	A (%/%)	T [h]
Nincs recirk.	fej	0,3	1,5	-0,5	1,9	0,4	1,7
	fenék	0,3	1,5	-0,5	1,9	0,4	1,7
DEB recirk.	fej	0,35	2	-0,7	2,5	0,4	2,2
	fenék	0,35	2	-0,7	2,5	0,4	2,2
B recirk.	fej	0,4	4	-0,8	8	0,5	3,5
	fenék	0,4	4	-0,8	8	0,5	3,5
Mindkét recirk.	fej	0,4	4,5	-0,8	8,5	0,5	4
	fenék	0,4	4,5	-0,8	8,5	0,5	4

9. táblázat: A különböző oszlopok átviteli tényezői és időállandói különböző recirkulációs esetekben

A mérési adatokból készített adatbázis tartalmazza valamennyi módosított jellemző megváltoztatásának hatását az oszlopokra valamennyi recirkulációs esetben, azonban az eredmények igen nagy száma miatt jelen dolgozatba csak az üstfűtés, mint módosított jellemző megváltoztatásának hatását illesztettem.

Az identifikált átviteli tényezők és időállandók segítségével a rendszert felépítő blokkokat elsőrendű holtidős tagoknak feltételeztem (az irodalomban fellelhető munkák szerint ez reális feltételezés), majd ellenőrzés céljából felépítettem a rendszert a Matlab szimulációs szoftver segítségével. Céлом az volt, hogy meggyőződjek az identifikált paraméterek helyességéről, praktikusán arról, hogy az identifikált paraméterekkel felépített rendszer hasonló

eredményeket és közel megegyező végértékű kimenő jeleket szolgáltat-e. Az identifikált átviteli függvényeket tartalmazó blokkokból felépítettem a rendszert (mely a kémiai reaktort is tartalmazta) a Matlab-ban, és valamennyi tényér összetételét megfigyeltem. A futtatási eredmények verifikálták a stacionárius eredményeket: a Matlabbal identifikált átviteli függvényekből számított válaszgörbék végértékei gyakorlatilag megegyeztek az Aspen folyamatszimulátor által szolgáltatott értékekkel. A dinamikus lefutásokban előfordultak különbségek, azonban a Matlab-ban végzett modellezések célja mindössze a zárt körök hangolásához szükséges identifikációk elvégzése volt, így a dinamikus viselkedés részletes vizsgálata helyett az átviteli tényezők és az időállandók stacionárius meghatározása is elegendő volt, ebben pedig egyező eredmények születtek. A nyílt láncú vizsgálatok mindegyikében az Aspen-nel és a Matlab-bal számított értékek között 0,5% alatt volt a relatív hiba a termékösszetételek végértékeire vonatkozóan.

Az identifikációs eljárás során tehát a **9. táblázat** adatait szolgáltató módszert valamennyi oszlopra és módosított jellemzőre kiterjesztve elvégeztem, majd a kapott átviteli tényezők és időállandók segítségével behangoltam a különböző összetétel-szabályozó köröket, melyeket a kolonnákra telepítettem az Aspen Dynamics segítségével. Az eljárást a **10. táblázatban** bemutatott eredmények segítségével illusztrálom. Ez a táblázat az üstfűtésre (Q), mint módosított jellemzőre vonatkozik, a benne található értékek az üstfűtés zavarásainak hatását mutatják a megfelelő kolonnák kulcskomponenseinek stacionárius összetétel-változásaira, átviteli tényezők (A), időállandók (T) és holtidők (T_d) formájában.

Üstfűtés hatása		1. oszlop			A (%/%)	2. oszlop		A (%%)	3. oszlop	
		A (%%)	T [h]	T _d [h]		T [h]	T _d [h]		T [h]	T _d [h]
Nincs recirk.	fej	0,3	1,5	0,1	-0,5	1,9	0,1	0,4	1,7	0,1
	fenék	0,3	1,5	0,1	-0,5	1,9	0,1	0,4	1,7	0,1
DEB recirk.	fej	0,35	2	0,15	-0,7	2,5	0,15	0,4	2,2	0,15
	fenék	0,35	2	0,15	-0,7	2,5	0,15	0,4	2,2	0,15
B recirk.	fej	0,4	4	0,15	-0,8	8	0,15	0,5	3,5	0,15
	fenék	0,4	4	0,15	-0,8	8	0,15	0,5	3,5	0,15
Mindkét recirk.	fej	0,4	4,5	0,15	-0,8	8,5	0,15	0,5	4	0,15
	fenék	0,4	4,5	0,15	-0,8	8,5	0,15	0,5	4	0,15

10. táblázat: Az üstfűtés zavarásainak hatása a kolonnák kimenő áramainak összetételére

A **10. táblázat** adataiból látható, hogy a dinamikus viselkedést meghatározó időállandók mind a recirkulációk számának, mind azok anyagáramának növekedésével nőnek, így kedvezőtlenül befolyásolják a rendszer dinamikus viselkedését. Ez a megállapítás az átviteli

tényezőkre és az időállandókra is elmondható, sőt, utóbbiak esetén jelentősebb a recirkuláció jelenlétének hatása.

A táblázatban látható adatok szolgáltatták az alapot az összetétel-szabályozó körök hangolásához, mely hangolás beállításai gyakorlatilag megegyeztek az Aspen Dynamics folyamatszimulátor hangolási módszerével beállított körökével.

5. 2. 3. Vizsgálatok az idő-tartományban

Ezeket a vizsgálatokat valamennyi vizsgált módosított jellemzőre elvégeztem, majd segítségükkel a rendszerre összetétel-szabályozási célból telepített szabályozóköreket behangoltam. A zárt szabályozókörok működése alapján ismét meghatározhatók a legjobb szabályozási struktúrák, akár a stacionárius eredményektől függetlenül is. Erre a célra az IAE-értékeket, azaz integrális abszolút hibaértékeket választottam minősítésre alkalmas mennyiségnek, az irodalomban ezt a módszert ún. „load-rejection” alapján történő minősítésnek nevezik. Ennek segítségével a szabályozókörok a dinamikus tartományban minősíthetők és rangsorolhatók. A vizsgálatok során a korábban is alkalmazott, lineáris tartományba eső mértékű zavarás hatását vizsgáltam, és regisztráltam a hibaintegrálok értékét a kimeneteken. A **11. táblázat** mutatja a kolonnák IAE-értékeit az alkalmazott szabályozási struktúrák függvényében.

Struktúra	IAE recirkuláció nélkül			IAE recirkulációval		
	1. oszlop	2. oszlop	3. oszlop	1. oszlop	2. oszlop	3. oszlop
L-Q	0,082	0,850	0,933	1,142	1,162	2,175
L-B	0,085	0,075	0,108	1,167	1,588	1,392
R-B	0,091	0,072	0,142	1,150	0,952	1,415
D-BR	0,115	0,970	0,732	1,850	1,945	2,011
L-BR	0,121	0,113	0,157	2,682	2,130	1,832
R-Q	0,135	0,069	0,095	2,151	1,312	1,210

11. táblázat: A zárt láncú vizsgálatok eredményei: IAE-értékek a szabályozási struktúrák függvényében

A **11. táblázatban** a sötét cellák mutatják a legkedvezőbbnek bizonyult szabályozási struktúrát, ennek minősítése itt a legkisebb hibaintegrál alapján történt, megfigyelhető a recirkuláció hatására történt struktúraváltás a második oszlop esetén is. Lényeges eredmény, hogy az IAE-értékek alapján legkedvezőbbnek talált struktúrák megegyeznek a stacionárius tartományban legjobbnak talált struktúrákkal, azzal együtt, hogy a két tartományban teljesen eltérő módszereket használtam a szabályozási struktúrák megállapítására: a stacionárius

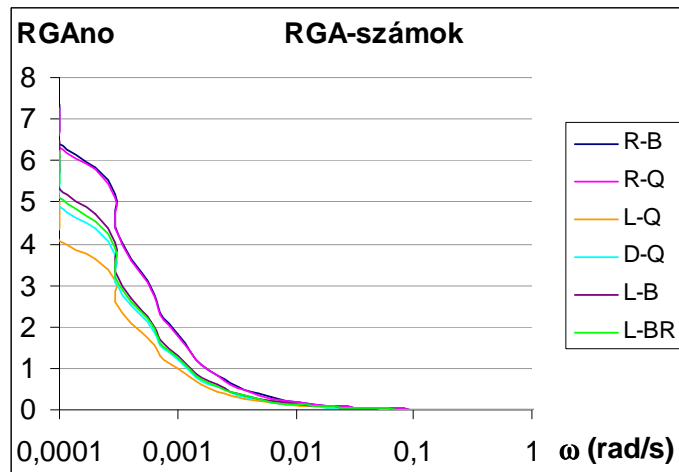
tartományban a stacionárius szabályozhatósági indexek értékeit, a dinamikus tartományban a zárt körök hibaintegrál-értékeit. Ezek egyezése verifikálta a módszerek helyességét. A rendszer dinamikus vizsgálatait az eddigiek mellett azonban a frekvencia-tartományra is kiterjesztettem, melynek segítségével a későbbi dekomponálhatósági vizsgálatok is támogathatók, fejleszthetők voltak.

5. 2. 4. Vizsgálatok a frekvencia-tartományban

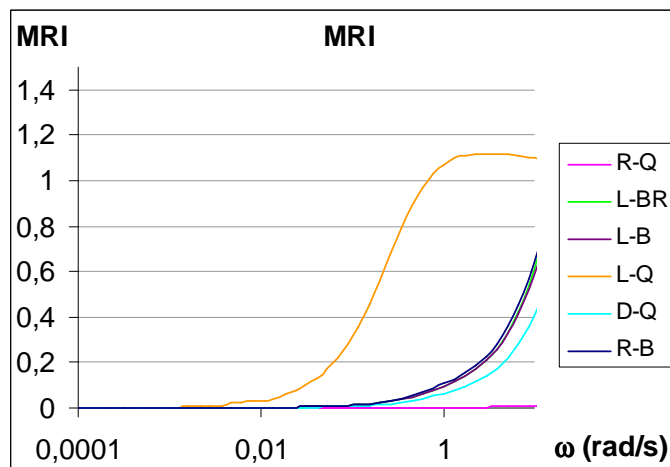
A frekvencia-tartományban történő vizsgálatok a rendszerek állapotmodelljeiből indulnak ki, céljuk a rendszer viselkedésének feltérképezése a frekvencia-tartományban, speciálisan a szabályozhatósági indexek változásának tanulmányozása a frekvencia függvényében. A vizsgálatok során a rendszer állapotegyenletéből indultam ki (63):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du + v \end{aligned} \tag{61}$$

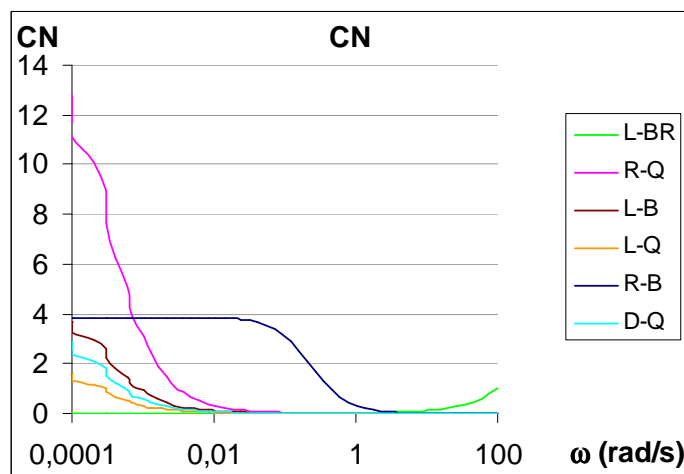
A, B, C, D jelöli a rendszer állapotmátrixait, melyek meghatározásához az Aspen Dynamics folyamatszimulátor Control Design Interface modulja nyújtott segítséget. Az eljárás során az I/O (bemenő/kimenő) változókból a CDI segítségével meghatároztam az állapotmátrixokat, először olyan háromszlopos mátrix formájában, amelynek első két oszlopa a harmadik oszlop elemének sor-, és oszlopindexét tartalmazta a valódi mátrixra vonatkozóan. Ezen mátrixokat a Matlab segítségével feldolgozva és megfelelően ritka mátrixszá kiegészítve megkaptam az A, B, C, és D mátrixok kezelhető formáját, melyekből egy erre a célra írott script segítségével meghatároztam a szabályozhatósági indexek frekvenciafüggvényeit. Ezeket a függvényeket logaritmusos diagramban ábrázoltam, majd a görbék összehasonlításával a frekvencia-tartományban is meghatároztam a legkedvezőbb szabályozási struktúrákat. Hat különböző szabályozási struktúrát vizsgáltam (D-Q, L-Q, R-Q, R-B, L-B, L-BR), valamint a korábban is vizsgált négy recirkulációs esetet. Az **49.**, **50.** és **51. ábrákon** néhány vizsgálat eredményét mutatom be. Ezek az első oszlopra, recirkulációmentes esetre vonatkoznak. Ezzel együtt valamennyi kolonnára és recirkulációs esetre rendelkezésre állnak az eredmények.



49. ábra: RGA-számok a frekvencia függvényében különböző módosítottjellemző-párosítások esetén



50. ábra: MRI-értékek a frekvencia függvényében különböző módosítottjellemző-párosítások esetén



51. ábra: Kondíciós számok a frekvencia függvényében különböző módosítottjellemző-párosítások esetén

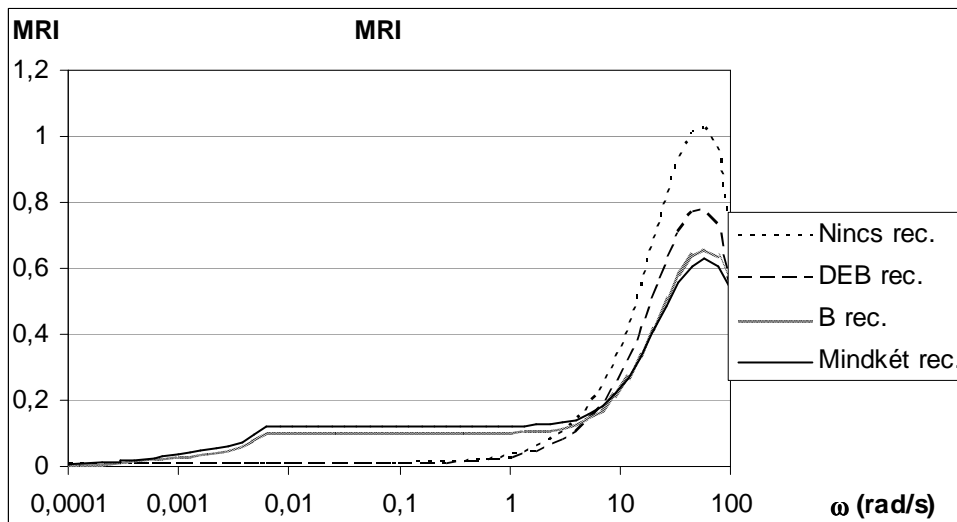
A szabályozhatósági indexekkel kapcsolatban különböző követelmények állíthatók fel, melyek alapján megállapítható egyes párosítások optimalitása. Az RGA számok egyetlen szám formájában mutatják a rendszer RGA-értékeinek eltérését a vele egyező méretű egységmátrixtól, ezért ezen érték minél közelebb van 1-hez, annál jobb minőségű szabályozást várhatunk. Az MRI-érték a rendszer szabályozásának távolságát mutatja a szingularitástól, ezért ennek minél távolabb kell lennie zérustól. A kondíciós számok szintén 1-hez közeli érték esetén kedvezőek. Az **49.**, **50.** és **51. ábrákon** látható frekvenciafüggvényekből egyértelműen megállapítható, hogy minden esetben a L-Q struktúra bizonyult legkedvezőbbnek. A többi oszlop és az egyéb recirkulációs esetek vonatkozásában a **12. táblázat** tartalmazza a legjobb párosításokat.

	1. oszlop	2. oszlop	3. oszlop
Nincs recirk.	L-Q	R-Q	R-B (R-Q)
DEB recirk.	L-Q	R-B	R-Q
B recirk.	R-Q	R-Q	R-Q
Mindkét recirk.	L-Q	R-B	R-Q

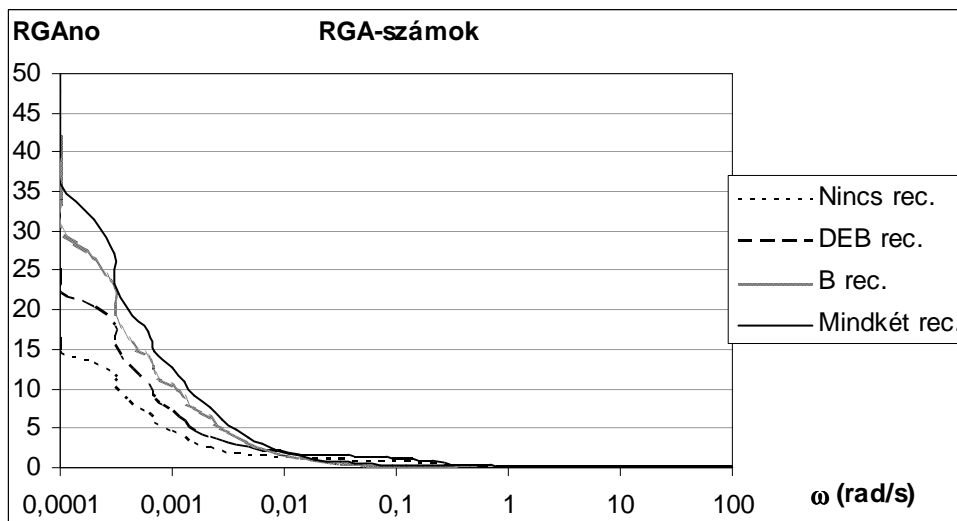
12. táblázat: Legkedvezőbb szabályozási struktúrák a frekvencia-tartományban

A **12. táblázatból** megállapítható, hogy a frekvencia-tartományban végzett vizsgálatok a dinamikus vizsgálatok eredményeivel összhangban ugyanazokat a struktúrákat mutatják legjobbnak, amelyeket korábban, a stacionárius és a dinamikus vizsgálatok is. A frekvencia-tartományban történő vizsgálatok alapja az állapotter-modell volt, maguk a frekvenciafüggvények pedig a meghatározott állapotmátrixokból származtak. A vizsgálatok menete nem tartalmazott olyan elemet, mely része lett volna akár a stacionárius, akár a dinamikus vizsgálatoknak, így elmondható, hogy a vizsgált etilbenzolt gyártó rendszerre alkalmazott modellek pontosak, a stacionárius-, a dinamikus-, és a frekvencia-tartományokban használt számítási módszerek helyesek voltak, és konzisztens eredményeket szolgáltatottak.

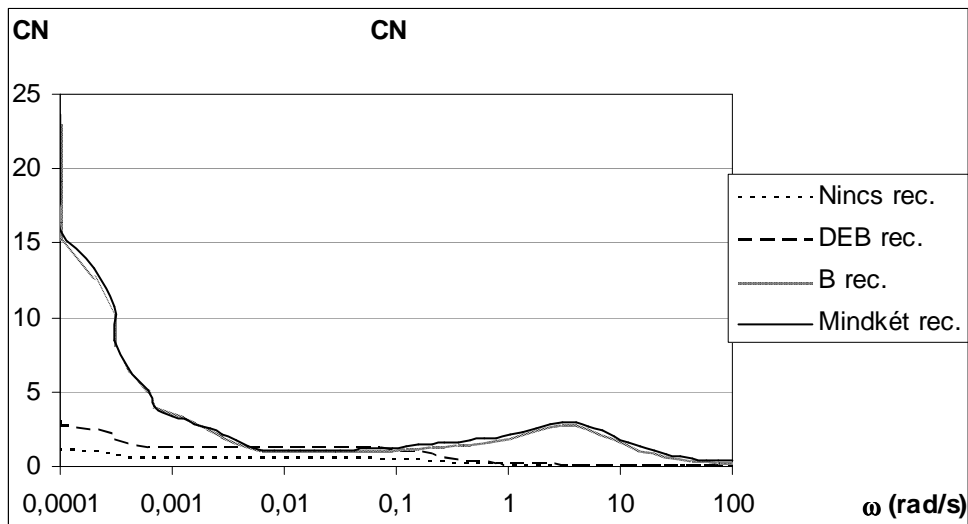
A különböző recirkulációs esetek vizsgálatához elemeztem a teljes rendszert is, mely valamennyi kilépő összetétel szabályozása esetén 6×6-os méretű. Ezen vizsgálatok esetén ugyancsak számos eset képzelhető el, melyek mindegyikét megvizsgáltam, ábra formájában azonban csak azokat jelenítettem meg, melyek a kolonnák legkedvezőbb szabályozási struktúráit tartalmazzák. Az **52.**, **53.** és **54. ábrákon** a 6×6-os rendszer frekvenciafüggvényei láthatók.



52. ábra: A teljes rendszer MRI-értékei a frekvencia-tartományban



53. ábra: A teljes rendszer RGA-számai a frekvencia-tartományban



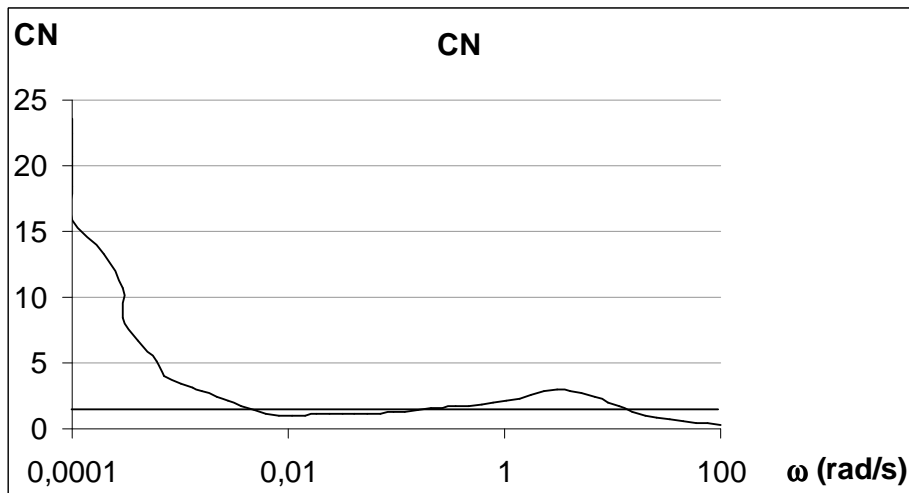
54. ábra: A teljes rendszer kondíciós számai a frekvencia-tartományban

Az **52.**, **53.** és **54. ábrákon** látható diagramokból a korábbi dinamikus vizsgálatokhoz hasonlóan megállapítható, hogy a recirkulált anyagáramok számának és nagyságának növelésével párhuzamosan egyre kedvezőtlenebb frekvenciafüggő szabályozhatósági indexeket kapunk; a recirkuláció hatását tehát a frekvencia-tartományban is kimutattam.

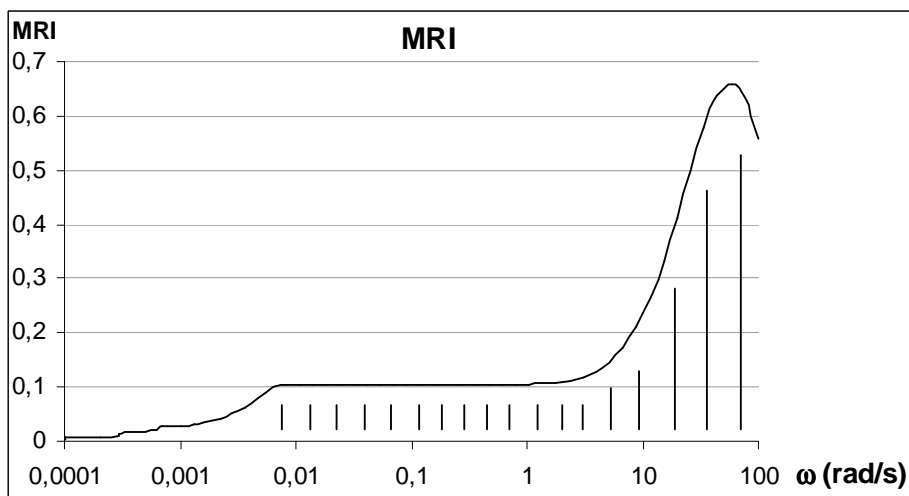
5. 3. Új frekvenciafüggő szabályozhatósági indexek

Két különböző szabályozási struktúra összehasonlítása a frekvenciafüggő indexek segítségével nehézségekbe ütközik, mert nem tudjuk, hogy melyik tartományban kell az összehasonlítást elvégezni. Ezért saját megfontolások alapján a frekvencia-tartományban történő struktúra-összehasonlításokhoz a frekvenciafüggvényeket a frekvencia függvényében integráltam, ennek felhasználásával két különböző értékből indultam ki: az átlagolt kondíciós számokból, és az integrált MRI-értékekből (**55.** és **56. ábra**). Ezek az értékek egyetlen szám formájában reprezentálják a vizsgált rendszer viselkedését a teljes frekvencia-tartományban, spektrum helyett tehát számokkal dolgozunk, és ezek a számok segítséget nyújtanak a struktúrák összehasonlításához. Kondíciós számok esetében azért választottam az átlagolt értéket, mert ideális esetben a kondíciós számnak egységnyihez közeli értéket kell felvennie és az átlagértékből ez jobban látható, informatívabb, mint egy integrálértékből. MRI esetében a teljes frekvencia-tartományban mutatott viselkedés leírására az integrálérték informatívabb. Ezen értékek szoros és jellemző kapcsolatban állnak az eredeti függvényekkel, így reprezentatív módon használhatók fel struktúrák minősítésére. Az RGA-értékekre nem

végeztem el ezeket a vizsgálatokat, mert az RGA kevésbé befolyásolja a szabályozási struktúrát.



55. ábra: Átlagolt kondíciós szám



56. ábra: Integrált MRI-érték

A **13. táblázat** és a **14. táblázat** az első és a második oszlop átlagolt kondíciós számait és integrált MRI-értékeit tartalmazzák recirkulációs rendszer esetén, aszerint, hogy melyik lehetséges szabályozási struktúrát alkalmaztam. A táblázatokban látható adatokat az adott szabályozhatósági indexszel szemben támasztott igények alapján a frekvenciafüggő viselkedés kedvezősége alapján rendeztem sorba.

Struktúra	Átlagolt CN	Integrált MRI
legjobb (L-Q)	1,15	45
2. legjobb (R-B)	1,19	44
3. legjobb (L-B)	1,31	42,6
4. legjobb (D-BR)	1,45	42
5. legjobb (R-Q)	1,6	41
legrosszabb (L-BR)	1,72	40,5

13. táblázat: Az átlagolt kondíciós szám, és az integrált MRI-értékek az első oszlop esetén

Struktúra	Átlagolt CN	Integrált MRI
legjobb (R-B)	1,21	42,5
2. legjobb (L-Q)	1,29	42
3. legjobb (R-Q)	1,35	41,4
4. legjobb (L-B)	1,56	40,9
5. legjobb (D-BR)	1,66	40
legrosszabb (L-BR)	1,8	39,5

14. táblázat: Az átlagolt kondíciós szám, és az integrált MRI-értékek a második oszlop esetén

A **13. táblázat** és a **14. táblázat** eredményei azt mutatják, hogy a frekvencia-tartományban végzett vizsgálatok során az alkalmazott szabályozási struktúrák kedvezőségének sorrendje megegyezik a dinamikus vizsgálatokéval (**11. táblázatban**) és gyakorlatilag a stacionárius vizsgálatok során kapott sorrenddel is egyezést mutat (**7. táblázat**). Mindhárom vizsgálati tartományban eltérő eszközöket alkalmaztam, ezért az azonosnak bizonyult legjobb struktúrák megerősítik az alkalmazott módszerek helyességét. A továbbiakban az előző fejezetekben ismertetett számítási módszerek és elvek összekapcsolásaként, dekomponálhatósági vizsgálatokat végzek az ipari technológiára és annak eredményeit mutatom be.

6. DEKOMPONÁLHATÓSÁGI VIZSGÁLATOK IPARI RENDSZERRE

6. 1. Bevezetés

Az előzőekben bemutatott vizsgálatok eredményeként rendelkezésünkre állnak különböző, minősítésre alkalmas mutatók a stacionárius-, a dinamikus-, és a frekvencia-tartományból, melyeket az eddigi vizsgálatok során oszloponként külön vizsgáltam. A munka egyik fő célkitűzése azonban a szabályozási struktúratervezés feladatának dekomponálhatósági vizsgálata, ehhez pedig meg kell vizsgálni a rendszer különböző blokkjait együttesen is. Együttes vizsgálatok alapján csak olyan mutatók használhatók a rendszer viselkedésének leírására, melyek a teljes struktúráról szolgáltatnak információt, például a teljes rendszert jellemző hibaintegrál-érték, integrált kondíciós szám, vagy integrált MRI-érték. A hipotetikus rendszerek dekomponálásával foglalkozó fejezetben írottakkal analóg módon jelen ipari rendszer dekomponálhatósági vizsgálatai során a különböző szabályozási struktúramódosítások együttes hatását vizsgálom. Jelen vizsgálatok háttérében továbbra is az a koncepció áll, miszerint feltételezhető, hogy a teljes rendszer szabályozási struktúráját a rendszert felépítő blokkok frekvenciatartományban vett lokálisan legkedvezőbb struktúráiból fel lehet építeni: ezen feltételezést igazolhatják a dekomponálhatósági vizsgálatok az ipari rendszer esetén is. Ezen vizsgálatok elvégzésére a dinamikus tartomány és a frekvencia-tartomány is alkalmas, mert mindkét tartományban számos mérési eredmény áll rendelkezésre a rendszert felépítő elemek viselkedéséről és egymásra gyakorolt hatásokról. A vizsgálatok alapját a dinamikus tartományban minősítő mennyiségekként a zavarások kompenzációja során mérhető hibaintegrál-értékek képezték, míg a frekvencia-tartományban a vizsgált tartományban számított integrált kondíciós szám-értékek, és az integrált belső szabályozhatósági indexek képezték. A teljes rendszerre vonatkozó hibaintegrál-értékek meghatározása során a rendszer elejére adott zavarás hatását vizsgáltam a főterméket (etilbenzolt) elválasztó kolonna kimenetére; a teljes rendszerre vonatkozó MRI-integrál értéke az adott teljes méretű szabályozási struktúra állapotter-modelljéből származó frekvenciafüggvényekből számolt mennyiség, míg a teljes rendszerre vonatkozó integrális kondíciós szám szintén a teljes rendszer állapotmodelljéből adódó frekvenciafüggvényekből származik. A teljes rendszerre vonatkozó mutatók természetesen kedvezőtlenebbek, mint az egyes kolonnákra vonatkozók, ami elsősorban a rendszerek méretével és a fellépő kölcsönhatásokkal magyarázható.

6. 2. Az egyedi kolonnák hatásának vizsgálata

A dekomponálhatósági vizsgálatok célja annak vizsgálata és egyidejű igazolása, hogy a teljes szabályozási struktúra felosztható-e kisebb méretű és komplexitású struktúrákra, illetve a teljes rendszerre vonatkozó szabályozási struktúra ezen rész-struktúrákból felépíthető-e. Bizonyos esetekben elképzelhető, hogy a szabályozási struktúra dekomponálása során egyes létező kölcsönhatások leírása kimarad a teljes modellből, azonban ha a struktúrák minősítésére használt általános jellemzők nem reprezentálják ezt a hiányt, akkor úgy tekintjük, hogy a teljes modellből hiányzó leírások nem érintik hátrányosan a modell érvényességét. A minősítések jellemzően különböző szabályozhatósági jellemzők és az ezekre vonatkozó kritériumok alapján történtek. A **15. táblázat**, a **16. táblázat** és a **17. táblázat** különböző struktúrák hibaintegráljait mutatják az egyes kolonnákra és a teljes rendszerre vonatkozóan egyaránt, növekvő sorrendben, a teljes rendszerre vonatkozóan. Felül a kedvező, alul a kedvezőtlen struktúrák láthatók.

Az 1. oszlop struktúrája	Az 1. oszlop IAE-értéke (recirkuláció)	A teljes rendszer IAE-értéke
L-Q	1,142	2,528
R-B	1,150	2,573
L-B	1,167	2,657
D-BR	1,850	2,663
L-BR	2,682	2,791
R-Q	2,151	2,830

15. táblázat: Az első kolonna struktúrájának hatása a teljes rendszer

A **15. táblázat** adatainak felvétele során a rendszer második és harmadik oszlopa a legkedvezőbb struktúrájával működött.

A 2. oszlop struktúrája	A 2. oszlop IAE-értéke (recirkuláció)	A teljes rendszer IAE-értéke
R-B	0,952	2,528
L-Q	1,162	2,552
R-Q	1,312	2,572
L-B	1,588	2,602
D-BR	1,945	2,789
L-BR	2,130	2,824

16. táblázat: A második kolonna struktúrájának hatása a teljes rendszer hibaintegráljára

A **16. táblázatban** látható adatok az első és a harmadik oszlop saját legjobb struktúrája esetén mutatják a teljes rendszer viselkedését.

A 3. oszlop struktúrája	A 3. oszlop IAE-értéke (recirkuláció)	A teljes rendszer IAE-értéke
R-Q	1,210	2,528
L-B	1,392	2,542
R-B	1,415	2,559
L-BR	1,832	2,592
D-BR	2,011	3,655
L-Q	2,175	2,712

17. táblázat: A harmadik kolonna struktúrájának hatása a teljes rendszer hibaintegráljára

A **17. táblázat** adatait a rendszer első két oszlopának saját legkedvezőbb szabályozási struktúrája esetén vettem fel. A **15. táblázat**, a **16. táblázat** és a **17. táblázat** bemutatja a szabályozási struktúrák sorrendiségét, a legkedvezőbbtől a legkedvezőtlenebbig, ahol a rangsorolás alapja az IAE-érték volt. Látható, hogy a kedvezőtlenebb struktúrák nem csak azokon a kolonnákon eredményeznek nagyobb hibaintegrál-értékeket, ahová telepítettem őket, hanem a teljes rendszerre vonatkozóan is. Egyes esetekben előfordul, hogy a saját

kolonna IAE-növekedésével párhuzamosan a teljes rendszer IAE-értéke csökken, ezek azonban nem számottevő esetek - a vizsgált struktúrák mellett egyedül az első oszlop L-BR és R-Q struktúrái között fordul elő.

Mivel a fenti vizsgálatok során a módosított struktúrákat tartalmazó kolonna melletti két másik kolonna mindig a saját legkedvezőbb struktúrájával működött, ezért ezekből az eredményekből nem nyerhető információ egyéb struktúrák együttes alkalmazásának eredményéről. A dekomponálhatóság igazolásának ugyanakkor alapvető feltétele, hogy két nem legkedvezőbb struktúra párosítása egyetlen esetben se eredményezzen kedvezőbb struktúrát az eredetiéknél, mert ha ez fennáll, akkor a teljes struktúra nem tervezhető meg a lokálisan legjobb struktúrákból. Ezzel együtt három kolonna struktúrájának együttes módosítása szintén nehézségekbe ütközik, mert annak ábrázolása már igen nehézkes (három független változó, és ezek függvényében az IAE-értékek). Az együttes struktúravizsgálati eljárás során a fentiek figyelembevételével két kolonna struktúráját változtattam párhuzamosan, egymástól függetlenül, miközben a harmadik oszlop struktúrája állandó volt, azonban a vizsgálatokat kiterjesztettem a harmadik oszlop struktúrájára is: a harmadik kolonna struktúráját paraméterként figyelembe véve több IAE-függvény ábrázolható. Az adatokat a **18. táblázatban** foglaltam össze. A táblázatban a hibaintegrál-értékek láthatók a teljes rendszerre, az első két kolonna szabályozási struktúrájának függvényében. A harmadik kolonna mindenütt a legjobb struktúráját tartalmazza.

6. 3. A teljes rendszer vizsgálata

1. oszlop	IAE értékek a teljes rendszerre (a 3. kolonna legjobb struktúrájával)					
	2. oszlop					
legjobb	legjobb	2. legjobb	3. legjobb	4. legjobb	5. legjobb	legrosszabb
legjobb	2,528	2,552	2,573	2,602	2,789	2,824
2. legjobb	2,573	2,595	2,632	2,663	2,811	2,843
3. legjobb	2,657	2,668	2,67	2,758	2,852	2,91
4. legjobb	2,663	2,672	2,8	2,812	2,887	3,03
5. legjobb	2,791	2,811	2,85	2,864	2,91	3,12
legrosszabb	2,83	2,95	2,981	2,997	3,16	3,374

18. táblázat: Hibaintegrál-értékek a teljes rendszerre

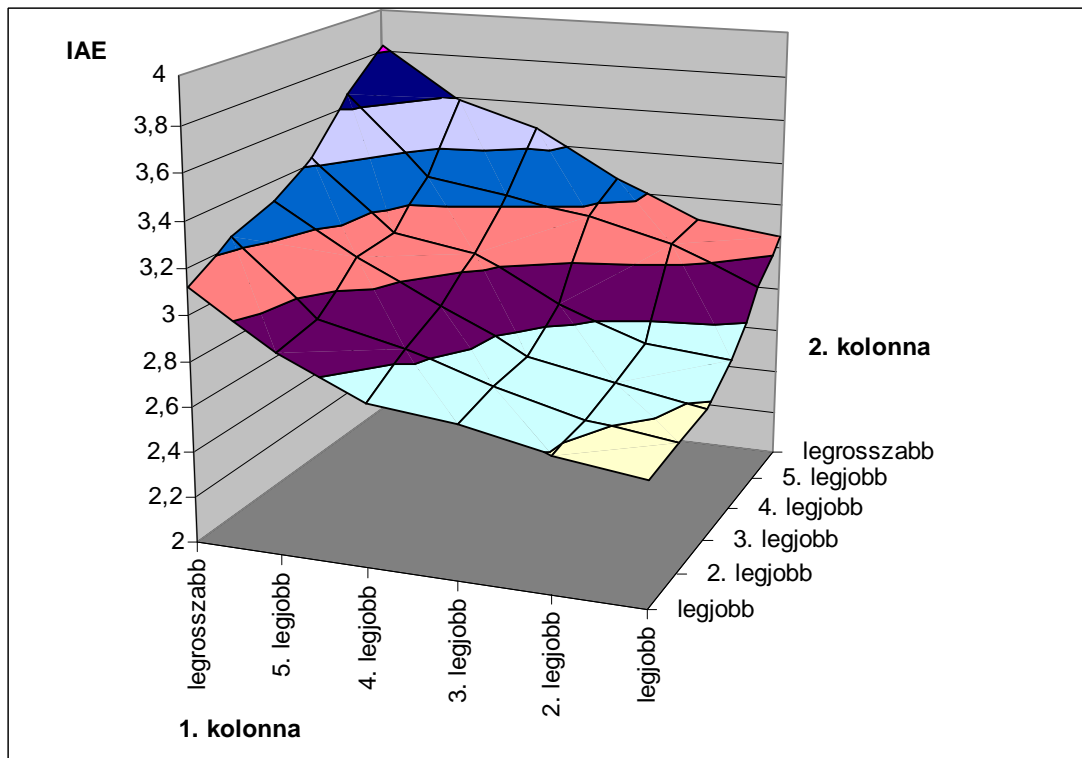
Ahhoz, hogy a harmadik kolonna szabályozási struktúrájának hatása együttesen legyen megjeleníthető az első két oszloppal, négydimenziós ábrázolásra lenne szükség - a három kolonna struktúrája, mint független változó, és teljes IAE, mint függvényérték. Átláthatóan ábrázolható diagramokat csak úgy lehet készíteni, hogy a harmadik kolonna struktúráját nem

változóként, hanem paraméterként értelmezzük, és annak függvényében ábrázoljuk azokat a térbeli IAE-felületeket, melyeket csak az első és a második oszlop határoz meg. A **19. táblázat** ugyancsak az első két kolonna együttes struktúraváltoztatásának a hatását mutatja a teljes hibaintegrálra, itt azonban a harmadik oszlop már a második legjobb struktúrát tartalmazza. Látható, hogy minden IAE-érték kis mértékben nőtt a **18. táblázat** adataihoz képest, melyet a harmadik oszlop legjobbtól eltérő (második legjobb) struktúrája indokol.

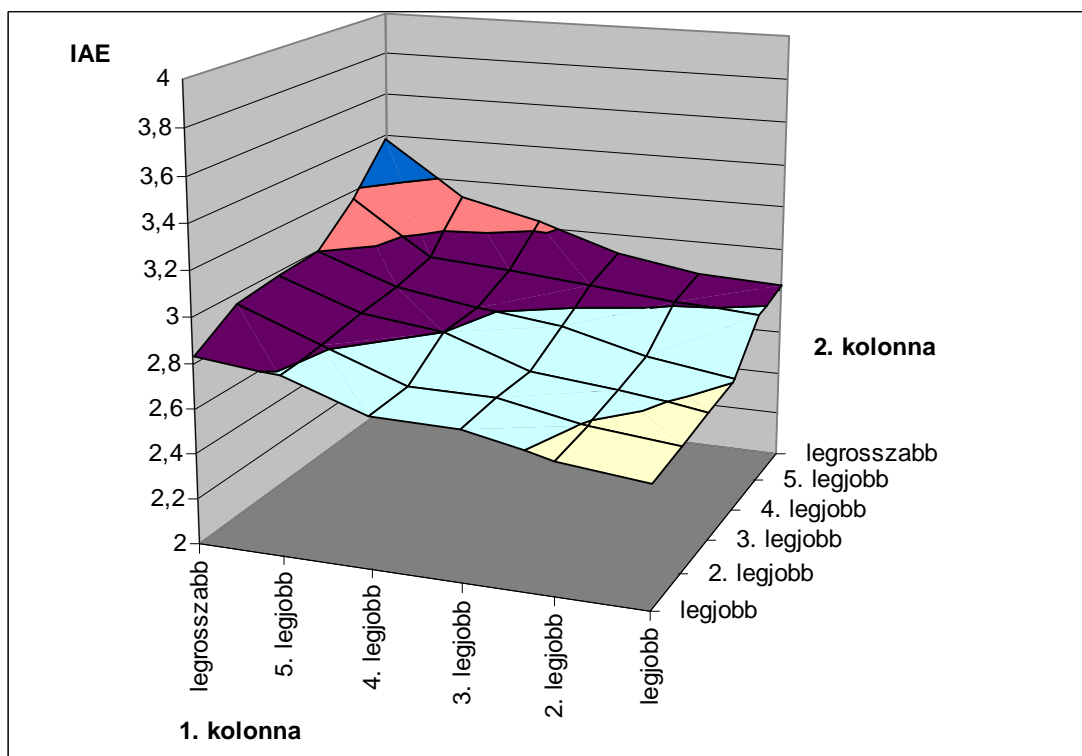
1. oszlop	IAE értékek a teljes rendszerre (a 3. kolonna második legjobb struktúrájával)					
	2. oszlop					
legjobb	legjobb	2. legjobb	3. legjobb	4. legjobb	5. legjobb	legrosszabb
legjobb	2,542	2,568	2,585	2,681	2,91	3,052
2. legjobb	2,594	2,612	2,654	2,72	3,073	3,095
3. legjobb	2,671	2,71	2,731	2,858	3,167	3,267
4. legjobb	2,715	2,834	2,912	3,056	3,231	3,481
5. legjobb	2,88	2,922	3,093	3,113	3,295	3,588
legrosszabb	3,125	3,243	3,311	3,426	3,661	3,825

19. táblázat: Hibaintegrál-értékek a teljes rendszerre

A szemléletesség érdekében a **18. táblázatban** és **19. táblázatban** foglalt értékeket háromdimenziós diagramokban ábrázoltam, melyekből a dekomponálhatóságra vonatkozó koncepciók alapjai jól láthatók. A harmadik kolonna legjobb és második legjobb struktúrájával felépített struktúrák IAE-értékei az első és a második oszlopok struktúráinak függvényében az **57.** és az **58. ábrákon** láthatók.



57. ábra: A teljes rendszerre vonatkozó IAE-értékek a harmadik kolonna legjobb struktúrájával



58. ábra: A teljes rendszerre vonatkozó IAE-értékek a harmadik kolonna második legjobb struktúrájával

Az **57.** és az **58. ábrákon** feltüntetett felületek minden tartományban csökkenő felületek, melyet egzakt formában a Manhattan-távolságok segítségével állapítottam meg. A Manhattan-távolságok az egyes ábrázolt pontok optimumtól mért index-távolságának sorozatát alkotják, és ezen számok az IAE-értékek változásának monoton növekedését mutatják a kedvezőtlenebb struktúrák párosításának irányába. Mindez az ábrázolt felületeken azt jelenti, hogy ha bármely tengelyen (első, vagy második oszlop struktúrája) kedvezőbb struktúrát reprezentáló irányba mozdulunk, akkor a függvényérték - a teljes rendszerre vonatkozó hibaintegrál értéke - csakis kisebb lehet. Ugyanez fordított irányban is igaz: két, egyenként kedvezőtlenebb struktúra párosításával egyik esetben sem állítható elő olyan rendszer, amely összességében kedvezőbb hibaintegrált mutat, mint azok, amelyekből kiindultunk. Utóbbi megállapítás a dekomponálhatóság szempontjából lényeges: következik az eredményekből, hogy a legkedvezőbb, vagyis a legkedvezőbb hibaintegrállal rendelkező struktúra csak az lehet, amit a függvényfelület legalsó pontja reprezentál. Bármely ettől eltérő pont eléréséhez ugyanis legalább az egyik struktúrát kedvezőtlenebbre kell cserélni. Az a tény, hogy a globálisan legkedvezőbb struktúra akkor és csak akkor legkedvezőbb, ha a lokálisan legkedvezőbb struktúrákból épül fel, az adott rendszerre igazolja a dekomponálhatóságot: a szabályozási struktúra megtervezésének feladata összeállítható lokális (kolonnánkénti) struktúratervezési feladatokból, vagyis lényegesen könnyebben kezelhető problémává egyszerűsödik. Ezzel a lényeges egyszerűsítési lehetőséggel a struktúratervezés feladata olcsóbbá és gyorsabbá válik, ezen struktúratervezési lehetőség igazolásával pedig pontosan ez volt a célom. A felületek lefutása a harmadik kolonna struktúrájától függetlennek bizonyult, annak kedvezőtlenebbre cserélésével csak a teljes hibaintegrál nőtt (várható módon), a felületek csökkenő jellege nem változott, ezért a dekomponálhatóság a vizsgált rendszer valamennyi lehetséges struktúrájára és azok párosításaira igaz.

A „load-rejection” alapú dekomponálhatósági vizsgálatok a dinamikus tartományban történő rendszervizsgálatok alapján történtek, azonban a rendelkezésre álló vizsgálati eszközök közül a dinamikus tartomány analízise csak az egyik lehetőség. Emellett a frekvencia-tartományban is kivitelezhetők további részletes vizsgálatok, melyek alapja az állapotér-modell, ezért az ilyen módon nyerhető adatok függetlenek a dinamikus adatoktól, ami lehetőséget ad az eredmények verifikálására, és megbízhatóságuk növelésére. Ugyanezen vizsgálatokat elvégeztem a frekvencia-tartományban is, minden egyes szabályozási struktúra-párosításra megfelelően hangolt szabályozóköörökkel, majd integrált kondíciós számok és integrált MRI-értékek alapján minősítettem a struktúrákat. Az eredményeket a **20-23. táblázatok** foglalják

össze, mindkét esetben a harmadik oszlop legkedvezőbb és második legkedvezőbb szabályozási struktúrája esetében.

Integrált MRI értékek a teljes rendszerre (a 3. kolonna legjobb struktúrájával)

1. oszlop	2. oszlop					legrosszabb
	legjobb	2. legjobb	3. legjobb	4. legjobb	5. legjobb	
legjobb	32,5	31,3	30,9	30,4	30	29,3
2. legjobb	31	30,5	30	29,5	29	28
3. legjobb	30,4	29,7	29	28,2	27,5	27
4. legjobb	29,5	27,9	27,5	27,1	26,9	25,2
5. legjobb	27	26,1	25,3	24,6	23,5	22
legrosszabb	25,5	24,5	23,2	22	21,6	20

20. táblázat: Integrált MRI-értékek a teljes rendszerre

Integrált MRI értékek a teljes rendszerre (a 3. kolonna második legjobb struktúrájával)

1. oszlop	2. oszlop					legrosszabb
	legjobb	2. legjobb	3. legjobb	4. legjobb	5. legjobb	
legjobb	31	30,3	30	29,5	29	28,4
2. legjobb	30,1	29,8	29,3	28,9	28,1	27,3
3. legjobb	29,5	28,8	28	27,7	27,3	26,4
4. legjobb	28,6	28	27,3	27	26,5	25,2
5. legjobb	26,2	25,5	24,9	24	23,7	22,9
legrosszabb	24,7	23,9	23	22,5	21	19,8

21. táblázat: Integrált MRI-értékek a teljes rendszerre

Átlagolt CN értékek a teljes rendszerre (a 3. kolonna legjobb struktúrájával)

1. oszlop	2. oszlop					legrosszabb
	legjobb	2. legjobb	3. legjobb	4. legjobb	5. legjobb	
legjobb	2,1	2,9	3,5	4,1	4,5	5
2. legjobb	2,5	3,2	4	4,6	4,9	5,2
3. legjobb	3,3	4,1	4,7	5	5,2	5,6
4. legjobb	3,8	4,5	5	5,5	5,8	6
5. legjobb	4,3	5,2	5,5	5,8	6	7,2
legrosszabb	4,7	5,5	5,7	6	7,3	7,8

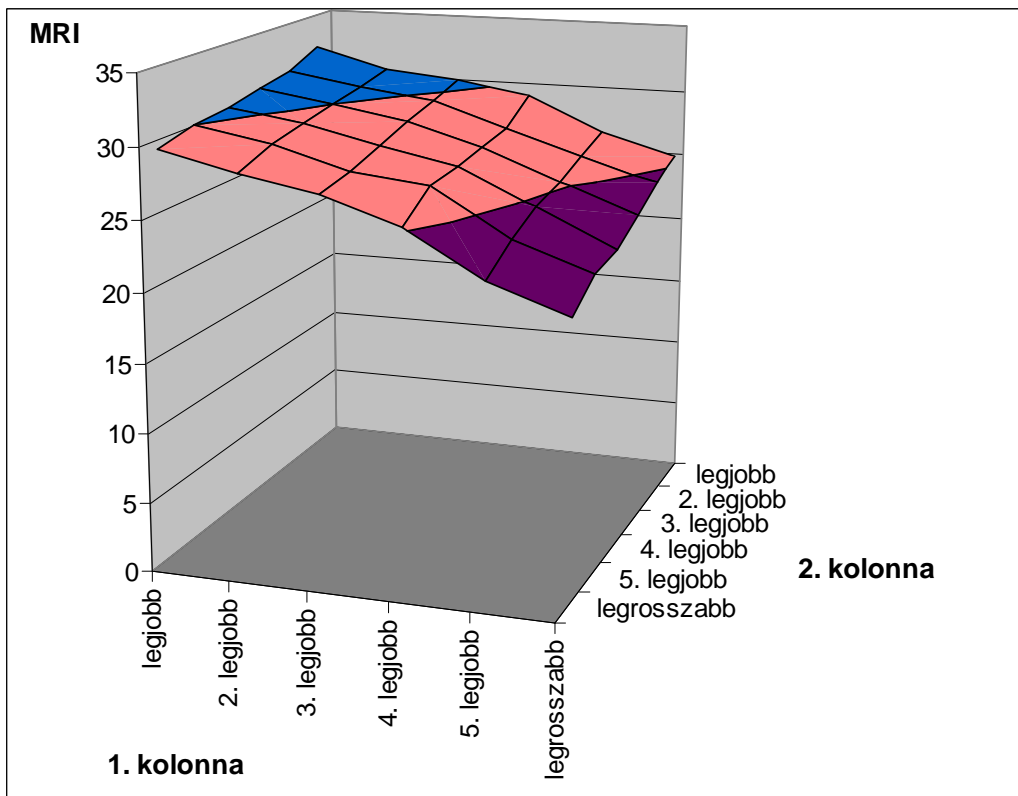
22. táblázat: Átlagolt CN-értékek a teljes rendszerre

Átlagolt CN értékek a teljes rendszerre (a 3. kolonna második legjobb struktúrájával)

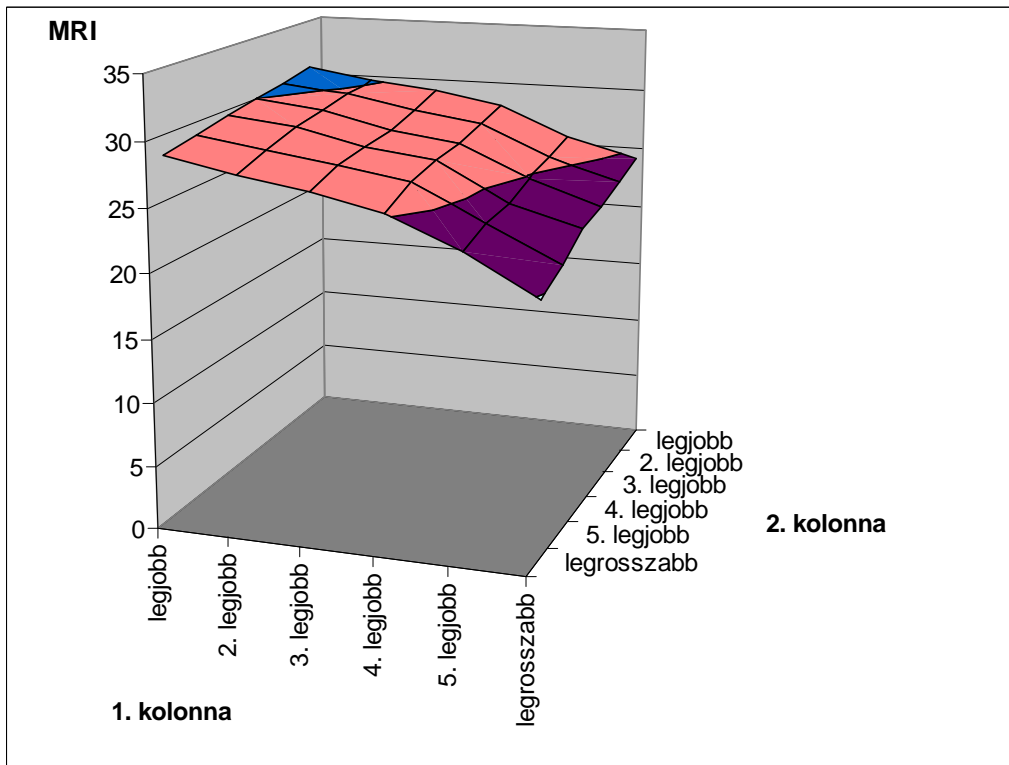
1. oszlop	2. oszlop					legrosszabb
	legjobb	2. legjobb	3. legjobb	4. legjobb	5. legjobb	
legjobb	2,5	3,3	3,8	4,5	4,9	5,4
2. legjobb	2,9	3,6	4,4	5	5,3	5,6
3. legjobb	3,7	4,5	5	5,4	5,6	6
4. legjobb	4,1	4,8	5,3	5,8	6,1	6,5
5. legjobb	4,6	5,5	6,2	6	6,4	7,5
legrosszabb	5	5,8	6,3	6,3	7,5	8,1

23. táblázat: Átlagolt CN-értékek a teljes rendszerre

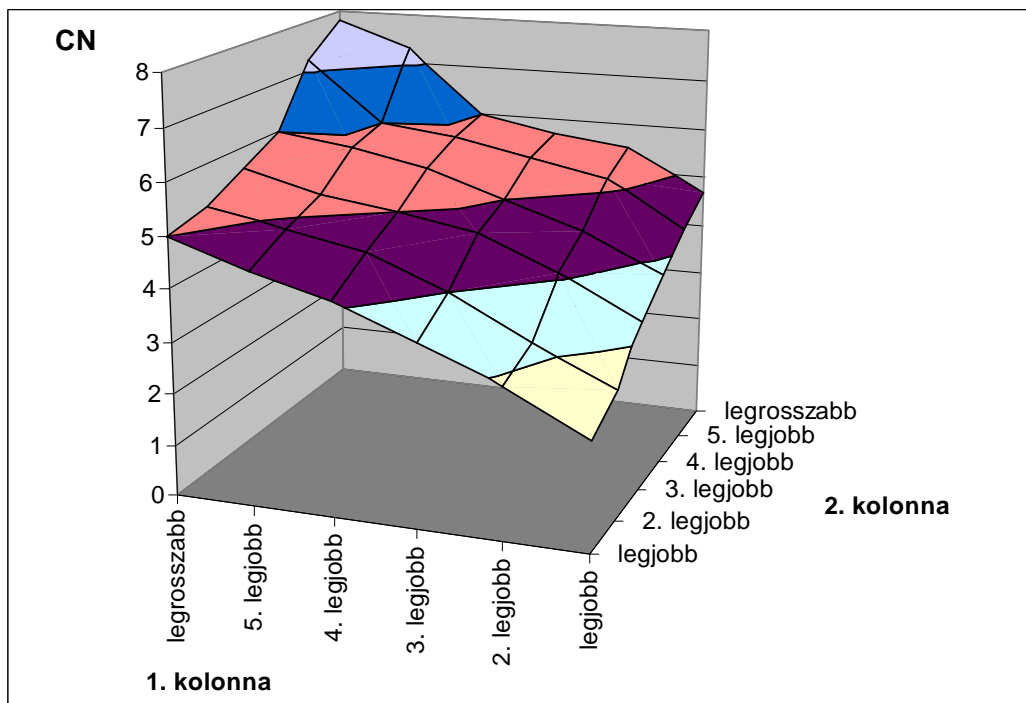
A fenti táblázatokban található értékek a különböző szabályozási struktúrák párosításai esetén minősítik a teljes rendszert. Egységnyihez közeli átlagolt CN-értékek és zérustól távoli integrált MRI-indexek esetén a rendszerek viselkedése kedvezőnek minősíthető. A frekvenciafüggő szabályozhatósági indexek szemléletes megjelenítése érdekében az előzőekhez hasonló módon háromdimenziós diagramban ábrázoltam az adatokat, melyek a **59., 60., 61. és 62. ábrákon** láthatók.



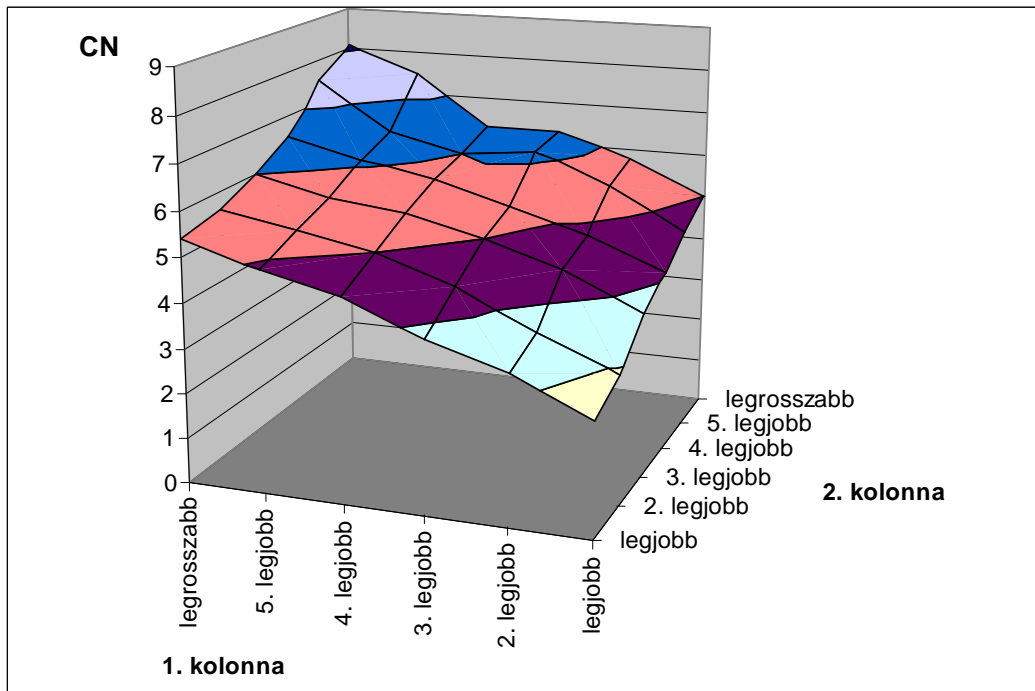
59. ábra: A teljes rendszerre vonatkozó MRI-integrálok a harmadik kolonna legjobb struktúrája esetén



60. ábra: A teljes rendszerre vonatkozó MRI-integrálok a harmadik kolonna második legjobb struktúrája esetén



61. ábra: A teljes rendszerre vonatkozó átlagolt CN-értékek a harmadik kolonna legjobb struktúrája esetén



62. ábra: A teljes rendszerre vonatkozó átlagolt CN-értékek a harmadik kolonna második legjobb struktúrája esetén

A 59., 60., 61. és 62. ábrákon látható felületek pontjainak Manhattan-számait az 57. és az 58. ábrákon láthatóakhoz hasonlóan monotonitást mutatnak, amely a „load rejection”-alapú vizsgálatok eredményeivel összhangban azt mutatja, hogy a globális szabályozási struktúra akkor minősíthető legkedvezőbbnek, ha minden lokális struktúra egyenként legkedvezőbb (a saját legjobb szabályozási struktúráját tartalmazza). A felületek ilyen jellegű változása az legkedvezőbbtől a legkevésbé kedvező struktúrapárosításokig ugyanis azt jelenti, hogy egyetlen párosítás esetén sem lehetséges, hogy két, egyenként kedvezőtlenebb struktúra együttesen egy kedvezőbb szabályozhatósági indexszel rendelkező struktúrát eredményezzen. Az eredmények a dinamikus tartományban és a frekvencia-tartományban is ugyanerre az eredményre vezettek, ez nagyban megerősíti megbízhatóságukat. A dekomponálhatóság ténye ezen vizsgálatok segítségével igazolást nyert, esetükben tehát a teljes szabályozási struktúra megtervezésének feladata dekomponálható, azaz a recirkulációs hurokban lévő egyes egységek önállóan megtervezett legjobb szabályozási struktúrája megadja a teljes rendszerre jellemző legjobb struktúrát. Ezen kisebb feladatok (lokális struktúratervezések) lényegesen egyszerűbbek, olcsóbbak és gyorsabban kivitelezhetők. A recirkulációs rendszerek kutatásának szempontjából ezen eredmények jelen rendszerekre vonatkozóan hozzájárulnak a szabályozási struktúrák könnyebb megtervezéséhez, kezeléséhez és üzemeltetéséhez.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Napjainkban a vegyipari folyamatok nélkülözhetetlen része a recirkuláció, mely jellemzően anyag-, és/vagy energiaáramok visszavezetését jelenti. A komponenselválasztó rendszerek döntő többsége technológiai okokból, más vegyipari rendszerek pedig gazdaságossági és egyéb megfontolások alapján tartalmazznak recirkulációs ágakat.

A recirkuláció alkalmazása azonban problémákat is felvet, melyek közül a legjelentősebb az általa a rendszerbe kerülő pozitív visszacsatolás kedvezőtlen hatása a struktúra szabályozhatóságára és dinamikus viselkedésére. Jelen dolgozat egyik célkitűzése ennek megfelelően a recirkuláció, mint általános elv hatásainak részletes, irányítástechnikai megfontolások alapján végzett vizsgálata, valamint a hatások kezelésének megvalósítása volt. Ezeket a vizsgálatokat kezdetben egyszerű, elméleti rendszereken végeztem el, melyek során vizsgáltam a recirkuláció, mint irányítástechnikai blokk átviteli tényezőjének, időállandójának és holtidejének hatását a rendszer dinamikus viselkedésére és kimenő jeleinek végértékére. Kimutattam a recirkuláció egyértelműen káros hatásait és labilitáshoz vezető viselkedését, majd elméleti levezetést adtam arra, hogy recirkulációt tartalmazó rendszerek esetében a relatív átviteli tényezők mátrixa, mint a legfontosabb stacionárius szabályozhatósági index alapja, megváltozik, ami egyértelműen jelzi a recirkuláció hatását. Bizonyítottam, hogy a recirkulációs rendszerek szabályozása szükségszerű, és különböző szabályozási lehetőségeket vizsgáltam elméleti rendszereken. A hagyományos (P, PI, stb.) szabályozásokkal a rendszerek stabilitása elérhetővé vált, azonban ezeken túlmenően újabb, modern szabályozási lehetőségeket is megvizsgáltam és kimutattam, hogy recirkuláció-kompenzátor alkalmazásával, és adaptív szabályozással a hagyományos algoritmusoknál lényegesen kedvezőbb eredmények érhetők el, miközben a szabályozások robusztussága szignifikánsan növelhető.

A recirkulációval kapcsolatos szabályozhatósági vizsgálatokat kiterjesztettem többváltozós (MIMO) rendszerekre is, mely felvetette a szabályozási struktúrák tervezési feladatának dekomponálhatóságát. A dekomponálhatósági lehetőségeket részletesen vizsgáltam 2×2 -es méretű hipotetikus rendszereken hibaintegrál-alapú vizsgálatokkal és az eredmények igazolták, hogy a szabályozási struktúra megtervezése a rendszer egyedi blokkjaira külön is elvégezhető, a tervezési feladat tehát dekomponálható.

Dolgozatom további célja volt, hogy szabályozhatósági és dekomponálhatósági vizsgálatokat végezzek el egy nagyipari méretű, etilbenzolt előállító háromkolonnás, két recirkulációt

tartalmazó rendszeren, és egyidejűleg a recirkuláció hatásainak kezelését is megvalósítom. Ezen ipari rendszer esetén is kimutattam a rendelkezésre álló szabályozhatósági indexek esetében, hogy stacionárius vizsgálati tartományban a recirkuláció által okozott hatások hasonlóak az elméleti rendszerek esetében tapasztaltakhoz, majd a különböző szabályozhatósági indexek segítségével meghatároztam a rendszer legkedvezőbb szabályozási struktúráit. Ugyanezen rendszert részletesen megvizsgáltam a dinamikus tartományban is, ahol az időfüggő viselkedés leírása volt a cél, majd a frekvencia-tartományban is, ahol az állapotér-modellből kiindulva számított különböző frekvenciafüggő szabályozhatósági indexekkel minősítettem a rendszer viselkedését a teljes frekvencia-tartományban, meghatároztam a legkedvezőbb szabályozási struktúrákat, és szintén kimutattam a recirkuláció hatását. A frekvencia-tartományban bevezetett új frekvenciafüggő szabályozhatósági indexek (átlagolt kondíciós szám és integrált MRI-értékek) kimutatták, hogy a recirkulált anyagáramok számának és nagyságának növelése kedvezőtlenül hat a rendszer viselkedésére a frekvencia-tartományban is. A stacionárius, a dinamikus és a frekvenciafüggő vizsgálati eredmények a lényegesen eltérő modellek és számítási algoritmusok ellenére mind ugyanazokat a szabályozási struktúrákat minősítették legkedvezőbbnek, verifikálva a modellezés és a számítási módszerek helyességét.

A dolgozat végső célja az eddigi vizsgálatok kombinálása, és az ipari rendszer szabályozási struktúrája tervezési feladatának dekomponálhatóságára vonatkozó feltételezések bizonyítása volt. A dinamikus, hibaintegrál-alapú vizsgálatokat a rendszer két desztilláló oszlopára együttesen elvégezve a hibaintegrál-értékekre vonatkozóan kétváltozós függvényeket kaptam, melynek független változója a vizsgált két desztilláló oszlop egyéni szabályozási struktúrájának optimalitása: a vizsgálatok során különböző optimalitású szabályozási struktúrák párosítása esetén mértem a teljes rendszerre vonatkozó hibaintegrál-értékeket, melyek így a két oszlop struktúrájától együttesen függtek. Ezen kétváltozós függvényeket háromdimenziós grafikonokon ábrázolva monoton felületeket kaptam (monoton változó távolság-sorozatokat az optimumtól), melyek igazolták a dekomponálhatóságot. A dekomponálhatósági vizsgálatokat a frekvencia-tartományban is elvégeztem az integrált kondíciós számok és az integrált MRI-értékek segítségével, melyek numerikus formában reprezentálják a rendszer viselkedését a teljes frekvencia-tartományban. A belőlük képzett kétváltozós függvények a hibaintegrál-alapú vizsgálatok eredményeivel megegyezően kimutatták a struktúratervezés feladatának dekomponálhatóságát, amely lehetőséget ad a struktúratervezés feladatának lényegesen egyszerűbb, gyorsabb és költségkímélőbb kivitelezésére. A dekomponálhatósági vizsgálatok során az egységenként történő

vizsgálatokat a recirkuláció jelenléte mellett kell elvégezni, mert ebben az esetben kapunk a recirkulációs rendszerre érvényes eredményeket. A stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban kapott eredmények segítségével tervezett szabályozási struktúrák működését dinamikus vizsgálatokkal (ugrászavarások alkalmazásával) verifikáltam.

8. ÚJABB TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Dolgozatom újabb tudományos eredményeit a következő tézisekben foglalom össze:

1.) Levezettem, hogy a relatív átviteli tényezők mátrixa (RGA), mint stacionárius szabályozhatósági mutató, recirkulációt tartalmazó esetben megváltozik a recirkulációmentes esethez képest. Ez bizonyítja, hogy recirkuláció jelenléte esetén változnak a szabályozhatósági tulajdonságok, mely igazolja, hogy a recirkuláció jelenléte megváltoztatja a kérdéses rendszer szabályozhatósági tulajdonságait.

2.) Új szabályozhatósági indexeket dolgoztam ki és alkalmaztam a recirkulációs rendszerek jellemzésére. Ezek az új indexek a hagyományos indexek frekvencia-tartományban vett átlagai és integráljai. Ezek az átlagolt kondíciós szám és az integrált Morari-féle belső szabályozhatósági index. Az új indexek segítségével, függvények helyett a dinamikus viselkedésre jellemző konstansok képezhetők, melyek reprezentatív és egyszerűbben értelmezhető módon jellemzik a vizsgált rendszereket a teljes vizsgálati és működési tartományban.

3.) Igazoltam, hogy a szabályozási struktúra megtervezésének feladata dekomponálható: a recirkulációs rendszer legkedvezőbb szabályozási struktúrája azonos a recirkulációban részt vevő egyes egységek önállóan megtervezett legjobb struktúráinak együttes alkalmazásával. Fontos azonban, hogy az egyes egységek vizsgálatát a szabályozási struktúrájuk megtervezéséhez a recirkulációs körben kell elvégezni. Ezzel a szabályozási struktúratervezés lényegesen egyszerűbb és gyorsabb feladattá válik. A szabályozási struktúrák rangsorolását a különböző vizsgálati tartományokban végzett kvantitatív analízis segítségével végeztem el, szabályozhatósági indexek és azok frekvenciafüggvényei alapján. A dekomponálhatóságot az ipari technológiai rendszerre és a holtidős egytárolós tagokat tartalmazó egyszerű esettanulmányokra kiterjedően is megvizsgáltam. Mivel a vegyipari folyamatok jelentős részénél a dinamikai viselkedés közelíthető a holtidős egytárolós tag modelljével, a fenti állítás a recirkulációs rendszerek széles körére értelmezhető.

4.) Megállapítottam, hogy az idő-tartományban mutatott viselkedés alapján tervezett legjobb szabályozási struktúrákkal azonos struktúrák tervezhetők a frekvencia-tartományban is. Ezen

megállapításom alapján a folyamatok szabályozási struktúrája egyszerűbben, a frekvencia-tartományban is elvégezhető, amely jelentősen egyszerűsíti a folyamattervezést. Megállapításomat az ipari technológiai rendszer vizsgálata alapján értem el.

5.) Igazoltam, hogy a különböző frekvenciafüggő szabályozhatósági indexek értékei a recirkulációban résztvevő anyagáramok nagyságával és a recirkulációk számával korrelációt mutatnak. A visszavezetett anyagáramok nagyságának növelésével egyre kedvezőtlenebbek a szabályozhatósági indexek értékei, a szabályozások minősége egyre romlik, ezért a rendelkezésre álló tervezési alternatívák esetén, irányítástechnikai szempontból, azon alternatíva választása javasolt, amelyikben nincs, vagy kevesebb a recirkuláció, vagy kevesebb a recirkuláltatott anyag mennyisége.

9. PUBLIKÁCIÓS LISTA

Lektorált, idegen nyelvű folyóiratokban megjelent publikációk:

1. **Marcell Horvath**, Zsolt Sztikai, Peter Mizsey - Investigation of Controllability of Systems with Recycle - A Case Study. *Periodica Polytechnica* **2007**, 51/2, pp. 37-44.
2. **Marcell Horvath**, Peter Mizsey - Decomposability of the Control Structure Design Problem of Recycle Systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2009**, 48 (13), pp 6339–6345 [IF: 1.895]
3. **Marcell Horvath**, Peter Mizsey - Decomposability Investigations for Control Structure Design of Recycle Systems in the Frequency-domain, *Revista de Chimie*, **2010** [IF: 0.389]

Konferencia-kiadványokban megjelent közlemények:

4. Alajos Meszaros, Peter Mizsey, **Marcell Horvath**, Zsolt Fonyo - Dynamic analysis and control of recycle processes. V. (Proc. 31. Int. Conf. SSCHE), Tatranské Matliare (Slovakia), 116, **2004**.
5. Peter Burian, **Marcell Horvath**, Peter Mizsey, Alajos Mészáros in *33rd Int. Conference of SSCHE*, **2006**, pp. 38-42, Tatranske Matliare, Slovakia.

Előadások:

6. **Marcell Horvath**, Alois Meszaros, Agnes Szanyi, Peter Mizsey – Investigation of the controllability of systems with recycle - *Hungarian Chemical Engineering Conference in Veszprém*, **2004** p. 253-257.
7. **Marcell Horvath**, Peter Mizsey – Investigation and controllability problems of systems with recycle - *Hungarian Chemical Engineering Conference in Veszprém*, **2005** p. 198-201.
8. **Marcell Horvath**, Peter Mizsey - Modelling, controlling and dynamics of systems with recycle - *Hungarian Chemical Engineering Conference in Veszprém*, **2006**, p. 284-288.
9. **Marcell Horvath**, Peter Mizsey - Investigation of controllability of systems with recycle, **2006**, CHISA, Prague
10. **Marcell Horvath**, Peter Mizsey - Recirkulációt tartalmazó vegyipari rendszerek szabályozhatóságának vizsgálata, **2007**, *Richter Centenárium Alapítvány ülése*, Budapest.
11. **Marcell Horvath**, Peter Mizsey - Investigation of controllability and dynamics of systems with recycle in (35th Int. Conference of SSCHE), Tatranské Matliare, Slovakia, page. 260-, **2008**.
12. **Horváth Marcell** - Recirkulációs rendszerek szabályozási kérdései, MTA Vegyipari Műveleti Munkabizottsági Ülés, **2009**, Veszprém.
13. **Marcell Horvath**, Peter Mizsey - Decomposability Studies of Control Structure Design for Systems with Recycle In (36th Int. Conference of SSCHE), Tatranske Matliare, Slovakia, **2009**.

10. JELÖLÉSJEGYZÉK

Jelölés	Megnevezés
2×2	2 módosított és 2 szabályozott jellemzővel rendelkező többváltozós rendszer
6×6	6 módosított és 6 szabályozott jellemzővel rendelkező többváltozós rendszer
A	átviteli tényezők mátrixa
a	átviteli tényező
a	polinom-együttható
A, B, C, D	állapotmátrixok
B	benzol
B	fenéktermék-elvétel
BR	visszaforralási arány
C	szabályozó
c	koncentráció
c	szabályozott jellemző
CDI	Control Design Interface
Col	kolonna
CN	kondíciós szám
CP	fordított bekötésű szabályozókör (a szabályozott és a módosított jellemzők szerint)
d	zavarás
D	desztillátum-elvétel
DEB	Dietil-benzol
det	determináns
DP	egyenes bekötésű szabályozókör (a szabályozott és a módosított jellemzők szerint)
e	hibajel
EB	Etilbenzol
F	folyamat
F	betáplálás

FOPTD	elsőrendű holtidős tag
G	átviteli függvény
H	reakcióhő
I/O	bemenet/kimenet
IAE	integrális abszolút hiba
K	átviteli tényező
K	kompensátor
L	refluxáram
lim	határérték
m	modell
m	módosított jellemző
MIMO	több bemenettel és több kimenettel rendelkező többváltozós rendszer
MRAC	modellreferenciás adaptív szabályozás
MRI	Morari-féle belső szabályozhatósági index
NI	Niederlinski-index
Q	üstfűtés
R	reboiler (visszaforraló)
R	recirkuláció
R	refluxarány
ref	referencia
RGA	relatív erősítési mátrix
RR	recirkulációs arány
s	Laplace-operandusz
s	rendszer
t	idő
T	hőmérséklet
t	időállandó
TEB	triethyl-benzol
T_I	integrálási idő
u	módosított jellemző
V	gőz
w	alapjel
x	bemenő jel

x	folyadékösszetétel (moltört)
y	kimenő jel
y	gőzösszetétel (moltört)
z	összetétel (moltört)
ε	hibajel
γ	adaptív erősítés
λ	relatív erősítési tényező
σ	szinguláris érték
τ_D	holtidő
θ	holtidő
τ	időállandó
ω	frekvencia

11. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Matlab™ from MathWorks, modelling software
- [2] Aspen Plus™ from AspenTech, modelling software
- [3] VisualBasic™ from Microsoft
- [4] Aspen Dynamics™ from AspenTech, modelling software
- [5] Luyben, W. L. Dynamics and control of recycle systems - 1. Simple open-loop and closed-loop systems, *Ind. Eng. Chem. Res.* **1993a**, 32, p. 46.
- [6] Luyben, W. L., Dynamics and control of recycle systems - 2. Comparison of Alternative Process Designs, *Ind. Eng. Chem. Res.* **1993b**, 32, p. 476.
- [7] Luyben, W. L., Dynamics and control of recycle systems - 3. Alternative process designs in a ternary system, *Ind. Eng. Chem. Res.* **1993c**, 32, p. 1142.
- [8] P. Mizsey, I. Kalmár, Z. Fonyo - Effects of recycle on control of chemical processes. *Computers and Chemical Engineering*, **1996**, 20, Suppl. 2, S883-S888.
- [9] B. Ruth, F. Csaki - *Automatika*, Tankonyvkiado, Budapest, **1969**.
- [10] Luyben, W. L. - *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*, Second edition, **1990**.
- [11] O. Taiwo - The design of robust control systems for plants with recycle, *Int. J. Control.* **1986**, 43, p. 671.
- [12] Kwo-Liang Wu, Cheng-Ching Yu, W. L. Luyben, S. Skogestad - Reactor/separator processes with recycles-2. Design for composition control, *Computers and Chemical Engineering*, **2003**, 27., 401-421.
- [13] P. Daoutidis, A. Kumar - Nonlinear dynamics and control of process systems with recycle, *Journal of process control*, **2002**, 12, 475-484.
- [14] C. Scali, R. Antonelli - Performance of different regulators for plants with recycle, *Computers and Chemical Engineering*, **1995**, 19., 409-414.
- [15] A. C. Dimian, A. J. Groenendijk, S. R. A. Kersten, P. D. Iedema - Effect of Recycle Interactions on Dynamics and Control of Complex Plants, *Computers and Chemical Engineering*, **1997**, 21., S291-S296.
- [16] E. M. Vasbinder, K. A. Hoo - Integration of Control Structure Synthesis & Plant Design: A Novel Plantwide Decomposition, in *AIChE National Conference Indianapolis*, **2002**, IN. Section 254, Nov. 5.
- [17] C. Scali, F. Ferrari, Control of systems with recycle by means of compensators, *Computers and Chemical Engineering*, **1997**, 21., S267-S272.
- [18] C. Scali, F. Ferrari - Performance of control systems based on recycle compensators in integrated plants, *Journal of Process Control*, **1999**, 9., 425-437.
- [19] *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, A10, 35-43, Weinheim, FRG, Wiley, **1987**.
- [20] Sigurd Skogestad, Ian Postletwaite - *Multivariable Feedback Control, Analysis and Design*, Second Edition, Chichester, U. K., **2005**.

- [21] Luyben, W. L., - Snowball effects in reactor/separator processes with recycle - *Ind. Eng. Chem. Res.* **1994**, 33, p. 299.
- [22] Luyben, W. L. - Simple method for tuning SISO controllers in multivariable systems. *Ind. Eng. Chem. Process Des.* **1986**, Dev., 25, 654-660.
- [23] Morud, J. Skogestad, S. - Effects of recycle on dynamics and control of chemical processing plants, *Computers Chem. Eng.* **1994**, 18, Suppl., S529-S534.
- [24] Scali, C., D. Semino, M. Morari - Comparison between Internal Model Control and Linear Quadratic Optimal Control for SISO systems, *Ind. Eng. Chem. Res.* **1992**, 31, p. 1920.
- [25] *Encyclopedia of Chemical Processing and Design* 371.698/20, Marcel Dekker Inc., 270 Madison Avenue, New York, 10016., **1984**.
- [26] D. Robinson, R. Chen; T. McAvoy, P. D. Schnelle - An optimal control based approach to designing plantwide control system architectures, *Journal of Process Control*, **2001**, 11., 223-236.
- [27] A. Kumar, P. Daoutidis - Nonlinear dynamics and control of process systems with recycle, *Journal of Process Control*, **2002**, 12., 475-484.
- [28] J. M. Douglas: The interaction between separation system synthesis and process synthesis, *Computers and Chemical Engineering*, **1985**, 9., 447-462.
- [29] Van der Lee, J.H., Young, B.R., Svrcek, W.Y. - A process design and control strategy for dimethyl ether production from a methanol feedstock in American Control Conference, *Proceedings of 2002*, **2002**, Vol. 2, 1585 – 1590.
- [30] N. Chawankul, H. Budman, P. L. Douglas - The integration of design and control: IMC control and robustness, *Computers and Chemical Engineering*, **2005**, 29., 261-271.
- [31] G. Stephanopoulos - Chemical Process Control, Prentice-Hall, Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey 07632, **1984**.
- [32] R. L. Kirkwood, M. H. Locke, J. M. Douglas - A prototype expert system for synthesizing chemical process flowsheets, *Computers and Chemical Engineering*, **1998**, 12., 329-343.
- [33] M. C. Georgiadis, M. Schenk, E. N. Pistikopoulos, R. Gani - The interactions of design, control and operability in reactive distillation systems, *Computers and Chemical Engineering*, **2002**, 26., 735-746.

NYILATKOZAT

Alulírott Horváth Marcell kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2010.06.15.

Horváth Marcell