



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

Recirkulációt tartalmazó vegyipari rendszerek szabályozhatóságának vizsgálata

PhD értekezés tézisei

Szerző: Horváth Marcell, okl.
vegyéssz mérnök
Témavezető: Dr. Mizsey Péter,
MTA doktora

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

2010

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**.

hagyományos módszerek eredményeihez igen hasonló, jórészt megegyező eredményeket szolgáltatottak. A szabályozókörök struktúrájának tervezése során megtehető dekomponálás lényegesen egyszerűsíti a folyamattervezési feladatot a gyakorlati ipari feladatok megoldása során.

7. KÖZLEMÉNYEK

Folyóiratokban megjelent publikációk:

1. **Marcell Horvath**, Zsolt Szitkai, 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**

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.

1. BEVEZETÉS

A folyamatok hatékonyságának növelése, költségeinek csökkentése napjainkra a vegyipari folyamat tervezés kulcsfontosságú elveivé váltak. Számos esetben azonban e két tervezési szempont nem függetleníthető egymástól, és a megtervezendő 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 desztillációs rendszerekben történik. Ezen rendszerek gyakran tartalmaznak anyag-, és/vagy energia-recirkulációt, bizonyos folyamatok pedig nem is valósíthatók meg recirkuláció alkalmazása nélkül.

A hagyományos összetétel-szabályozó körök jellemzően az anyag-, 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/beállításain. Összetett rendszerek teljes szabályozási struktúrájának kialakításakor igen lényeges kérdés a szabályozási struktúratervezés feladatának dekomponálhatósága. Amennyiben a teljes szabályozási struktúra megtervezése kivitelezhető a rendszert felépítő egységek saját szabályozási struktúráiból egyenként, a struktúratervezés feladatát dekomponálhatónak nevezzük, ha azonban a teljes struktúrát csak az egyéni blokkok szimultán struktúratervezésével lehet megtervezni, a rendszer nem dekomponálható.

Munkám során hipotetikus és ipari rendszereket egyaránt vizsgáltam, mind a recirkuláció hatásainak, mind a dekomponálhatóság szempontjából, stratégiát dolgoztam ki az etilbenzol-gyártás szabályozási struktúrájának megállapítására mind az idő-, mind a frekvenciatartományban elérhető vizsgálatok alapján.

2. IRODALMI HÁTTÉR

A recirkulációs rendszerekkel kapcsolatban az irodalomban fellelhető közlemények döntő többsége említést tesz a velük kapcsolatos várható, és/vagy lehetséges szabályozási nehézségekről, esetleges instabilitásokról (lassúbb válaszok, átviteli tényezők változása, hálóba-effektus, stb.). A recirkulációt tartalmazó rendszereket fokozott figyelemmel kell kezelni,

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 folyamat tervezést. 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 recirkulált anyag mennyisége.

6. ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉG

Elsősorban összetett ipari rendszerek esetében segítik az eredményeim szabályozási struktúra kidolgozását, annak egyszerűsítését, gyorsítását, és az eredmények alapján hasonló rendszerek esetén feltételezhető a stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban mért jellemzők hasonlósága, a szabályozási struktúrák megegyező, vagy hasonló sorrendű kedvezősége. A hipotetikus rendszereken végzett vizsgálatok eredménye 2×2 -es méretű MIMO-rendszerekre általánosítható, amennyiben átviteli függvény-mátrixuk hasonló a vizsgálthoz (elsősorban holtidő tekintetében). A stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban alkalmazott mérési módszerek, és a saját ötleten alapuló, módosított frekvenciafüggő szabályozhatósági mutatók hitelesen jellemzik a vizsgált struktúrákat, a kapott eredmények az irodalomban fellelhető,

A szimulációk során minden esetben azt állapítottam meg, hogy a felületek egyes pontjainak az optimumtól mért távolsága monoton változik (nő, vagy csökken az aktuális indextől függően), amely bizonyítja, hogy kedvezőtlenebb egyedi struktúrák párosítása nem vezethet globálisan kedvezőbb struktúrához, és egyetlen, valóban legkedvezőbb szabályozási struktúra létezik a teljes rendszerre, ez pedig a felépítő blokkok egyedileg legkedvezőbb szabályozási struktúrájából állítható elő. Ipari rendszer esetén is igazoltam a szabályozási struktúra megtervezésének dekomponálhatóságát, melynek segítségével lényegesen lerövidíthető a tervezésre fordítandó idő, és a szimulációk is egyszerűbbé válnak.

5. TÉZISEK

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

szabályozási struktúráik megtervezése összetettebb feladat. Az irodalomban található munka a recirkulált anyagáramok nagyságának és a recirkuláció által okozott káros hatások összefüggéseinek vizsgálatáról és számos esetben részletes vizsgálat tárgyát képezi az egyik legrégebb óta vizsgált összeállítás, a reaktor-desztilláló oszlop-párosítás. A recirkuláció, mint a rendszer struktúrájának szerves része, a folyamattervezési/szabályozástervezési hierarchia részévé vált, ezért már az előzetes vizsgálatok során szükséges várható hatásainak elemzése. Kimutatták, hogy bizonyos esetekben a recirkulációs áramok szabályozás nélküli kialakítása szükségszerűen instabillá teszi a rendszereket. Recirkulációs rendszerekben a zavarásokra adott válaszfüggvények átviteli tényezője, időállandója, és az átmeneti viselkedést leíró függvények rendje is eltér a recirkulációt nem tartalmazó rendszerekben tapasztaltakhoz képest, adekvát szabályozási struktúra kialakítását ez is nehezíti. Ismereteseek különböző recirkuláció-kompenzációs eljárások, ezek azonban nem alkalmazhatók rendszerfüggetlenül, legalábbis nem alkalmazhatók eredményesen minden recirkulációs rendszerre. A recirkulációs rendszerek vizsgálata általában matematikai modellek segítségével történt, mely modellek a folyamatot jelentősen leegyszerűsített formában kezelték, és kisebb részben fellelhetők valódi rendszerek, vagy teljesebb körű modellek alapján született mérési eredmények.

Szabályozási struktúrák tervezési feladatainak dekomponálására vonatkozóan elsősorban elméleti jellegű munkák található az irodalomban, melyek a „flowsheeting”-technikák hierarchikus tárgyalásával kapcsolatban tesznek ajánlásokat a dekomponálhatósági vizsgálatok elvégzésére. Az Analitikus Hierarchikus megközelítés jól összefoglalja a dekomponálási metódusokkal kapcsolatos ajánlásokat, melynek lépései:

- 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

Ugyanezen módszer a korábbi ajánlások hiányosságát pótolva már a szabályozási kérdésekre is javasol egy többszintű közelítést, melyet azóta sikerrel alkalmaznak. Később szekvenciális kiegészítést is kapott a modell.

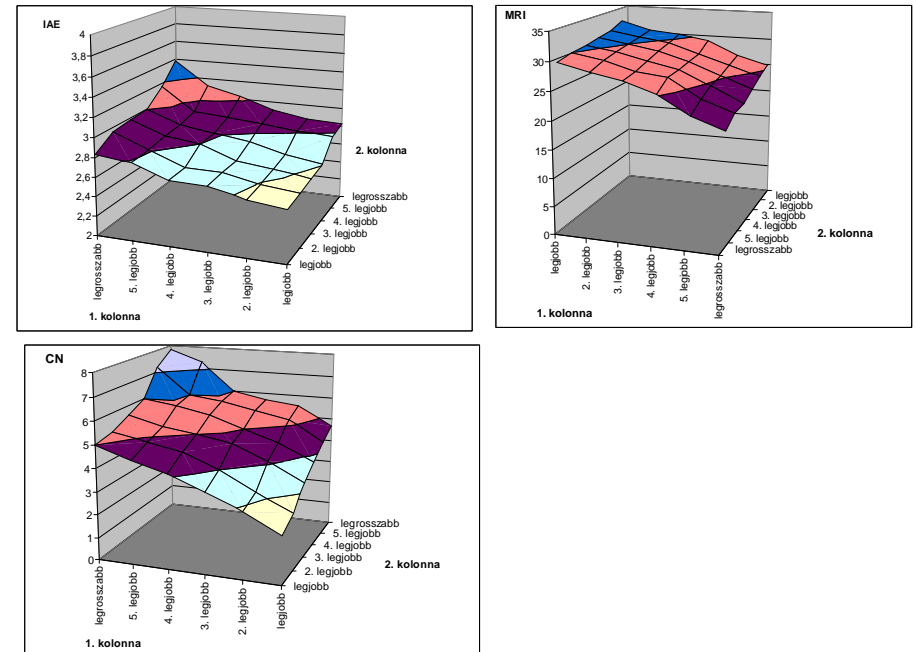
Az irodalomban jelen pillanatban nem lelhető fel olyan munka, amely célzottan alkalmazná a frekvencia-tartományban rendelkezésre álló eszközöket a recirkuláció hatásainak elemzéséhez, és amely a szabályozási struktúra felépítéséhez dekomponálhatósági vizsgálatokat hívna segítségül – dolgozatomban elsősorban ezen a két területen kísérel meg hozzátenni a tudományterület jelenlegi állásához, felhasználva számos modern eszközt, melyet a számítástechnika fejlődése, a fejlett folyamatszimulátorok (dinamikus modellezés lehetőségével) és a matematikai szoftverek kínálnak.

3. SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREK

A recirkuláció hatásainak kvantitatív leírása a munka alapvető része, ennek segítségével világítható meg a recirkulációval kapcsolatos vizsgálatok szükségessége. Hipotetikus és ipari rendszerek esetén egyaránt a stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban is kimutattam a recirkuláció hatását. Előbbi két esetben ugrászavarásokra adott válaszfüggvények elemzésével és különböző szabályozhatósági indexek segítségével kvantifikáltam a recirkuláció hatásait, míg a frekvencia-tartományban az állapotter-modell segítségével frekvenciafüggő szabályozhatósági mutatókat határoztam meg, melyekkel lehetővé vált a különböző rendszerek összehasonlító elemzése.

A megfelelő szabályozási struktúrák kialakítása után megvizsgáltam a komplex struktúratervezés dekomponálhatóságát is, „load rejection”-alapú szimultán vizsgálatok segítségével is, majd a frekvencia-tartományban különböző módosított frekvenciafüggő szabályozhatósági indexek segítségével. A komplex struktúrát jellemző mennyiségeket kétváltozós függvényként kezeltem, melynek független változói a rendszert felépítő blokkok saját szabályozási struktúrái, a kapott függvények segítségével pedig igazoltam a dekomponálhatósági hipotéziseket, majd az eredmények birtokában stratégiát dolgoztam ki az etilbenzol-gyártás komplex szabályozási struktúrájának új, egyszerűbb, kevesebb vizsgálat elvégzését igénylő, hatékonyabb megvalósítására. A teljes rendszert jellemző függvény a megfelelő feltételek mellett globálisan legkedvezőbb komplex

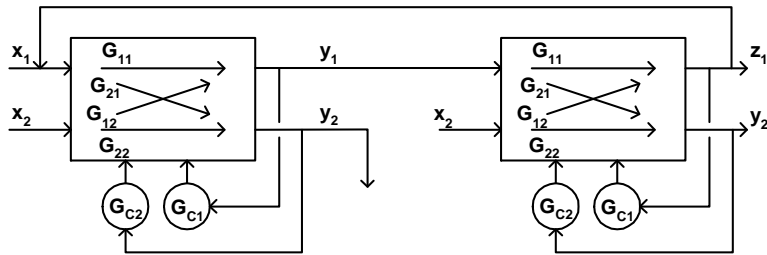
eredménnyel. Az első esetben az alkalmazott zavarásokra adott válaszfüggvényekből, a szabályozóköri kimenő jeleink hibaintegráljából határoztam meg a különböző struktúrákhoz tartozó IAE-értékeket, míg a frekvencia-tartományban átlagolt kondíciós számokat és integrált MRI-értékeket határoztam meg az állapotmodell segítségével (CDI), ezekkel jellemezve a struktúrákat. A méréseket az egyedi oszlopokra és a teljes rendszerre is elvégeztem, utóbbi esetben a vizsgálatok célja annak megállapítása volt, hogy a teljes rendszerre nézve legjobb szabályozási struktúra kialakítása elvégezhető-e az egyedi oszlopok legjobb struktúráiból, vagy az összes oszlopot egyszerre figyelembe vevő, szimultán vizsgálatokra van szükség. A kérdés olyan formában is felmerül, hogy egyenként nem legkedvezőbb struktúrával ellátott oszlopok párosítása okozhat-e együttesen jobb struktúrát a teljes rendszer számára. Az eredmények a teljes rendszer jellemző különböző mutatók alakulását mutatják az első és a második oszlop szabályozási struktúrájának függvényében, melyet háromdimenziós felületek formájában ábrázoltam.



4., 5., 6. ábra: A rendszer első és második kolonnájának szimultán vizsgálata az idő- és a frekvencia-tartományban

Dekomponálhatósági vizsgálatok

A dolgozat további részében részletesen vizsgáltam szabályozási struktúrák tervezésének dekomponálhatósági kérdéseit, hipotetikus, és a korábban már vizsgált ipari rendszer esetén is. Korábbi, előzetes vizsgálatok alapján a szóban forgó rendszerek struktúratervezése dekomponálhatónak bizonyult, célul tűztem ki ennek igazolását komplex vizsgálatok felhasználásával és stratégia kidolgozását egyszerűbb módon történő teljes struktúratervezésre. A vizsgált hipotetikus rendszer két összekapcsolt 2×2-es méretű MIMO-rendszer volt (**3. ábra**), melyet recirkulációval is elláttam, erre a struktúrára terveztem és hangoltam szabályozókat. A blokkok modelljeihez a **4. táblázatban** látható átviteli függvény mátrixokat használtam.



3. ábra: 2×2-es hipotetikus MIMO-rendszer recirkulációval

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

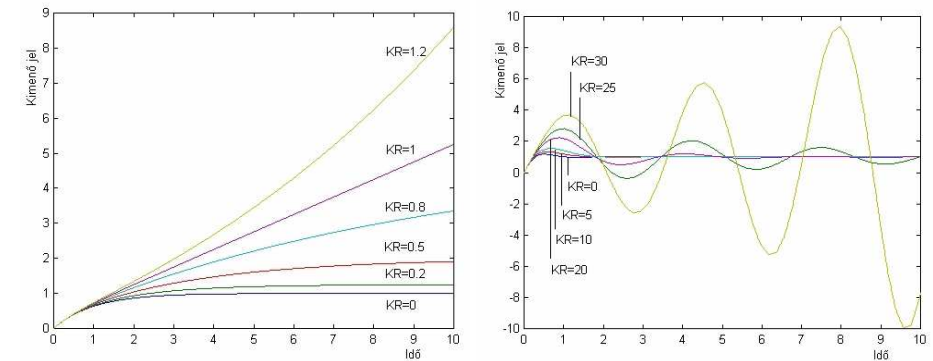
4. táblázat: Átviteli függvény-mátrixok a hipotetikus rendszerben

A rendszer elemeit a szabályozókörök bekötéseinek szempontjából két struktúrával vizsgáltam: DP (direct pairing) és CP (cross pairing) struktúrákkal, ezeket és a teljes rendszert is minősítettem a szabályozókörök zavarásokra adott válaszainak hibaintegráljaival (IAE-értékek). Ezek alapján meghatároztam a szabályozási struktúrákat az egyedi blokkokra és a teljes rendszerre is; az eredmények azt bizonyítják, hogy a vizsgált hipotetikus rendszer esetén a szabályozási struktúra megtervezésének feladata dekomponálható. Hasonló, de kiterjedtebb dekomponálhatósági vizsgálatokat folytattam az ipari rendszer struktúratervezésének dekomponálhatóságára, melyet „load rejection”-alapján történő elemzéssel és különböző módosított frekvenciafüggő szabályozhatósági indexek alapján is elvégeztem – megegyező

szabályozási struktúrát ad meg a teljes rendszerre, melynél kedvezőbb struktúra kialakítása egyetlen blokk struktúrájának és több blokk struktúrájának egyidejű megváltoztatásával sem lehetséges.

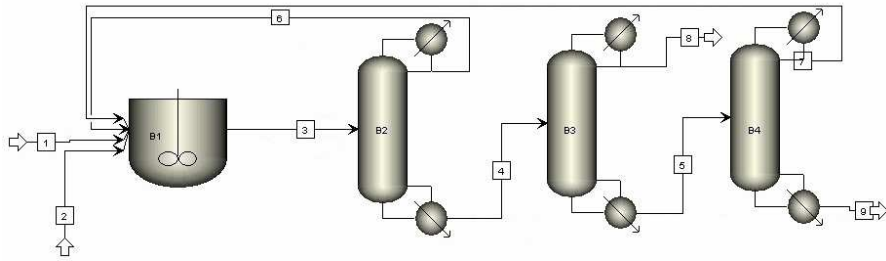
4. EREDMÉNYEK

Számos előzetes vizsgálat igazolta, hogy egyszerű felépítésű szabályozókörökben a recirkulációs ág átviteli tényezőjének növelése a teljes folyamatra kedvezőtlen hatást gyakorol, szabályozó nélkül és hagyományos szabályozással egyaránt (**1. ábra**).



1. ábra: Recirkulációs hatások egyszerű rendszer esetén

Az etilbenzol előállítására használt komplex ipari struktúra (**2. ábra**) részletes vizsgálata képezte munkám egy részét, mely rendszert megvizsgáltam a stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban is. Kimutattam és kvantifikáltam mindhárom tartományban az alkalmazott recirkulációk hatását, meghatároztam a szabályozási struktúrákat, szabályozóköröket terveztem, melyeket a kapott adatok segítségével behangoltam.



2. ábra: Etilbenzol gyártására használt ipari struktúra, 1: benzol, 2: etilén, 8: etilbenzol, 7: dietil-benzol, 9: trietil-benzol

A stacionárius tartományban a rendszer stacionárius modellje segítségével meghatároztam a következő stacionárius szabályozhatósági indexeket: NI (Niederlinski-index), CN (kondíciós szám), MRI (Morari-féle belső szabályozhatósági index), RGA (relatív átviteli tényezők mátrixa), és a velük szemben támasztott követelmények alapján kijelöltem a szabályozási struktúrákat mind recirkuláció nélküli, mind recirkulációs esetben. A reaktort itt nem, csak a desztilláló oszlopokat vizsgáltam. A stacionárius tartományban legkedvezőbbnek talált szabályozási struktúrák az **1. táblázatban** láthatók.

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

1. táblázat: struktúrák a stacionárius tartományban (L: refluxáram, Q: üstfűtés, R: refluxarány, B: fenéktermék-eltétel)

A stacionárius vizsgálatok során a rendszer időfüggő viselkedését nem vizsgáltam, a későbbi dinamikus analízishez azonban a vizsgálatokat kiterjesztettem az időtartományra: ezek során különböző ugrászavarások hatását regisztráltam, és a kapott válaszfüggvényekből átviteli tényezőket, időállandókat, holtidőket, stb. határoztam meg, mely paraméterek a zárt szabályozóköri felépítéséhez nyújtottak segítséget. A szabályozóköri minősítése alapján az időtartományban meghatározott szabályozási struktúrák a **2. táblázatban** láthatók.

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

2. táblázat: Struktúrák az időtartományban

A nagyobb anyagáramú recirkulációt adó első oszlop, valamint az etilbenzolt elválasztó második oszlop, a rendszer két legfontosabb oszlopja esetén ugyanaz a szabályozási struktúra bizonyult legkedvezőbbnek a stacionárius-, és az időtartományban is, ez az alkalmazott módszerek egyfajta verifikációjaként értelmezhető.

Vizsgálatok a frekvencia-tartományban

A frekvencia-tartományban történő vizsgálatok során a rendszer állapotegyenletéből indultam ki:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du + v$$

a benne szereplő állapotmátrixokat (A, B, C, D) a Control Design Interface segítségével állapítottam meg, melyeket a Matlab segítségével alakítottam értelmezhető, használható formájúra. Szintén a Matlab segítségével ezen mátrixokból különböző frekvenciafüggő szabályozhatósági indexeket számítottam ki (RGAno, CN, MRI), és ezen görbék lefutásából szintén meghatároztam a szabályozási struktúrákat a különböző oszlopokra, mind recirkulációval, mind anélkül, és több különböző recirkulációs esetben is. Az eredmények a **3. táblázatban** láthatók.

	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

3. táblázat: Struktúrák a frekvencia-tartományban

Ezzel teljessé vált a recirkulációs hatások elemzése az etilbenzol-gyártás nagyipari struktúrájára; a stacionárius-, az idő-, és a frekvencia-tartományban történt mérések megfelelő konzisztenciát mutatnak, a rendszer dinamikus modellje, a szabályozóhangolások jónak minősíthetők.