

Vélemény
Leitold Dániel
“Hálózat-alapú irányíthatósági és megfigyelhetőségi elemzés,
szenzorok és beavatkozók optimális elhelyezése” c.
PhD értekezéséről a végső vitához

Készítette: Tar József

2020. április 28.

Előzetes megjegyzés

Tekintettel arra, hogy a munkahelyi vitához korábban igen részletes bírálatot készítettem, az értekezés e végső változatának részleteiről –miután a Szerző értekezését jelentősen kibővítette– nem sok érdemi, új mondanivalóm maradt. Ezért inkább az értekezés egészének értékelésére igyekszem koncentrálni.

1. A téma aktualitásáról

A Szerző a bevezetésben korrekt képet vázol fel a mai kor kutatói számára izgalmas kihívást jelentő „komplex rendszerek” területéről, elsősorban nem is azok „modellezése”, hanem inkább szabályozhatósága szempontjából, ami szükségképpen igényli e rendszerek bizonyos mértékű megfigyelhetőségét is. Jellemzően olyan területen dolgozik, amelyen a rendszerek „mérete” jóval nagyobb a hagyományos matematikai eszköztárral, elviselhető méretű mátrixokkal, számítógépekkel és numerikus integrációval még jól kezelhető, „néhány változóval leírható dinamikai rendszernél”, de jóval kisebb azoknál a számoknál, amelyeket a szintén hagyományos statisztikus fizikai módszerek segítségével még a gyakorlatban használhatóan tudunk alkalmazni. A statisztikus fizikai megközelítés alapja, hogy abban számunkra az „egyéni történetek nyomkövetése” érdektelenné válik, s megelégszünk a kis relatív szórású várható értékek kezelésével, míg általában egy komplex rendszer esetében az egyéni történetek is fontosak maradnak.

Az értekezés elsősorban a „komplex rendszerek” hatalmas osztályának még mindig igen tág olyan részére koncentrálni, amelyet nem terhelnek kisméretű modellek által is bőségesen produkált „viselkedési komplexitások” a bennük lévő nemlinearitások következményeként. A Szerző a „lineáris, állandó együtthatójú differenciálegyenlet rendszerekkel” (LTI) leírható modellekre koncentrálni, amelyekről előre tudható, hogy amennyiben stabilak, fix frekvenciájú periodikus gerjesztésre (a tranziensek lecsengése után) ugyanilyen frekvenciájú rezgésekkel válaszolnak. E rendszerek viselkedése „elvben átlátható” az együttható mátrixok Jordan-féle kanonikus alakjára hozásával, azonban bizonyos méreten túl ez inkább csak elvi mint a gyakorlatban ténylegesen is megvalósítható lehetőséget jelent. E rendszerosztályról előre tudható, hogy viselkedésének minden komplexitása a rendszer modelljét leíró mátrixok szerkezetéből származtatható, s ugyanez az állítás érvényes e rendszerek (általában részleges) megfigyelhetőségére és szabályozhatóságára is. A klasszikus mátrixelméleti módszerek e területen „belefulladnak” a maguk tetemes műveleti igényébe és ezzel összefüggésben sérülékenyekké is válnak a numerikus hibák elkerülhetetlen felhalmozódása miatt. E hibák olyan „ugrásra” hajlamos mutatók kiszámítása esetében, mint pl. a mátrix rangja, igen kellemetlen hatást eredményezhetnek, ugyanakkor ezek a mutatók nagyon fontosak a rendszer irányíthatósága és megfigyelhetősége szempontjából. A Szerző által vizsgált fizikai rendszerek, az iparban is gyakran használt hőcserélő rendszerek bizonyos határok között nagyon jól leírhatók ilyen LTI modellekkel, így kutatási eredményei közvetlen gyakorlati alkalmazására

is mód nyílik.

A Szerző által e terület feldolgozására bevezetett hálózatzelméleti megközelítés olyan tudományos nívó, amely nagyon jelentős könnyebbésséggel bír a klasszikus módszerekkel szemben, azoknál sokkal hatékonyabban, egyszerűbben, és gyorsabban vezet olyan eredményre, amelynek alapján a tényleges szabályozás már megtervezhetővé válik. Az alapötlet végtelenül szellemes és egyben egyszerű is: a mátrixok különböző valós mátrixelemeket tartalmazhatnak, de ezek közül kiemelt szerepe van a 0 mátrixelemnek, amely világosan interpretálható úgy, hogy „nincs kapcsolat” bizonyos részek között, míg ettől eltérő érték feltételez valamilyen „kapcsolatot”. A megfigyelhetőségi tulajdonságok ilyen kapcsolatokat létét igénylik, a rendszerbe beépíthető „szenzorok” a rendszer megfigyelésében ilyen kapcsolatokat hoznak létre amennyiben jeleiket a visszacsatolásban fel tudjuk használni, akár csak a beépített „hajtások”, amelyek ilyen kapcsolatkon keresztül tudnak hatni. **Bár egy konkrét, jól működő szabályozó megtervezésében a „kapcsolati szerkezeten” túl maguk a konkrét mátrixelem-értékek is fontos szerepet játszanak, a tervezés világosan két lépésre bontható: a Szerző által ajánlott módszer gyorsan és kis számítási igénnyel deríti fel a kívánatos kapcsolati szerkezetet, így azok kiderítése a tervezés első lépésében nagyon hatékonyan megtehető. A nagyobb számítási igényű lépéseket a „hagyományos” tervezési szempontok figyelembevételével már csak az így kialakított struktúrákra kell elvégezni.**

A Szerző nagyon alapos szakirodalmi feldolgozással mutatja meg a hálózatzelméleti megközelítés utóbbi években felfedezett sikereit, s egyúttal azt is, hogy az általa kiválasztott kutatási terület egy olyan „rés”, amely még nincs lefedve.

A témaválasztása minden kétséget kizáróan tudományos és gyakorlati szempontból is aktuális és izgalmas.

2. Az alkalmazott tudományos módszerekről

A módszertan matematikai formalizálása c. részben a „A hálózattudomány a maximális párosítás algoritmusát alkalmazza egy lineáris időinvariáns (LTI) rendszer bemeneteinek és kimeneteinek meghatározására a strukturális irányíthatóság és a strukturális megfigyelhetőség biztosítása érdekében.” mondattal röviden megalapozza megközelítésének „matematikáját”, amely a Kálmán Rudolf által bevezetett „kanonikus formán” alapul. A zavarásokat „bevezető” mátrixot illetve a megfigyelhető változóba a szabályozó jelet közvetlenül bevezető mátrixot [az (1.1) egyenlet **E** és az (1.2) egyenlet **D** mátrixait] a gyakorlatban meglévő modellekkel összhangban és célszerűen általában nullmátrixoknak tekinti.

A klasszikus irodalommal összhnagban használja a „strukturális megfigyelhetőség” és „strukturális irányíthatóság” fogalmát a Kálmán-féle rangfeltételre alapozva. Igen precízen jegyzi meg, hogy

*„Ez a módszer csak a rendszer strukturális elemzését biztosítja, azaz kizárólag a strukturális architektúrára vonatkozik, és figyelmen kívül hagyja még az élsúlyokat is. A meghatározott beavatkozó és érzékelő csomópontok szintén csak a rendszer strukturális pozíciói, a módszertan nem ad konkrét értékeket a **B** és **C** mátrixok elemeinek vagy a **u** és **y** vektoroknak.”*

viszont igen gyorsan végrehajtható és egyszerű algoritmusra vezet, szemben a klasszikus módszerekkel, amelyek alkalmazásával az összefüggő komponensek meghatározása sokkal nehezebb feladat.

A Jelölt értekezésében röviden áttekinti azokat a „modernnek mondható klasszikus irányításelméleti módszereket”, amelyekkel összevetésben az általa javasolt megoldás hatékonyabb lehet, és ahol erre módja van, kvantitativ összehasonlításokat is ad. (A „modernnek mondható klasszikus irányításelméleti módszerek” fogalmán itt a klasszikus, Nyquist és Bode által 1932-körül a kor technikai lehetőségeinek megfelelően alkalmazott, metrikus papírra, mechanikus számológépekre vagy logarlécra alapozott, vagy a konkrét számításokat mátrix-szerkezet vizsgálattal megkerülő tervezési módszereket felváltó, számítógéppel algoritmikusan végrehajtható módszereket értem.)

Az LTI rendszerekre kényelmesen alkalmazható Cayley-Hamilton tétellel összhangban így hálózatzelméleti módszerrel elemzi, hogy az x változó melyik (a tétel alapján maximalizált) deriváltjára van hatással az u szabályozó jel, így információt nyer a szabályozás *relatív rendjére* is. Gondosan jegyzi meg, hogy „... a maximális párosítás eredménye nem egyedi, és ugyanarra a hálózatra létezhet több azonos méretű diszjunkt élhalmaz is. Ez különböző bemeneti és kimeneti konfigurációkat eredményez, amelyek egymástól eltérő dinamikus viselkedést produkálhat a komplex rendszerekben.”

Megjegyzem, hogy e kitétel nem tekinthető a Jelölt által alkalmazott módszer „gyengeségének”, ugyanis a gyakorlatban előforduló legtöbb probléma nem egyértelmű megoldással rendelkezik. (Például a Lyapunov-függvény alkalmazásával létrehozott adaptív szabályozók megszámlálhatatlanul sok szabályozó paraméter érték mellett stabilak, s ezek a paraméterek befolyásolják a szabályozott rendszer működésének „dinamikáját” is.) A többféle megoldás közti válogatás lehetőségének feltárása inkább a módszer „erőssége”.

Fontosnak tartom, hogy az értekezésben a Jelölt kitér eredményei alkalmazási körének lehetséges további bővítésére a „1.2.1.2 A módszertan nemlineárs értelmezhetősége” c. fejezetben, melyben jelzi, hogy elsősorban a „lokális elérhetőség” fogalmával kezelhető részterületen vár eredményeket.

Saját munkájának közvetlen tudományos előzményeit gondosan tekinti át egy kiterjedt irodalmi összefoglalóval, amelyben először azokra a közleményekre koncentrál, amelyek nem a maximális párosítás algoritmusát használták a beavatkozó és az érzékelő csomópontok elhelyezésére, hanem célfüggvényeket optimalizálva dolgoztak, így bizonyos kontextusban jobb eredményeket adtak, mint a hálózat-alapú megoldások.

Már ebből az irodalomból tudható volt, hogy ha a biztosított bemeneti és kimeneti konfigurációk minimális számú beavatkozó és érzékelő csomópont felhasználásával készülnek, kivételesen magas vagy akár fizikailag lehetetlen energiaigényt, magas relatív foksámot vagy kedvezőtlen dinamikus viselkedést kaphatunk eredményként, ami gyakorlatilag elfogadhatatlan lehet. E problémát kvalitatív mérőszámok bevezetésével és heurisztikus megközelítésekkel „kezelték”. Ezen közleményekből áll a második nagyobb, feldolgozott és hivatkozott csoport.

További elemzési szempont volt az irányíthatóság és megfigyelhetőség robusztusságának kérdése (amennyire meg tudom érteni, ez a rang nemtriviális ugrásával kapcsolatos kérdéskörnek felel meg, midőn az LTI rendszer mátrixai kevés nullát tartalmaznak). A Jelölt által áttekintett módszerek lényege, hogy azok csomópontok és élek eltávolításával igyekeztek javítani a helyzeten.

A hálózattudomány-alapú rendszerelemzés alkalmazhatóságát bemutató cikkeket szintén egy nagyobb csoportban foglalta össze a Jelölt.

Az értekezés különös erősségének tartom, hogy míg sok cikkben vagy értekezésben az előzmények bemutatása általában egy semmitmondó felsorolás, a Jelölt munkájában adott nagyon tömör táblázatos elrendezés valódi, érdemi kritikai elemzést valósít meg.

A Jelölt saját munkájának motivációját a fenti gondos elemzés alapján határozta meg. Az általa alkalmazott módszerek tudományos volta és relevanciája határozottan bizonyított az értekezésben.

A hálózatzelméleti megközelítések irodalomból ismert változatainak alapvető gyengeségeit illetve hiányosságait a kritikai elemzés alapján az alábbi pontokban foglalja össze: a) a rendszer gyakorlatban is megfelelő topológiájának kiválasztása; b) a kapott eredmények megbízhatóságának elemzése (robusztusság, energiaigény, az eredmények szisztematikus minősítése). Saját munkájával e területeken kívánt jelentős előrelépést tenni.

3. A Szerző célkitűzéseiről

Az értekezésben a Szerző a szakterület fent azonosított „lefedetlen rései”-nek egy részét kívánja saját munkájával lefedni:

- a) A hálózati topológia elemzéséhez tipikus olyan „motívumokat” választ ki és mutat be, amelyek jellemzően előfordulnak a valóságban megjelenő dinamikus rendszerekben, s ezeket szembe állítja a tipikus „benchmark példákkal”, amelyek jó részére az irodalmi vizsgálatokat alapozzák. Ezzel kapcsolatban egy új módszert dolgozott ki a maximális párosításon alapuló beavatkozó és érzékelő csomópontok meghatározását végző, meglévő módszertan hiányosságának kijavítására.
- b) A gyakorlati alkalmazásokban a rendszer szabályozhatósága szempontjából fontos gyakorlati igény a lehetséges „alacsony relatív foksám” biztosítása, ami egy adott konfiguráció olyan átalakításával érhető el, amely új beavatkozók és érzékelők rendszerbe való beillesztését igényli. (Ez véleményem szerint akár bizonyos „redundanciák” bevezetése árán is lehet gyakorlatilag kedvező hatású: míg az „többlet” eszközök bevezetése a beruházási költségeket kissé növelheti, a folyamatos üzemeltetés hosszútávú költségeinek lefaragásával lehet racionális döntés is.) Öt módszert vezet be az előírt relatív foksám túllépésének kiiktatására, amelyek különböző matematikai megközelítéseken alapulnak. Ezek hatékonyságát valódi példák alapján vizsgálja.

A javasolt módszer használhatóságát ezután több mint 600 hőcserlő hálózat elemzésével mutatja be.

4. Az értekezés felépítéséről és formájáról

Az értekezés logikus szerkezetű, jól felépített munka, amelynek struktúrája a fenti programpontoknak felel meg. Az „1 Bevezetés” c. fejezet a szakterület jelenlegi állapotának mély kritikai elemzését adja. A „2 Az állapotváltozók közötti dinamikák, és azok hatása a strukturális irányíthatóságra és megfigyelhetőségre komplex hálózatokban” c. fejezet a hálózatok topológiai elemzése témakör részletes kifejtését tartalmazza. A „3 A relatív foksám csökkentése további beavatkozók és érzékelők optimális elhelyezésével” c. fejezet a relatív foksám korlát alatt tartására tett javaslatokat fejti ki, „optimalizálási szempontokat” is szem előtt tartva. A „4 A hőcserlő hálózatok (HEN) dinamikai komplexitásának strukturális elemzése” c. fejezet tartalmazza a nagyszámú, hálózatelméleti alapú elemzés eredményét.

Az új tudományos eredményeket tartalmazó tézisek célszerűen a 2., 3. és 4. fejezet végén vannak összefoglalva az azokhoz szorosan csatlakozó publikációk felsorolásával együtt.

A nagyon rövid „5 Összefoglalás” c. fejezet az eredmények tömör értékelését tartalmazza.

Az értekezéshez tartozik még két részletes melléklet, egy jelölésjegyzék, egy rövidítésjegyzék (ez utóbbi kettő a Bevezetés előtt van elhelyezve). Az „Irodalomjegyzék” –az általános szokásoktól kissé eltérő módon– a „B” melléklet részét képezi. E jegyzék igen bőséges, 233 releváns referencia bibliográfiai adatait tartalmazza.

Az értekezés nyelve szép, tudományos igényességű magyar nyelv, az ábrák és táblázatok kifogástalan minőségűek. Bizonyos ábrákon a fekete mellett a „türkiz” és a „zöld” színek egymás mellett való használata nem szerencsés: a nagyon zsúfolt, kiméretű részleteket tartalmazó ábrákon ezek nehezen különböztethetők meg egymástól.

5. Kérdések, észrevételek

A „1.2.1.1 Az irányításelmélet klasszikus megközelítései” fejezetben a „Az 1960-as évek és Rudolf Kálmán munkája óta, a Laplace- transzformációkból és frekvenciatartományból a rendes differenciálegyenletekbe való kilépéssel ...” a matematikai szakirodalommal összhangban helyesebb szóhasználat lenne a „**közönséges differenciálegyenlet rendszerekbe való kilépéssel**” megfogalmazás.

A „1.2.2 Tudományos hatás a dinamikus rendszerek területén” c. alfejezet utolsó mondata a maga kontextusában nehezen értelmezhető számomra: „A megadott eredmények minősítése szintén érzékeny pont, mivel a rendszereknek pontosan le kell képezniük a valóságot.” Ez a megfigyelés érzésem szerint túlmutat az értekezés határain, ugyanis a **valóság**ot inkább maguk a **rendszerek** jelentik, míg azok többé-kevésbé pontos

leképezését a **rendszermodellek** végzik. A Szerző által ajánlott módszer a rendelkezésre álló modellekből kiindulva dolgozik, és annak a kérdésnek az eldöntése, hogy ezek milyen pontosan írják le a valóságot, legalábbis számomra, nem tűnik a Szerző feladatának. Kiindulásképp használhatja a rendelkezésére álló modellt, továbbá a valóságot nem tükröznie kell, hanem megfelelő elemek beépítésére tett javaslataival „formálnia”, módosítania is kell.

A „3.3 Gyors és robusztus kimeneti konfiguráció tervezése” c. fejezet „A rendszer relatív fokszámának és lustaságának optimalizálása érdekében meghatároztam egy célfüggvényt (3.1. egyenlet), amelyet az érzékelők és állapotváltozók közti maximális és átlagos távolságának lineáris kombinációjának alapszik.” → „... maximális és átlagos távolság lineáris kombinációján alapszik.”-ra javítandó.

A (3.2) egyenlet alatti szövegben „A közteesség kiszámításához meg kell számolni azon legrövidebb utak számát, amely tartalmazza az i. csomópontot ...” → „... amelyek tartalmazzák az i. csomópontot ...”-ra lenne javítandó.

A „Fejezet 4 A hőcserélő hálózatok (HEN) dinamikai komplexitásának strukturális elemzése” c. fejezetben az „Absztrakt”-ban a „... meghatároztam a HEN tervezési módszereknek fő jellemzőit, feltárom a HEN-k strukturális tulajdonságainak dinamikus viselkedésre gyakorolt hatását, ...” → „... meghatároztam a HEN tervezési módszerek fő jellemzőit, feltárom a HEN-k strukturális tulajdonságainak a dinamikus viselkedésre gyakorolt hatását, ...”-ra javítandó.

Ugyanebben a fejezetben a (4.1) és (4.2) egyenletek fizikai interpretációját a Szerző nem adja meg, sem az egyenletekben alkalmazott mennyiségek mértékegységét. Az a gyanúm, hogy a mennyiségek definiálása pontatlan, és javításra szorul. A (4.2) egyenlet alatti szövegrész sehogy sem áll összhangban az egyenletekkel:

„ahol T_{hi} , T_{ci} , T_{ho} és T_{co} rendre a meleg bemeneti, hideg bemeneti, meleg kimeneti és hideg kimeneti áram, v_h és v_c a meleg és hideg áram áramlási sebessége, V_h és V_c a hőcserélő tartály meleg és hideg oldali felülete, U a hőátadási együttható, A a hőcserélő térfogata, és c_p és ρ az áram fajhője és sűrűsége.”

Akármi is a T -vel jelölt mennyiség dimenziója, a leírás szerint az egyenletek bal és a jobb oldalán lévő mennyiségek dimenziója nem lehet azonos egymással: $\left[\frac{dT}{dt}\right] = [T] \cdot s^{-1}$, míg $\left[\frac{v}{V}T\right] = [T] \cdot m \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ lenne. Ha feltételezzük, hogy mind a fajhő $[c] = J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, mind pedig a folyadék sűrűsége $[\rho] = kg \cdot m^{-3}$ (ami nem azonos fizikailag a folyadékáramsűrűséggel), akkor e két egyenletnek van fizikai értelme, azaz akkor fejezi ki az energia megmaradását, ha v_c és v_h térfogatáram $[m^3 \cdot s^{-1}]$ mértékegységgel, T hőmérsékletet jelent $[K]$ mértékegységben, V a hőcserélőben lévő folyadék térfogata $[m^3]$ mértékegységben. Ugyanis ekkor dt kis idő alatt a „meleg csőben” lévő V_h $[m^3]$ térfogatú folyadék energiája

$$\rho_h c_{ph} V_h dT_h \quad [J]$$

értékkel változik, ahol T_h valami „átlagos hőmérséklet a csőben”, és ennek az energiaváltozásnak a „forrása” egyrészt a bemeneti részen a csőbe befolyó és ugyanakkor a kimeneti részen a csőből kifolyó dv_h $[m^3]$ térfogatú folyadék entalpia tartalmának $c_{ph} \rho_h dv_h (T_{hi} - T_{ho})$ $[J]$ különbsége, továbbá az $[U] = J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ felületi hőátadási tényezővel működő, $[A] = m^2$ felületen keresztül hőcserélést lebonyolító

$$dtUA(T_{co} - T_{ho}) \quad [J] \quad (1)$$

energia-átáramlás. Hasonló megfontolás érvényes a másik cső kimeneti hőmérsékletére vonatkozó egyenletre is.

A 61. oldalon elírást tartalmaz a Táblázat 4.5 Kiszámol mértékek és rövid bemutatásuk táblázat → „... kiszámolt ...”-ra módosítandó.

6. Az értekezés téziseiről

A bíráló e részében nem törekszem az egyes tézisek pontos megismétlésére, hanem inkább azok lényegét igyekszem kiemelni, amennyiben azokat sikerült megértenem.

6.1. 1. Tézis

A Tézis lényegét a Szerző azon felismerése képezi, hogy az irodalomban általában használt „benchmark” hálózatok nem alkalmasak a hálózatelméleti eljárások dinamikai rendszerek területén való vizsgálatára egész egyszerűen azért, mert azok jó része csak egy topológiai szerkezetet tartalmaz mindenféle rendszerdinamika nélkül.

A helyzet javítására a Szerző saját vizsgálatait olyan rendszerekre összpontosította, amelyekben a hálózati struktúra mögé legalább egy LTI típusú, Kálmán-féle kanonikus modellt lehet elképzelni, amelynek keretében az irányíthatóság és megfigyelhetőség fogalmai dinamikus rendszerhez illően már megfogalmazhatók.

Egy egyszerű, nem okvetlenül LTI modellre épített példán keresztül bemutatja, hogy a hálózatok „fizikai topológiájának” megadása nem elégséges a dinamikai modellezéshez. Visszatérve az LTI modellek osztályára, az egyes változópárokhoz rendelhető „almátrixok” kiválasztásával megmutatja, hogy ezek a változó párok milyen hatással vannak egymásra és önmagukra, és hogy irányíthatóságuk és megfigyelhetőségük egymás vonatkozásában milyen irányítási bemenetek és megfigyelési kimenetek beillesztését igényli illetve teszi lehetővé. Ezek a Szerző által definiált „motívumok”.

A Szerző egy világos „munkafolyamatot” definiált a rendszerek megfelelő hálózat-alapú reprezentálására és elemzésére.

A „2.6 Kapcsolódó tézisek” pontban megfogalmazott tézist annak összes altézisével elfogadom új tudományos eredménynek.

A Szerző egyértelműen meggyőződött arról, hogy a maga szakterületén (amely érzésem szerint a világ „újrafelfedezésének” felel meg egy speciális nézőpontból és modellezési aspektusból kiindulva) munkájával jelentős előrelépést és tisztázódást eredményezett nemzetközi szinten. A tézis publikáltsága egészen kiváló, egy nemzetközi monográfia, egy nagy (4.122) impakt faktorú folyóiratközlemény 21 független hivatkozással, egy további nemzetközi folyóiratközlemény, és két konferenciaközlemény támasztja alá a tézist.

6.2. 2. Tézis

A tézis lényege az a megfigyelés, hogy bár a strukturális irányíthatóságot és megfigyelhetőséget a korábban bemutatott path-finding módszer biztosítani tudja, az eredményül kapott beavatkozók és az érzékelő csomópontok aránya a rendszer méretéhez képest alacsony, így az eredmény a gyakorlatban kevésbé kívánatos magas relatív rendű, emiatt „lomha” szabályozás megvalósítására vezet.

A Szerző szándéka az eredmény javítása további meghajtók és szenzorok bevezetésével. Ezen új elemek célszerű bevezetésének helye azonban korántsem triviális. A tézis az ezen részproblémát taglaló szakirodalom mély és részletes elemzésével kezdődik, s rámutat arra, hogy a problémát a szokásos „költségfüggvény minimalizálásával” kezelni hatalmas számítási igényt jelent még viszonylag kisméretű hálózatok esetében is, ami a gyakorlatban azt jelenti, hogy lehetőleg nem gradiens-alapú, részben heurisztikus evolúciós módszerek alkalmazására vagyunk rászorulva.

A szabályozás relatív foksámát (a „hivatalos kifejezés” inkább „relatív rend” lenne) egy LTI-nél általánosabb, de valamennyire speciális nemlineáris modell-osztályra a Szerző a konvencionális szakirodalommal összhangban a Lie-deriváltak fogalmának segítségével definiálja. Az LTI rendszermodellekre áttérve kimutatja, hogy ez egy „legrövidebb elérési út”-nak felel meg.

Az egyik heurisztikus megoldás első lépésben útkereséssel létrehoz egy „minimális konstrukciót”, majd ennek csomópontjait minősíti annak alapján, hogy azokból hány állapotváltozó érhető el. Ezzel kapcsolatos a „közelség mérőszám”. Ezután minden egyes kiindulási és cél csomópont szempontjából meghatározza azon legrövidebb utak számát, amelyek tartalmazzák az adott csomópontot. Ezzel függ össze a „köztesség mérőszáma”. Ezután minden egyes érzékelőhöz megkeresi a hozzá legközelebb eső állapotváltozókat, ennek alapján meg tudja mondani azt a relatív rendet, amit ezzel az érzékelővel el lehet érni. Ha ez magasabb a megengedett maximálisnál, akkor célszerűen a legmagasabb centralitású pontba helyez újabb érzékelőt, és elvégzi vele az előző „minősítést”. Az eljárást addig ismétli, amíg a „relatív fokszám” kellő mértékben le nem csökken. Egy másik heurisztikus megoldás a „halmazlefedés-alapú módszer” szintén egy viszonylag egyszerű megközelítés.

Talán szerencsésebb lett volna egy olyan szekesztési sorrend, amelyben először a két egyszerűbb módszert vezeti be, s csak utána szól a komplexebb, költségfüggvény-minimalizáláson alapuló megoldásról.

Az „egyszerű megközelítésektől” tovább lépve a (3.1) egyenlet relatív fokszámot is tartalmazó költségfüggvényének minimalizálására (a megfigyelhetőség biztosítása mellett) a Szerző optimalizálási algoritmusokat dolgozott ki. A célfüggvény az érzékelők és állapotváltozók közti maximális és átlagos távolság lineáris kombinációján alapszik, és a szimulált hűtés módszerét, és a fuzzy klaszterezés módszerét alkalmazza. Mind a négy algoritmus pszeudokódját megadja az értekezésben. Módszereit esettanulmányok keretében teszteli, amelyeket részletesen leír.

A „3.6 Kapcsolódó tézisek” fejezetben adott tézist és annak alpontjait együttesen elfogadom új tudományos eredménynek. A tézis publikáltsága kiváló: egy nemzetközi monográfia, egy 3.01 impakt faktorú folyóirat közlemény 3 független hivatkozással, két egyéb nemzetközi folyóirat és további két konferenciaközlemény támasztja azt alá.

6.3. 3. Tézis

A tézis lényege, hogy a Szerző, felismerve a „folyamatintegráció” gyakorlati fontosságát, belátja, hogy a hőcserélő hálózatok a legkülönbözőbb szempontok szerint „optimalizálhatók”. Értekezésének témájával összhangban ő maga olyan optimalizációs folyamatok iránt érdeklődik, amelyek a rendszer jó szabályozhatóságát (dinamikus strukturális jellemzők) tartják szem előtt, s ennek érdekében strukturális változtatások végrehajtását teszik lehetővé a hálózatban szenzorok és szabályozó „hajtások” (ez esetben fűtések és hűtések) beépítésével. Az LTI modell-közelítésből kiinduló *közönséges differenciálegyenletek* mátrixainak gráfelmélet-alapú vizsgálata teszi ezt lehetővé. Az irodalomból származó, a 4.2. táblázatban adott mérőszámok használatával minősít, illetve tár fel kapcsolatokat a különböző mérőszámok, illetve korrelációt a strukturális és a dinamikus tulajdonságok között.

A „4.5 Kapcsolódó tézisek” fejezetben adott fő állítás „Kifejlesztettem egy szisztematikus eljárást a dinamikus rendszerek hálózat tudomány-alapú elemzésére, amit 639 hőcserélő hálózat elemzésén keresztül ismertettem.”, és a hozzá tartozó 1. és 3. altézispontok együttesen elfogadhatók új tudományos eredménynek.

A 2. altézist nem tartom új eredménynek, hiszen abban azt írja, hogy „2. Kimutattam a hőcserélő hálózatokat tervező módszerek vezérelveit a hálózati mérőszámok korrelációja alapján, ami a hőintegráció növelése vagy a telepítési költség minimalizálása.” Ezek a „vezérelvek” eleve ismertek mint gazdaságilag motivált tervezési szempontok, a Szerzőnek nem a hálózatelemzésből kellett „rájönnie” ezekre a vezérelvekre. Mindenesetre megnyugtató vizsgálati eredmény, hogy ezek az elvek megmutatkoztak a hálózati mérőszámok korrelációjában.

E tézis publikáltsága is kiváló: egy nemzetközi monográfia, egy 2,7-es impakt faktorú folyóirat közlemény és két további, nemzetközi folyóiratban megjelent közlemény, és két nemzetközi konferenciaközlemény támasztja azt alá.

7. Kérdés

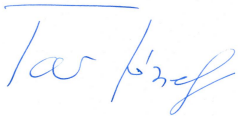
Munkájának milyen továbbfejlesztési lehetőségeit látja nemlineáris rendszermodellekkel leírható hálózatok analízisében? Várható-e jelentős előretörés azon analógia alapján, hogy miként az LTI esetben nem konkrét mátrixszorzatok kiszámolására volt szüksége, hanem csak a kapcsolatok létének vagy nemlétének felderítésére, ugyanígy a Lie-deriváltak konkrét kiszámolására sincs szükség, csupán annak a láncolatnak a felderítésére, hogy valamelyik szabályozó jel van-e hatással valamelyik állapotváltozó valamelyik deriváltjára?

8. Összefoglaló értékelés

Értekezésében Leitold Dániel világosan meggyőzött arról, hogy a konvencionális szakmai alapok helyett egy új, hálózateméleti alapokról kiinduló megközelítéssel nagyon jelentős önálló új kutatási eredményeket tudott elérni nagy szerkezeti komplexitású dinamikai rendszerek analízise és minősítése terén, továbbá új módszereket tudott javasolni ezek hatékony strukturális átalakítására, hajtások és szenzorok beviteli módjára azok megfigyelhetőségi és szabályozhatósági jellemzőinek javítására. Eredményeit jelentős és nívós, nemzetközi szinten erősen ellenőrzött közleményekben publikálta.

Eredményei alapján határozottan javasolom számára a PhD tudományos fokozat megadását.

Budapest, 2020. április 28.



Tar József
egyetemi tanár, az MTA doktora