

Opponensi bírálat Péter Tamás “Közúti járműforgalmi folyamatok nemlineáris modellezése nagy méretű hálózatokon” c. doktori értekezéséről

Készítette: Tar József

2021. szeptember 4.

1. A témaválasztás aktualitásának értékelése gyakorlati és tudományos szempontból

A disszertáció témája a közúti járműforgalmi folyamatok modellezése nagy méretű hálózatokon, többféle céllal. Egy megfelelő modell jól használható lehet e folyamatok tervezésében, szabályozásában, a környezeti hatások és különböző gazdasági hatások becslésében. Míg az alaptudomány (pl. fizika) esetében a modell legfőbb értéke annak precizitása és teljessége, a mérnöki tudományokban a precizitás mellett a könnyű felhasználhatóság, az adott kor technológiai színvonalán való kezelhetőséget befolyásoló komplexitás és számítási igény szempontjai is fontosak. Egy "jó modell" a maga korában e szempontok szerint meghozott praktikus kompromisszumokat tükröz. A modell által elhanyagolható vagy mindenképpen figyelembe veendő hatások nem *ab ovo* adóttak, hanem azok a modell tervezett felhasználási területétől is függenek.

Bizonyos szempontból modellezési feladatnak tekinthetők a modellezett rendszer némely állapotváltozóinak mérésén vagy becslésén alapuló megközelítések is. Az első esetben a változók egy csoportja egymástól független és külön-külön megfigyelhető, mérhető adatokat feltételez. E közelítés megvalósításához drága szenzorok kellhetnek, használatuk helyett érdemes lehet a modell átalakításával foglalkozni abban az értelemben, hogy az egyes mennyiségeket nem közvetlen mérésből kívánjuk megfigyelni, hanem más, közvetlenül mérhető mennyiségekből próbáljuk származtatni, becsülni a modell alapján.

Az értekezés igen részletes elemzést ad az aktuális társadalmi elvárásokról, a különböző szintű (mikroszkopikus, szub-mikroszkopikus, mezoszkopikus és makroszkopikus) modellezési megközelítésekről, az állapotváltozók mérésében elért hazai és nemzetközi eredményekről, rendkívül bőséges hivatkozási listára támaszkodva.

Alapos előkészítés után a disszertáció 19. oldalán jelenik meg a határozott kijelentés, mely szerint "A disszertáció, a nagy méretű hálózati folyamatok makroszkopikus modellezését tárgyalja." E modellezési módszer kiválasztása ésszerű, mert bár a folyamatokat leíró közúti közlekedési rendszerek nagy méretű sztochasztikus dinamikus rendszereknek tekinthetők, a csillagászati nagyságú számok érvényességének egyik praktikus előnye lehet, hogy a klasszikus termodinamikához hasonló módon sok esetben számolhatunk az átlagokkal, és a mennyiségek csekély relatív szórásának gyakran nincs különösebb jelentősége. E modellek lényegében folyadék-dinamikai elvű megközelítésnek felelnek meg.

A disszertáció röviden összefoglalja az úthálózat gráfelmélet alapú "hagyományos" modellezési módszereit is. A 32. oldalon a "4. A nagy méretű közúti hálózatokon fellépő bonyolult forgalmi folyamatok" c. szakaszban fogalmazódik meg az értekezés konkrét célja:

"A kutatás célja a hagyományos térkép-gráf szemlélet helyett egy új, hatékony modell-típus kidolgozása, amely matematikai területen a pozitív nemlineáris rendszerek elméletéhez vezet. Általa,

vizsgálhatók a nagyméretű hálózati problémák és Lyapunov függvényt alkalmazó tartományszintű irányítás valósító meg és a továbbiakban globális vizsgálatok végezhetőek el, hogy megfelele-e a hálózat, (jelenleg, ill. a fejlesztéseket követően) a fenntartható fejlődés kritériumainak."

Az új modell segítségével kialakítható az a konkrét "absztrakt csőhálózat", amelyben a "modellező folyadék" áramlik, s amely áramlást a rendszerbe beépített "csapok" nyitása/zárása segítségével szabályozni lehet, valamint az áramlás egyes állapotváltozóinak megfigyelésére használható szenzorokat el lehet helyezni.

A fenti "általánosságok" rögzítése után kialakul egy "keretrendszer", amely a legkülönbözőbb speciális *áramlási modell-közelítésekkel*, a "csapok" működtetésére előírt stratégiákkal mint konkrét tartalommal tölthető meg, s az így kialakult rendszerek viselkedése numerikus számítások segítségével vizsgálhatóvá válik. E vizsgálatok alapján értékelhetők a különböző szabályozási stratégiák az adott modellezési keretek között.

A témakörben különös fontosságú a "rész és egész" problémájának nem csupán "filozófiai", hanem **praktikus szinten való kezelése**, amelyben a numerikus vizsgálatokra való ráutaltság miatt a számítási kapacitások végeessége jelenti a fő problémát. Leválasztható-e a nagy teljes rendszerből egy kisebb részrendszer úgy, csak annak állapotait kelljen modellezni, azzal a feltevéssel, hogy a kis rendszer hatása elhanyagolható a hatalmas "komplementer" állapotára nézve, amely inkább csak időtől explicit módon függő befolyást gyakorol a kis részrendszerre? A klasszikus termodinamikában a problémát a "tartályok" fogalmával lehet kezelni, amelyek a kis részrendszer bizonyos állapotjellemzőit konstans értéken tudják tartani, és feltehetőleg valami hasonló közelítéssel elhagyható lehet a komplementer rendszer dinamikai szimulálása közlekedési modellek esetében is. **A probléma mindenképp konkrét vizsgálatokat igényel, amelyekre a Szerző által megalkotott modell kiváló lehetőséget kínál.**

Mivel a "keret" erősen nemlineáris modell-tartalmakkal tölthető fel, az eredmények nem becsülhetőek egyszerűen, a gondosan elvégzett szimulációs vizsgálatok számos tudományos érdekességet, eredményt hozhatnak. A témaválasztás tudományos szempontból is igen aktuális.

2. Az alkalmazott kutatási módszerek értékelése tudományos szempontból

Matematikai értelemben a feladat nemlineáris csatolt differenciálegyenlet rendszerek előállítását és vizsgálatát jelenti. Az ilyen differenciálegyenlet rendszerek megoldása általában nem állítható elő "zárt alakban", ezért a technológia mai szintjén kétféle, egymást kiegészítő megközelítéssel lehet élni:

- i) Lyapunov 2. vagy "direkt" módszerének alkalmazása, amelynek segítségével a megoldások különböző lehetséges stabilitási módjaira vonatkozóan egzaktul bizonyítható állítások tehetőek, noha e megoldások pontos részleteit nem tudjuk "elméletileg" feltárni,
- ii) ennek kiegészítéseként e részletek feltárásának érdekében numerikus szimulációkat végezhetünk,
- iii) a szabályozási módszerek minősítése céljából az ilyen szimulációk eredményeit tudjuk vizsgálni, kiértékelni egy véges időszakaszon.
- iv) Ésszerű élni azzal a speciális lehetőséggel, amely a vizsgált területen lineáris Lyapunov-függvény használatát teszi lehetővé az előforduló fizikai mennyiségek természete miatt. Az ezzel való kalkuláció sokkal egyszerűbb, mint a szokásos kvadratikus függvényekkel végezhető számítások.
- v) Célszerű módszer a makroszkopikus modell numerikus tesztelésére 0 várható értékű, az egyes független változókra egymástól függetlenül ható Gauss-eloszlású zaj alkalmazása. Ezzel kapcsolatban érdemes megjegyezni, hogy a "zajszerű" effektusok makroszkopikus szinten nem modellezhetőek, mivel azok a mikroszkopikus szinten "szem előtt lévő" jelenségekből erednek. **Hatásuk** úgy modellezhető makroszkopikus szinten, hogy a zajos tagokat "kézzel" beillesztjük a modell azon pontjaiba, amelyekben az a szenzorok mérési adatait veszi figyelembe. Az értekezéssel kapcsolatban fontosnak tartom megjegyezni, hogy míg számos munkában "szofisztikált" becslési eljárásokat (pl. különböző Kálmán szűrőket) alkalmaznak, amelyek a megfigyelési zajok természetére vonatkozó megszorító feltételezések teljesülése

esetén tervezhető és alkalmazható "értelmesen", a jelen munkára ez a korlátozás nem vonatkozik. **A Szerző által kifejlesztett keret alkalmas bármilyen zajtípus hatásainak szimulálására.**

Péter Tamás értekezése mindezen módszerekkel szisztematikusan él az adott modellezési kereteken belül.

Megállapítható, hogy a Szerző tudományos módszerei minden tekintetben megfelelnek a kor általános követelményeinek.

3. A doktori értekezés formai értékelése

Az értekezés formailag igen szépen szerkesztett (feltehetően MS Word vagy valami hasonló szövegszerkesztő segítségével létrehozott) munka, amelyet méreteihez képest elenyésző mértékben terhelnek kisebb formai hiányosságok.

Az 1. oldalon kezdődő rövid "Bevezetés" és a 2. oldalon "2. A közúti közlekedés meghatározó szerepe, a területen jelentkező problémák, feladatok és a kitörés iránya" c. rész tulajdonképpen együttesen alkot egy bevezető jellegű szerkezeti egységet, melyben a Szerző motivációit ismerteti, amelyek kutatásai elvégzésére és az értekezés megírására készítették. Személyes motivációja a "modellezési komplexitás" vs. "mérnöki intuíció" viszony fontosságának a sikeres tárgyalásmód meghatározásában való felismerése és "helyes beállításának" megtalálása volt, míg a többi megfontolás a társadalom részéről megmutatkozó igényeket foglalja össze. Az itt leírtak egy nem matematikai módon tárgyalt helyzetkép részletes bemutatásának felelnek meg, számos releváns referenciára támaszkodva.

A 10. oldalon a "3. A közúti közlekedési rendszerek forgalmi folyamatainak modellezése" c. fejezetben kezdődik el az értekezésben alkalmazott modellek fenomenológiai megalapozása, a lehetséges modellezési módszerek körvonalazása, és a Szerző által is alkalmazott megközelítés matematikailag megfogalmazott felépítése. Itt foglalja össze a Szerző a járműforgalmi rendszerek modellezése és irányítása, valamint a járműforgalmi rendszerek fejlesztése területén elért hazai eredményeket is, melyekre saját munkásságát alapozni tudta. A közúti közlekedési hálózatokhoz kapcsolódó egyes modellezési módszerek és a közúti hálózatokon lezajló járműforgalmi folyamatok dinamikájának áttekintése már teljesen nemzetközi szinten történik meg. A Szerző által is használt egyenletek matematikai felépítése a "3.5. A további vizsgálatok szempontjából fontos modellezési megfontolások és irányok, amelyeknél a forgalom és a sebesség értékek mérési zajokkal terhelték" c. részben kezdődik el a 29. oldalon.

A 32. oldalon kezdődő "4. A nagyméretű közúti hálózatokon fellépő bonyolult forgalmi folyamatok" c. fejezet a meglévő módszerek gondos kritikai elemzésével indít, amelynek alapján a Szerző a 37. oldalon saját megközelítésének módszeres felépítését kezdi el tárgyalni a "4. A nagyméretű közúti hálózatokon fellépő bonyolult forgalmi folyamatok" c. fejezetben. A fejezet végén a 48. oldalon fogalmazza meg a Szerző új tudományos eredményként 1. Tézisét.

A 49. oldalon kezdődő "5. A hálózati forgalom általános matematikai modellje" c. részben dolgozza ki a Szerző azokat a tartalmakat, amelyek "beletölthetők" az 1. Tézisben megfogalmazott "keretrendszerbe". Minden egyes részletet gondosan kidolgozott, esztétikus ábrával illusztrált magyarázat segít megérteni. Az olvasónak olyan benyomása van, mintha egy kiválóan megírt egyetemi előadás jegyzetét olvasná. A 62. oldalon jelenik meg a leírtak összefoglalásaként a 2. Tézis, amelynek fő eredménye egy koherens többváltozós sebesség-sűrűségfüggvény bevezetése az egymáshoz csatlakozó szektorokra vonatkozóan.

A 63. oldalon a "5.5. Az univerzális hálózati forgalmi modell felírása" c. részben a korábban kimunkált részletekből a Szerző összeállítja globális hálózati modelljét, amely egy elsőrendű, csatolt, számos nemlinearitást tartalmazó differenciálegyenlet rendszer, s amelyhez meghatározza azokat a "kiegészítő feltételeket", amelyek a megoldás létét és egyértelműségét garantálják. A 69. oldaltól a 73. oldalig e modellezés alkalmazhatóságát demonstrálja egy konkrét szimuláció számítási eredményeinek bemutatásával.

A 74. oldalon a "7. A modell stabilitásának vizsgálata a Lyapunov függvény alkalmazásával" c. fejezetben tárgyalja a Szerző annak az elegáns lineáris Lyapunov-függvénynek az alkalmazását, amelynek segítségével a megoldás stabilitásának szükséges és elégséges feltétele egyszerűen állapítható meg. A vizsgálati eredmények összefoglalásaként jelenik meg a 80. oldalon a Szerző 3. és 4. Tézisének kimondása az "univerzális", illetve a "globális" hálózati modell kidolgozásáról.

A 81. oldalon "8. Alkalmazás. Csomópontok optimális működtetése közúti közlekedési hálózatban" c. fejezet az elért eredmények alkalmazását mutatja meg egy speciális Modell Prediktív Szabályozóban (MPC). A Szerző leírja modelljének validálást Budapesten, a Petőfi híd pesti hídfőjétől a körúton északi irányba elindulva a Nyugati térig terjedő szakaszra, valamint Győr városközpontjára vonatkozóan.

A 99. oldalon a "10. Az új tudományos eredmények összefoglalása" c. fejezet összefoglalja az elért eredményeket és szó szerint megismétli a korábban megfogalmazott négy tézist. Az értekezés a 101. oldalon az "Irodalomjegyzék" megadásával folytatódik, ami 21 oldal terjedelmű és rengeteg, érdemben hivatkozott referenciát tartalmaz, köztük a Szerző téziseihez szorosan kötődő közlemények bibliográfiai adatait is. Az értekezést 6 olyan melléklet zárja, amely számítási részletek megértését teszi lehetővé. Az értekezés teljes terjedelme 137 oldal.

3.1. Kisebb szövegszerkesztési pontatlanságok

Ebben a szakaszban kisebb szerkesztési pontatlanságokra hívnám fel a figyelmet, ami egy bíráló kötelessége. Meggyőződésem, hogy ezek nem lehetnek "tartalmi hibák", azaz az elvégzett számításokban és programkódokban nem fordulhatnak elő (akkor ugyanis nehezen értelmezhető eredményekre vezetnének), hanem csak a disszertáció szövegezésébe kerültek bele.

A 29. oldalon a (3.4) egyenletben hiányzik egy zárójel, pótlása után a megfelelő részlet így nézne ki: $\frac{T}{\tau} \cdot (V(\rho(k)) - v(k))$.

A (3.4) egyenlet alatt a helyes képlet nem $E(t) = E(t_0)e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$ lenne? (A hiba ismétlődik az alatta következő, nem számozott egyenletben is, de a (3.5) egyenletre nem terjed át, és a teljes levezetés matematikailag korrekt.)

A 30. oldalon a "3.3. ábra: Szegmensek, mért és a számított forgalom értékek együttes diagramjai" c. ábra aláírása nehezen vethető össze annak tartalmával: a függőleges tengelyen egyértelműen csak a "mért" hozamokra van utalás, az L2 és L3 pontok beazonosíthatónak tűnnek az ábra fölötti rajzból, és az "upstream location" vélhetően az L1 pontnak felel meg. Az ábrán mintha kis időkésséssel követhetők lennének az L1-nél történő beömlésben megjelenő csúcsok az L2 és L3 pontokban, a távolsággal némileg relaxálódva, és az L0 pontnál lévő beömlési adatokkal "perturbálva". Mért és számított értékek összevetése a 3.4. ábrán jelenik meg a sebesség adatokra vonatkozóan.

A 3.4. ábra alatti szövegben az "Űrátlag-sebesség:" valószínűleg "Átlag-sebesség" lenne.

A 68. oldalon az "Osgood-féle unicitás tétel" bemutatásánál egy számozatlan egyenletben és az (5.19) egyenletben főlegesen felső index látszik lenni az $f_i^1(x^{(1)}, t)$ kifejezésben.

A 75. oldalon a (7.3), (7.4), (7.5), (7.8), (7.9), (7.10), (7.11), (7.12) (7.18) egyenlet mindegyikének a parciális $\frac{\partial}{\partial t}$ derivált helyett a teljes $\frac{d}{dt}$ idő szerinti deriváltat kellene tartalmaznia a $V(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ Lyapunov-függvényre, mivel az közvetlenül nem függ a t változótól, csupán az $x_i(t)$ függvényeken keresztül. A hiba nyilvánvalóan szövegszerkesztési pontatlanság, hiszen az értekezés következetesen alkalmazza mindenhol a láncszabályt.

A Szerző nem jelöli egyértelműen, hogy a "vektorokat" oszlopokkal vagy sorokkal kívánja reprezentálni. Pl. a (7.4) alatti jelölés esetén L sornak felel meg, de akkor a (7.1) alatt a $v = \mathbf{L} \star \mathbf{x}$ -ben \mathbf{x}^T lenne a skalárszor-zathoz illő oszlop.

4. Tartalmi kérdések, észrevételek

A "3.5. A további vizsgálatok szempontjából fontos modellezési megfontolások és irányok, amelyeknél a forgalom és a sebesség értékek mérési zajokkal terhelték" c. fejezetben a Papageorgiu által felállított modellről az olvasható, hogy "Folytonos esetben, egy t időpillanatban az eltérési hibát $E(t) = V(\rho(t)) - v(t)$ számítja, amelynek abszolút értékére exponenciális csökkenést írnak elő:". Mi a fizikai alapja a (3.4) egyenletben az $E(t)$ mennyiségre előírt exponenciális csökkenésnek? (Az exponenciális alak **formális előnyei** jól látszanak: $\dot{E} = -\frac{E}{\tau}$) miatt \dot{E} kifejezésébe egyszerűen "visszacsempészhető" $E(t)$ értéke. Más típusú relaxáció feltételezése nem tenne lehetővé egy ilyen "trükköt".) Ez valóban egy "előírás", aminek érvényességét valamilyen módon "garantálni kell", vagy inkább csak egy ésszerűnek tűnő közelítés, amelyet valamilyen kvalitatív érveléssel lehet megtagadni?

5. A tézisek értékelése

Az egyes tézisek értékelése előtt itt szeretném kiemelni az értekezés véleményem szerint legfontosabb tudományos értékét. A Szerző által bevezetett "új modell" egy "absztrakt konstrukció", amely mentesül a hagyományos "térképalapú modellek" nehéz általánosíthatóságától (pl. a modell szerkezeti újrakonstrukciója szükséges, ha a hálózatban valami útszakasz megszűnik vagy abba új útszakasz épül be). Ilyen változások az új absztrakt modell egyszerű bővítésével oldhatók meg annak **strukturális átalakítása nélkül**. A hagyományos térképrendszerek bonyolult struktúrája miatt e megközelítésekkel mindig a nagy egész rendszerből *áttekinhető módon* mindig csak egy kisebb részrendszert lehet kiragadni és tárgyalni úgy, hogy a komplementer állapotának, valamint a részrendszer állapotának a komplementer állapotára való hatásának modellezésére ez a keret nem kínál semmilyen módot. Csupán arra van mód, hogy bizonyos adatokat a komplementer rendszer "kapukon" keresztül "ráerőszakol" a kiragadott részrendszerre. (Termodinamikai analógia alapján ez egy "csökkentett hatékonyságú" megközelítésnek felel meg, ami csak akkor működik, ha az egyik részrendszer egy óriási "tartály", de egymással összemérhető méretű részrendszerek kölcsönhatásának modellezésére nem kínál módszert.)

A modell érdekes eleme a (4.2) egyenlet szerint definiált "járműsűrűség" alkalmazása. Ennek fizikai értelmét a Szerző részletesen elmagyarázza, gyakorlati haszna pedig az, hogy ez az érték mindig a $[0, 1]$ intervallumba esik. További fontos részlet, hogy az alkalmazott formalizmus a parkolókat nem "forrásként" vagy "nyelőként" közelíti, mint a hagyományos eljárások, hanem azok ugyanolyan "típuselemekkel" ("**általánosított szektorok**") írhatók le, mint az úthálózat többi része. E megközelítés sokkal közelebb áll a valósághoz, mint a hagyományos: a parkolók fizikailag se nem források, se nem nyelők: csak azokat a járműveket képesek kibocsátani magukból, amelyeket korábban "elnyeltek", de se új járművet nem képesek a rendszerbe beereszteni, sem járművet abból eltüntetni nem tudnak. Ugyanúgy működnek, mint egy közönséges útszakasz. Továbbá, a régi modellben ugyanaz a parkoló hol "forrásként", hol "nyelőként" léphet fel.

A (4.20) és (4.21) egyenletek "önszabályozó" függvényei garantálják, hogy fizikailag nem interpretálható értékek nem fordulnak elő a rendszerben, azaz nem sérülhet *a rendszer pozitív volta*. Nagyon lényeges, hogy a modellbe tetszőlegesen sok sebesség-járműsűrűség függvény illeszthető bele, amely képes az elvárható szigorúan monoton csökkenést produkálni úgy, hogy $x = 1$ sűrűségnél a közeli értéket vesz fel (4.8. ábra).

Kérdés: Az egzaktul a érték kapcsolatban áll-e a 63. oldalon tárgyalt Greenshields-féle paradoxonnal?

Az "1. Tézis" 48. oldalon adott megfogalmazását teljes mértékben elfogadom új tudományos eredménynek. A részletes és gondos előkészítés a tézisben szintén igen részletesen kifejtett minden egyes állítást szigorúan megalapoz. A tézist 6 jelentős publikáció támasztja alá.

A 49. oldalon kezdődő "5. A hálózati forgalom általános matematikai modellje" c. fejezet az 1. Tézisben nagy vonalakban adott modellezési módszer és "absztrakt struktúra" lehetséges tartalmakkal való feltöltésével foglalkozik. Ez mindenképp szükséges lépés annak érdekében, hogy a Szerzőnek a későbbiekben szimulációs eredmények bemutatásáig lehessen eljutnia. Ezzel kapcsolatban a Szerző a következő követelményeket írja elő:

"A valóságos helyzetekben a fenti függvényeknél figyelembe kell venni az emberi, vezetői

reakciófolyamatokat is, amelyekhez kapcsolódó mozgások út-idő és sebesség-idő függvényei folytonosak és folytonosan változóak. Ennek megfelelően az általam felírt modellben alkalmazott forgalomirányító lámpák és belső tiltás-automatizmusok jelei is folytonosnak, továbbá folytonosan differenciálható függvények. "

E megjegyzéshez még hozzávehetjük, hogy a közlekedés tárgyalása bizonyos mértékig "alkalmazott klasszikus mechanikának" tekinthető, amelyben a gyorsulás fogalma fenomenológiailag értelmezett, tehát idő szerint legalább kétszer differenciálható függvényekben kell gondolkoznunk. Weierstraß híres példájára, a mindenhol folytonos és sehol sem differenciálható egyváltozós függvényre, valamint a folytonos függvények univerzális közelítőit alkalmazó "lágymodellezési eljárások" esetében felmerülő, "a dimenzionalitás átka" c. jelenségre gondolva eljárását teljes mértékben elfogadhatónak kell tartanunk. (A mérnöki gyakorlat számos területen alkalmaz hasonló "trükköket", amelyek annyira beleivódtak a köztudatba, hogy matematikai értelemben korlátozó jellegükre ma már szinte senki sem gondol. Ilyen például a véges tartójú, végtelen sokszor folytonosan differenciálható ún. "gyorsan fogyó alapfüggvények \mathcal{D} " osztálya, amelyeket az LTI rendszerek gerjesztő, inhomogén tagjának modellezésére szokás használni. Ezek Laplace-transzformáltja nem tartalmaz szingularitásokat, így az időképbé való visszatranszformálásnál csak az átviteli függvény pólusainak megfelelő "kikerülésével" kell foglalkozni, míg általános esetben a gerjesztő függvény pólusaira is kellene gondolni. Ugyanez a tulajdonságuk ad alapot a disztribúciók és ultradisztribúciók elegáns elméletének is.) **Összességében az várható, hogy az e célból bevezetett paraméterek konkrét értékei csak kismértékű befolyással bírhatnak a szimulációk eredményére.**

Nem matematikai, hanem inkább gyakorlati jelentőségű a szakasz szektorokról a parkolókra, illetve a fordított irányú rádologozás modellezésében az 5.3. ill. 5.4. ábrán szemléltetett függvényalakok használata, ami szintén ésszerű közelítés.

A Szerző részletes, jól kidolgozott példákkal mutatja meg a kapcsolati mátrix elemeit. Koherens modell kialakítása szempontjából kruciális jelentőségű a sebesség-sűrűség függvények (5.11)-ben adott, előírt tulajdonságú $f(x)$ magfüggvényből való származtatása.

A fenti előkészítés alapján maradéktalanul új tudományos eredmények ismerem el a 62. oldalon megfogalmazott 2. Tézist, melyet négy jelentős tudományos közlemény támaszt alá.

Az "5.5. Az univerzális hálózati forgalmi modell felírása", "5.6. A globális hálózati modell felírása" és az "5.7 A szűkített hálózati modell" c. szakaszok "speciális" alkalmazási közelítéseket írnak le igen világosan. Ezeket egészíti ki az "Egzisztencia és unicitás vizsgálata a globális hálózati modellen" c. rész, amely matematikailag teljes mértékben alátámasztja és értelmezhetővé teszi a "6. Egy hálózati modell és néhány szimulációs eredmény" c. részben bemutatott eredményeket. A "6.1. Egy stabilitási megfigyelés" c. szakaszban leírt észrevétel matematikai indoklása / szigorú bizonyítása a "7. A modell stabilitásának vizsgálata a Lyapunov függvény alkalmazásával" c. részben történik meg. Ez matematikailag a Luenberger által pozitív rendszerekre javasolt Lyapunov függvény használatának felel meg. **A Szerző új tudományos eredménye ennek a módszernek a bevezetése, alkalmazása a járműforgalmi folyamatok irányításában.** A konkrét Lyapunov-függvény a Szerző alkalmazásában a különböző szektorok által meghatározott belső úthálózaton a járművek által elfoglalt összes úthosszat jelenti, azaz fizikailag jól értelmezett, időbeli csökkenése parktikus szempontból "egyre inkább javuló helyzetnek" felel meg. A Szerző következetesen és igen elegánsan alkalmazza ezt a speciális Lyapunov-függvényt stabilitásvizsgálataiban.

A fent említett vizsgálatok szigorúan és tökéletesen megalapozzák a Szerző 3. (11 közleménnyel alátámasztott) és 4. (két közleménnyel alátámasztott) Tézisét az értekezésben adott formában. Mindkettőt maradéktalanul elfogadom a Szerző új tudományos eredményének.

Gyakorlati szempontból különlegesen értékesnek tartom a Szerző "8. Alkalmazás. Csomópontok optimális működtetése közötti közlekedési hálózatban" c. részben elmondott megfontolásait, amelyek egy igen speciális MPC kialakításának lehetőségét alapozzák meg. Ahelyett, hogy belebonyolódna egy általános célfüggvény adott dinamikai modell mint kényszer melletti optimalizálásának problémájába, ahonnan formálisan nagyon

komplikált lenne "visszakaszálódni" az adott speciális feladathoz és hatékonyan kihasználni annak sajátos vonásait, a Szerző "fordítva gombolja a kabátot": az MPC lényegéről egy rövid szöveges leírást ad, egyszerűen jelöli meg az "optimalizálás" értelmét, és az adott modellre támaszkodva természetes módon határozza meg az optimálisnak tartható szabályozó jelet. Igen szellemes megoldásnak tartom, hogy az egymásnak ellentmondó feltételek kompromisszumos kezelését nem a célfüggvénybe beírt extra büntető tagból próbálja komplikált módon származtatni, hanem természetes egyszerűséggel a következőképp jár el: *"Ennél a modellszámításnál, pl. ha egymás után 3-szor ugyanaz az optimális irányítási döntés lép fel, akkor beiktatunk egy 30 sec-os időtartamra vonatkozó ellentétes döntést. Ez egy nem optimális, de közlekedéstechnikai szervezés miatt szükséges döntés, mivel a keresztirányban is el kell engedni a járműveket, még akkor is, ha minimális számú jármű várakozik erre ott."*

Külön figyelmet igényel az "adaptivitás" fogalmának gyakorlatias kezelése. Itt nem arról van szó, hogy maga a szabályozó rendszer végez megfigyeléseket abból a célból, hogy ezek alapján a jövőben hatékonyabban működjék. A módszer ehelyett szezonális illetve napszakokra vonatkozó olyan eredmények egyszerű beépítését teszi lehetővé, amelyeket nem a szabályozó figyelt meg, hanem mások korábbi megfigyeléseiből származnak.

Kiemelném, hogy a Szerző speciális problémamegközelítésének köszönhetően az adott módszer eredménye annyira egyszerű, hogy az gyakorlatilag közvetlenül programozható, és nem igényli semmiféle speciális MATLAB toolbox felhasználását.

A Szerző egyetlen mondatát pontosítanám, kiemelve, hogy **nem tartalmi, hanem formai hibáról van szó, ami ebben az esetben nem elírás, hanem megfogalmazásbeli pontatlanság, amelynek az eredményekre nézve semmilyen következménye nincs:** *"A célfüggvény értéke függ a rendszer jövőbeni állapotaitól, melyeket a rendszer modellje alapján a beavatkozó jelek és a kezdőállapot függvényében számolni tudunk."* Az észrevételnek azért van némi jelentősége, mert nemzetközi konferencián hallottam már előadótól azt állítani, hogy *"az MPC nem kauzális"*. Ez a félreértés úgy alakulhat ki, hogy a kiemelt mondatához hasonló szerkezeteket valaki "felületesen olvas" és vesz át. Az MPC is természetesen kauzális rendszer, **a jelenbeli működését nem a jövőben ténylegesen kialakult állapotok határozzák meg, hanem azok, az adott időpillanatban a múltbeli megfigyelésekből a jövőre vonatkoztatott feltételezéseink, amelyek alapján a jelenbeli szabályozó jelet kiszámítjuk.** A mondat korigálva így hangzana: *"A célfüggvény értéke függ a rendszer feltételezett jövőbeni állapotaitól, melyeket a rendszer modellje alapján a beavatkozó jelek és a kezdőállapot függvényében számolni tudunk."*

Sajnálattal állapítom meg, hogy éppen a fenti megfontolások összefoglalásaként formálisan nem jelenik meg egy újabb "Tézis" az értekezésben. Megítélésem szerint a 94. oldalról kiemelt alábbi szövegrész megfelelt volna egy újabb tézisnek:

"A csomópontok maximális járműátbocsátására a hálózati modell alapján MPC-alapú, rapid irányítási stratégiát határoztunk meg, amely irányítás a fázisba sorolást alapul véve egyaránt figyelembe veszi a csomópont, illetve kereszteződés minden bemenetén és kimenetén is a járműsűrűségeket. Ennek figyelembevétele mellett a modelleken elvégzett számítások alapján az átbecsült járművek számát tekintve 45-50 %-os növekedési eredmény is elérhető a csomópontok optimális működtetésénél. ...Az irányítás célja a „szintbeli eltolás hatásának legjobb megközelítésével” a legkisebb akadályozás elvének teljesítése volt és ez által a csomóponton átáramló maximális járműszám biztosítása. A csomópontok optimális irányítása a modellezés alapelvét követve a csomópontot körülkerítő zárt görbével körülhatárolt tartomány felvételével történt, amelynél figyelembe vesszük a tartomány „mögött” is kialakuló torlódások hatását a csomópontok MPC irányításánál. Együtt alkalmazva a csomóponti irányításokat és a korábban a 7. fejezetben tárgyalt Lyapunov függvényt alkalmazó irányítási törvényt a teljes tartományon, illetve azokon a szubtartományokon, ahol kritikus helyzet lép fel, az eredmény egy új elvű, kettős szintű hibrid fogalmi irányítás bevezetéséhez vezet, amely egyszerre valósítja meg a csomópontok optimális átbecsülését és a tartományszinten az optimális járműsűrűséget is."

Bár formálisan tézisként nem jelentkezik, ez a rész megerősíti az értekezés egészének tudományos értékét, éppen úgy, mint a "9. Alkalmazás. Trajektórián történő mozgás, egyedi sebességfolyamatok kinyerése és optimális trajektória meghatározása. Modellezés és validálás valós hálózatokon" szakaszban közölt eredmények összefoglalása.

6. Nyilatkozat az egyes tézisek elfogadásáról vagy elutasításáról

Összefoglalva ismételten kijelenem, hogy az értekezés minden egyes tézisét a Szerző által adott megfogalmazásban elismerem új tudományos eredménynek.

Megítélésem szerint Szerző a műszaki tudományok területén kiemelten értékelhető, hatékony gyakorlati problémamegközelítést dolgozott ki. Nem egy általános formalizmust alkalmazott kiindulási pontnak, amelyet aztán addig "farigcsált", amíg az gyakorlati szempontból kezelhető komplexitásúvá redukálódott és feldolgozható méretűvé zsugordott. A gyakorlat igényeit szem előtt tartva, mindig az egyszerű kezelhetőségre és átláthatóságra, a használt mennyiségek világos fenomenológiai értelmezhetőségére koncentrálna "alulról építkezett", majd az így kialakuló modellt tette utólag matematikailag szigorúvá és korrektté beépítve abba a folytonos differenciálhatóság feltételét és az ennek megfelelő praktikus megindokolt közelítő komponenseket. Ezzel olyan általános modellezési keretrendszer hozott létre, amely mentes a gyakorlati szempontból fölösleges "komplexitásoktól". Ezen általános modellforma stabilitása fenntartható akkor is, ha abba bizonyos "természetes megszorításoknak eleget tevő" újabb tartalmakat illesztnek, és ezekkel újabb szimulációs vizsgálatokat végeznek. E keret alkalmas a legkülönbözőbb zajmodellek hatásainak vizsgálatára is. Továbbá, a Szerző elérte, hogy konkrét szimulációs eredményeit a szigorú matematikai megalapozottságra támaszkodva hihetővé, elfogadhatóvá tegye.

7. Nyilatkozat arról, hogy az értekezés hiteles adatokat tartalmaz-e

A tézisek tudományos tartalmának igényes és részletes ismertetése, a szakterület aktuális állását ismertető alapos és részletes szakirodalmi áttekintés valamint a tézisek megállapításainak erős publikáltsága alapján **az a határozott meggyőződése alakult ki, hogy az értekezés hiteles eredményekről számol be.**

8. Nyilatkozat a nyilvános vita megtartásáról

A fentiek alapján határozottan javaslom a nyilvános vita megtartását.

9. Javaslat az „MTA doktora” cím odaítéléséről

Értékelésem alapján határozottan javaslom a Jelölt számára az MTA doktora cím megadását.



Tar József egyetemi tanár, az MTA doktora