

MODELLEZÉSI MÓDSZEREK A GÉPÉSZETBEN

MODELING METHODS IN MECHANICAL ENGINEERING

Nemes Dániel*

ABSTRACT

Modeling of mechanical systems plays a fundamental role in modern engineering design processes, especially for complex, dynamic systems. This work examines different modeling approaches through different application examples, highlighting their applicability and limitations. The research presents the use of AVL Cruise, Matlab Simulink and Simscape environments, and TPToolbox, with a special focus on polytope-based model transformation methods. The results show that appropriately chosen modeling and control tools significantly contribute to more efficient design and optimization of systems.

A gépészeti rendszerek modellezése alapvető szerepet játszik a korszerű mérnöki tervezési folyamatokban, különösen a komplex, dinamikus rendszerek esetében. Jelen munka különböző modellezési megközelítéseket vizsgál eltérő alkalmazási példákon keresztül, kiemelve azok alkalmazhatóságát és korlátait. A kutatás bemutatja az AVL Cruise, a Matlab Simulink és Simscape környezetek, valamint a TPToolbox használatát, különös tekintettel a politóp alapú modelltranszformációs módszerekre. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a megfelelően megválasztott modellezési és szabályozási eszközök jelentősen hozzájárulnak a rendszerek hatékonyabb tervezéséhez és optimalizálásához.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki tervezés egyik alapvető kihívása a vizsgált rendszerek viselkedésének pontos és egyben hatékony leírása. A gépészeti rendszerek esetében ez különösen fontos, mivel a dinamikai, energetikai és szerkezeti sajátosságok együttesen határozzák meg a működést. A modellezés lehetőséget biztosít arra, hogy a fejlesztési folyamat korai szakaszában vizsgáljuk a különböző tervezési alternatívákat, ezáltal csökkentve a fizikai prototípusok számát és a fejlesztési költségeket.

A különböző alkalmazások – például járművek vagy kézi elektromos szerszámok – eltérő modellezési igényeket támasztanak, így szükségessé válik többféle módszer és eszköz párhuzamos alkalmazása. A modern szimulációs környezetek, mint a Matlab Simulink és Simscape, valamint az ipari alkalmazásokban elterjedt AVL Cruise, lehetőséget nyújtanak komplex rendszerek többfizikai modellezésére. Emellett egyre nagyobb

szerepet kapnak a fejlett szabályozástechnikai módszerek, különösen a politóp alapú megközelítések, amelyek hatékony keretet biztosítanak nemlineáris rendszerek kezelésére.

Jelen cikk célja, hogy különböző modellezési technikákon és esettanulmányokon keresztül bemutassa ezen módszerek gyakorlati alkalmazhatóságát, valamint iránymutatást adjon a megfelelő modellezési és szabályozási stratégiák kiválasztásához.

2. MODELLEZÉSI ELJÁRÁSOK BEMUTATÁSA

A gépészeti rendszerek modellezése során több eltérő szemléletű megközelítés alkalmazható, amelyek különböző kompromisszumokat kínálnak a pontosság, a számítási igény és az általánosíthatóság tekintetében. Az alábbiakban a legfontosabb modellezési eljárások kerülnek áttekintésre.

2.1. Analitikus modellezés

Az analitikus (egyenlet alapú) modellezés a fizikai törvényeken alapuló leírásra épül, ahol a rendszer viselkedését differenciálegyenletek, algebrai összefüggések és megmaradási törvények írják le. Tipikus példái a mechanikai rendszerek mozgásegyenletei, energetikai mérlegek vagy villamos hálózatok leírásai. Előnye, hogy a modellek jól értelmezhetők és paramétereik közvetlen fizikai jelentéssel bírnak. Hátránya ugyanakkor, hogy komplex rendszerek esetén a modellalkotás időigényes lehet és gyakran egyszerűsítéseket igényel, amelyek a pontosság rovására mehetnek. Jól szemlélteti ezt Pacejka munkássága [1], mely a kerékabroncsok dinamikájának, azok súrlódási viszonyainak és annak a járműdinamikára gyakorolt hatását részletesen tárgyalta.

2.2. Adatalapú modellezés

Az adatalapú (data-driven) modellezés a rendszer bemeneti-kimeneti méréseire támaszkodik és lookup-table, statisztikai vagy gépi tanulási módszerekkel állít elő modellt. Ide tartoznak például a regressziós modellek, neurális hálók vagy egyéb fekete-doboz jellegű megközelítések. Előnye, hogy nem szükséges részletes fizikai ismeret a rendszerről, valamint jól alkalmazható bonyolult vagy nehezen modellezhető folyamatok

* tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

esetén. Az adatalapú modellek jó alapot biztosítanak későbbi helyettesítő modellek alkalmazására. Ezek a helyettesítő modellek jöhetnek egy gépi tanulásból vagy modellidentifikációból, amellyel direkt módon modellegyszerűsítést tudunk elvégezni, mégis megőrizve az egyenlet alapú felírás előnyeit. Ugyanakkor korlátozza a megfelelő mennyiségű és minőségű adat szükségessége, valamint az, hogy a modellek általában korlátozottan interpretálhatók és extrapolációs képességük gyenge lehet. Számos további részletet tár fel Lennart könyve a témában [2].

2.3. Vegyes (hibrid) modellezés

A vegyes modellezési megközelítések az analitikus és adatalapú módszerek kombinációját jelentik. Ilyen esetben a fizikai alapú modell struktúráját kiegészítik adatalapú komponensekkel, például paraméterazonosítással vagy nem modellezett dinamikák becslésével. Ez lehetővé teszi a fizikai értelmezhetőség megőrzését, miközben javul a modell pontossága. A hibrid modellek különösen hasznosak olyan rendszereknél, ahol a fizikai modell ismert, de nem teljes, vagy ahol bizonyos nemlineáris hatások nehezen írhatók le analitikusan. Ezt a módszert főként közepes komplexitású rendszerek leírására szokták használni.

2.4. Politopikus modellezés

A politopikus modellezés a nemlineáris rendszerek egy speciális reprezentációját adja, ahol a rendszer egy paraméterfüggő lineáris modellek konvex kombinációjaként írható le. Ez a megközelítés szorosan kapcsolódik a lineáris paraméter-változós (LPV) rendszerekhez és lehetőséget biztosít fejlett szabályozási módszerek alkalmazására [3]. A járművek szabályozásának és átfogó értelmezésének alpművében [4] további részletek olvashatóak. A politóp alapú modellek egyik jelentős előnye, hogy a nemlineáris viselkedést több lineáris modell segítségével közelítik, így alkalmazható a lineáris rendszerekre kidolgozott gazdag módszertan. Ugyanakkor a megfelelő politóp-reprezentáció meghatározása nem triviális feladat, és a modell komplexitása gyorsan növekedhet a paraméterek számának emelkedésével. Fontos megjegyezni, hogy a politopikus modellezés fő alkalmazása a nemlineáris robosztus szabályozótervezésben van, és a hozzá kapcsolódó optimalizációs feladatok is ehhez kapcsolódnak, nem pedig a rendszer dinamikáját leíró együtthatók optimalizálásához.

A politopikus modellezés és a cikkben bemutatott esettanulmányok megértéséhez az alábbi alapfogalmak definiálása szükséges [5]:

TP modell transzformáció: Olyan tenzorszorzat-alapú numerikus eljárás (HOSVD alkalmazásával), amely egy adott nemlineáris (LPV) modellt lineáris időinvariáns (LTI) rendszerek konvex kombinációjára bont fel.

Vertex (csúcspont): A generált politóp csúcspontja, amely a paraméterter egy-egy lokális, lineáris LTI rendszerét (modelljét) reprezentálja.

Súlyfüggvény: Az adott munkapontban meghatározza, hogy a rendszer pillanatnyi viselkedéséhez az egyes vertexek (LTI modellek) milyen arányban (súllyal) járulnak hozzá.

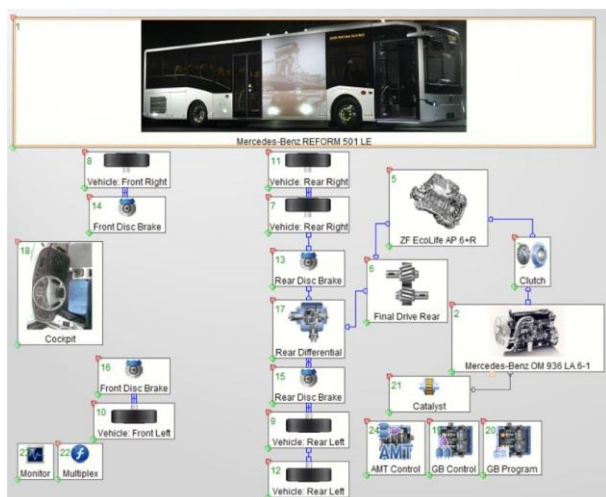
Politóp burok és méret: A vertexek által kifeszített konvex burok, amely befoglalja a rendszermátrix lehetséges paraméter-trajektóriáit. A burok mérete (pl. befoglaló hipertér fogat formájában) befolyásolja az LMI alapú szabályozótervezés konzervativizmusát.

CNO, SNNN, IRNO: A TP transzformáció során alkalmazható különböző normalizációs stratégiák (Close to Normal, Sum Normalisation – Non Negativeness, Inverse Relaxed Normalised), amelyek eltérő méretű és alakú politóp burkokat eredményeznek, ezáltal közvetlenül hatva a belőlük tervezhető szabályozó tulajdonságaira.

3. ESETTANULMÁNYOK

3.1. Mercedes-Benz REFORM 501 LE városi busz szimulációja AVL Cruise szoftver használatával

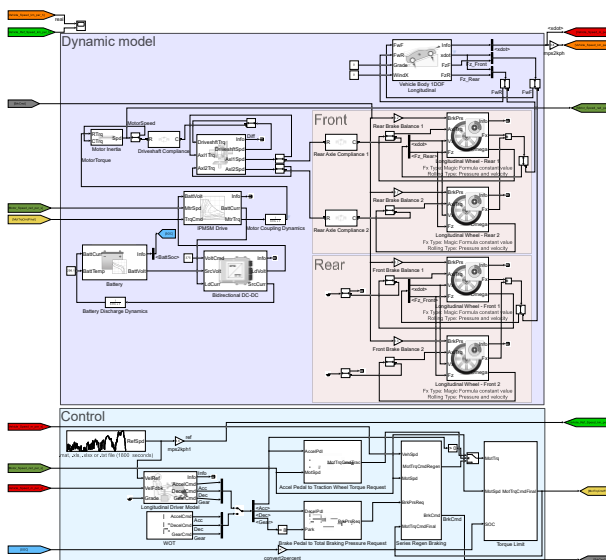
Ebben a kutatásban [6] egy Mercedes-Benz REFORM 501 LE longitudinális járműdinamikai modelljét készítettük el az AVL Cruise szoftver segítségével. Az AVL Cruise szoftver tapasztalataink szerint kiválóan alkalmazható autógyártók kutatólaboratóriumaiiban, illetve olyan kutatóintézményekben, ahol a főként adatalapú modellezési megközelítéshez mérésekkel előállítható a szükséges mennyiségű és minőségű adat. Ebben a kutatásban a szoftverbe beépített példa járműmodell paramétereit hangoltuk át úgy, hogy az leginkább megközelítse a modellezett jármű tulajdonságait. Megállapítható volt, hogy mélyreható mérések nélkül egy ilyen megközelítés nem képes kellő részletességű modellel szolgálni önvezetés vagy menetstabilizálás kutatásához, fejlesztéséhez, azonban hibridizációs lehetőségek későbbi vizsgálatára remekül alkalmazható. A módszer segítségével egy jól felépített modellstruktúra annak fő paramétereinek illesztésével megvizsgálható, hogy például milyen méretű akkumulátort célszerű alkalmazni, hogy a jármű WLTP-szerinti fogyasztása minimális legyen. Az alkalmazott dinamikai modell az 1. ábrán látható.



1.ábra Mercedes-Benz REFORM 501 LE városi busz dinamikai modellje

3.2. Matlab Simulink és Matlab Simscape összehasonlítása járműdinamikai szimulációkban

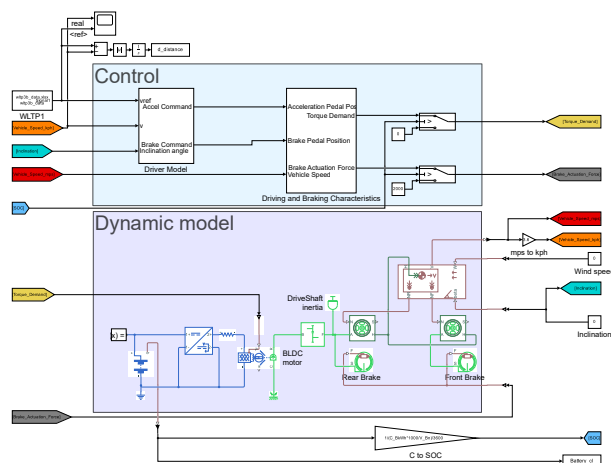
Ebben a kutatásban elkészítettük egy általános jármű dinamikai szimulációját Matlab Simulink és Matlab Simscape segítségével is, majd összehasonlítottuk a modellépítést és a szimulációs eredményeket. A modellek paraméterei a [7] publikációban vannak részletezve. A Simulink modell felépítése a 2. ábrán, míg a Simscape modell felépítése a 3. ábrán látható. A modellek felépítését követően a paraméterek illesztése következett. A folyamat ellenőrzésére a referencia menetciklus lekövetésének pontosságát használtuk. A 4. ábra a Simulink, míg az 5. ábra a Simscape modell referenciakövetését ábrázolja.



2.ábra Matlab Simulink modell felépítése

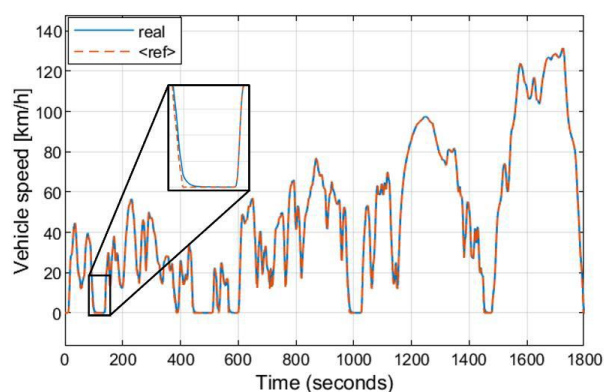
A Simulink járműdinamikai alkalmazásakor javasolt a Powertrain Blockset használata, mellyel lehetőségünk van a Simulinket nem pusztán blokkdiagramos

megközelítésben használni, hanem komplett fizikai alrendszereket egyetlen blokkként beilleszteni. Ilyen összetett blokk a kerék, a motor és a vezérlés is.

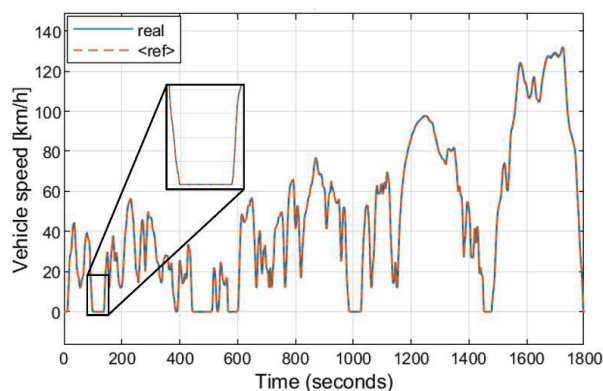


3.ábra Matlab Simscape modell felépítése

A Simscape modellezésnél még inkább felhasználóközelí megoldást lehet alkalmazni. Ennél ugyanis a blokkoknak egyfelől valós fizikai reprezentációja van, másfelől a fizikai kapcsolatokat is egy-egy tartomány-specifikus ággal kell összekötnünk. Ebben a reprezentációban úgy kapcsolódnak össze a blokkok, mint az általuk modellezett fizikai alrendszerek a valóságban. Mivel a modellépítés úgy kívánta, minimális topológiai különbségek vannak a modellek között, mely hatására jól megfigyelhető, hogy míg a Simulink modell a 0 km/h sebességet egy természetes simasággal éri el, addig a Simscape modell hirtelen. A tranziens folyamatok leírásakor nagy szerepet kap a modell részlemeinek pontos topológiája. Ezek a hatások energetikai szimulációknál szintén elhanyagolhatóak, azonban ABS rendszerek tesztelésénél már komoly eltéréseket okozhatnak, ugyanis az ABS rendszer működése épp ezen tranziens átmenetek során lép fel.



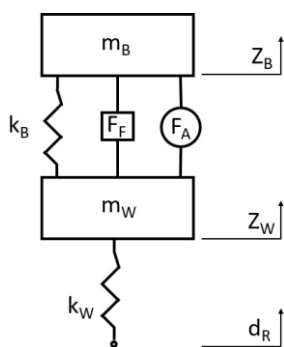
4.ábra Matlab Simulink modell referenciakövetése



5. ábra Matlab Simscape modell referenciakövetése

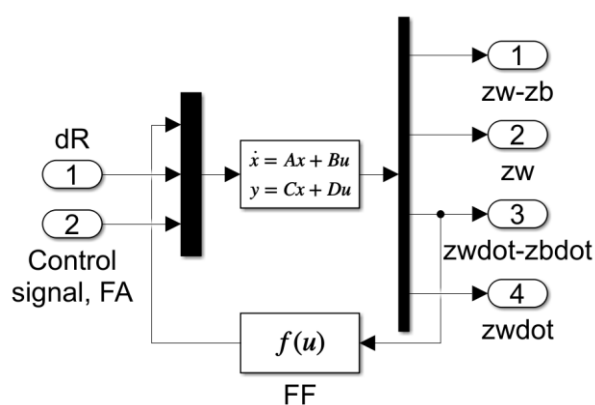
3.3. Járműfelfüggesztés szabályozó tervezése politopikus modellezéssel

A [8] kutatásban egy jármű felfüggesztés szabályozását valósítottuk meg politopikus modellezés segítségével. A publikáció fókuszában a politopikus modellezés oktatása volt. A bemutatott példa egy, a hallgatóknak kiadott házi feladat megoldási menetét hivatott bemutatni. Ebből adódóan fellelhetőek benne az oktatási példákra jellemző, elsősorban furcsának tűnő megfontolások és elhanyagolások. A példában alkalmazott negyed járműmodell sematikus felépítése a 6. ábrán látható.



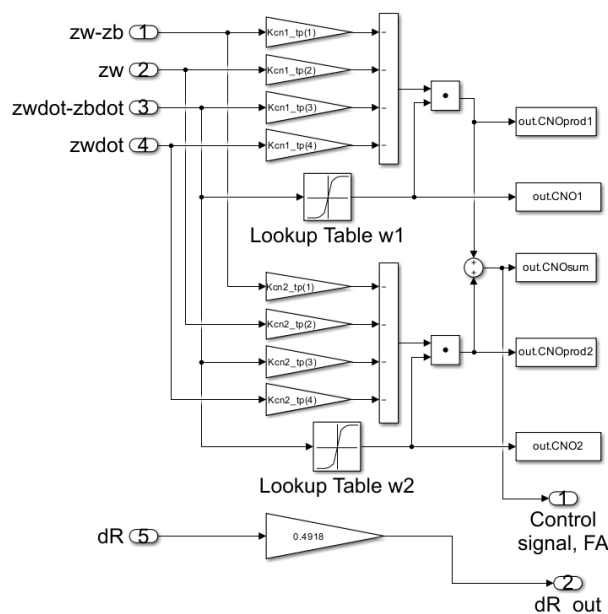
6. ábra Negyed járműmodell sematikus felépítése

Ebben a megközelítésben tisztán egyenletalapú leírást alkalmaztunk. Az LPV modell leírása a nemlineáris súrlódási modellben volt. A cél, itt, hogy a hallgató megértse, hogy hogyan lehet egy ilyen nemlinearitási problémát a politopikus modellezés eszköztárával kezelni. Itt a felfüggesztés viszkózus, coulomb és stribeck súrlódási komponenseket tartalmazott. Az LPV modell ekvidisztens paramétertartományon való kiértékelését követően politóp modellt hoztunk létre a Matlab TPTtoolbox segítségével. A dinamikai modell állapotter-reprezentációja a 7. ábrán, a politopikus szabályozóviszacsatolás a 8. ábrán látható. A rendszert Matlab Simulink környezetben állítottuk össze. Ezzel tudtuk azt biztosítani, hogy az egyenletalapú rendszerbe szemléletesen integrálható legyen a politopikus rész.



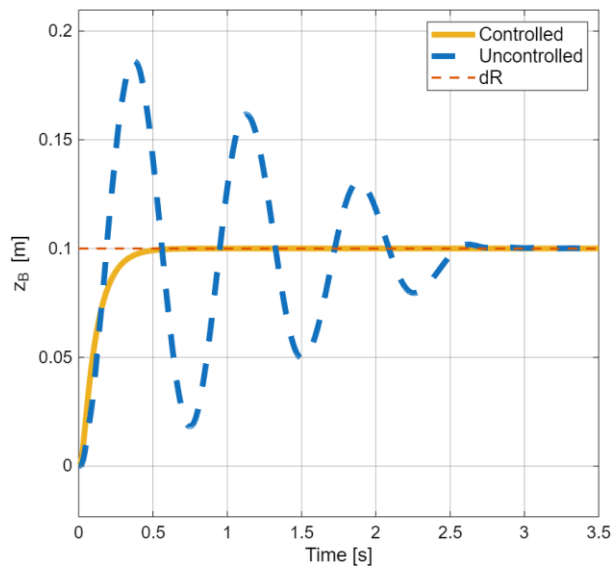
7. ábra Dinamikai modell állapotter-reprezentációja

Az állapotter-modellben a nemlineáris súrlódás egy FF függvényblokkal reprezentáltuk a B kimeneti mátrixból. A visszacsatolás dR értékei a LookupTable elemekben lévő politóp súlyfüggvények és az állapotok lineáris kombinációjából állnak elő.



8. ábra Dinamikai modell politopikus szabályozó visszacsatolása

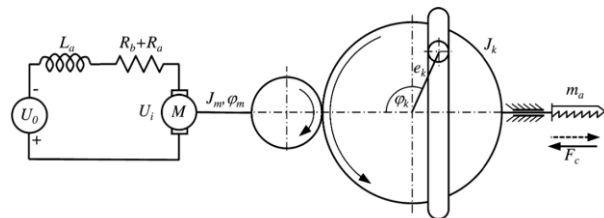
A dinamikai modell politopikus reprezentációjának csúcspontjaira (vertexeire) pólusallokációs módszerrel terveztünk egy-egy szabályozót. A vertexek közti tartomány állapotviszacsatolása ezen vertexek és súlyfüggvények tenzorszorzatából adódott. A szabályozó nélküli és a szabályozott rendszer karosszéria pozíciója a 9. ábrán látható. A hallgatóknak itt olyan általános megfigyelést kell tenniük, hogy a szabályozott rendszer stabilitása gyorsabban beáll, mint a nem szabályozotté. A szabályozótervezés egyéb részleteit más példákon keresztül ismerik meg.



9. ábra A szabályozó nélküli (szaggatott) és szabályozott (folytonos) rendszer karosszéria pozíciója

3.4. Kézi szűrőfűrész nemlineáris dinamikáinak politopikus modellezése qLPV modellezés felhasználásával

A politopikus modellezés, mint az adatalapú modellezés, az egyik zászlóshajó a szabályozótervezések során. A [9] cikkben említett példában egy kézi szűrőfűrész politopikus modellezése és a politóp átmenetek burokra gyakorolt hatása kerültek bemutatásra. A modellezett kézi szűrőfűrész sematikus felépítése a 10. ábrán látható.

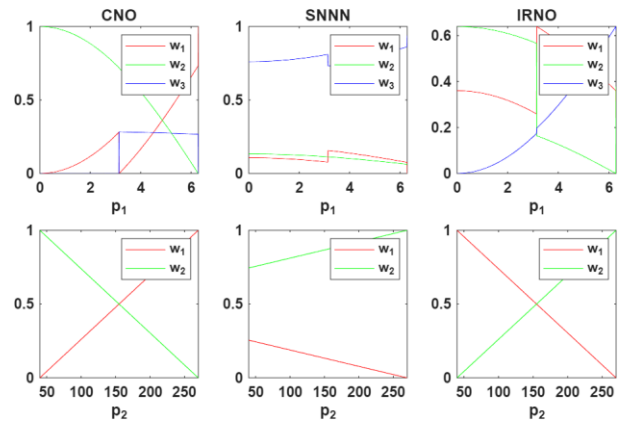


10. ábra Kézi szűrőfűrész sematikus felépítése

Baranyi Péter és munkatársai által létrehozott Matlab TPToolbox segítségével az LPV modell pontjait kiszámolva felhasználóbarátan lehet politopikus modelleket generálni. A folyamat lényege a magasabb rendű szinguláris érték felbontás (HOSVD), melynek segítségével egy tenzor felosztható vertex tenzorok és súlyfüggvényeik lineáris kombinációira [5]. A 11. ábrán a felbontást követő CNO, SNNN és IRNO típusú súlyfüggvények vannak. Ezek egyen egyenként tágabb és szűkebb politópot eredményeznek, melyek hatással vannak a szabályozótervezésre. Ebben a cikkben bizonyítottuk, hogy létezik sima átmenet* ezek között a politópok között a súlyfüggvények megfelelő kombinálásával.

*A sima átmenetet úgy lehet definiálni, hogy a politóp mérete az átmenet során a nagyobb buroktól a kisebb felé

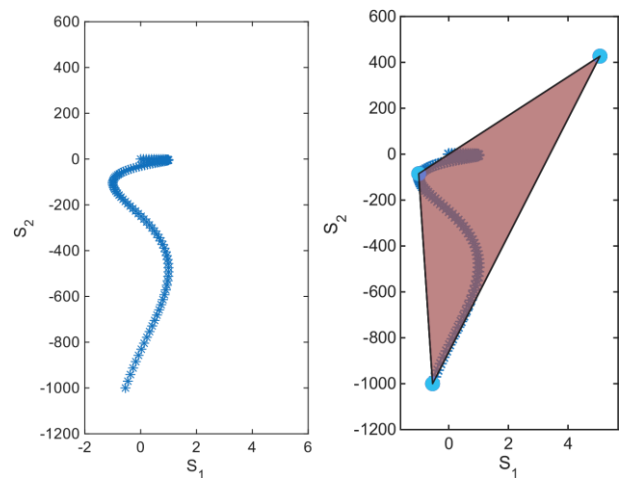
monoton csökken. A 11. ábrán a TP transzformációból adódó CNO, SNNN és IRNO politópokhoz kapcsolódó p_1 és p_2 paraméterek szerinti súlyfüggvények láthatóak.



11. ábra A TP felbontást követő CNO, SNNN, és IRNO típusú súlyfüggvények

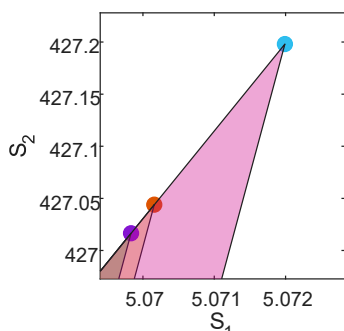
3.5. A politópok alakjának és méretének ábrázolási lehetőségei a TP átmenet alkalmazásával

A [10] cikkben egy térgörbe adatpontjaira illesztett politópokon mutattuk be a politópok méretmeghatározásának kérdéseit. A példát alkotó adatpontok és a rájuk illesztett CNO, SNNN és IRNO típusú politópok a 12. ábrán láthatóak.



12. ábra példát alkotó adatpontok és a rájuk illesztett CNO, SNNN, és IRNO típusú politópok

A politopikus modellezés egyik prominens alkalmazása a lineáris mátrix-egyenlőtlenséggel (LMI) tervezett szabályozók. Mivel az LMI szabályozótervezés során a politóp vertexei annak súlyfüggvényei nélkül vannak alkalmazva (a konvex optimalizáció természete miatt), így a burok mérete és alakja kulcsfontosságú a tervezett szabályozó szempontjából. A generált politópok jobb felső sarki vertex részlete a 13. ábrán látható.



13. ábra A generált politópok jobb felső sarki vertex részlete

A tanulmány fő konklúziója, hogy a politópok méretének valamilyen módú definiálása és értéke adott dinamikai rendszer burkainak összehasonlítására alkalmas, de a magas absztrakció miatt különböző rendszerek már nem összevethetőek. Ennek fő oka, hogy a burkok befoglaló hiperkockájának, vagy térfogatának meghatározása ugyan metrikát ad a politóp méretére, de nem lehet belőle egyértelműen következtetni arra, hogy a burok mennyire van "közel" a reprezentálandó adatpontokhoz.

3.6. Szimulációs módszerek szisztematikus összehasonlítása

Az eddig tárgyalt kutatások rövid összefoglalása segített megérteni példákon keresztül ezen módszerek sajátosságait. A továbbiakban szükségessé válik egy szisztematikus összehasonlítási rendszer ismertetése, mely segít a holisztikus megértésben.

Az 1. táblázat egységes szempontrendszerbe foglalja a cikkben bemutatott esettanulmányok módszereit és szoftvereit.

Általánosságban elmondható, hogy a modellezési eljárás egyszerűsítésével jellemzően romlik annak rugalmassága és fordítva is. További általános megfigyelés, hogy a költséghatékony szimuláció matematikához és géphez közelebb módszereknek érhető el. Ez igazolja azt, hogy az újabb ember közeli módszerek nem jobbak általánosságban, csak egyszerűségük miatt nagyobb publicitást kapnak.

1. táblázat A vizsgált modellezési és szabályozási környezetek összehasonlítása

Összehasonlítási szempont	AVL Cruise	MATLAB Simulink	MATLAB Simscape	TPToolbox (Politopikus mód.)
Modellezés megközelítése	Adataalapú / Makroszkopikus	Analitikus / Blokk-orientált (Jelfolyam)	Hibrid / Fizikai hálózat (Egyenletalapú)	Analitikusból transzformált / LPV
Modellépítés módja	Kész rendszerelemek paraméterezése, mérések illesztése	Matematikai differenciál-egyenletek és hatásvázlatok grafikus felírása	Komponensek fizikai topológia szerinti összekötése (tartományspecifikus)	HOSVD alapú tenzorfelbontás lineáris (LTI) vertexekre
Fő alkalmazási terület (a cikk alapján)	Hibridizáció, WLTP fogyasztásvizsgálat, hajtáslánc méretezés	Általános járműdinamika, klasszikus szabályozások (Powertrain Blockset)	Többfizikai rendszerek, valós idejű HIL tesztelés (ABS vizsgálatok)	Nemlineáris, robusztus szabályozótervezés (LMI alapokon)
Számítási kapacitásigény	Alacsony	Közepes	Magas (a merev egyenletek és nulla-átmenetek miatt)	Magas (tervezéskor), Alacsony (valós idejű futtatáskor)
Kiemelt előny	Gyors rendszerszintű elemzés iteratív mérésekkel	Átláthatóság, egyedi algoritmusok könnyű implementálása	Valóság-hű ág-csomópont reprezentáció, topológiai hűség	Garantált globális stabilitás a teljes nemlineáris tartományon
Kritikus korlát	Önvezetés vagy finomdinamika vizsgálatára nem alkalmas	Bonyolult fizikai kölcsönhatásoknál a felírás nehézkes	A hirtelen állapotátmenetek (pl. 0 km/h) szimulációs instabilitást okozhatnak	A paraméterek számával exponenciálisan nő a vertexek száma (dimenzióátok)

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Összefoglalva, a gépészeti rendszerek hatékony tervezésének alapját a megfelelő modellezési megközelítés kiválasztása képezi, amely egyensúlyt teremt a modell pontossága és a számítási erőforrások igénye között. A bemutatott példák rámutattak arra, hogy különböző alkalmazások – legyen szó járművekről vagy kisebb mechanikai eszközökről – eltérő modellezési stratégiákat igényelnek, amelyek az adott probléma komplexitásához és céljához illeszkednek.

Az ismertetett szoftverkörnyezetek, mint az AVL Cruise, a Matlab Simulink és Simscape, valamint a TPToolbox, jól szemléltetik, hogy a modern mérnöki gyakorlatban a több szinten történő modellezés és szimuláció elengedhetetlen. Külön kiemelhető a politóp alapú módszerek szerepe, amelyek lehetőséget biztosítanak nemlineáris rendszerek hatékony kezelésére és korszerű szabályozási eljárások alkalmazására.

A kutatás eredményei alapján megállapítható, hogy a megfelelően megválasztott modellezési és szabályozási eszközök jelentősen hozzájárulnak a tervezési folyamatok optimalizálásához, a fejlesztési idő csökkentéséhez, valamint a rendszerek megbízhatóságának és teljesítményének növeléséhez. A bemutatott módszerek és eszközök így releváns támogatást nyújtanak a jövő mérnöki kihívásainak kezelésében

5. SUMMARY

In summary, the basis for the effective design of mechanical systems is the selection of the appropriate modeling approach, which creates a balance between the accuracy of the model and the need for computational resources. The presented examples have shown that different applications – be it vehicles or smaller mechanical devices – require different modeling strategies that match the complexity and purpose of the given problem.

The described software environments, such as AVL Cruise, Matlab Simulink and Simscape, and TPToolbox, clearly illustrate that multi-level modeling and simulation are indispensable in modern engineering practice. The role of polytope-based methods can be particularly emphasized, which provide an opportunity to effectively handle nonlinear systems and apply modern control procedures.

Based on the results of the research, it can be concluded that properly selected modeling and control tools significantly contribute to the optimization of design processes, reduction of development time, and increase of system reliability and performance. The presented methods and tools thus provide relevant support in addressing future engineering challenges.

6. IRODALOM

- [1] Hans B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2012. doi: 10.1016/C2010-0-68548-8.
- [2] Lennart Ljung, “System Identification: Theory for the User,” *Prentice Hall information and system sciences series*, vol. 609, 1999.
- [3] J. S. Shamma, “An Overview of LPV Systems,” in *Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications*, Boston, MA: Springer US, 2012, pp. 3–26. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1833-7_1.
- [4] U. Kiencke and L. Nielsen, *Automotive Control Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. <https://doi.org/10.1007/b137654>.
- [5] P. Baranyi, “TP Model Transformation as a Way to LMI-Based Controller Design,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 387–400, Apr. 2004, <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.822037>.
- [6] D. Nemes and S. Hajdu, “Vehicle Dynamics Modelling of the Mercedes-Benz REFORM 501 LE Urban Bus by Using AVL Cruise Software,” 2023, pp. 793–798. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_65.
- [7] D. Nemes and S. Hajdu, “Mechanical Design and Simulation of Electric Vehicles for Sustainable Mobility,” 2025, pp. 737–746. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80512-7_72.
- [8] D. Nemes, R. Mikuska, S. Hajdu, and P. Korondi, “Poly Topic Model and Control of a Friction-Enhanced Quarter Vehicle (Education of Datadriven Modelling),” in *2025 IEEE 12th International Conference on E-Learning in Industrial Electronics (ICELIE)*, IEEE, Oct. 2025, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICELIE64733.2025.11244765>.
- [9] D. Nemes, “A Systematic Strategy for TP Modeling: A Use Case Study of the Jigsaw System.”
- [10] D. Nemes and S. Hajdu, “Possibilities for Representing the Shape and Size of Polytopes when Applying the Tp Transition,” Aug. 2026, pp. 259–265. <https://doi.org/10.4028/p-RA6j9q>.