

**Homlokkörmös kapcsolószerkezetek kapcsolási  
folyamatának optimalizálása nehéz haszonjárművek  
automatizált mechanikus sebességváltóiban**

Tézisfüzet

BÓKA GERGELY

Témavezető: Márialigeti János  
Külső témavezető: Palkovics László

Gépészeti tudományok (Járművek és mobil gépek) tudományszak

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Közlekedésmérnöki Kar  
Járműelemek és Hajtások Tanszék  
Budapest

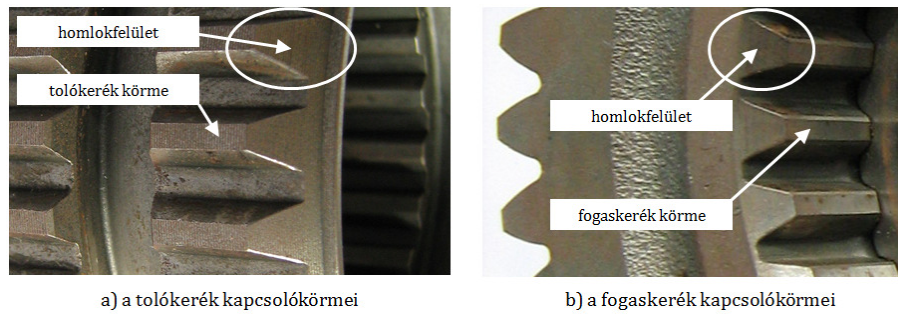
2011

# 1 Bevezetés és a kutatás célkitűzése

A száraz, súrlódó tengelykapcsolóból és mechanikus sebességváltóból álló automatizált hajtáslánccal (Automated Mechanical Transmission, AMT) felszerelt járművek egyre növekvő népszerűségnek örvendenek a nehéz haszonjármű kategóriában. Az automatizált sebességváltók a kézi kapcsolásúakhoz hasonlóan 3 váltószekcióból állnak, a főváltót felező és tartományváltó egészíti ki, ily módon négyszerezve meg a főváltó fokozatait, beleértve a hátramenetet is. A tengelykapcsolót és a kapcsolórudakat nem a vezető, hanem a hajtáslánc-irányító egység (Transmission Control Unit, TCU) által elektronikusan irányított beavatkozók működtetik. Mivel a sűrített levegő előállítása a fékrendszer miatt a járművön amúgy is megoldott, általában ez használatos a hajtáslánc elemek működtetésére is. A hajtáslánchoz kapcsolódó érzékelőkből származó (pl. tengelykapcsoló pozíció, kapcsolórudak helyzete, tengelysebességek, útemelkedési szög, stb.) és a jármű CAN kommunikációs hálózatán elérhető jelek feldolgozásával a TCU képes a jármű üzemi viszonyainak felismerésére. Az elektronikus motorirányítás rövid idejű felülbíráásával a TCU önállóan, a vezető beavatkozása nélkül határozza meg és kapcsolja az optimális sebességfokozatot.

A főváltóban található kapcsolószerkezetek kapcsolásához szükséges, legalább részleges fordulatszám-kiegyenlítés a motor, a tengelykapcsoló és a sebességváltó összehangolt irányításával a kapcsolószerkezetek egyedi, szinkronszerkezetekkel történő szinkronizálása nélkül is lehetséges. Sebességváltás alatt ugyanis a TCU az új fokozatban szükséges értékre hozza a motor fordulatszámát, ami éppen a váltó behajtó tengely teljesen szinkronizált fordulatszámának felel meg. A behajtó tengely sebessége pedig a tengelykapcsoló részleges vagy teljes zárásával gyorsan a motorfordulatszámhoz igazítható. Következésképpen, a kézi kapcsolásúaktól eltérően, az automatizált sebességváltók főváltója nem egyedileg, hanem központilag szinkronizált körmös kapcsolószerkezeteket tartalmaz. Az egyedi szinkronszerkezetek elhagyása csökkenti a bonyolultságot és a beépítési helyet, valamint növeli a fajlagos teherbírást azáltal, hogy lehetővé teszi a fogaskereke fogszélességének növelését ugyanazon hajtóműházon belül. Azonban még a legkorszerűbb motorfékkel felszerelt motorok is lassabban ejtik a fordulatszámot, mint ahogyan növelik. Felváltáskor, illetve üresből történő sebességváltáskor ezért – amikor a szinkronizált fordulatszám eléréséhez a behajtó tengely fékezése szükséges – a sebesség csökkentését egy különálló, a TCU által működtetett beavatkozó, az ún. előtettengely-fék segíti vagy végzi önállóan.

A körmös kapcsoló egy egyszerű, két elemből álló kapcsolószerkezet, amely kapcsolókörmök segítségével, alakzáró módon rögzíti a fogaskereket a tengelyéhez. Az első elem, melyet kialakítástól függően tolókeréknek vagy kapcsolóhüvelynek nevezünk, a tengellyel együtt forog, ahhoz képest csupán hosszirányban mozgatható a megfelelő kapcsolóvilla segítségével. A második kapcsolóelem általában a fogaskerékkel van egybeépítve. A fogaskerék rögzítése a tengelyhez, vagyis a kapcsolódás a kapcsolókörmökön keresztül valósul meg, amikor a tolókerék a megfelelő axiális helyzetben van. A kapcsolófogak kialakítása szerint a körmös kapcsolók két alcsoportba sorolhatók: standard- és homlokkörmös kapcsolószerkezetek. A kutatás tárgyát képező homlokkörmös kapcsolószerkezetek kapcsolókörmői lapos homlokfelülettel rendelkeznek, így a körmök a kapcsolódás előtt képesek elcsúszni egymáson (1. ábra).



1. ábra. A vizsgált homlokkörmös kapcsolószerkezet

A technika mai állása szerint a hajtáslánc irányító szoftverek a kapcsolódó elemek fordulatszám-különbségének csökkentésére összetett algoritmusokat tartalmaznak, melyek biztosítják, hogy a kapcsolódás egy előre meghatározott, a minőségi és élettartam elvárásokat teljesítő, szinkronizált állapotnak tekintett fordulatszám-különbség ablakban történjék meg. Az optimális fordulatszám-különbség ablakot egyfelől a kapcsolódás utáni nyomatékklengések alacsony tartása határozza meg, másfelől az ún. fog-a-fogon felakadások elkerülése, melyek olyankor alakulnak ki, amikor a kapcsolódás előtt egymáson elcsúszó homlokkfelületek közötti súrlódás még a kapcsolódás előtt felemészteti a fordulatszám-különbséget, és így a kapcsolóelemek a tolókerék részleges lökete mellett, nyomatékátvitelre nem alkalmas állapotban, de már véglegesen együtt forognak tovább.

A központilag szinkronizált kapcsolószerkezetek kapcsolásának minősége az egész sebességváltási folyamat szempontjából döntő jelentőségű, és így az egyre növekvő vevői elvárások miatt folyamatos fejlesztést igényel. A szinkronizált állapot fordulatszám-különbség ablakként való értelmezése azonban csupán a körmös kapcsolók más autóiipari alkalmazásaiból került átvételre, és nem veszi figyelembe a nehéz haszonjármű sebességváltókban az előtétengely-fék működtetéséből következő lényegileg eltérő üzemi körülményeket. Egy előre definiált fordulatszám-különbség ablak bizonyos esetekben túl magas és így a megnövekedett kapcsolási zaj mellett a kapcsolószerkezet szükségtelenül magas mechanikai terhelését, és így fokozott kopását okozza, máskor pedig túl alacsony és a kapcsolódás sikertelenül, a már említett fog-a-fogon felakadással végződik.

E disszertáció célkitűzése a holmokörmös kapcsolószerkezetek kapcsolódásának mélyreható vizsgálata, különös tekintettel az előtétengely-fék működtetés befolyásoló hatására. Ezek alapján az optimális kapcsolódási körülmények egy új, továbbfejlesztett értelmezését adjuk meg azon sebességváltások esetére, melyek előtétengely-fék működtetést igényelnek. Az új definíciónak a kapcsolódáshoz szükséges fordulatszám-különbség és ily módon mechanikai terhelés, illetve ebből következően a kapcsolási zaj csökkentése mellett a fog-a-fogon felakadást is meg kell előznie.

## 2 A kutatás fő lépései, eredmények

A célkitűzésnek megfelelően, a fog-a-fogon felakadások kialakulásának vizsgálatához először a körmös kapcsolószerkezet mechanikai modellje került felépítésre, amely a kapcsolódási jelenségeket a homloksúrlódási fázissal bezárólag tartalmazza. A kapcsolódásnak bizonyos fordulatszám-különbségek mellett tapasztalható váltásról váltásra eltérő kimenetelét a kapcsolódó elemek egymáshoz viszonyított kezdeti szöghelyzetének változása okozza. A kapcsolódás nem determinisztikus kimenetelét a kezdeti szöghelyzet egyenletes eloszlású valószínűségi változóként történő kezelésével vettük figyelembe. A kapcsolódási képességet a kapcsolódás-valószínűségi görbével jellemeztük, amely a sikeres kapcsolódás valószínűségét adja meg a fordulatszám-

különbség függvényében. A redukált behajtó és kihajtó oldali tehetetlenségek hatásának bemutatásával magyarázatot adtunk ugyanannak a kapcsológeometriának a különböző sebességfokozatok kapcsolásakor jelentkező eltérő kapcsolódási képességére, illetve a tesztpadi és járműves alkalmazások közötti különbségekre.

A számítási eredmények tesztpadi mérésekkel kerültek validálásra. A kutatás során használt sebességváltó próbapad egy nehéz haszonjármű automatizált sebességváltóból és a ki-, illetve behajtó tengelyre szerelt elektromotorokból áll. A tengelykapcsoló szintén része a hardware-körnek, de nincs a behajtótengelyre szerelve. Az elektromotorok sebessége egy valós idejű hosszirányú járműmodell jeleinek megfelelően kerül szabályozásra. A sebességváltó és a tengelykapcsoló teljes funkcionalitással működik egy kifejezetten teszt célokra fejlesztett hajtáslánc irányító szoftvernek köszönhetően. A vizsgált sebességváltó körmös kapcsolószerkezeteinek kapcsolódási valószínűség függvénye egy több, mint 5000 kapcsolásból álló mérési sorozat segítségével került felvételre, a nagy számok törvénye alapján történő statisztikai kiértékelésből. A számított és mért eredmények között jó összhang volt megállapítható.

A körmös kapcsolószerkezet mechanikai modellje ezt követően az előtétengely-fék részletes mechanikai – pneumatikus modelljével került kiegészítésre abból a célból, hogy feltárjuk a megelőző előtétengely-fék működtetés kapcsolódásra gyakorolt hatását. A sebességváltó behajtó oldali súrlódási veszteségeit szintén figyelembe vettük. A kiegészített modellt algebrai és differenciálegyenletek rendszere alkotja, melyet MATLAB/Simulink szimulációs környezetben implementáltunk. Az ismeretlen paraméterek identifikálása, valamint a modell validálása mérési eredmények alapján történt. A kapcsolódás-valószínűségi függvényt az előtétengely-fék nyomás mint második változó felvételével felületté általánosítottuk. A fordulatszám-különbség – előtétengely-fék nyomás grafikonon egy olyan terület került azonosításra, amely 1-nél alacsonyabb kapcsolódás-valószínűségi értékekkel rendelkezik, ezt a területet a kapcsolódás szempontjából bizonytalan területnek nevezzük. A bizonytalan terület alakjának változását részleteiben megvizsgáltuk, és a változás jellege szerint a jármű három üzemállapotát – álló, lassan mozgó és mozgó – különböztettük meg.

A homlokkörmös kapcsolószerkezet előtétengely-fék működtetés utáni kapcsolódási jellemzőire vonatkozó számítási eredmények alapján finomításra került a szinkronizált állapotnak a technika mai állása szerinti meghatározása. Az optimális kapcsolódási feltételeket a fordulatszám-különbség – előtétengely-fék nyomás grafikonon azon területeként értelmezzük, amely a lehetséges legkisebb fordulatszám-különbség értékek mellett, de már kívül esik a bizonytalan területen. A kapcsolódás utáni nyomatéklingéseket ily módon a fog-a-fogon felakadás kizárása mellett csökkentettük a technika mai állásához képest.

Végezetül, az új definíció gyakorlati alkalmazhatóságának bizonyítására egy szinkronizáló algoritmus került kifejlesztésre, és egy nehéz haszonjármű automatizált sebességváltó hajtáslánc-irányító szoftverében implementálásra. Az algoritmus numerikusan generált jelleggörbéken alapszik, melyek a kontrol logikában kerülnek eltárolásra, így az rugalmasan és gyorsan alakítható különböző sebességváltó típusokhoz. A kifejlesztett eljárás képes az előtétengely-fék alkalmas irányításával biztosítani, hogy a körmös kapcsolószerkezet kapcsolódása az új definíció szerinti szinkronizált állapotban történjék meg, ily módon igazolja az új definíció alkalmazhatóságát, melyet tesztpadi és járműves mérések segítségével igazoltunk.

### 3 Gyakorlati hasznosítás, további munka

A szinkronszerkezettel nem rendelkező homlokkörmös kapcsolószerkezet kapcsolódásának optimalizálásában elért új eredmények, azaz a kapcsolódási feltételek kedvezőbb definíciója, illetve az erre épülő szinkronizáló algoritmus gyakorlati alkalmazása a sebességváltás minőségének közvetlen javulását, illetve a komponens élettartamának növekedését eredményezi. További lépésként, a szinkronizált állapot hasonló, továbbfejlesztett értelmezése adható a körmös kapcsolószerkezetek másik alaptípusára is. A standard körmös kapcsolók esetén a kapcsolódást fog-a-fogon felakadás vagy fogátugrás esetén tekinthetjük sikertelennek, az utóbbi eset, amikor a kapcsolóköröm átugrik a következő fogárokba, ugyan nem igényel újbóli kapcsolódási kísérletet, de recsegéssel és a kapcsolókörmök fokozott kopásával jár.

### 4 Tézisek

A disszertáció új tudományos eredményei az alábbi tézisekben foglalhatók össze. A vonatkozó publikáció 5. fejezet szerinti száma a tézis után, zárójelben található meg.

- 1. tézis** Felépítésre került a homlokkörmös kapcsolószerkezet és az előtéttengely-fék kapcsolt mechanikai – pneumatikus modellje azzal a speciális céllal, hogy segítségével a nehéz haszonjármű automatizált mechanikus sebességváltóba épített kapcsolószerkezet kapcsolódási képességét vizsgáljuk ([P2], [P4], [P5]).
1. A modell algebrai és differenciálegyenletek rendszeréből áll, és a fogaskerékre, illetve a tolókerékre redukálva a hajtáslánc összes elemét tartalmazza.
  2. A modell egyetlen bemenete az előtéttengely-fék mágnesszelepének parancsa. A modell kimenetei az előtéttengely-fék nyomás, a fogaskerék és a tolókerék fordulatszám, és nem szokványos kimenetként a sikeres, fog-a-fogon felakadás nélküli kapcsolódás valószínűsége.
  3. A modell ismeretlen paramétereit a legkisebb négyzetek módszere segítségével, a folytonos idejű modell és diszkrét idősorokként rendelkezésre álló tesztpadi mérési eredmények alapján identifikáltuk.
  4. Az identifikált modellt független mérések segítségével validáltuk, a kapcsolódási valószínűségekre vonatkozó eredmények sajátosan, nagyszámú mérés statisztikai kiértékelésével kerültek ellenőrzésre, a nagy számok törvényének felhasználásával.
  5. Nem szokványos szimulációs célok eléréséhez a mechanikai modellt fordított idejű modellé alakítottuk, amely a fizikai folyamatokat az időben *visszafelé* haladva modellezi.
- 2. tézis** A körmös kapcsolószerkezet kapcsolódási képességét a sikeres kapcsolódás valószínűségével jellemezve az előtéttengely-fék működtetést igénylő sebességváltásoknál jelentkező kapcsolódási képesség leírásához bevezettük a kapcsolódás-valószínűségi felületet ([P4]).
1. A kapcsolódás-valószínűségi felület a sikeres, fog-a-fogon felakadás nélküli kapcsolódás valószínűségét adja meg a kapcsolódáskor érvényes fordulatszám-különbség és előtéttengely-fék kamranyomás függvényében.
  2. Bizonyos üzemi körülmények között a kapcsolódás-valószínűségi felületen egy 1-nél kisebb valószínűségű terület azonosítható, amelyet a kapcsolódás

szempontjából bizonytalan területnek nevezzük, mivel nem biztosítja a kapcsolódás sikeres kimenetelét.

3. Megmutattuk, hogy a bizonytalan terület alakja függ a kapcsolt sebességfokozattól, valamint a sebességváltás után érvényes behajtó tengely fordulatszámától, melyet a kapcsolódás-valószínűségi felület paraméterének tekintünk. A bizonytalan terület változásának jellege alapján a jármű három üzemállapotát különböztettük meg: álló, lassan mozgó, valamint mozgó jármű.

### 3. tézis

A 2. tézis alapján új, továbbfejlesztett meghatározást adtunk a körmös kapcsolószerkezet szinkronizált állapotára, amely a technika jelenlegi állásához képest a fog-a-fogon felakadás veszélye nélkül javítja az előtéttengely-fék működtetést igénylő váltások komfortját ([P3], [P4]).

1. A szinkronizált állapot, vagyis az optimális kapcsolódási feltételek összetett alakú területként jelentkeznek a fordulatszám-különbség – előtéttengely-fék kamranyomás grafikonon, amely terület függ a bizonytalan zónától és így a jármű üzemállapotától.
2. Álló jármű esetén a szinkronizált állapotot a következő definíció határozza meg:

$$S = \{(\Delta\omega_1, p_{csb}) \mid P(\Delta\omega_1, p_{csb}) = 1 \wedge T_{tor,max}(\Delta\omega_1) \leq T_{lim}\}$$

Az elemek közötti játék hatásának kiküszöböléséhez, és ez által a váltási zaj további csökkentéséhez mozgó jármű esetén a szinkronizált állapotot negatív fordulatszám-különbségekre korlátozzuk:

$$S = \{(\Delta\omega_1, p_{csb}) \mid P(\Delta\omega_1, p_{csb}) = 1 \wedge T_{tor,max}(\Delta\omega_1) \leq T_{lim} \wedge \Delta\omega_1 < 0\}$$

3. A szinkronizált állapot új definíciója a technika mai állásához képest lehetővé teszi a kapcsolódás utáni nyomatékklengések lehetséges csúcsértékének csökkentését, és a fog-a-fogon felakadások megelőzésével mindig biztosítja a kapcsolódás sikeres kimenetelét.

### 4. tézis

A szinkronizált állapot új, 3. tézis szerinti meghatározásának gyakorlati alkalmazhatóságát egy létező nehéz haszonjármű automatizált sebességváltóhoz kifejlesztett, jelleggörbe alapú szinkronizáló algoritmus segítségével bizonyítottuk ([P3]).

1. A szinkronizált állapot továbbfejlesztett meghatározásának implementálása a létező nehéz haszonjármű automatizált sebességváltó irányító szoftverébe hardveres átalakítás, illetve az előtéttengely-fék mágnesszelepének kapcsolási számának növelése nélkül lehetséges volt.
2. A kifejlesztett algoritmus a jármű üzemállapota szerint két al-algoritmusból áll. Az álló, illetve mozgó járműhöz kifejlesztett al-algoritmusok numerikusan generált, majd a logikában eltárolt jelleggörbéken alapulnak, és együttesen lefedik az előtéttengely-fék működtetésének minden lehetséges esetét.
3. A járművet a szinkronizálás szempontjából akkor tekintjük mozgónak, ha az legalább a kapcsolt fokozathoz tartozó zárasi sebesség felével halad. Ennél alacsonyabb sebességnél a járművet a szinkronizálás szempontjából állónak tekintjük.
4. A szinkronizáló algoritmus működését tesztpadi és járműves mérések segítségével ellenőriztük.

## 5 Publikációk

### 5.1 A tudományos eredményekhez közvetlenül kapcsolódó publikációk

A disszertáció tudományos eredményei az alábbiak szerint kerültek konferenciákra, illetve folyóiratokban közzé. A 2010. évi FISITA Autóipari Világkonferencián bemutatott [P3] jelű publikációt a Federation Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile (FISITA) „Outstanding Paper Award” díjjal tüntette ki.

- [P1] Bóka, G., Márialigeti, J., Lovas, L. és Trencsényi, B. External synchronization strategies for automated mechanical transmissions with face dog clutch and countershaft brake. Buletin Stiintific-Universitatea Din Baia Mare-Seria C Fascicula Organe De Masini Tribologie Constructii De Masini XXIII: pp. 75-80. (2009)
- [P2] Bóka, G., Márialigeti, J., Lovas, L. és Trencsényi, B. Automatizált nehéz haszonjármű sebességváltó elektro-pneumatikus előtétengyelfékének modellezése. *GÉP LX:(10-11) pp. 18-21.* (2009)
- [P3] Bóka, G., Trencsényi, B. és Németh, H. Look-up Based Synchronizer Logic for the Effective Actuation of the Countershaft Brake in a Heavy duty AMT with Face Dog Clutch. In: Proceedings of FISITA World Automotive Congress 2010. Budapest, Hungary, GTE, pp. 1-6. Paper F2010C097 (2010), ‘Outstanding Paper Award’ díjjal kitüntetve
- [P4] Bóka, G., Lovas, L., Márialigeti, J. és Trencsényi, B. Engagement capability of face-dog clutches on heavy duty automated mechanical transmissions with countershaft brake. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, 224 (D9), pp. 1125-1139. DOI 10.1243/09544070JAUTO1435 (2010)
- [P5] Bóka, G., Márialigeti, J., Lovas, L. és Trencsényi, B. Face dog clutch engagement at low mismatch speed. Periodica Polytechnica Ser. Trans. Eng. 38/1 pp. 29-35. (2010)

### 5.2 A tudományos eredményekhez közvetve kapcsolódó publikációk

Az alábbi publikációk nem tartalmazzák a disszertáció tudományos eredményeit, de szorosan kapcsolódnak a kutatási témához és hivatkozásokként szerepelnek a dolgozat szövegében.

- [P6] Bóka, G. és Lovas, L. Szinkronszerkezet rugós központosító mechanizmusainak hatása a kapcsolóhüvely axiális dinamikájára. *GÉP LIX:(10-11) pp. 7-10.* (2008)
- [P7] Bóka, G., Trencsényi, B., Németh, H. és Palkovics, L. Elektromechanikus működtetőegység fejlesztése automatizált nehézhaszonjármű-sebességváltóhoz. *A Jövő Járműve 2010: (1-2) pp. 64-69.* (2010)
- [P8] Bóka, G., Trencsényi, B., Németh, H. és Palkovics, L. Hajtáslánc irányító funkciószoftver fejlesztése automatizált nehéz haszonjármű sebességváltóhoz. *A Jövő Járműve 2010: (3-4) pp. 46-52.* (2010)