

Személygépjármű futómű modellezése újszerű felfüggesztés szabályozási rendszerek tervezéséhez

Varga Balázs*, Németh Balázs**

*BSc hallgató, BME Közlekedésautomatikai Tanszék

**PhD hallgató, BME Közlekedésautomatikai Tanszék, Budapest, Bertalan L. u. 2.
Hungary (Tel: +36-1-463-3089; e-mail: bnemeth@sztaki.hu).

Absztrakt: A cikk célja egy személygépjármű menetdinamikát javító felfüggesztési rendszer szabályozótervezésének előkészítése. A rendszer egy valós jármű háromszög-trapéz első futóműve alapján kerül megvalósíthatósági vizsgálat és előtervezés alá. A szabályozás alapja egy a futóműbe épített aktív elem segítségével a kerékdőlés befolyásolása, amellyel befolyásolható a jármű oldaldőlése és ívmeneti stabilitása.

MOTIVÁCIÓ ÉS BEVEZETÉS

A közúti közlekedésben a nagy teljesítményű személygépjárművek terjedésével szükségessé vált korszerű futóművek fejlesztése. Ennek fő oka a vezetési élmény, a kényelem és nem utolsósorban a biztonság javítása. Napjainkban egyre több tudományos cikk, kutatóintézet, illetve autópári szereplő foglalkozik aktív, menetdinamikát javító rendszerekkel (Trachtler (2004.); He *et al.* (2006); Yu *et al.* (2008); Gáspár *et al.* (2012))

Ezek közül, egy még nem teljesen feltérképezett terület a változtatató geometriájú futómű, amely lényege, hogy egy hidraulikus elem segítségével a futómű lengőkarjainak bekötési pontjainak helyzete kis mértékben változtatható, ennek segítségével változtatva a kerékdőlési szöget, amely megfelelő szabályozás esetén javítja a jármű stabilitását, például ívmenetben. Egy ilyen szabályozás előnye az egyszerű mechanikai kialakítás, az alacsony energiaigény, ezáltal az alacsony költség.

A futóműbe való beavatkozás jelentősége az, hogy a jármű lényeges statikus és dinamikus paramétereit közvetlenül lehetséges befolyásolni, mint például a momentán centrum magasságát, nyomtávvaltozást.

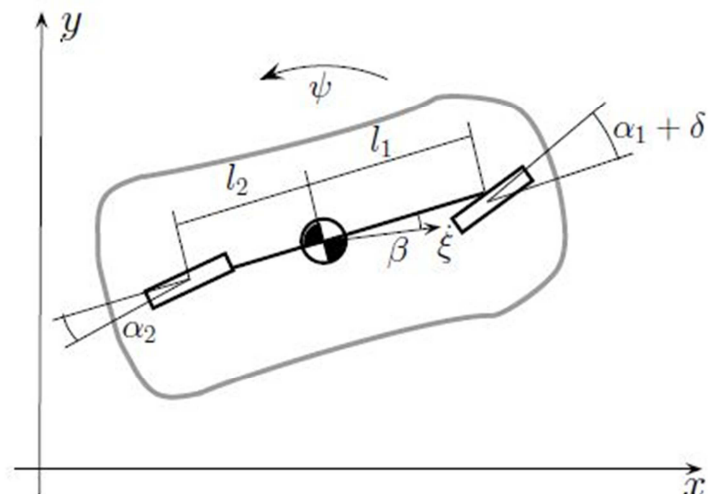
A szabályozás alapja egy háromszög-trapéz kialakítású (kettős keresztlengőkaros) kormányzott első futómű. A választás azért erre esett, mert a kettős keresztlengőkaros futómű, vagy annak változatai elterjedtek a felső kategóriás járművek körében, ezenfelül a hagyományos passzív konstrukció könnyen átalakítható szabályozott futóművé.

Változtatható geometriájú és aktív futóművek szabályozásával több szakirodalom is foglalkozik, mint például Lee *et al.* (2006), Sharp (1998), Fallah *et al.* (2009), a hazai kutatók közül Németh&Gáspár (2011), Bokor *et al.* (2008).

A cikk felosztása a következő: a szabályozási rendszer tervezésének alapjául szolgáló modell bemutatása után egy valós gépjármű kerül bemutatásra, aminek első futóműve kerül a későbbiekben elemzésre, végül pedig a szabályozási rendszer előkészítésének utolsó modellezési lépéseként a futómű karakterisztikák lesznek bemutatva.

2. GÉPJÁRMŰ SZABÁLYOZÁSI CÉLÚ MODELLEZÉSE

Ebben a fejezetben a jármű keresztirányú dinamikájának állapotter reprezentációja kerül bemutatásra. A modell alapja a kerékpár modell, ami figyelembe veszi a jármű hossz- és keresztirányú dinamikáját, illetve a legyezőmozgást.



1. ábra: Kerékpár modell

A kerékpármodell a gépjármű keresztirányban ható dinamikai egyenletein alapszik:

$$J\ddot{\psi} = C_1 l_1 \alpha_1 - C_2 l_2 \alpha_2 - C_{2,\gamma} l_2 \gamma \quad (1)$$

$$mv(\dot{\psi} + \beta) = C_1 \alpha_1 + C_2 \alpha_2 + C_{2,\gamma} \gamma \quad (2)$$

Ahol J a jármű legyezési inerciája, l_1 és l_2 geometriai paraméterek C_1 és C_2 kanyarodási merevségek, ψ a legyezési szög, β az oldalirányú kúszási szög. A kerekek kúszási szögei pedig: $\alpha_1 = -\beta + \delta - l_1 \cdot \dot{\psi}/\dot{\epsilon}$ és $\alpha_2 = -\beta + \delta + l_2 \cdot \dot{\psi}/\dot{\epsilon}$.

A kerekek keresztirányú dinamikája és a kerékdőlési szög szintén lényeges a modellben. A Pacejka-féle Magic formula jól leírja a kerékdőlés hatását a keresztirányú kerékerőre, Pacejka (2004).

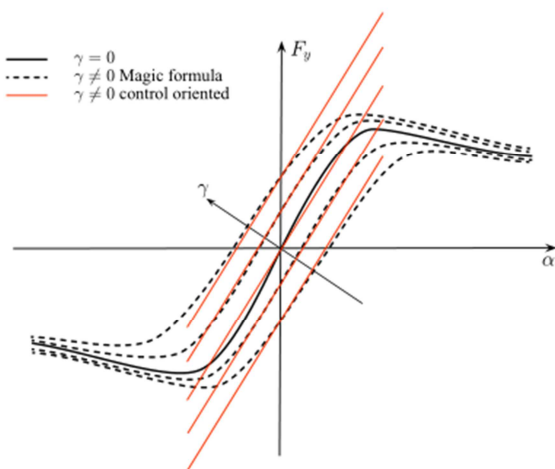
A Magic formula általános alakja a következő:

$$F_y = D_y \sin\{C_y \tan^{-1}[B_y \alpha - E_y(B_y \alpha - \tan^{-1}(B_y \alpha))]\} \quad (3)$$

ahol B_y , C_y , D_y , E_y a modell paraméterei, α pedig a kerék oldalcsúszási szöge.

A 2. ábrán szaggatott vonallal látható az $F_y(\alpha)$ görbék változása a kerékdőlési szög változásának hatására. Ezek a görbék kis kúszási szög esetén linearizálhatók (piros vonalak).

$$F_y = C\alpha \quad (4)$$



2. ábra: Kerékdőlés járműdinamikai hatása

A kerékdőlést is figyelembe véve a (4) egyenlet az alábbira módosul:

$$F_y = C\alpha + C_\gamma \gamma \quad (5)$$

ahol C_γ az eltolódást kifejező együttható, γ pedig a kerékdőlési szög.

3. VALÓS GÉPJÁRMŰ PARAMÉTEREK FELVÉTELE

A korszerű futómű szabályozó rendszer konstrukciós lehetőségeinek és a későbbiekben a szabályozás tervezéséhez egy valós járművet vettünk alapul. A választott jármű egy

BMW 520d (F10). A választás azért erre a járműre esett, mert a BMW képviseli azt a piaci szegmenst ahol egy ilyen rendszer megvalósításának lehet létjogosultsága, mert esetlegesen kiegészítheti vagy akár ki is válthatja a hasonló célt megvalósító aktív kormányzást másrészt mivel egy hátsókerék meghajtású járműről beszélünk így az első futóműnél több hely van egy beavatkozó beépítésére.

3.1 Gépjármű általános bemutatása

A választott gépjármű 1995cm³ hengerűrtartalmú, 4 hengeres soros hengerelevezésű, közvetlen befecskendezésű TDI motorral szerelt, melynek maximális teljesítménye 135 kW (184 LE). Maximális nyomatéka 380 Nm. A hajtáslánc része a 8 sebességes automata Steptronic váltó, amelyet több felső kategóriás járműben is használnak. A gépjármű hátsókerék-meghajtású.

A vizsgált gépjármű számos kényelmi és biztonsági rendszerrel rendelkezik, mint például: ABS, Brake Assist, Dynamic Traction Control, Dynamic Stability Control, oldallégzsák, vezető- és utasoldali légzsák, függönylégzsák, parkolást segítő rendszer (Park Distance Control), ülésfűtés, automatikus klíma.



3. ábra: Az alapul vett valós gépjármű

3.2 Futóművek bemutatása

Az első futómű kettős keresztlengőkaros, az alsó lengőkar, a szokványostól eltérően két elemből áll (dual ball joint suspension). Egy vezető- és tartó lengőkarból. A felső lengőkar rövidebb, mint az alsó kettő, (short long arms suspension (SLA)) ezzel a jármű oldaldőlése esetén a kerékdőlés értéke kis mértékben változik, amely növeli ívmenetben a talajjal érintkező felületet, ezáltal jobb tapadást és kanyarodási képességet biztosítva a járműnek, a gumik túlzott kopása nélkül. Hátránya a hagyományos háromszög-trapéz futóműhöz képest nagy helyigénye illetve, hogy a lengőkarokban nagy igénybevétel ébred.

A hátsó futómű egy multi-link felfüggesztés, annak tágabb értelmezésében. A BMW saját fejlesztésű, Integral V elnevezésű futóműve aktív hátsókerék kormányzással (HSR) amely a hátsó kerekek kismértékű (3,5°) elfordulását teszi

lehetővé.

A futómű főként alumínium alkatrészekből készült, alapja a 7-es sorozatban megvalósított rendszer. A futómű hordozó hegesztett alumínium elemekből készült és négy nagyméretű gumiagyazáson csatlakozik a kocsiszekrényhez. Ennek célja a jobb kényelem megvalósítása és a zaj csillapítása. Ezzel együtt keresztirányban merev, a kerekek jobb szabályozhatósága miatt. A kérékagyul alul egy H alakú elemen, felül pedig egy lengőkaron és az aktív kormányzáshoz szükséges nyomtávrúdon keresztül csatlakozik az alvázszerkezethez. A kérékagyon ébredő erőket a köztes (integral) lengőkar viseli ezért az alsó elem további csavaró igénybevételnek van kitéve. Ez a kialakítás lehetővé teszi a hosszirányú rugalmasságot anélkül, hogy az ébredő nyomtatók igénybe vennék az ágyazásokat, mint abban az esetben, ha a nyomtatókat két hosszirányú lengőkar venné fel.

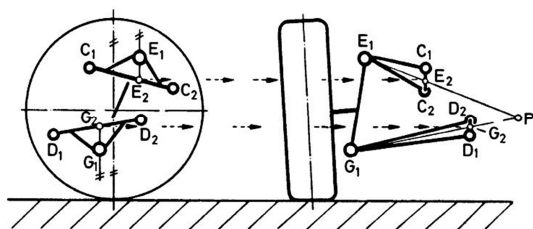
4. FUTÓMŰ KARAKTERISZTIKA SZERKESZTÉSE

Az előző fejezetben bemutatásra került a választott valós gépjármű. Mérések segítségével a futómű konstrukciós paraméterei rögzítésre kerültek, ebben a fejezetben ezek alapján a szabályozási célra igénybe venni kívánt első futómű három jelentős karakterisztikáinak szerkesztésének bemutatása történik: momentáncentrum helyzete, kerékdőlés, nyomtávvaltozás.

4.1 Első tengely feletti momentáncentrum szerkesztése

Az első momentáncentrum meghatározásához a futómű összetettsége miatt külön megfontolásokat kell tenni:

A BMW első futóművei jellemzően nagy utánfutási szöggel rendelkeznek amely csökkenti a kerekek szitalását. Az utánfutás (csapdőlés) miatt a lengőkar szemből nézve szögben látszik, tehát úgy tűnik mintha két lengőkar csatlakozva egy pontba. Ebben az esetben a 4. ábrán látható módon kell meghatározni a virtuális bekötési pontokat. Először az E1 és G2 pontokon keresztül függőlegest húzva a C1, C2 és D1, D2 pontokat összekötő egyeneshez. A két egyenes metszéspontját (E2, G2) vesszük a lengőkar virtuális csatlakozási pontjának. Az E1E2 és G1G2 egyenesek metszéspontja (P) lesz az instant centrum. Reimpell (2001)



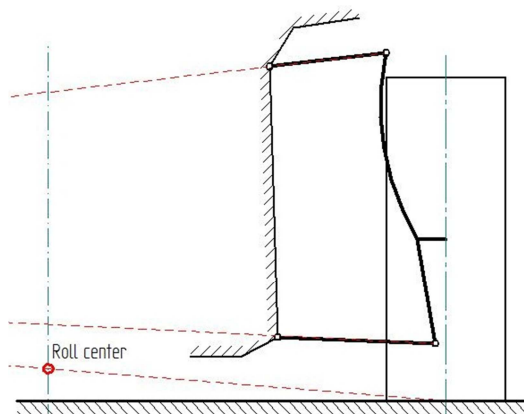
4. ábra: Szabályozandó első futómű vázlata

A dual ball suspension felfüggesztés esetén az alsó lengőkarok virtuális bekötési pontja a két lengőkar bekötési pontjai által meghatározott egyenesek metszéspontjába kerül.

Ez csak a csapterpesztést befolyásolja, a felső lengőkar síkját nem. Az alsó két lengőkar egymáshoz közel levő vízszintes síkban található. Ebben az esetben az alsó lengőkar síkja vehető a két lengőkar közös síkjának (Mark(2011))

Az instant centrum a fent leírtak alapján már könnyen meghatározható. Az instant centrum és a kerék középvonalához húzott egyenes és a jármű középvonala által kijelölt pont lesz az első momentáncentrum (5. ábra).

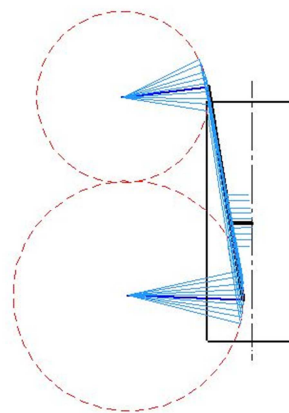
A momentáncentrum magassága a szerkesztés alapján megközelítőleg 64 mm.



5. ábra: A momentáncentrum

4.2 Kerékdőlés változási karakterisztika

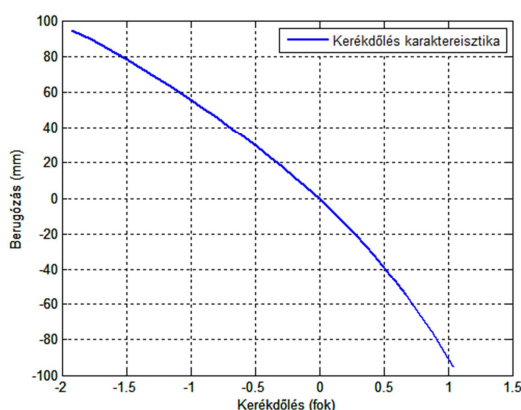
A 4.1. fejezet alapján meghatározott egyszerűsített futómű modell segítségével meghatározhatók a szükséges karakterisztikák. A kerékdőlés karakterisztika a 6. ábrán látható szerkesztés alapján a futómű több pozíójában meghatározható az adott helyzetben a kerékdőlési szög. A kerék berugózása során a lengőkarok a pirossal jelölt kör körül fordulnak el, ekkor a kényszerek miatt változik a középső elem, amely a keréktartó elemet szimbolizálja, színén elfordul, amely elfordulás azonos lesz a kerékdőlés változásával.



6. ábra: Kerékdőlési karakterisztika szerkesztése

Háromszög-trapéz futómű esetén a kerékdőlési szög megegyezik a csapteresztési szög változásával. Reimpbell (2001). Így 30 mért pontra polinomot illetve meghatározható a kerékdőlés változás karakterisztika. A megfelelő pontosság eléréséhez 4-ed fokú polinom szükséges, melynek egyenlete (6), (ahol γ a kerékdőlés, x a berugózás értéke):

$$\gamma = -1,6056x^4 - 6,2641x^3 - 15,2677x^2 - 66,9376x - 0,3544 \quad (6)$$



7. ábra: Kerékdőlés változási karakterisztika

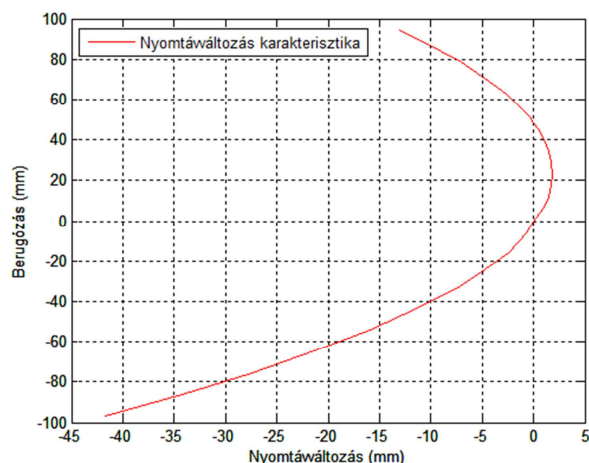
Az egyes futómű kialakításokra jellemző, hogyan változik a kinematikájuk. Az egyik kinematikai paraméter a kerékdőlés. A kerék ki- és berugózása során a kerékdőlés változni fog, ami meghatározza a járműdinamikai viselkedését is. Cél, hogy növeljük a jármű stabilitását kanyarban. A stabilitás növelése érdekében berugózás során negatív, kirugózásnál pedig pozitív értékűnek kell lennie.

A kerékdőlés berugózáskor negatív irányba változik, ami megfelelő mért kanyarodáskor a külső kereket dönti olyan irányba, ami segít, hogy az autó ne sodródjon le az ívről. A kerék ilyenkor sokkal nagyobb tapadást tud kifejteni, mivel ideálisabb szögben áll. Kirugózáskor a kerékdőlés pozitív irányba változik, ennek segítségével több oldalerőt tud felvenni a kirugózott belső kerék, mert ideálisabb pozícióba áll. Figyelni kell a dőlésváltozás esetén arra, hogy ez egyben nyomtávátváltozást is okoz, vagyis nem lehet túl nagy értéket adni ennek. A dőlés alapvetően befolyásolja a gumik oldalkopását, ha rosszul van beállítva.

4.3 Nyomtávátváltozási karakterisztika

A nyomtávátváltozási karakterisztika segít a járműnek egy bizonyos értékű berugózás esetén kis mértékben megnövelni a nyomtávot, mellyel kanyarban megnő a kanyar külső kerék íve, így sokkal nagyobb tapadást képes átvinni az útra. A nagy nyomtávátváltozás erősen lecsökkenti a tapadási tényezőt. Előírás szerint 40 mm-es ki illetve berugózáskor nem szabad 25 mm-es nyomtávátváltozásnál nagyobbak létrejönnie. Ezt teljesíti is a rendszer. Ebben a tartományban jellemzően kanyarodás során rugózik be a jármű. A nyomtáv megnövekedése miatt nagyobb sugarú körben fog az ív külső

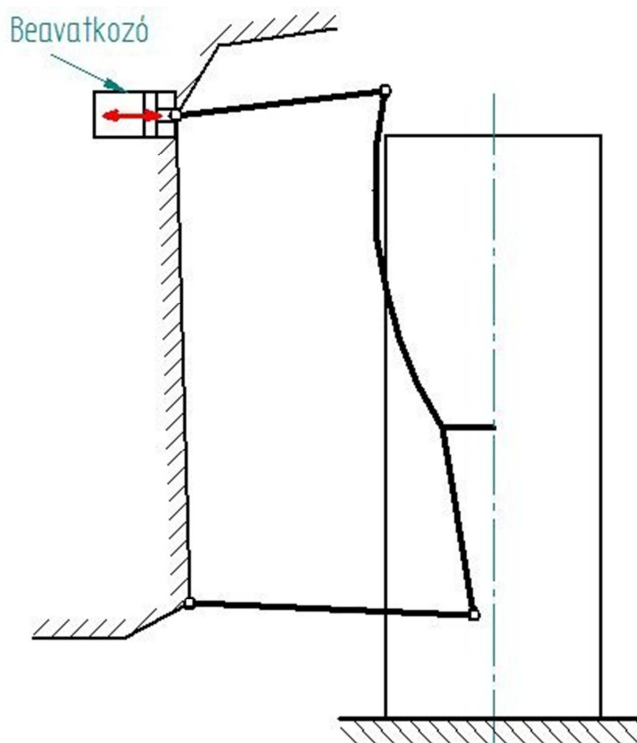
kerék futni, vagyis nagyobb oldalirányú erő felvételére képes. A nyomtávátváltozásnál ugyanakkor figyelembe vették azt, hogy ne legyen olyan jelentős, hogy a jármű koptassa a gumikat, valamint ez miatt esetleg nagyobb szlip tartományba kerüljön a gumi.



8. ábra: Nyomtávátváltozási karakterisztika

5. SZABÁLYOZÁSI RENDSZER KONSTRUKCIÓS VÁZLATA ÉS TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK

Az előző fejezetben részletes vizsgálat alá került, hogyan változnak a futómű egyes karakterisztikái a kerék ki-berugózásának függvényében.



9. ábra: Aktív beavatkozó konstrukció elhelyezése

A jármű első futóművének konstrukciós vizsgálata alapján ebben a fejezetben a beavatkozó elhelyezhetőségére teszünk javaslatot, valamint ennek felhasználásával további irányokat szabunk meg kutatásaink számára.

Megítélésünk alapján a szabályozási rendszer beavatkozója az első futómű esetében a felső lengőrudak kocsiszekerény bekötési pontjainál helyezhetők el a legcélszerűbben. Ebben az esetben a kerék oldaldőlése könnyen változtatható, valamint a bekötési pontok eltolásával hatékonyan növelni lehet a momentáncentrum magasságát, mely ilyen módon a felépítmény oldaldőlésére lehet hatással.

A beavatkozót tekintve véleményünk szerint az elektrohidraulikus aktuátor lehet a legcélszerűbb. Figyelembe kell ugyanis venni, hogy a beavatkozónak jelentős terheléseket kell átvinnie a kocsiszekerényre ívmenetben, hiszen a felső lengőrudakon is átadódnak a kerék-talaj kapcsolatban ébredő oldalirányú erők. Emiatt szükséges, hogy nagy teherbírású hidraulikus rendszer építsünk ki, viszont az elektronikus szabályozás miatt lényeges, hogy gyorsan irányítható legyen. A munkahengerek elmozdításának pontos pozíciója valósítja meg a kerékdőlést, ezért ezen elmozdulások mérése jelentős szerepet játszik a szabályozásban. Emellett szükséges a kerék ki-berugózásának ismerete is, hiszen mint a 4. fejezetben bemutatásra került, ennek jelentős hatása van a kerékdőlési/nyomtávvaltozási karakterisztikákban is.

A további kutatásokban a szabályozó megtervezéséhez szükséges megvizsgálni a lehetséges beavatkozók dinamikáját, és fel kell mérni az általuk átvendő terheléseket. A szabályozó tervezésénél így figyelembe kell venni a beavatkozók gyorsaságát, és ennek megfelelően beállított sávzélességű szabályozót kell tervezni. A változtatható geometriájú rendszerek egyik lehetséges iránya olyan szabályozó tervezése, ami képes minimalizálni a nyomtáv változását ki-berugózás esetében. Ilyen rendszerrel elérhető a gumiabroncsok kopásának csökkentése, mely gazdaságossági és környezetvédelmi szempont a gépjármű fenntartásban.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A megkezdett kutatás során változtatható geometriájú futómű rendszer szabályozójának tervezését kezdtük meg. A szakirodalom áttekintése után felvezettük a gépjármű oldalirányú dinamikájának leírását, mely a későbbi szabályozótervezés alapját képezi. Valós gépjárműről vett adatok alapján számítógépes eljárásokkal felvettük jellemző futómű karakterisztikákat, majd pedig javaslatot tettünk a rendszer beavatkozójának elhelyezésére. A jövőbeli kutatásokban a szabályozó megtervezése fog az elért eredmények alapján megtörténni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatási munkát a SIEMENS Zrt. támogatta a Siemens és a BME Pro Progressio Alapítvány együttműködésével, a *hallgatói szakmai körök számára kiírt pályázat* keretében.

A cikkben bemutatott kutatásokat az OTKA CNK 78168 pályázat támogatta.

REFERENCES

- P. Gáspár, Z. Szabó, and J. Bokor. (2012) LPV design of adaptive integrated control for road vehicles. *IFAC World Congress*, Milan
- J. He, D.A. Crolla, M.C. Levesley, and W.J Manning. (2006) Coordination of active steering, driveline, and braking for integrated vehicle dynamics control. *Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering*, pages 1401–1421.
- S. H. Lee, H. Sung, J. W. Kim and U. K. Lee. (2006) Enhancement of vehicle stability by active geometry control suspension system. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 303–307
- B. Németh and P. Gáspár. (2011) Integration of control design and variable geometry suspension construction for vehicle stability enhancement. *Proc. of the Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida
- H. B. Pacejka. (2004) *Tyre and vehicle dynamics*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.
- J. Reimpbell, H. Stoll, J. W. Betzler (2001) *The automotive chassis*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- A. Trachtler (2004) Integrated vehicle dynamics control using active brake, steering and suspension systems. *International Journal of Vehicle Design*, 36:1–12.
- F. Yu, D.F. Li, and D.A. Crolla. (2008) Integrated vehicle dynamics control: State-of-the art review. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China.
- R. Sharp (1998) Variable geometry active suspension for cars. *IEEE Computing and Control Engineering Journal*, vol. 9, no. 5, pp. 217–222.
- M. S. Fallah, R. Bhat, and W. F. Xie. (2009) New model and simulation of Macpherson suspension system for ride control applications. *Vehicle System Dynamics*, vol. 47, no. 2, pp. 195–220.
- J. Bokor, P. Gáspár, Z. Szabó (2008) Átkonfigurálható és hibatűrő felfüggesztési rendszer tervezése. *A Jövő Járműve*. Vol. 1-2. pp. 20-24.
- The Mark Ortiz Automotive Chassis Newsletter. (2011) No.: April