



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

AGYMOTOROS HAJTÁSÚ MODELLAUTÓ ÉPÍTÉSE ÉS SZABÁLYOZÁSA

TDK dolgozat

Lang András

Konzulens:
Prof. Gáspár Péter

2013. november 4.

Nyilatkozat önálló munkáról, hivatkozások átvételéről

Alulírott Lang András kijelentem, hogy TDK dolgozatom magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2013. november 4.

Lang András

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni Dr. Gáspár Péternek, hogy lehetőséget biztosított az MTA SZTAKI, Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratóriumában végzett kutatásra. Köszönöm szakmai és emberi támogatását, amivel a kutatás során végigkísért.

Köszönöm továbbá Bakos Ádámnak a sok segítséget, amivel támogatta a munkámat, valamint Gőzse Istvánnak, Regula Gergelynek, Soumelidis Alexandrosnak, és a labor többi munkatársának a sok segítséget és a motiváló közeget, amivel nagyban hozzájárultak a kutatás sikeréhez.

Összefoglaló

A kutatás témája agymotoros hajtású modellautó tervezése, megépítése és felsőszintű szabályozás fejlesztése. Az MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet, Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratóriumában végzett munka célja az agymotoros hajtásban rejlő lehetőségek megismerése és továbbfejlesztése egy lehetséges szabályozás megtervezésével és egy modulárisan felépülő, 1:5-ös méretarányú autómodellen történő alkalmazásával.

A dolgozatban bemutatásra kerülnek a laboratóriumi demonstrációs eszközként is használható, modulárisan felépülő modellel szemben támasztott elvárások, valamint az ezeken alapuló tervezés és építés lépései. A rendszer moduláris felépítésével lehetővé válik az egyes alrendszerek továbbfejlesztése és könnyű integrálása. A rendszerszintű tervezés és a koncepció megfogalmazása mellett részletes bemutatásra kerül az eredetileg belsőégésű motorral hajtott autó átépítéséhez szükséges mechanikai alkatrészek tervezése, gyártása és szerelése. A motorok közvetlen vezérlése, az elektronikai alkatrészek, és a vezérlések mikrovezérlőkön történő implementálása a laboratórium több munkatársával való szoros együttműködésben valósult meg, ezek fejlesztését a dolgozat tömören összefoglalja, majd áttér a szabályozás fejlesztésének részletes bemutatására. A minőségi kritériumok megfogalmazásra kerülnek, majd a mechanikai modelltől felállított matematikai modellre építve áttér állapotterezs reprezentációra. A szabályozási feladatot lineáris kvadrátikus (LQR) szabályozóval, állapotbecslő (LQR) alkalmazásával oldja meg.

Abstract

Construction of a wheel hub motor driven model car and control development

The subject of the research is to design an in-wheel-motored model vehicle, its construction and the development of the high level control. The aim of the work at the Systems and Control Lab of the MTA SZTAKI, is to get acquainted with the power in the wheel hub drive technology and its improvement via developing control and applying it on a modularly structured, 1:5 scaled model car.

The study presents the requirements that the modularly structured model has to fulfil as well as the steps of the design and construction. The benefit of the system's modularity is the ease of extensibility and its parts can conveniently be replaced. Beside the description of the systemic design and conception, the study presents thoroughly the design, manufacture and assembly of the new mechanical parts. The motors' control, the electronic parts and the implementation on the microcontrollers and microprocessors has been realized in tight cooperation with the researchers at the laboratory. The document contains the brief summary of these parts, and step forward to the control development. First, the performances are drawn up, then the mathematical model is derived based on the mechanical one, which is then converted into state-space description. It solves the control task via linear quadratic control (LQR) and state estimator (LQR).

Tartalomjegyzék

	Page
Ábrák jegyzéke	iv
Táblázatok jegyzéke	v
1. Bevezetés	1
1.1. Motiváció	1
1.2. Problémafelvetés	1
1.3. Célkitűzés	2
1.4. Irodalomkutatás	2
2. Az agymotoros hajtás áttekintése	5
2.1. Az agymotoros hajtás előnyei és hátrányai	5
2.2. A kerékgymotor bemutatása	6
3. A modellautó konstrukciója	7
3.1. A kiindulási modellautó	7
3.2. Az agymotoros modellautó architektúrája	8
3.3. A futómű alkatrészek tervezése	8
3.3.1. Az első futómű	9
3.3.2. A hátsó futómű	13
3.4. A központi vezérlőegység	16
3.5. Motorok és vezérlésük	16
3.6. Kormány szervó	17
3.7. Szenzormodul	17
3.8. Power Management	18
3.9. Rádiófrekvenciás kommunikáció	18
4. Az agymotoros szabályozás fejlesztése	19
4.1. A szabályozáshoz alkalmazott modell felállítása	19
4.1.1. A dinamikai modell definiálása biciklimodell alkalmazásával	19
4.1.2. A mozgásegyenletek felírása	23
4.1.3. Áttérés állapotter reprezentációra	23
4.2. Szabályozási feladat	24
4.3. Referenciajel képzése	24
4.4. Szabályozási módszerek	25

4.4.1. LQR szabályozó	25
4.4.2. LQR állapotbecslő	31
4.4.3. Zavarások, szaturáció	31
4.4.4. Lineáris és nemlineáris tesztmodellek	33
4.5. Elemzés	35
4.6. A legyezési nyomaték szétosztása	38
5. Eredmények összegzése	40
5.1. Kitekintés	41

Ábrák jegyzéke

2.1. A Lohner-Porsche	5
2.2. Ford-Schaeffer agymotor	6
3.1. A Baja 5B modellautó és a főbb méretei	8
3.2. Az első futómű bak	10
3.3. A rögzítőcsavar	11
3.4. Az első rögzítőgyűrű	11
3.5. Az ellengyűrű	11
3.6. A hüvelyek, bennük a mágnessel	12
3.7. Az első futómű	12
3.8. A motor rögzítése az első futóműbakhoz	13
3.9. Az első motor rögzítésének oldalnézete	13
3.10. Hátsó futómű bak	14
3.11. A hátsó rögzítőgyűrű	14
3.12. A hátsó távtartó gyűrű	14
3.13. A hátsó futómű	15
3.14. A hátsó futómű metszete	15
3.15. A hátsó mágnes és a szenzor elhelyezkedés	16
3.16. Turnigy SK3 6354	17
4.1. Az Ackermann szerkesztés	20
4.2. Az alkalmazott biciklimodell	20
4.3. Az első kerék sebességkomponensei és oldalkúszása	21
4.4. A hátsó kerék sebességkomponensei és oldalkúszása	21
4.5. Kettős sáv váltás teszt	25
4.6. A LQR alapmodell	26
4.7. A LQR modell struktúra módosítással	26
4.8. A válaszfüggvény $q = \text{diag}[0.001, 1, 10000]$ és $r = \text{diag}[1000, 1]$ esetén	27
4.9. A kormányzógigény két különböző r súlyozás esetén	27
4.10. A legyezési nyomatógigény két különböző r súlyozás esetén	28
4.11. A kormányzógigény két különböző q súlyozás esetén	28
4.12. A legyezési nyomatógigény két különböző q súlyozás esetén	28
4.13. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[1, 1, 100]$ esetén	29
4.14. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[1, 1, 1000]$ esetén	29
4.15. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[1, 1, 10000]$ esetén	29

4.16. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[0.01, 1, 1]$ esetén . . .	30
4.17. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[0.0001, 1, 1]$ esetén .	30
4.18. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[0.001, 1, 10000]$ esetén	30
4.19. Az állapotbecslővel kiegészített modell	31
4.20. Szenzorajjal, valamint szaturációval bővített modell	32
4.21. A referenciajel és a válaszfüggvény szenzoraj esetén	32
4.22. A lineáris és nemlineáris modell válaszfüggvényei a referenciajellel	35
4.23. A nemlineáris modell válaszfüggvényei különböző q mátrixok esetén	36
4.24. A nemlineáris modell kormányzógigényei különböző q mátrixok esetén . . .	36
4.25. A nemlineáris modell legyezési nyomatékigényei különböző q mátrixoknál .	36
4.26. A nemlineáris modell kormányzógigényei különböző r mátrixok esetén . . .	37
4.27. A nemlineáris modell legyezési nyomatékigényei különböző r mátrixoknál .	37
4.28. A jármű sebességvektorai ívmenetben	39
4.29. A keréktalpponti erők	39

Táblázatok jegyzéke

3.1. A Baja 5B modellautó paramétere	7
3.2. Kiindulási paraméterek	9
3.3. A maximális kerekenkénti terhelések	9
3.4. Az átépített modellautó új paramétere	10

1. fejezet

Bevezetés

A kutatás témája agymotoros hajtású modellautó tervezése, megépítése és felsőszintű szabályozás fejlesztése. Az MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet, Rendszer és Irányításméleti Kutatólaboratóriumában végzett munka célja az agymotoros hajtásban rejlő lehetőségek megismerése és továbbfejlesztése egy lehetséges szabályozás megtervezésével és egy modulárisan felépülő, 1:5-ös méretarányú autómodellen történő alkalmazásával.

1.1. Motiváció

Napjaink fontos kérdése a gépjárművek hajtására használt belsőégésű motorok kiváltása, vagy azok hibrid környezetben történő alkalmazása. Ennek számos előnye (károsanyag kibocsátás-, fogyasztás-, valamint zajcsökkentés...) jelentősen befolyásolja a járműipari kutatások, fejlesztések tendenciáit. Sok kérdést, és eddig ismeretlen problémát vet fel az új technológiák megvalósítása, kiépítése és társadalmi szintű elfogadtatása. A kívánt célok eléréséhez a lehetséges megoldások párhuzamos kutatása és tesztelése folyik jelenleg. Ezen lehetőségek közül az egyik alternatíva agymotoros hajtás alkalmazása, ami azt jelenti, hogy a kerékagyakban elhelyezett elektromotorok hajtják a gépjárművet. A technológia mélyebb megismerése és továbbfejlesztése, a benne rejlő lehetőségek és a téma aktualitása miatt képzeli a dolgozatban ismertetésre kerülő kutatás tárgyát.

Az agymotoros hajtás kutatásának és demonstrációjának támogatására egy lehetséges mód laboratóriumi modellautó létrehozása. Ennek tervezése, építése és egy szintén a kutatás részét képező szabályozó ezen platformon történő realizálása nagy mértékben támogatja az elméleti kutatás gyakorlatba történő átültetését és sok kihívást rejt magában.

1.2. Problémafelvetés

A feladat első része, vagyis az agymotor hajtású modellautó építése egy BAJA 5B típusú, eredetileg 23 ccm-es belsőégésű motorral szerelt, 1:5-ös méretarányú modellautó átépítésén alapul. Az átépítés mechanikai részének lényegi és egyben legnehezebb része a BLDC motorok rögzítése a futóművek és a kerekek közé. A feladat nehézsége, hogy a meglévő futóműelemek és a motorok fix geometriai méretei adottak, erősen korlátozva a tervezés

szabadságát. Az első futóműnél rendelkezésre álló rendkívül szűk $\varnothing 24.5 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ -es helyen kell rögzíteni a motort oly módon, hogy még egy, a tengelyre rögzített mágnes és egy ennek síkjával párhuzamos érzékelő is elférjen.

A feladat második része az agymotoros hajtású jármű rendszerszintű átgondolása, architektúrájának megtervezése. Ebben kihívást jelent, hogy a Kutatólaborban még nem foglalkoztak korábban ilyen járművel, így sok kérdést az alapoktól kell felépíteni és átgondolni. A mechanikai tervezés, az architektúra átgondolása, valamint a szabályozó megtervezése mellett a szerző feladata a többi részegység fejlesztésének összefogása.

A feladat harmadik részét legyezési szögsebességet, mint referenciajelet követő szabályozó tervezése és tesztelése jelenti. Itt a minőségi tulajdonságok megfogalmazása, a szabályozási modell, valamint több szabályozási módszer kidolgozása a feladat, azok tesztelése először Matlab Simulink környezetben, majd a modellautón. Itt komoly kihívást jelent a több bemenetű, egy kimenetű modell MISO (Multiple Input Single Output) bemenetei közötti elosztás koncepciójának kidolgozása, valamint ennek megvalósítása. Ezen felül lineáris kvadratikus szabályozóval és a mért állapotok hiányossága miatt állapotmegfigyelő tervezésével kell megoldani a kívánt szabályozási feladatot.

1.3. Célkitűzés

A munka célja agymotoros hajtású modellautó építése egy Baja 5B alapmodellből kiindulva. Az autót beltéri, vagy tiszta útfelületű kültéri környezetben lehessen használni 10 m/s sebesség határig és 6 m/s^2 -es gyorsulás korlátig. A platformot moduláris felépítés kell jellemezze, ezzel egyszerűsítve a szimultán fejlesztést, valamint a későbbi, alrendszeret érintő továbbfejlesztéseket. Az egyes alrendszereket CAN kommunikációs protokoll alkalmazásával kell összekapcsolni. Az agymotoros hajtáshoz, legyezési szögsebességet, mint referenciajelet követő, minimális túllendülést és gyors beállási időt biztosító szabályozó tervezése és realizálása az autómodellen. A megvalósított szabályozót elemzésnek, az ismeretlen értékeket paramétervizsgálatnak alávetve hangolni a szabályozót.

1.4. Irodalomkutatás

Az agymotoros hajtás alkalmazásától, a benne rejlő lehetőségek egyre szélesebb körű kihasználásán át, a minőségi tulajdonságok javításáig, valamint hibátűrő rendszerek megalkotásáig az elmúlt másfél évtized kutatásai jól kivehető ívet írnak le. A '90-es években indult kutatások jármű stabilitásának javítására, valamint a gépjármű kormánymű nélküli kormányzására irányultak, melyek a négy kerék különböző mértékű, szabályozott hajtásával valósultak meg. [12] Egy másik lehetséges járműirányítási feladat hátsó kerék hajtású járművek stabilizálása és dinamikai tulajdonságaik javítása. A hátsó kerék hajtotta gépjárművek ívmenetben történő gyorsításkor könnyen kitérnek, vagyis a gépkocsi hátsó része letér az ideális ívről. Ennek a problémának a megoldására és egyéb dinamikai minőségi tulajdonságok javítására irányuló kutatások a két hátsó kerék független hajtásában és szabályozásában keresték a megoldást. Kimutatták, hogy a közvetlen legyezési nyomaték szabályozás (DYC, Direct Yaw moment Control) javítja a dinamikai tulajdonságokat és

a két hátsó kerék független szabályozásával mind a hajtás, mind pedig a legyezési dinamika szabályozása megoldható. Az ívmenetben tapasztalható kitérés jelenségét a hátsó keréknél ébredő keréktalpponti erők szabályozásával lehet elkerülni oly módon, hogy az első kerekek kúszását figyelembe véve, határhelyzetben mindig az első kerekek csússzanak meg először. Ezzel biztosítható a gépjármű alulkormányozottsága, mely annak stabilitását hozza magával. A stabilitás feltétele, hogy a hátsó kerekek oldalirányú erejének kúszás függvényében vett gradiense nagyobb legyen, mint az első kerekek karakterisztikájáé. A szabályozás bemenete a kormányszög, valamint a gázpedálállás, részei pedig egy gyorsulás szabályozás, egy kipörgésgátló, valamint egy hajtóerő határolás kontroll. [15]

Agymotorok alkalmazásával lehetőség nyílik a négy kerék független hajtására, s ezáltal az ABS, ASR és ESP járműdinamikai szabályozók hatékony alkalmazására. Igen fontos kérdés a szabályozó felépítésének architektúrája. Előnyös modulárisan felépülő hierarchikus szabályozás alkalmazása, ahol a felső szintű szabályozás a jármű mozgását írja le, míg az alacsony szintű az egyes aktuátorok között osztja szét a feladatot. [19] A felső szintű szabályozó a kormánykerékszög, valamint a gáz- és fékpedál állás alapján kiszámolja a stabilitási kontroll által igényelt általános erőket, vagyis a szükséges hosszirányú erők eredőjét és a legyezési nyomatékigényt. Az alsó szintű szabályozó bizonyos elosztási szabályok, valamint a külső kötöttségek (maximális motornyomatékok, súrlódási tényező az útfelület és a gumi között) figyelembe vételével az általános erőt az egyes aktuátorok között osztja szét. Ez a szabályozó veszi figyelembe a hossz- és keresztirányú erők kombinációját, beleértve a hosszirányú erők változásának hatását a keresztirányú erőkre, mely a szabályozás elosztásának javulását eredményezi. Az alkalmazott LQR jelkövető szabályozónál az állapotter állapotai a legyezési szögsebesség (ψ), valamint az oldalkúszás (β). A modellben lévő hajtóerők lehetnek fékezőerők is. Egyszerűsítésként a modell nem veszi figyelembe a kerekenként eltérő súrlódás viszonyokat, valamint az esetleges szélleköseket sem. Az elosztás végül az allokációs hiba minimalizálását valósítja meg a korábban említett kényszerek figyelembe vétele mellett oly módon, hogy figyelembe veszi az gumibroncsok adhéziós görbéit, az eltérő vertikális terheléseket, és a különböző hossz- és keresztirányú erőket. A módszertől remélhetjük a motorok energiafogyasztásának minimalizálását is. [20] A szabályozási feladat a manőverező képesség, valamint a stabilitás javítása mellett lehet az energiafogyasztás minimalizálása is. [10]

A vonóerőt és stabilitást biztosító hajtónyomatékok független szabályozással történő elosztása, a hagyományos dinamikai stabilitást megvalósító szabályozókkal ellentétben nem vonja maga után a jármű gyorsulásának csökkenését. Jó szabályozhatósága miatt különösen hasznosnak mutatkozik gyorsuláskor a stabilitás határán. A különböző nyomaték-elosztás paraméterek, a jármű irányára és gyorsulására gyakorolt hatását többek között Box-Behnken kísérlettel lehet eldönteni. PI szabályozás alkalmazásával legyezési szög visszacsatolással lehet szabályozni az első-hátsó nyomatékelosztást, míg a keresztirányú nyomaték visszacsatolásával a bal-jobb elosztást. Az így felépített rendszer szignifikáns javulást mutat agresszív, ívben történő gyorsuláskor jól tapadó útfelületen. Az eredmények megközelítették az elméletileg elérhető határokat, és az agymotorok jövőbeli alkalmazásával ezek széles körű alkalmazása is elképzelhető. [13]

A legyezési szögsebesség szabályozására többféle algoritmus is alkalmazható. A hajtónyomaték oldalirányú gyorsulás függvényében történő redukálása mellett előnyös a csúszási tényező PID típusú súly együtthetével történő figyelembe vétele. Ebben az esetben

a legyezési szögsebesség szabályozása osztja szét a kívánt nyomatékot az egyes kerekre a csúszómód kontroll alkalmazásával (Sliding Mode Control). A performanciák ezzel a módszerrel is elérhetőek. [11] A csúszómód szabályozás alkalmazásával változó paraméterű, nemlineáris rendszerek robusztus szabályozása valósítható meg. [8] A csúszómód szabályozás performance érzéketlen az ismeretlen paraméterekre és a paraméterváltozásokra, ám komoly korlátot jelent a csúszófelület körüli nagyfrekvenciás oszcilláció, a csattogás (chattering) jelensége. [16]

Az agymotoros technológia steer-by-wire rendszerrel történő közös alkalmazása a kormányzás és a hajtás együttműködésével igen hatékony. Itt is ajánlott a szabályozás hierarchikus struktúrájú felépítése. A felső szintű mozgás szabályozást (állapottér: ψ , v_x , v_y), valamint az alacsony szintű beavatkozás allokációt egy aktuátor dinamikai modellel kiegészítve, vizsgálható a különböző szabályozók hatékonysága a lineáris és nemlineáris vezetési tartományokban. Ezen felül a jármű állapotbecslő egy vonóerő megfigyelőből és egy unscented Kalman szűrőből (UKF, Unscented Kalman Filter) áll, melyek analizálják a szabályozó működését valós szenzorok alkalmazása esetén. A szabályozó a normál üzem mellett alkalmazható a jármű μ -split fékezéskor, valamint ütközések elkerülésekor történő stabilizálására, továbbá megoldható, hogy a gépkocsi változtatható vezetési karakterisztikákkal rendelkezzen. Szem előtt tartandó a kis számítási igény, hogy valós időben futhasson a szabályozó. [18]

A korábbi modellek és szabályozók hibáinak és gyengéinek kivédése és további finomítása érhető el lineáris, változó paraméterű (LPV, Linear Parameter-Varying) szabályozó alkalmazásával négy független kerék hajtású, aktív kormányzású járműveknél. Ezzel a módszerrel mind a stabilitás megőrzése, mind pedig a jármű kezelhetősége megvalósítható az agymotorok vagy a kormányrendszer hibái esetén is. A zavarás hatásának csökkentése és a hiba detektálása érdekében egy újfajta hiba-tűrő (FT, Fault Tolerant) robusztus LQR alapú, LPV módszert alkalmazó H_∞ szabályozás javasolt. Az LQR alapú H_∞ kontroll alkalmazásával a követési feladat és a bemenetek véges energiája közötti optimum megvalósul, s közben a külső zavarások hatása a kimeneten minimális lesz. A rendszer állapotai a ψ , a v_x , valamint a v_y szimultán szabályozva vannak, és követik a saját referenciajeleiket. [17]

A legfrissebb kutatásokban a hagyományos, konstans hosszirányú sebességre alapozó modellek mellett a változó sebességű modellek kezdenek megjelenni. Emellett nem elhanyagolható a hossz, a kereszt, valamint a legyezési dinamika egymásra hatás sem. A menetdinamikai tulajdonságok további finomítása érhető el ezen szempontok figyelembe vételével, a három különböző dinamikai egyidejű szabályozásával. A jármű paraméter bizonytalanságát kezelve megtervezhető egy csattogás-mentes szabályozás, mely dinamikusan alkalmazkodó határréteg vastagsága bevezetésével érhető el, valamint végeredményül robusztusabb rendszer adódik. [6]

Az eddigi kutatásokra alapozva, a dolgozatban egy hierarchikus felépítésű szabályozó megtervezése a cél, ahol a felső szintű szabályozás biztosítja a legyezési szögsebesség, mint referenciajel követését, míg az alsó szintű szabályozó az egyes motorokra osztja szét a beavatkozójelet. Az LQR szabályozóhoz kétdimenziós állapotter kerül felírásra, állapotai ψ és β . A nem mért állapotok visszacsatolása érdekében LQR állapotbecslő kerül alkalmazásra, majd a szabályozók analízisével és hangolásával zárul a szabályozó fejlesztése.

2. fejezet

Az agymotoros hajtás áttekintése

Az agymotoros hajtás gondolata a 19. században indult útjára, és az első ilyen elven hajtott autót Ferdinand Porsche tervezte [3]. Az 1900-ban rendezett Párizsi Világkiállításon megnyerte a kiállítás különdíját [1], majd szériagyártásba került, és Lohner-Porsche néven vált híressé (2.1. ábra). Ebben a járműben jelent meg a kerékagymotor, ahol az elektromágnes került a motor belső részébe, míg a mágnesek a külső gyűrűre [3]. A kerékagyba épített motor koncepciója, a benne rejlő lehetőségeket miatt fel-fel kelti a mérnökök érdeklődését, ám egyes negatív tulajdonságai miatt elterjedni még nem tudott. Az alábbi alfejezetekben rövid összefoglaló olvasható az agymotoros hajtásban rejlő előnyös és hátrányos tulajdonságokról, valamint a kerékagymotor működési elvéről.



2.1. ábra. A Lohner-Porsche
Forrás: <http://www.technischesmuseum.at>

2.1. Az agymotoros hajtás előnyei és hátrányai

Az agymotoros hajtás három alapvető módon jelenhet meg a gépjárművekben. Alkalmazható az első-, vagy hátsókerék-hajtás kiváltására vagy négy kerék hajtásra. Kiváltható vele a belsőégésű motortól a hajtórudakig a teljes hajtásrendszer, ám a súlyos moto-

rok miatt komoly hátrányokkal is számolni kell. A jól szabályozható agymotorokkal egy megfelelően működő súrlódásmérő rendszer esetén igen jól kihasználható a tapadási tartomány, valamint az ESP rendszerrel összekapcsolva jelentősen javíthatóak a gépjármű legyezési dinamikai tulajdonságai. A fékezés az elektromotorok generátorüzemben történő alkalmazásával áramtermelést jelent jól szabályozható módon, s csak a megállás előtti kis sebességnél, valamint rögzítésnél kell mechanikai féket alkalmazni. A mechanikai összeköttetések számának csökkentésével a manőverezési tulajdonságok javulása a nagyobb szögben kifordítható kerekeknek köszönhető, melynek parkolásnál lehet nagyobb jelentősége. Az agymotorok jelentős súlya a gépjármű rugózatlan tömegeinek számottevő emelkedését okozza, mely jelentősen rontja a lengéskényelmi tulajdonságokat, s többek között ezen tulajdonság miatt nem terjedt el az agymotoros technológia egyelőre. [2]

2.2. A kerékagymotor bemutatása

A gépjárművek kerékagyba épített motorjai állandómágneses szinkronmotorok. A két alapvető kialakítás közül, vagyis a belső, illetve külső forgórészes típus közül a második az elterjedt. Ennek legnagyobb előnye, hogy a külső forgórész közvetlenül a kerékagy lehet, ami egyszerű konstrukciót tesz lehetővé. További előnyös tulajdonsága a motort jellemző kétféle fordulatszámmal kapcsolatban jelentkezik. A motor mechanikai fordulatszámát úgy kapjuk, hogy a villamos fordulatszámát elosztjuk a póluspárok számával. A póluspárok száma az állandó mágnesek számával egyezik meg, vagyis azonos frekvenciájú áram esetén a póluspárok növelésével csökken a mechanikai fordulatszám és ezzel nő a nyomaték. Mivel a villamos fordulatszámnál jelentősen kisebb mechanikai fordulatszámra van szükség (lévén, hogy nincs lassító áttétel a motor és a kerék között), agymotorok esetén a póluspárok, vagyis az állandó mágnesek számának növelése a cél, tehát előnyös azok külső gyűrűn történő elhelyezése. A motorok belsejében általában háromfázisú tekercselést alkalmaznak. Egy lehetséges konstrukciót mutat a 2.2. ábra.



2.2. ábra. Ford-Schaeffler agymotor
Forrás: m.schaeffler.de

3. fejezet

A modellautó konstrukciója

3.1. A kiindulási modellautó

Az agymotoros hajtású gépjármű modell megépítését egy Baja 5B 1:5-ös méretarányú off-road modell átalakításával valósította meg a szerző. Az eredetileg 23ccm-es belsőégésű motorral szerelt hátsó kerék hajtású és első kerék kormányzású járművet és befoglaló méreteit a 3.1. ábra mutatja. A modellautó eredeti paramétereit a 3.1 táblázat ismerteti.

Teljes hossz	817 mm
Magasság	255 mm
Szélesség (elől/hátul)	460/480 mm
Nyomtáv (elől/hátul)	395/400 mm
Tengelytáv	570 mm
Megfelelő padlólemez magasság	76 mm
Felfüggesztés át (elől/hátul)	95/100 mm
Tömeg	9.6 kg
Kerékdőlés	Elöl illesztő alátétekkel, hátul csavarokkal állítható.
Elöl csaphátradőlés	Illesztő alátéttel 22°, 22.5°, 29°
Kerékösszetartás	Elöl kormányösszekötő rúddal, hátul illesztő alátétekkel 2°, 3°, 4° mindkét oldalon.
Váz	Air craft alumínium 6061 T6 héjszerkezet.
Futómű	Dupla keresztlengőkaros állítható gördülési centrummal (elől/hátul)
Lengéscsillapító	Szabályozható csillapítás és rugó

3.1. táblázat. A Baja 5B modellautó paramétereit



3.1. ábra. A Baja 5B modellautó és a főbb méretei
Forrás: <http://www.hpiracing.com>

3.2. Az agymotoros modellautó architektúrája

A dolgozat tárgyát képező, agymotoros hajtású modellautó architektúrája az előírt funkciók ellátása mellett, a moduláris felépítés szem előtt tartásával lett megtervezve. Bekapcsoláskor a power management indul el, majd amikor már stabilan működik és elvégezte az akkumulátorok állapotának feltérképezését, kiadja az 5 V-os feszültséget a többi mikrokontrollernek és mikroprocesszornak. Amikor minden egység vezérlője elindult és jól működik, a motorok is megkapják a hajtáshoz szükséges feszültséget és áramot, és az autó működésre készen áll. A központi vezérlőegység funkcióját egy Raspberry Pi mikroszámítógép látja el, mely a CAN kommunikációs protokoll alkalmazásával tartja a kapcsolatot a többi egységgel. Ezen a platformon a kommunikáció mellett implementálva van a szabályozó, mely a beérkező vezérlőjelek és a kért szenzorjelek függvényében a motorok számára a nyomatéki igényt, míg a szervónak a kormánysszög kívánt értékét küldi ki. Minden egyes motorhoz külön vezérlőegység tartozik, mely gondoskodik róla, hogy a kért nyomaték a motorokon megjelenjen, valamint a központi egység számára a szögsebesség aktuális értékét továbbítja. A motorok kiválasztása és beépítése is szorosan kapcsolódik az architektúra tervezéséhez. A szervó a kért kormánysszöget az első kerekeken realizálja. A modellautó legyezési szögsebesség egy szenzor modul méri, mely szintén a CAN vonalon kommunikál a központtal. A jármű a vezérlőjelet rádiófrekvenciás modulon keresztül kapja és a CAN-re továbbítja.

Az alábbiakban a szerző feladatát jelentő mechanikai tervezés részletes ismertetésére kerül sor, majd az egyes részegységek tömör bemutatása következik, melyek a szerzővel szoros együttműködésben lettek kifejlesztve és a szerző feladata volt azok modellautóba történő integrálása.

3.3. A futómű alkatrészek tervezése

A mechanikai tervezés a szerző feladata volt, s ezt a motorok, kerekek és a futóművek közé történő rögzítésére szolgáló egyedi alkatrészek tervezése, gyártása és szerelése jelentette. A feladat nehézsége abban rejlett, hogy a meglévő futóműelemek és a kiválasztásra került motor geometriai méretei adottak voltak, erősen korlátozva a tervezés szabadságát. A tervezés során felmerült több lehetséges megoldás közül a célnak leginkább megfele-

lő, vagyis a becsült terheléseknek ellenálló, kotyogásmentes, egyszerű és lehetőség szerint minél olcsóbban gyártható megoldás lett kiválasztva.

A futóműveket érő terhelések becslése a 3.2. táblázatban található paramétereken alapszik.

Várható össztömeg	7.5 kg
Maximális sebesség	10 m/s
Maximális gyorsulás/lassulás	6 m/s ²

3.2. táblázat. Kiindulási paraméterek

A terhelések a kiindulás paraméterek alapján lettek becsülve és az új alkatrészek ezen terhelések figyelembe vétele mellett tervezve. Az oldalirányú erő maximuma a legnagyobb sebesség és 4.7 m fordulókör sugár figyelembe vétele mellett adódott, ahol a 4.7 m egy később bemutatásra kerülő, méretarányosan lekicsinyített kettős sáv váltás teszt legkisebb fordulási sugara. A 3.3. táblázat a becsült kerekenkénti nyomatékot, valamint a hossz- és keresztirányú erőket tartalmazza.

Maximális nyomaték	0.95 Nm
Maximális hosszirányú erő	11.25 N
Maximális keresztirányú erő	39.89 N

3.3. táblázat. A maximális kerekenkénti terhelések

A lent bemutatásra kerülő megtervezett alkatrészeket ALMgSi1 (EN AW 6082) alumínium alapanyagból készültek kis súlya, valamint megfelelően magas (310 MPa) szakítószilárdsága miatt.

Mivel az alább bemutatásra kerülő konstrukcióval a teljes terhelés a motortengelyeken megy át, s azok elsősorban nem radiális terhelésre vannak méretezve, különösen figyelni kell az előírt sebességkorlát betartására, valamint a sima útfelület biztosítására.

3.3.1. Az első futómű

Az motor első futóműben történő integrálása komoly kihívást jelentett a tervezés során, ugyanis rendkívül szűk, $\varnothing 24.5 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ -es térfogat állt rendelkezésre a motor rögzítésére, valamint annak tengelyére egy speciális mágnes precíz illesztésére és egy ennek síkjával párhuzamos, 0.5 mm-re lévő IC elhelyezésére.

Az első futómű konstrukciója

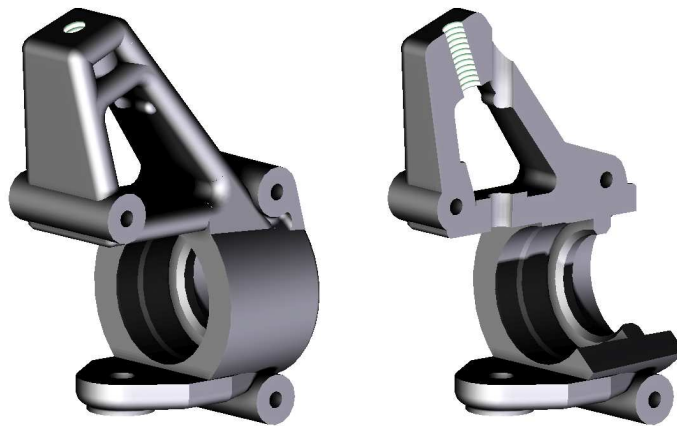
A kereket a motorral egy egyedi rögzítőcsavar kapcsolja össze anyára, valamint 4 kisebb csavar segítségével. A motor futóművön történő rögzítését az első rögzítőgyűrű, valamint egy erre csavart, a futóműbak (3.2. ábra) egyik vállfelületén felütköző ellengyűrű tartja a 3.8. és a 3.9. ábrákon látható módon. A motor tengelyére két vékony hüvely illeszti a mágneset, a vele szemben elhelyezkedő szenzort tartalmazó nyák pedig az ellengyűrűn kapott helyet. Az egyes alkatrészek részletes ismertetése az alábbiakban olvasható. A teljes

konstrukciót a 3.7. ábra mutatja be.

Az átalakítások hatására a modellautó egyes paramétereit (nyomtáv, tömeg) megváltoztak. Ezen új paramétereket tartalmazza a 3.4. táblázat.

Szélesség (elől/hátul)	565/570 mm
Nyomtáv (elől/hátul)	500/490 mm
Tömeg	7.5 kg

3.4. táblázat. Az átépített modellautó új paramétereit



3.2. ábra. Az első futómű bak

Rögzítő csavar

A kerék motoron történő rögzítése egy speciális rögzítő csavar tervezésével valósult meg. Feladata a kerék motorhoz történő rögzítése, a nyomtáv menesztése, valamint a radiális és axiális erők átvitele. Több lehetséges megoldási lehetőség közül választva, az egy darabból gyártott konstrukció bizonyult a legmegfelelőbbnek a minél pontosabb, lötyögésmentes konstrukció érdekében. A 3.3. ábrán látható a rögzítőcsavar végleges formája.

Menesztés

A menesztésnél a rendkívül fontos volt a kerék és a motor kottyanásmentes illesztése annak érdekében, hogy mind a motorvezérlő, mind pedig a felső szintű szabályozás minél pontosabb realizációja legyen megvalósítható. A keréken, a menesztéshez rendelkezésre álló hatlapú felület többszöri méréséből lehetett következtetni annak tűrésére és erre alapozva tūrni az új alkatrészen kialakításra kerülő felületet.

Radiális erők

A radiális erők felvételét és az egytengelyűség biztosítását egy-egy hengerpalást felület biztosítja mind a kerék és a rögzítő csavar között, mind pedig a motor felé.

Axiális erők

Az alkatrész motoron történő rögzítését, és egyben az axiális erők felvételét 4db M3-as csavar valósítja meg, míg a kereket a rögzítő csavaron az eredeti, fogazott peremmel ellátott anyacsavar tartja.



3.3. ábra. A rögzítőcsavar

Első rögzítőgyűrű

Az első rögzítőgyűrű feladata az előző alkatrésznél felsorolt terhelések átvitele a motorról a futóműbak felé.

A motor és az alkatrész között úgy a menesztést, mint mindkét irányú erőt erőkötéssel 4db M4-es csavar viszi át. Az alkatrészről a futómű felé szétválnak a funkciók. Az axiális erőket egy, a futóműben lévő vállon felütköző speciális ellengyűrű, míg a menesztést részben az így ébredő erőkötés, részben pedig egy kis méretű csap valósítja meg. A radiális erők illesztett felületen kerülnek át a futóműre. A rögzítőgyűrű a 3.4. ábrán látható.



3.4. ábra. Az első rögzítőgyűrű

Ellengyűrű

Az ellengyűrű feladata az első rögzítőgyűrű valamint a nyák rögzítése.

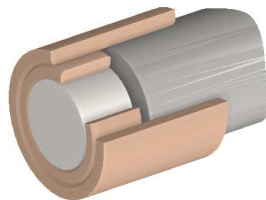
Az első rögzítőgyűrűt csavarmenettel kapcsolódik, és a futóműbak egy vállfelületén felülve lehet megfeszíteni. A meghúzása külön kialakított horony, és erre a célra gyártott célszerszám segítségével valósul meg. A nyák rögzítésére 4db M1,4-es furat helyezkedik el a gyűrű homloklfelületén. Az ellengyűrűt a 3.5. ábra mutatja.



3.5. ábra. Az ellengyűrű

Mágnes tartó hüvelyek

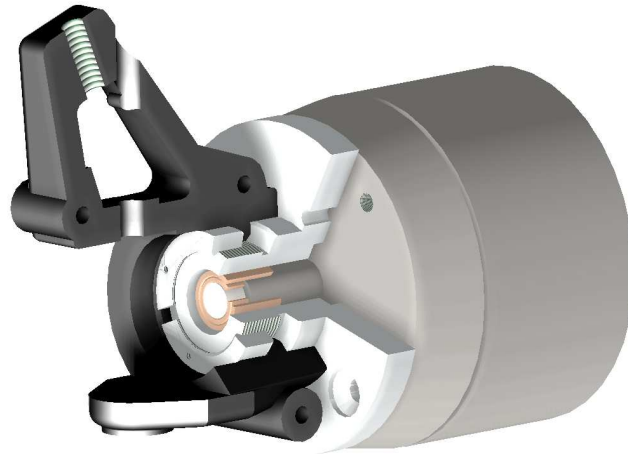
Az $\varnothing 6$ mm mágnes $\varnothing 8$ mm-es motortengelyen történő rögzítését két rézhüvely valósítja meg. A nagyobbik hüvelyben helyezkedik el a kisebbik hüvely, melyben pedig a mágnes ül. A nagyobbik hüvely fennmaradó része a korábban méretre vágott motortengelyre van húzva oly módon, hogy a szenzor és a mágnes között 0.5 mm rés legyen. A két hüvely, valamint a bennük elhelyezkedő mágnes a 3.6. ábrán látható.



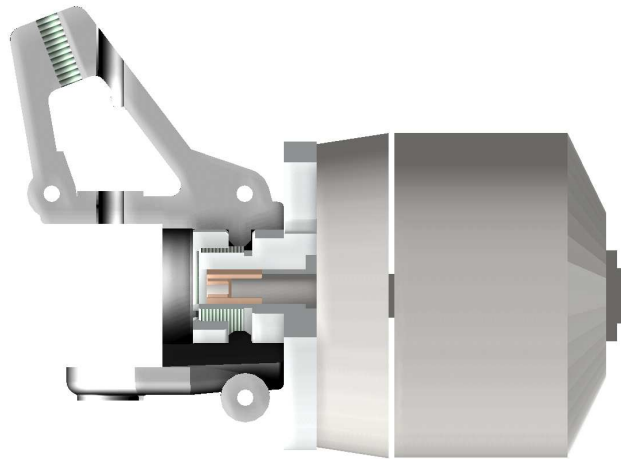
3.6. ábra. A hüvelyek, bennük a mágnessel



3.7. ábra. Az első futómű



3.8. ábra. A motor rögzítése az első futóműbakhoz



3.9. ábra. Az első motor rögzítésének oldalnézete

3.3.2. A hátsó futómű

A hátsó futóműnél nagyobb hely állt rendelkezésre, valamint a motorok rögzítésére a futóműbakban (3.10. ábra) rendelkezésre álltak csavarhelyek, melyek nagyban megkönnyítették a tervezést. A rendelkezésre álló térfogat leginkább annak volt köszönhető, hogy az autómódellet eredetileg hátsó kerék hajtással építették, így a féltengelyeknek helyett kellett biztosítani. A motortengelyre rögzítendő mágnessel párhuzamos síkú nyákot oly módon kell rögzíteni, hogy a párhuzamosság a kerékösszetartás változtatása mellett is megmaradjon.

A hátsó futómű konstrukciója

A kerék motoron történő rögzítése, valamint a mágnesek elhelyezése az első futómű konstrukciójával teljes mértékben megegyezik. A motort a futóműbakkal a hátsó rögzítőgyűrű kapcsolja össze, s egy erre ültetett távtartó gyűrűn helyezkedik el a szenzortartó nyák (3.14. ábra). A mágnes rögzítése az első futóműnél leírt módon történik a 3.15. ábrán



3.10. ábra. Hátsó futómű bak

látható módon. A teljes, szerelt hátsó futómű a 3.13. ábrán látható.

Hátsó rögzítőgyűrű

Az alkatrészt a motorhoz 4db M4-es csavar rögzíti, míg a rögzítőgyűrűt szintén 4db M4-es csavar tartja a futóműbakon. Ezen kívül 4db M1,4-es furat került kialakításra, melyek a nyák rögzítését szolgálják. A hátsó rögzítőgyűrű a 3.11. ábrán látható.



3.11. ábra. A hátsó rögzítőgyűrű

Távtartó gyűrű

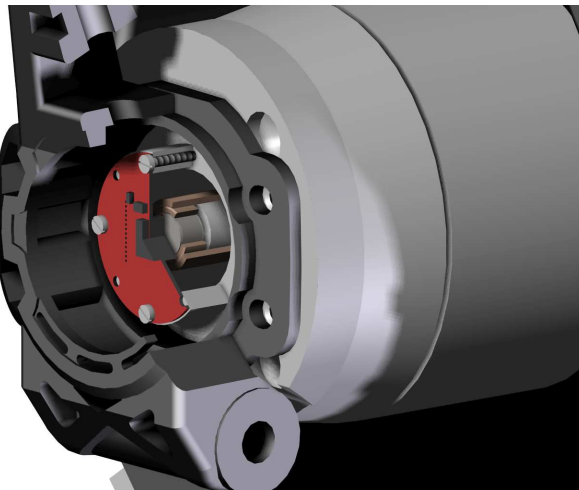
A hátsó futóműbakra ültetett, a nyákon keresztül 4db M1,4-es csavarral rögzített alkatrész, melyet a 3.12. ábra mutat.



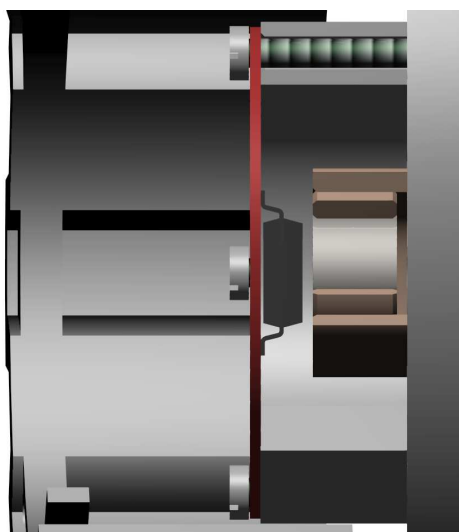
3.12. ábra. A hátsó távtartó gyűrű



3.13. ábra. A hátsó futómű



3.14. ábra. A hátsó futómű metszete



3.15. ábra. A hátsó mágnes és a szenzor elhelyezkedés

3.4. A központi vezérlőegység

A központi vezérlést egy Raspberry Pi típusú, 700 MHz-es processzorral szerelt számítógép végzi. Az egységen Linux környezetben fut a modellautó szabályozása, valamint a különböző modulokkal (szenzorral, motorvezérlőkkel...) való kommunikáció lebonyolítása. A rádiófrekvenciás modulon keresztül CAN-re érkező üzenet, valamint a szenzoregységtől jövő ψ érték ismeretében a szabályozó számítja a szükséges motornyomatékokat, valamint szervó szöveget és a CAN csatornán küldi az aktuátoroknak. Ezen fő funkciók mellett a központi egység fogja össze az egyes modulokat és intézi az esetleges kalibrációs-, vagy hibaüzenetek továbbítását a kezelőszemélynek.

3.5. Motorok és vezérlésük

A modellautó hajtására külső forgórészű, állandómágneses szinkronmotorok lettek kiválasztva. Mivel ebben a méretben nem állt rendelkezésre tényleges agymotor, repülőmodellekhez tervezett Turnigy SK3 6354 motorok lettek kiválasztva a kívánt nyomatékok figyelembe vétele mellett (3.16. ábra). Lévén, hogy a motorok mechanikai terhelések szempontjából összetettebb igénybevételnek vannak kitéve ebben a konstrukcióban, mint amire tervezték őket, ezért lehetőség szerint vastagabb tengelyű ($\varnothing 8$ mm) kivitel került kiválasztásra, valamint a terhelések minimalizálása érdekében kis sebesség és sík talaj előírva.

A motorvezérlő mezőorientált áramszabályozás elven működik, vagyis a tápláló áramok fázishelyzetét a forgórész aktuális szögének figyelembevételével állítja elő, tehát az áramot a forgórész mindenkor szöghelyzetéhez orientálja. Ez a módszer több előnyös tulajdonsággal is rendelkezik a különböző motorszabályozási technikákkal szemben. Egyik előnye, hogy egységnyi áram hatására ezzel a módszerrel érhető el a legnagyobb nyomaték. Másik előnyös tulajdonsága, hogy a szabályzott, ám nemlineáris karakterisztikákkal rendelkező motor kívülről már lineáris tulajdonságot mutat, így egyszerűsítve a vezérlését. További járulékos előny, hogy a szinkronmotor nem esik ki a szinkronból, továbbá csökkenthető a



3.16. ábra. Turnigy SK3 6354

Forrás: <http://www.rcmodellek.hu>

motor lüktetőnyomatéka, valamint fontos tulajdonsága, hogy a motor nyugvó állapotban is képes nyomatékot kifejteni. Ez utóbbi lehetőség az autó indításánál kap fontos szerepet.

A motor szög helyzetének mérése egy, a tengelyen elhelyezett speciális mágnes és egy IC segítségével történik. A henger alakú mágnes észak-déli pólusai nem alul-fölül helyezkednek el, hanem keresztben. A mágnes a motor tengelyével együtt forog egy lapjával párhuzamos síkú IC előtt 0.5 mm-rel. Az IC-ben található 4 Hall elem segítségével mérhető a szög helyzet, valamint az ebből kalkulált szögsebesség.

A teljesítményelektronika a motorvezérlővel közös panelen kapott helyet. A MOSFET-ekből felépülő kapcsolóüzemű elektronika PWM vezérléssel rendelkezik. A motorok nyomatéka a tápláló áramok amplitúdójával a mezőorientált szabályozás miatt egyenesen arányos. A motor és a szabályozás alkotta közös rendszer egy nyomaték bemenettel és fordulatszám kimenettel jellemezhető rendszerként működik, így végtére is a nyomatékból adódik a fordulatszám.

3.6. Kormány szervó

A kormányzáshoz kereskedelmi forgalomban kapható szervómotor került beépítésre, mely egy CAN-PWM átalakító elektronikával lett kiegészítve. A későbbiekre egy saját vezérlőelektronikával rendelkező szervó alkalmazása van előírva.

3.7. Szenzormodul

A modellautó legyezési szögsebességének mérését egy kompakt szenzormodul végzi. Az MTA SZTAKI-ban, modellrepülő pozíciójának és orientációjának mérésére fejlesztett, modellrepülőkre optimalizált egység két különböző, három irányú gyorsulás- és szögmérővel, mágneses iránytűvel, légnyomásmérővel, valamint GPS-szel rendelkezik. A beépített flash memóriának köszönhetően adatok tárolására alkalmas, valamint az AVR 32-es mikrovezérlő lebegőpontos számolása valós idejű kalibrációt tesz lehetővé a szenzoradatok

tekintetében. Környezetével több kommunikációs porton, köztük CAN-en is képes kapcsolatot tartani. Kompakt kialakítás és alacsony fogyasztás jellemzi. A modellautón egyelőre a szögsebességszenzor, később pedig a gyorsulásszenzor és a GPS kerül alkalmazásra. A szögsebességszenzornál a maximális szenzorhaj ± 0.0174 rad/sec-ra adódott korábbi mérések során.

3.8. Power Management

Fő feladata a modellautó teljes elektronikai hálózata számára az 5 V-os tápfeszültség biztosítása, valamint a hajtások számára külön akkumulátor kezelése. Az autó bekapcsolásakor először ez az elektronika kapcsol be, majd stabil működése esetén ellenőrzi az akkumulátorok feszültség szintjét és amennyiben megfelelő, kiadja az 5V-ot a többi egységnek. Amikor már minden alrendszer felállt, a hajtásokat is feszültség alá helyezi. Az akkumulátorok feszültségét figyeli, bizonyos határfeszültség alatt jelez, kritikus érték esetén pedig lekapcsolja a rendszert.

3.9. Rádiófrekvenciás kommunikáció

Az irányító személlyel történő kommunikációt a Digi által gyártott XBee rádiófrekvenciás egységek intézik. A vezeték nélküli kommunikációhoz három panel lett tervezve. Egy a modellautóra szerelhető, egy számítógépre csatlakoztatható, valamint egy távirányítóba építhető. A modellautón elhelyezett panel egy CAN-soros átalakítóval van szerelve, melynek feladata a gépjármű belső CAN-alapú kommunikációs hálózata és az XBee soros vonala közötti információ átalakítása. A számítógéphez csatlakozó modul egy soros-USB átalakítóval van szerelve, míg a távirányítóba készült egység soros vonalon kommunikál a mikrovezérlővel. Az XBee-hez soros vonalon érkező információ rádiófrekvenciás jel formájában kerül továbbításra Zig-Bee protokoll szerint, 2.4 GHz frekvencián.

4. fejezet

Az agymotoros szabályozás fejlesztése

A szabályozási feladat referenciajel követése minimális túllendüléssel, gyors beállási idővel, valamint a bemenetek, vagyis az aktuátorok energiakorlátainak figyelembevételével. A referenciajel a legyezési szögsebesség legyen.

4.1. A szabályozáshoz alkalmazott modell felállítása

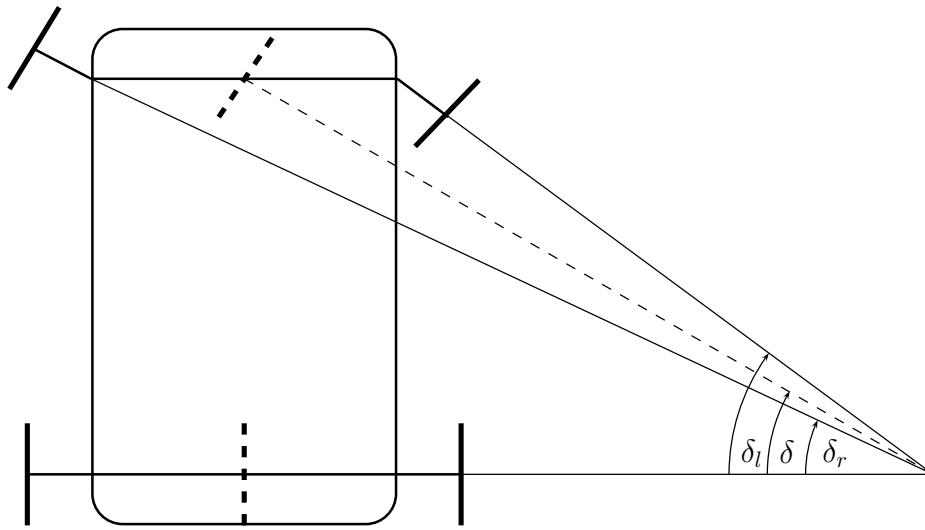
4.1.1. A dinamikai modell definiálása biciklimodell alkalmazásával

A gépjármű legyezési dinamikájának vizsgálata biciklimodell alkalmazásával valósult meg. Ennek lényege a két első, valamint a két hátsó kerék 1-1 virtuális kerékre redukálása, majd e két képzeletbeli kerék elhelyezése a gépjármű hossz tengelyében. [5, 14] A dolgozat első kerék kormányzású jármű tervezésével foglalkozik, így a kormányoszogok meghatározásánál is ez lett figyelembe véve az Ackermann geometria felhasználásával alkalmazásával. A Ackermann szerkesztés a 4.1. ábrán látható.

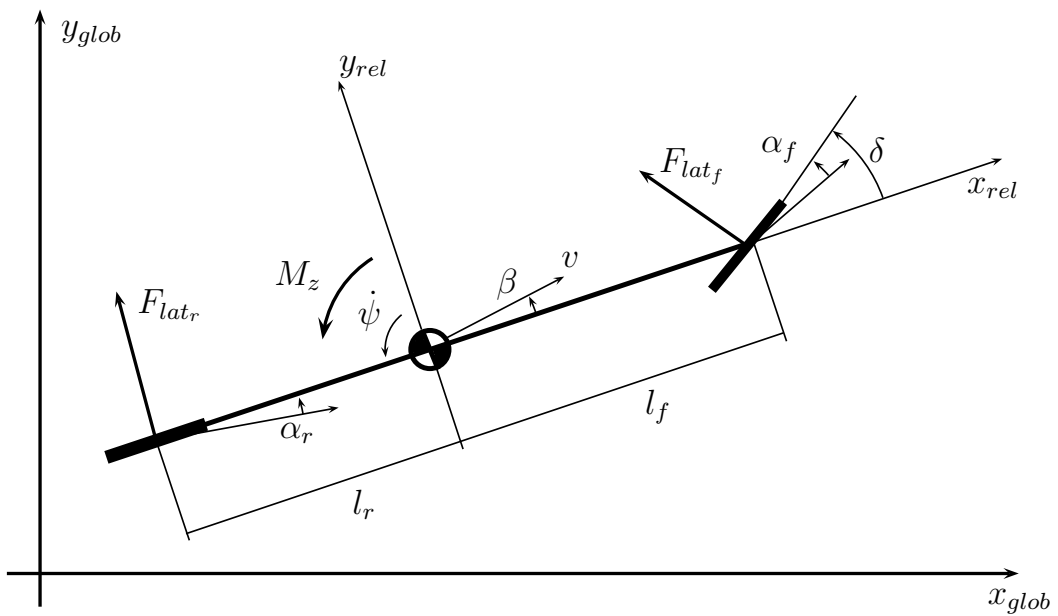
A 4.2. ábrán látható a biciklimodell és a legfontosabb változók, ahol

$\dot{\psi}$	legyezési szögsebesség
δ	kormányoszog
v	sebesség
l_f	az első kerék és a súlypont távolsága
l_r	a hátsó kerék és a súlypont távolsága
β	a jármű oldalkúszási szöge
α_f	az első kerék oldalkúszási szöge
α_r	a hátsó kerék oldalkúszási szöge

A 4.2. ábrán látható módon a relatív koordináta-rendszer x tengelye jármű hossz tengelyével azonos irányban, annak súlypontjába helyezett origóval értelmezett, az y tengely pedig erre merőlegesen az vízszintes síkban helyezkedik el. A z , függőleges tengely körüli forgás a jármű legyezési szögsebessége, pozitív iránya az óramutató járásával ellentétes irányban értelmezett. A δ kormányoszoggal elkormányzott első kerék hatására az autó sebességének iránya megváltozik, és a kúszás miatt nem esik egybe sem az első kerék irányával, sem pedig a jármű hossz tengelyének irányával. A megcsúszással jelen dolgozat nem



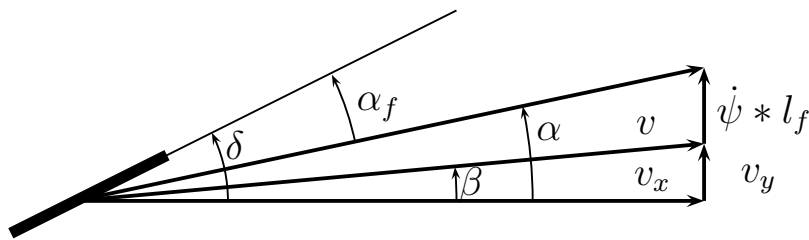
4.1. ábra. Az Ackermann szerkesztés



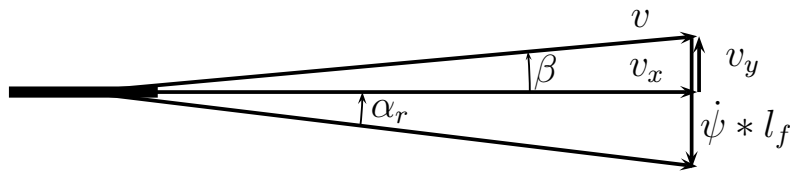
4.2. ábra. Az alkalmazott biciklimodell

foglalkozik. A gépjármű oldalkúszása azt jelenti, hogy a gépjármű (súlypontbeli) sebességvektora és hossz tengelye nem párhuzamosak, egymással β szöget zárnak be. A keréktalpponton ez még nem jelent megcsúszást, csak kúszást, mely a gumiabroncs deformációjával magyarázható. Az egyes kerekeknél ébredő oldalkúszási szög a sebességvektortól mutat az abroncs felé. [14]

Az oldalkúszás hatását az egyes talppontokon befolyásolják a gépjármű sebessége, a súlypontban lévő β értéke, a legyezési szögsebesség (és az adott kerék súlyponttól vett távolsága), valamint kormányzott kerekek esetén az elkormányozottság mértéke. Ezek eredőjeként kaphatjuk az α_f és α_r keréktalpponti oldalkúszás szögeket. A kerekeknél ébredő sebességkomponensek a 4.3. és a 4.4. ábrán látható vektori összegzéséből adódnak a keresett szögértékek az alábbiak szerint.



4.3. ábra. Az első kerék sebességkomponensei és oldalkúszása



4.4. ábra. A hátsó kerék sebességkomponensei és oldalkúszása

$$v_x \tan \alpha = v_y + \dot{\psi} l_f \quad (4.1)$$

$$\frac{v_x}{v_y} = \tan \beta \quad (4.2)$$

$$v_x = v \cos \beta \quad (4.3)$$

A fenti összefüggésekből kiindulva és azokat rendezve az alábbi egyenletek adódnak az első illetve hátsó kerekekre:

$$\tan \alpha = \frac{v_x \tan \beta + \dot{\psi} l_f}{v_x} = \tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \quad (4.4)$$

$$\tan \alpha_r = \frac{-v_x \tan \beta + \dot{\psi} l_r}{v_x} = -\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \quad (4.5)$$

Az α és β értékeket igen kicsinek feltételezve az alábbi egyszerűsítésekkel lehet élni:

$$\tan \beta = \beta; \quad \cos \beta = 1; \quad \tan \alpha = \alpha \quad (4.6)$$

Ebből a keresett α_f és α_r oldalkúszási szögekre az alábbi értékek jönnek ki:

$$\alpha_f = \delta - \alpha = \delta - \beta - \frac{\dot{\psi}l_f}{v} \quad (4.7)$$

$$\alpha_r = \alpha = -\beta + \frac{\dot{\psi}l_r}{v} \quad (4.8)$$

Adott kerék oldalkúszásának hatására a keréktalpponton oldalirányú erő ébred, melyet az egyszerűsítés érdekében lineáris összefüggéssel szokás közelíteni:

$$F_{lat} = c\alpha \quad (4.9)$$

Ahol c a kerék oldalirányú merevségi tényezője.

A kerék oldalirányú merevségi tényezője megadja, hogy adott keréken, adott járműbe építve, egységnyi szögben futás hatására milyen oldalirányú erő ébred. A modellben a valós érték duplájával kell dolgozni, ugyanis a két-két kerék van egy virtuális kerékkal reprezentálva. Átlagos személygépjárműveknél $10^4 - 10^5$ nagyságrendű konstansokról van szó, esetünkben ennél jelentősen kisebb értékeket feltételezett a szerző. Mivel a szabályozó tervezését alapvetően befolyásolja ezen konstansok értéke, így ennek kimérése, vagy becslése fontos lehet a modell későbbi finomítása érdekében. Az adott kutatás témájába ez, a gumi dinamikájával és deformációjával szorosan összefüggő témakör nem tartozott bele annak bonyolultsága miatt.

Az α_f és α_r szögeket, valamint a c_f és c_r értékeket a 4.9 összefüggésbe helyettesítve, a kerekeknél ébredő oldalirányú erők adódnak.

$$F_{lat_f} = c_f \alpha_f = c_f \left(\delta - \beta - \frac{\dot{\psi}l_f}{v} \right) \quad (4.10)$$

$$F_{lat_r} = c_r \alpha_r = c_r \left(-\beta + \frac{\dot{\psi}l_r}{v} \right) \quad (4.11)$$

Mivel az agymotoros hajtásnál a különböző kerekeken széles határok közötti előírt nyomaték vihető át, s ezek eredője a legyezési szögsebesség befolyásolására is alkalmas, ennek modellbe történő integrálása alapvető.

Az egyes kerekekre adott nyomatékokból (a csúszási határ alatti tartományt feltételezve egyelőre) a kerék sugarának ismeretében (annak deformációját elhanyagolva) kiadódnak a keréktalpponti erők, s ezek súlypontra vonatkozó forgatókarját ismerve számítható az egyes kerekek a járművet z tengely körül forgató nyomatéka.

$$M_{fl} = F_{fl}l_{fl} = \frac{M_{fl_{mot}}}{R}l_{fl} \quad (4.12)$$

Ahol M_{fl} a bal első motor súlypontra vonatkozó, z tengely körüli forgatónyomatéka, F_{fl} a bal első keréken ébredő keréktalpponti erő, $M_{fl_{mot}}$ a bal első motor nyomatéka, R a kerék sugara, l_{fl} pedig a bal első keréken ébredő keréktalpponti erő forgatókarja a z tengelyre.

Az egyes kerekeken ébredő keréktalpponti erők z tengelyre számított nyomatékának eredőjeként adódó nyomaték (4.13. egyenlet) már könnyen integrálható a hagyományos modellbe.

$$M_z = M_{fr} - M_{fl} - M_{rl} + M_{rr} \quad (4.13)$$

4.1.2. A mozgásegyenletek felírása

A geometriai méretek, valamint a külső erők és nyomatékok ismeretében felírhatók a mozgásegyenletek. Két bemenetű (δ , M) rendszert feltételezve az oldalirányú erők eredőjét, valamint a legyezési nyomatékok eredőjét felírva adódnak az alábbi képletek.

Y irányú erők eredője:

$$ma_{cp} = F_{lat_f} + F_{lat_r} \quad (4.14)$$

$$a_{cp} = \frac{v^2}{R_{iv}} = v\omega = v(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \quad (4.15)$$

$$mv(\dot{\psi} + \dot{\beta}) = c_f \left(\delta - \beta - \frac{\dot{\psi}l_f}{v} \right) + c_r \left(-\beta + \frac{\dot{\psi}l_r}{v} \right) \quad (4.16)$$

Z tengely körüli nyomatékok egyenlete:

$$J\ddot{\psi} = F_{lat_f}l_f - F_{lat_r}l_r + M_z \quad (4.17)$$

$$J\ddot{\psi} = c_f l_f \left(\delta - \beta - \frac{\dot{\psi}l_f}{v} \right) - c_r l_r \left(-\beta + \frac{\dot{\psi}l_r}{v} \right) + M_z \quad (4.18)$$

4.1.3. Áttérés állapotér reprezentációra

A 4.16., valamint a 4.18. egyenleteket továbbvíve, azokat $\ddot{\psi}$ és $\dot{\beta}$ -ra rendezve lehet áttérni állapotér reprezentációra, amennyiben

$$x = \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \beta \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} \delta \\ M_z \end{bmatrix}; \quad y = \dot{\psi} \quad (4.19)$$

Az egyenletek rendezve:

$$\dot{\beta} = \frac{c_f}{mv}\delta - \frac{c_f + c_r}{mv}\beta - \left(\frac{c_f l_f - c_r l_r}{mv^2} + 1 \right) \dot{\psi} \quad (4.20)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{c_f l_f}{J}\delta - \frac{c_f l_f - c_r l_r}{J}\beta - \frac{c_f l_f^2 + c_r l_r^2}{Jv}\dot{\psi} + \frac{1}{J}M_z \quad (4.21)$$

Majd áttérve állapotteres felírásra:

$$\dot{\psi} = Ax + Bu \quad (4.22)$$

$$y = C^T x \quad (4.23)$$

Ahol az állapotteres reprezentáció mátrixai:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{c_f l_f^2 + c_r l_r^2}{Jv} & -\frac{c_f l_f - c_r l_r}{J} \\ -\left(\frac{c_f l_f - c_r l_r}{mv^2} + 1\right) & -\frac{c_f + c_r}{mv} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{c_f l_f}{J} & \frac{1}{J} \\ -\left(\frac{c_f}{mv} + 1\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$C^T = [1 \ 0] \quad (4.26)$$

4.2. Szabályozási feladat

A szabályozási feladat referencijel követése, vagyis az $\left| \dot{\psi} - \dot{\psi}_{ref} \right|_{t \rightarrow \infty} = \min!$ egyenlőség teljesülése, minél kisebb túllendülés és gyors beállási idő mellett. Az alapmodell két bemenetű és egy kimenetű (MISO, Multiple Input Single Output) rendszer, ahol a két bemenetet a δ kormánysszög, valamint az M_z legyezési nyomaték jelentik. A legyezési nyomatékot az alsó szintű szabályozással szétosztva a négy kerékre, öt bemenetű, egy kimenetű rendszer adódik.

Mivel az állapotok közül csak az egyiket, vagyis a legyezési szögsebességet mérjük szenzorok segítségével, így állapotbecslő alkalmazása szükséges.

A szabályzót a modellautón történő alkalmazás előtt mind lineáris, mind nemlineáris Matlab Simulink modellen tesztelni és hangolni kell, valamint paramétervizsgálat elvégzése is szükséges.

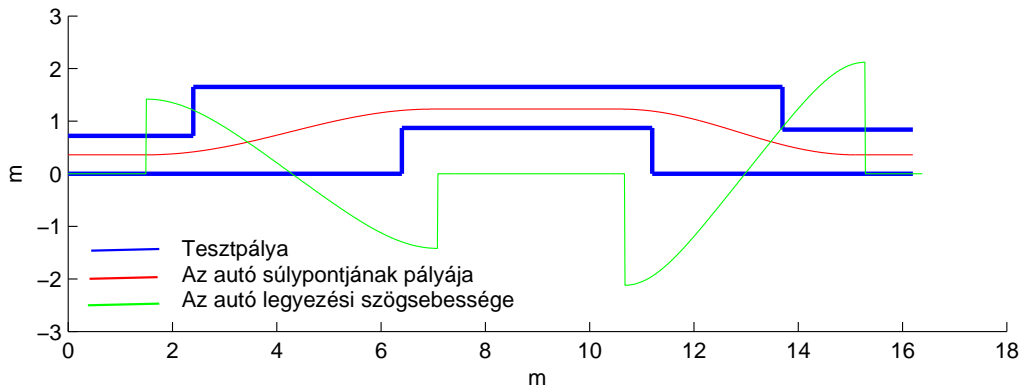
4.3. Referencijel képzése

A legyezési dinamikával kapcsolatos szabályozási feladat a szakirodalomban általában a $\dot{\psi}$ referencijel követése. A trajektóriakövetés, vagy ψ legyezési szög követése ekkor még nem valósul meg a kettő közti integrálás miatt. Az útvonalkövetéshez megfelelő referencijel képzés külön kutatási feladatot és témakört ölel fel, mellyel ez a kutatás nem foglalkozik. Ebben a munkában referencijelként, az ISO/TR-3888 szabványban definiált kettős sáv váltás teszt pályájának lekicsinyítésén alapuló, a szerző által definiált szinuszos jellegű pálya került alkalmazásra. A pálya görbületi sugara a 4.27. képlet alapján számítható, melyből a 4.28. képlet alapján adódik a legyezési szögsebesség. Ekkor az R és a $\dot{\psi}$ az x , vagyis az úttesttel párhuzamos koordináta függvényében adottak. Ám ahhoz, hogy a gépjármű által valóban megtett utat vegyük figyelembe, s így az idő függvényében ismerjük a $\dot{\psi}$ értékét, előbb át kell térni ívhosszparaméterre. [9] Az áttéréshez az x tengely

egyenközű felosztása után a pályagörbe hossza ezen pontok között Pitagorasz-tétellel közelíthető. Ezeket összeadva adódik az s megtett úthossz az x függvényében. Az s egyenközű felosztásával és a interpoláció alkalmazásával adódik az egységnyi megtett útszakaszokhoz tartozó x értékek. Ezekben a pontokban alkalmazva az alábbi képleteket megkapjuk a ψ legyezési szögsebességet a hely függvényében. a 4.5. ábrán látható a pálya, az autó középvonala, valamint az ehhez szükséges legyezési szögsebesség az s függvényében.

$$R = \frac{(1 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}}{\ddot{y}} \quad (4.27)$$

$$\dot{\psi} = \frac{v}{R} \quad (4.28)$$



4.5. ábra. Kettős sávváltás teszt

4.4. Szabályozási módszerek

4.4.1. LQR szabályozó

A szerző kitűzött szabályozási feladatot lineáris kvadratikus szabályozó alkalmazásával oldotta meg. Mivel a szabályozási cél referenciajel követése, és az eredeti modell nem integráló tulajdonságú, struktúramódosítás módszerének alkalmazása volt szükséges. [4] Ennek metodikáján az eredeti kétállapotú rendszert ki kellett bővíteni egy harmadik állapottal, melynek deriváltja a $\dot{\psi}$ kimenet és az $\dot{\psi}_r$ referenciajel különbsége, vagyis $\dot{z} = \dot{\psi}_r - \dot{\psi}$, s ezt egy integrátoron és egy erősítésen keresztül vinni a rendszer bemenetére. A 4.6. ábrán látható az eredeti modell, míg a 4.7. ábrán a kiegészített rendszer. Az állapotter dimenziójának növekedtével a reprezentáció mátrixai is változtak, a rendszer bemenete pedig a referenciajel lett. Az LQR szabályozó eredménye immár egy $K_{2 \times 3}$ -as mátrix, mely a mindhárom állapotot mindkét bemenetre súlyozza. A bővített rendszer állapotter reprezentációja, kimentei egyenlete, valamint mátrixai az alábbiak:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + Bu + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (4.29)$$

$$y = C^T \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

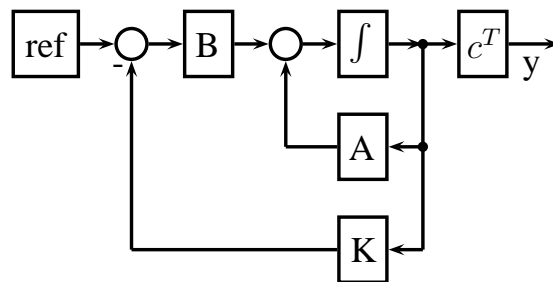
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{c_f l_f^2 + c_r l_r^2}{Jv} & -\frac{c_f l_f - c_r l_r}{J} & 0 \\ -\left(\frac{c_f l_f - c_r l_r}{mv^2} + 1\right) & -\frac{c_f + c_r}{mv} & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{c_f l_f}{J} & \frac{1}{J} \\ -\left(\frac{c_f}{mv} + 1\right) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

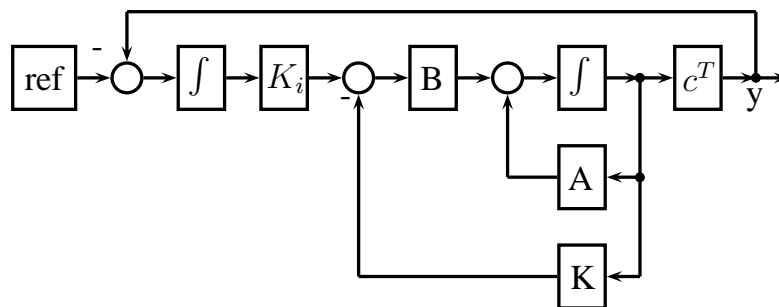
$$C^T = [1 \ 0 \ 0] \quad (4.33)$$

Az LQR költségfüggvény, vagyis a minimalizálandó funkcionál az alábbi:

$$J(x, u) = \frac{1}{2} \int_0^T [x(t)^T q x(t) + ru(t)^2] dt \quad (4.34)$$

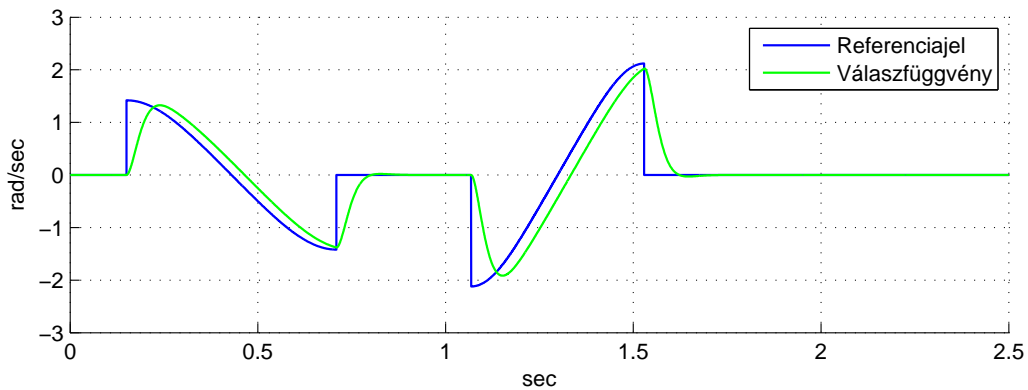


4.6. ábra. A LQR alapmodell

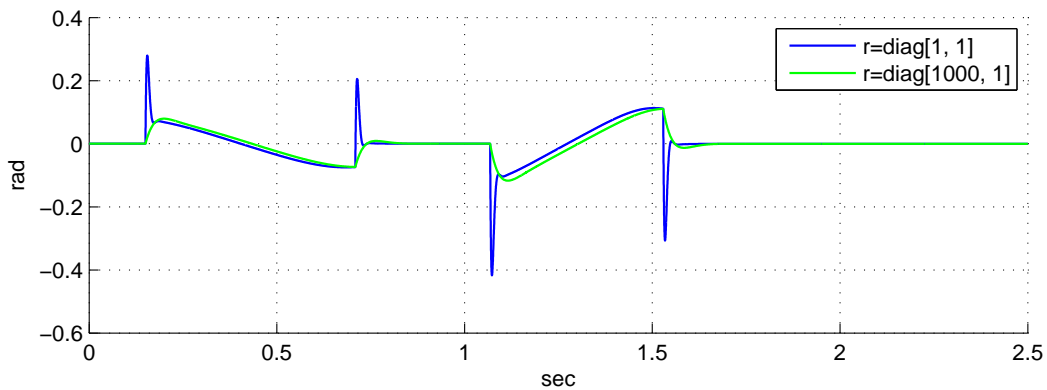


4.7. ábra. A LQR modell struktúra módosítással

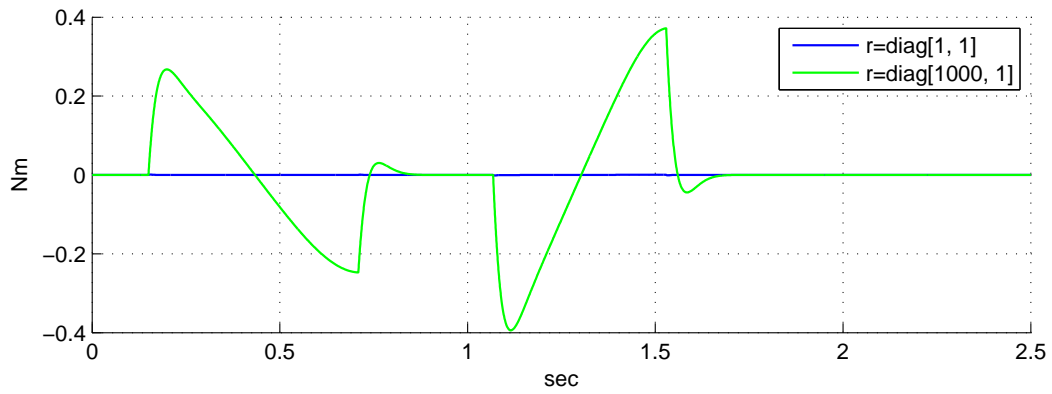
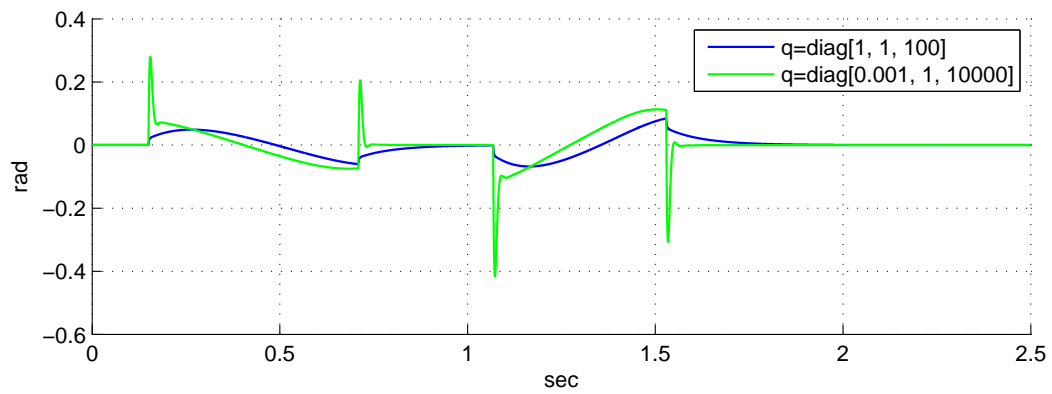
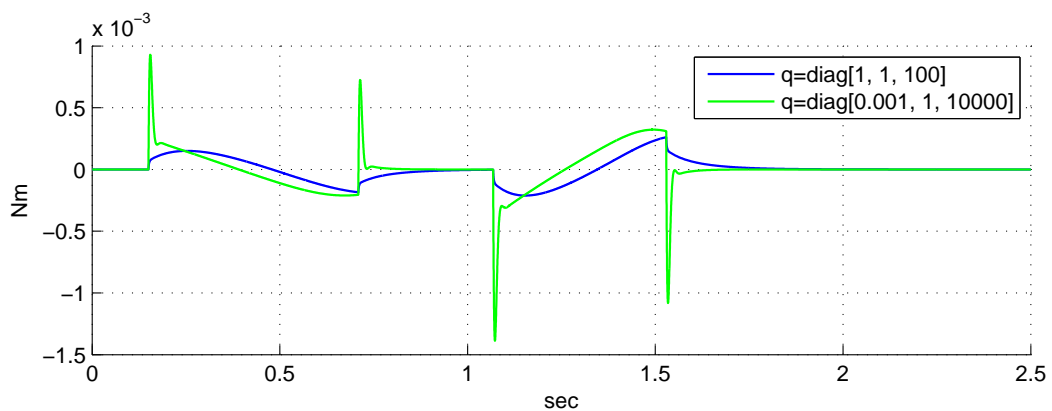
A modellt paramétervizsgálatnak vetve alá megfigyelhető, hogy a kerekek oldalirányú merevségi tényezőjének függvényében a rendszer bizonyos tartományokban instabil viselkedést mutat. A tapasztalatokra alapozva a c_r és c_f paraméterek úgy lettek felvéve, hogy a gépjármű stabil tartományban mozogjon. A pontos szabályozás érdekében fontos lenne az oldalirányú merevségek kimérése, ám ennek megvalósítására ebben a kutatásban nem volt lehetőség. A referenciajel követése a 4.8. ábrán láthatóan megvalósul, az LQR szabályozásnak köszönhetően a q és r mátrixok segítségével a minőségi tulajdonságok hangolhatóvá váltak. Az r mátrix értékeinek megadásával a beavatkozókat lehet súlyozni, melynek hatását a 4.9. és a 4.10. ábrák mutatják. A 4.10. ábrán látható, 10^{-3} nagyságrendű maximummal rendelkező kék függvényt a zöld színűvel összevetve az r mátrix szignifikáns hatása mutatkozik. A szimulációk azt mutatják, hogy az r mátrix első értékének növelésének hatására (vagyis δ büntetésével), nem túszerű karakterisztikák adódnak a beavatkozókhoz, hanem az alábbi ábrákon látható egyenletesebb függvények. Ennek hatására azonban a referenciajel-követés sebessége csökken, hibája nő. A q mátrix változtatásával adódó válaszfüggvényeket a 4.13. ... 4.18. ábrák mutatják. Megfigyelhető, hogy a követési hiba súlyának növelésével, valamint a ψ súlyának csökkentésével a követés pontosabban valósul meg, de nőnek az aktuátoroktól elvárt beavatkozójelek, melyek a 4.11. és a 4.12. ábrákon láthatók.

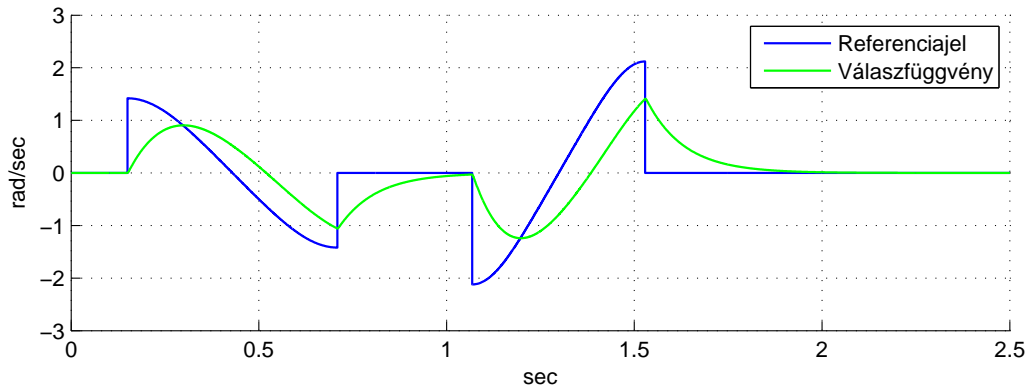


4.8. ábra. A válaszfüggvény $q = \text{diag}[0.001, 1, 10000]$ és $r = \text{diag}[1000, 1]$ esetén

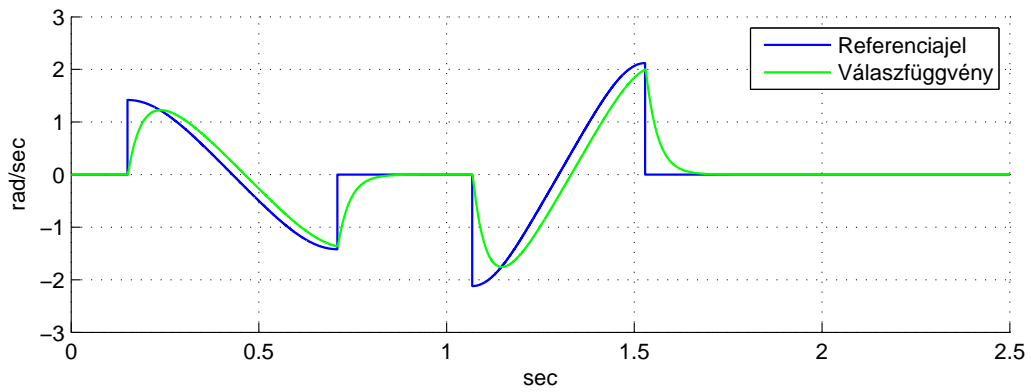


4.9. ábra. A kormányzóigény két különböző r súlyozás esetén

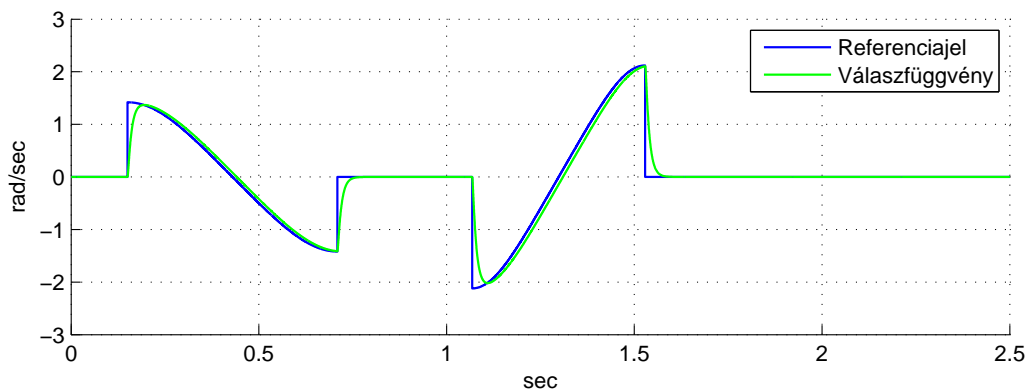
4.10. ábra. A legyezési nyomatékigény két különböző r súlyozás esetén4.11. ábra. A kormányzóigény két különböző q súlyozás esetén4.12. ábra. A legyezési nyomatékigény két különböző q súlyozás esetén



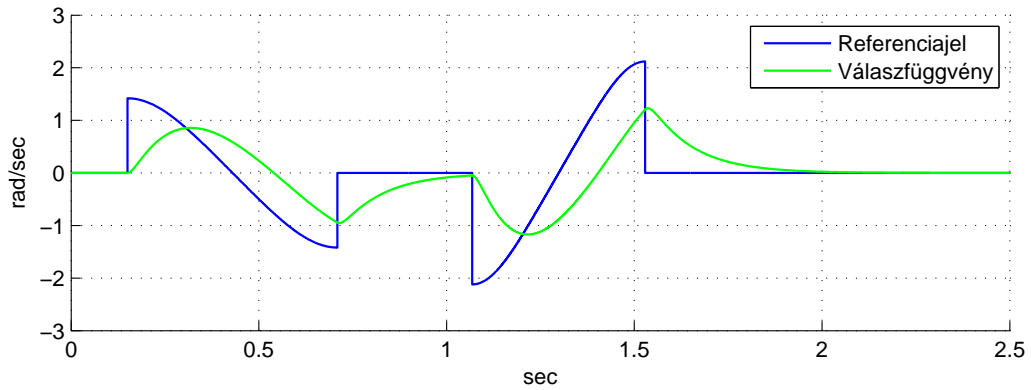
4.13. ábra. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[1, 1, 100]$ esetén



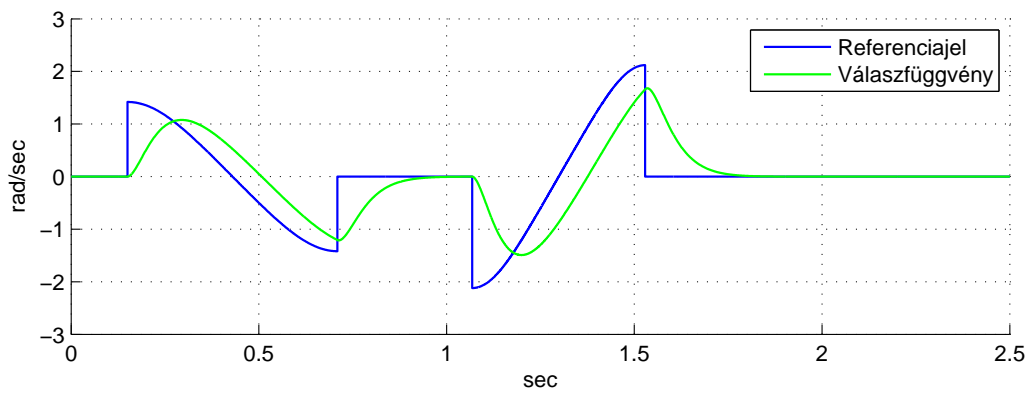
4.14. ábra. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[1, 1, 1000]$ esetén



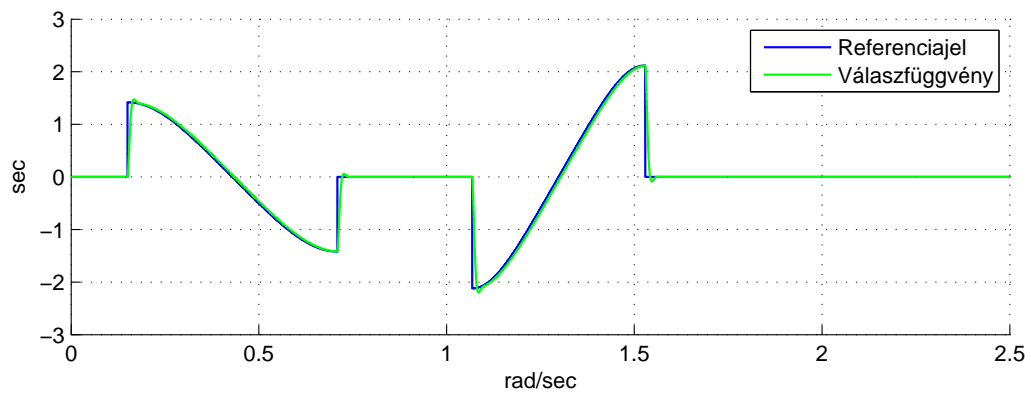
4.15. ábra. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[1, 1, 10000]$ esetén



4.16. ábra. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[0.01, 1, 1]$ esetén



4.17. ábra. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[0.0001, 1, 1]$ esetén



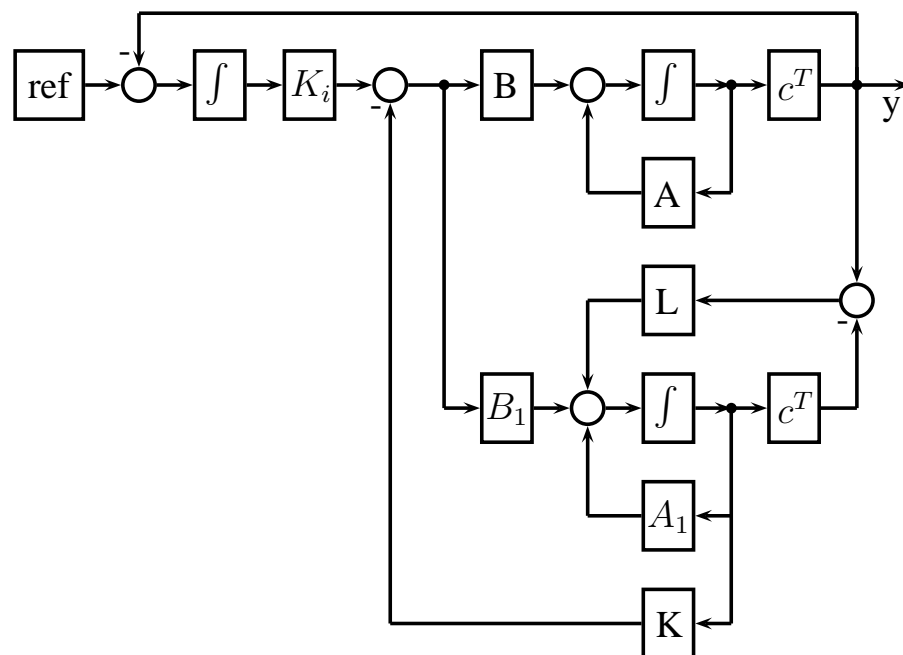
4.18. ábra. A referenciajel és a rendszer válaszfüggvénye $q = \text{diag}[0.001, 1, 10000]$ esetén

4.4.2. LQR állapotbecslő

Az eddigi rendszer hiányossága, hogy a három állapot közül a valóságban csak a ψ -ot ismerjük, így állapotbecslő alkalmazása szükséges. Az állapotbecslő tervezés első lépéseként a rendszer megfigyelhetőségének vizsgálata történt meg. A megfigyelhetőségi mátrix eleget tett a Kalman-féle rangfeltételnek [4], vagyis

$$\text{rang}O_n(c^T, A) = n \quad (4.35)$$

Az állapotbecslő L erősítési tényezőjét LQR módszerrel számolta a szerző, hangolása az egyes minőségi kritériumok alapján történt. A megfigyelővel kiegészített modell a 4.19. ábra mutatja.



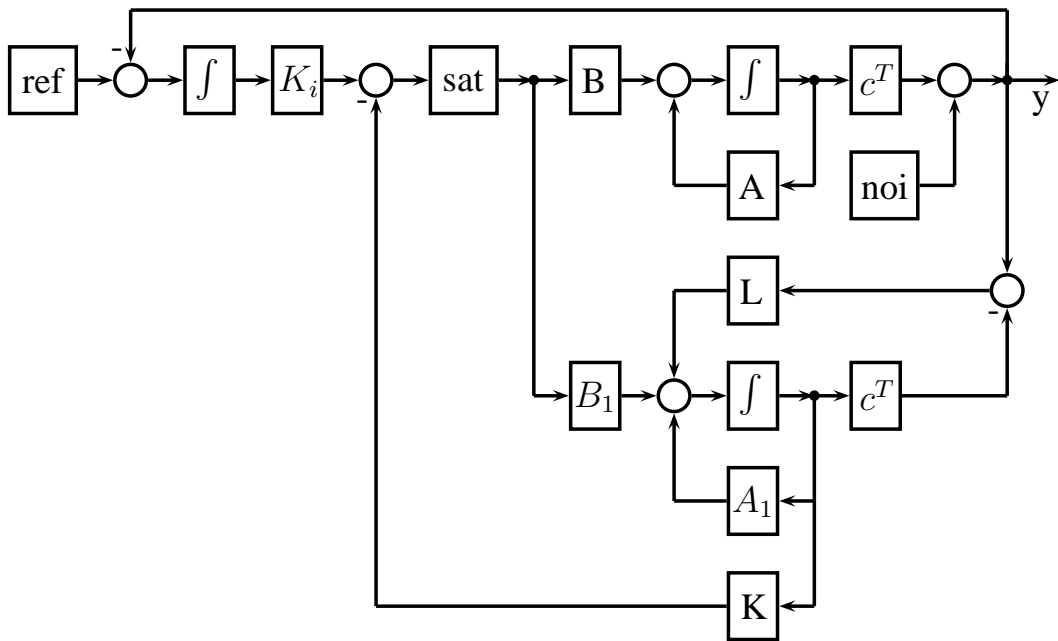
4.19. ábra. Az állapotbecslővel kiegészített modell

Az állapotbecslő tesztelésére lefuttatott számítások a várt eredményt hozták, vagyis a becsült állapotok a modellbeli valós állapotokat jól közelítették.

4.4.3. Zavarások, szaturáció

Zavarások

A gépjárművön történő implementálás előtt a szabályozót hangolni kell az esetlegesen felmerülő zajok kezelésére is. A lehetséges zajforrások közül a szenorzaj vizsgálata történt meg az ismert ± 0.0174 rad/sec szenorzaj alapján. Ezt a zajértéket a gyakorlatban még befolyásolják a rezgések is, ám ezek jelenleg elhanyagolásra kerültek. Egy véletlen szám generáláson alapuló zajt téve a kimenetre az állapotbecslővel kiegészített szabályozó eltérést mutatott az eredeti rendszerhez képest. A gyors beállási idő, a minimális

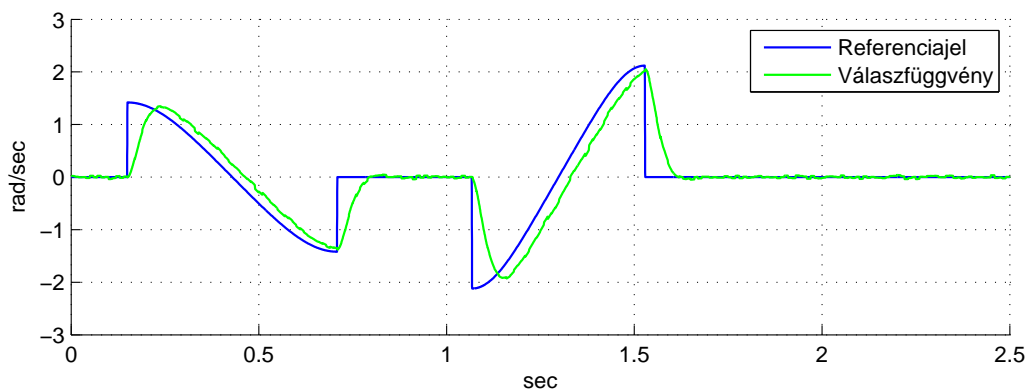


4.20. ábra. Szenzorajjal, valamint szaturációval bővített modell

túllendülés, valamint a bementek véges voltának figyelembe vételével történt az L súlyozó vektor értékeinek hangolása.

Szaturáció

A bemenetek, vagyis a nyomaték és a kormányzóg véges fizikai korlátainak figyelembe vétele egy-egy szaturációs blokk segítségével valósult meg. A 4.20. ábra mutatja a szenzorajjal, valamint a szaturációs blokkal kiegészített modellt, míg a 4.21. ábra a $q = \text{diag}[0.001, 1, 10000]$, $r = \text{diag}[1000, 1]$ súlyozómátrixokkal rendelkező, szenzorajjal terhelt rendszer válaszfüggvényét és a referenciajelet. Az r mátrix úgy lett kiválasztva, hogy a szaturációs blokkokon ne ütközzenek fel a beavatkozójelek.



4.21. ábra. A referenciajel és a válaszfüggvény szenzoraj esetén

4.4.4. Lineáris és nemlineáris tesztmodellek

A szabályozó modellautón történő tesztelése előtt sor került annak analízisére Matlab Simulink környezetben mind lineáris, majd nemlineáris dinamikai modell alkalmazásával. A lineáris dinamikai modell a 4.1.2. fejezetben ismertetett mozgásegyenletek alapján lett összeállítva Simulinkben. A modell bemenetét a szabályozott rendszerből kivezetett beavatkozójelek jelentik, míg kimenetét a $\dot{\psi}$ legyezési szögsebesség.

A nemlineáris modellben a kis szögekből adódó közelítéseket nem kerültek elhanyagolásra, így ez a modell a valós rendszert pontosabban írja le. A nemlineáris modell mozgásegyenleteinek levezetése az alábbi:

Az első és hátsó kerekek oldalkúszása a 4.4. és a 4.5. egyenletek rendezésével adódik:

$$\alpha = \arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \quad (4.36)$$

$$\alpha_f = \delta - \arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \quad (4.37)$$

$$\alpha_r = \arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \quad (4.38)$$

Az oldalirányú erő:

$$F_{lat} = c\alpha \quad (4.39)$$

Az oldalirányú erő y irányú komponense:

$$\begin{aligned} F_{latfy} &= c_f \alpha_f \cos \alpha = \\ &= c_f \left(\delta - \arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) \cos \left(\arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} F_{latry} &= c_r \alpha_r \cos \alpha_r = \\ &= c_r \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) \cos \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) \end{aligned} \quad (4.41)$$

Az oldalirányú erő x irányú komponense:

$$\begin{aligned} F_{latfx} &= -c_f \alpha_f \sin \alpha = \\ &= -c_f \left(\delta - \arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) \sin \left(\arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned}
F_{latrx} &= -c_r \alpha_r \sin \alpha_r = \\
&= -c_r \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) \sin \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) \quad (4.43)
\end{aligned}$$

A nyomatékok eredője:

$$M_{fl} = F_{fl} l_{fl} = \frac{M_{flmot}}{R} l_{fl} \quad (4.44)$$

$$M_z = M_{fr} - M_{fl} - M_{rl} + M_{rr} \quad (4.45)$$

Mozgásegyenletek:

Y irányú erők eredője:

$$ma_{cp} = F_{latf} + F_{latr} \quad (4.46)$$

$$a_{cp} = \frac{v^2}{R_{iv}} = v\omega = v(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned}
mv(\dot{\psi} + \dot{\beta}) &= \\
c_f \left(\delta - \arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) \cos \left(\arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) + \\
c_r \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) \cos \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) \quad (4.48)
\end{aligned}$$

Z tengely körüli nyomatékok eredője:

$$J\ddot{\psi} = F_{latf} l_f - F_{latr} l_r + M_z \quad (4.49)$$

$$\begin{aligned}
J\ddot{\psi} &= \\
c_f \left(\delta - \arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) \cos \left(\arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) l_f - \\
c_r \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) \cos \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) l_r + M_z \quad (4.50)
\end{aligned}$$

X irányú erők eredője:

$$m(1 + \gamma)a = F_{latfx} + F_{latrx} + F_x \quad (4.51)$$

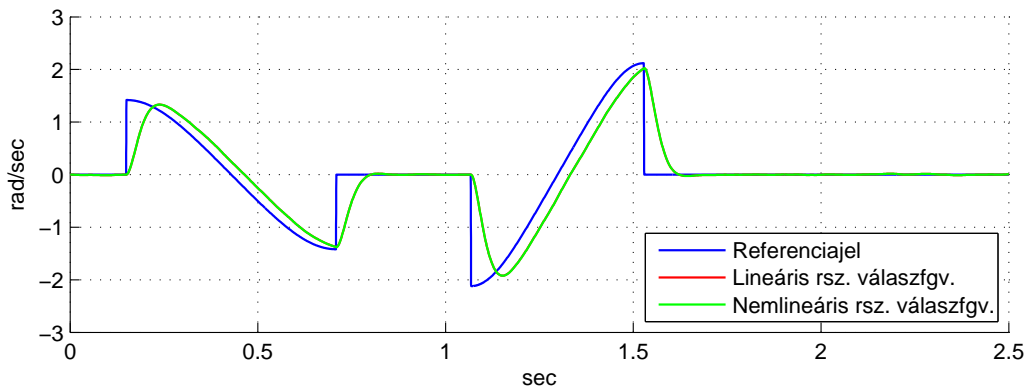
$$F_x = F_{fr} + F_{fl} + F_{rl} + F_{rr} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned}
m(1 + \gamma)a = & \\
& - c_f \left(\delta - \arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) \sin \left(\arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \right) \\
& - c_r \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) \sin \left(\arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \right) + F_x
\end{aligned} \tag{4.53}$$

Az y irányú erők és a z tengely körül forgató nyomatékok eredőjét továbbvíve (az x irányú erőket és a hosszdinamikát még nem emeljük a modellbe), és egy Simulink modellben összeállítva adódik a nemlineáris dinamikai modell. A be- és kimenetét lineáris rendszerhez hasonlóan a szabályozott rendszerből kivezetett beavatkozójelek, valamint a $\dot{\psi}$ legyezési szögsebesség adják.

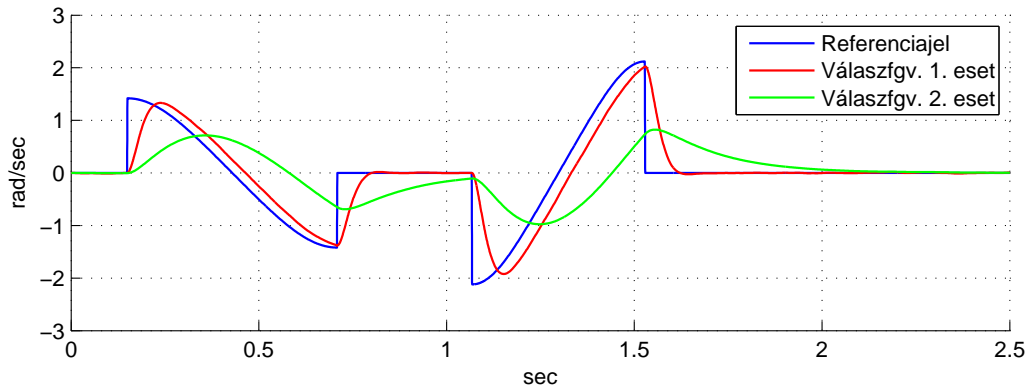
4.5. Elemzés

Az LQR módszerrel szabályozott, állapotbecslővel, zavarással és szaturációs blokkal kiegészített rendszer analízise lineáris és nemlineáris modellek alkalmazásával valósult meg. A 4.22. ábrán látható a rendszer kettős sávváltás teszt referenciajellel adott válaszfüggvénye $q = \text{diag}[0.001, 1, 10000]$ és $r = \text{diag}[1000, 1]$ esetére (az állapotbecslő súlyozómátrixának főátlója csupa 1-esből áll). Az ábrán a lineáris és nemlineáris válasz gyakorlatilag egybeesik, a kettő közötti különbség 10^{-4} nagyságrendű.

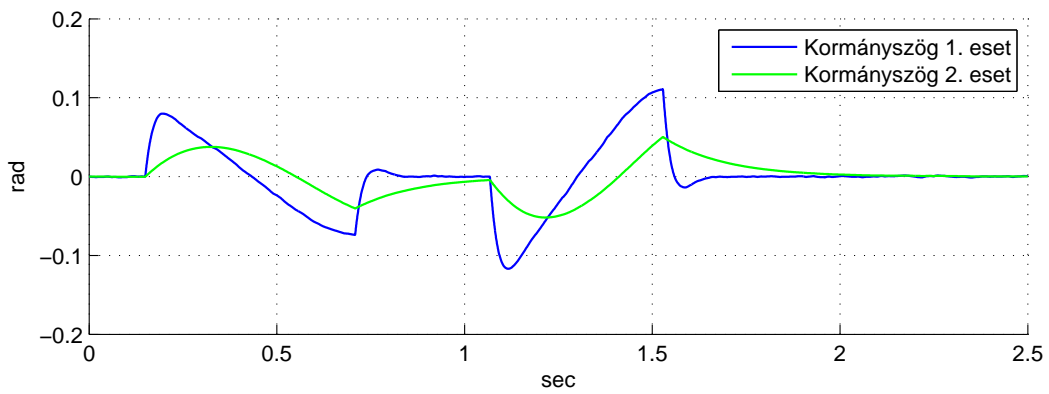


4.22. ábra. A lineáris és nemlineáris modell válaszfüggvényei a referenciajellel

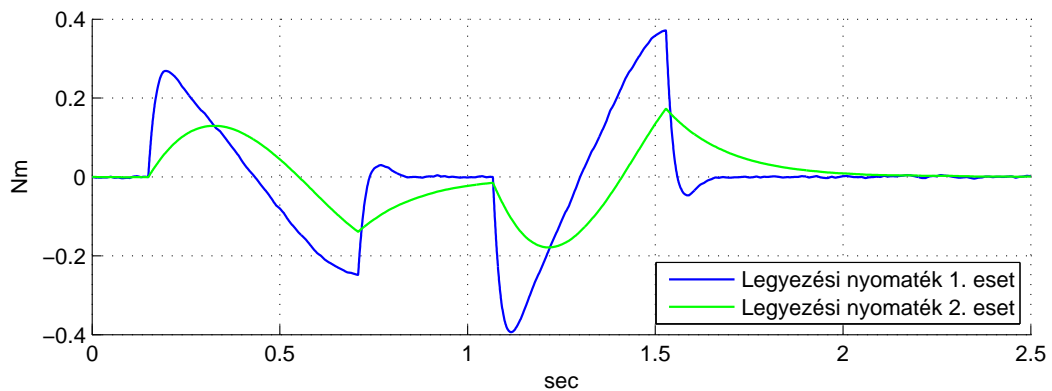
A referenciajel követése megvalósul, a szabályozó q és r mátrixai segítségével hangolható mind a jelkövetés minőségi tulajdonságai, mind a beavatkozójelek nagyságának tekintetében. A 4.23. ábra a nemlineáris rendszer válaszát mutatja két esetben. Az elsőnél $q = \text{diag}[0.001, 1, 10000]$, a másodiknál $q = \text{diag}[0.01, 1, 100]$ súlyozást s mindkét esetben $r = \text{diag}[1000, 1]$ -t alkalmazva. Látható, hogy a $\dot{\psi}$ állapotnak kis súlyszámot választva és a hibajelnek nagy súlyt adva a szabályozás pontosabb referenciajel követést valósít meg. Ugyanakkor a 4.24. és a 4.25. ábrán megfigyelhető, hogy a gyorsabb és pontosabb referenciajel követéssel nagyobb csúcsok és lengések mutatkoznak a beavatkozójeleken.



4.23. ábra. A nemlineáris modell válaszfüggvényei különböző q mátrixok esetén



4.24. ábra. A nemlineáris modell kormányaszögigényei különböző q mátrixok esetén

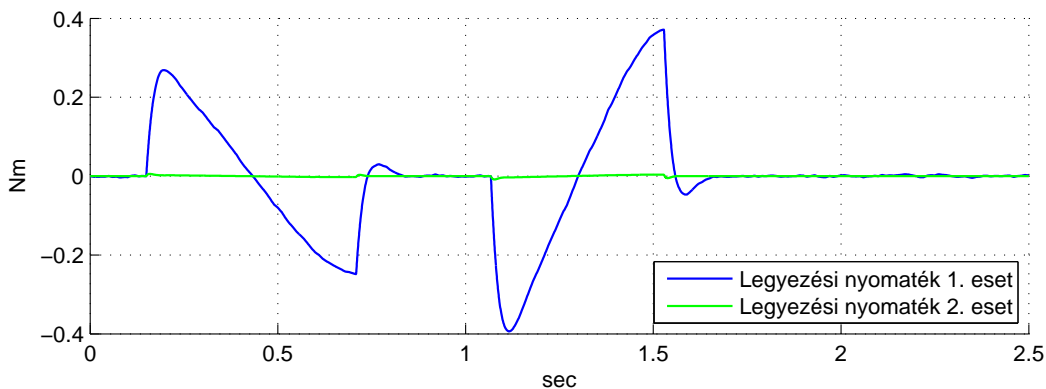


4.25. ábra. A nemlineáris modell legyezési nyomatékigényei különböző q mátrixoknál

Az r mátrix értékválasztásának hatását a 4.26. és a 4.27. ábrák mutatják. Az első esetben a beavatkozójelek súlyozása $r = \text{diag}[1000, 1]$ mátrixszal valósult meg, míg a második esetben $r = \text{diag}[10, 1]$ került alkalmazásra. Mindkét számítás $q = \text{diag}[0.001, 1, 10000]$ mellett valósult meg. Látható, hogy az első második esetben, vagyis amikor a kormányzőg a kisebb súlyt kapta, a δ igény lengéseket és csúcsokat tartalmaz, míg a nyomatékigény gyakorlatilag elhanyagolhatóan kicsi. Az első esetben ezzel szemben a kormányzőg igény ideálisnak mondható, mert amellett, hogy sem lengéseket sem kiugró csúcsokat nem tartalmaz, értéke is alacsonyabb, míg a nyomaték is részt vesz a gépjármű kormányzásában. Ugyanakkor egyik beavatkozójel sem éri el a lehetséges maximumát, mely a kormányzőgnél ± 0.5 rad lenne, a nyomatéknál pedig ± 2.6 Nm.



4.26. ábra. A nemlineáris modell kormányzőgigényei különböző r mátrixok esetén



4.27. ábra. A nemlineáris modell legyezési nyomatékigényei különböző r mátrixoknál

4.6. A legyezési nyomaték szétosztása

A fenti fejezetekben bemutatott felső szintű szabályozás által adódó beavatkozójelek közül az M_z legyezési nyomaték további szétosztása szükséges, melyet az alsó szintű szabályozás végez. Az M_z a négy keréktalpponti erő súlypontra számított forgatónyomatékának eredőjeként adódik. Szétosztásánál az alábbi célok lettek figyelembe véve:

- a keréktalpponti erő oldalanként egyezzenek meg
- a kerekek ne csússzanak
- a gumik egyenletesen és minél kisebb mértékben kopjanak
- a hosszirányú sebesség ne változzék jelentősen
- a motorok energiakorlátosak

A 4.28. ábrán látható, hogy amíg a gépjármű egyenesen halad, a kerekek fordulatszáma megegyezik. Amennyiben ezt a sebességet kell tartani ívmenetben, az $v = r\omega$ képlet alapján a belső kerekek kisebb fordulatszámon, míg a külsők nagyobb fordulatszámon kell forogjanak. A nyomatékok elosztása is ezt követi, vagyis ívmenetben a külső kerekek nagyobb nyomatékigénynek kell eleget tegyenek, nagyobb keréktalpponti erő ébred a külső íven, ezzel segítve a kormányzást.

A legyezési nyomatékokot adó oldalankénti keréktalpponti erők különbsége a nyomtávok figyelembevételével lett számítva úgy, hogy közben az oldalankénti erők elől-hátul megegyezzenek. Az adódó ΔF erőkülönbség a jobb és bal oldal közötti szétosztásával a belső íven $-\frac{\Delta F}{2}$, míg a külső íven $\frac{\Delta F}{2}$ adódik a meglévő F_h hajtóerőhöz. A kerekek 85 mm-es sugarának figyelembevételével számítható a motoroktól elvárt nyomaték, mely az M_h hajtónyomaték és a ΔM nyomaték előjeles összege.

$$M_z = 0,25\Delta F + 0,245\Delta F \quad (4.54)$$

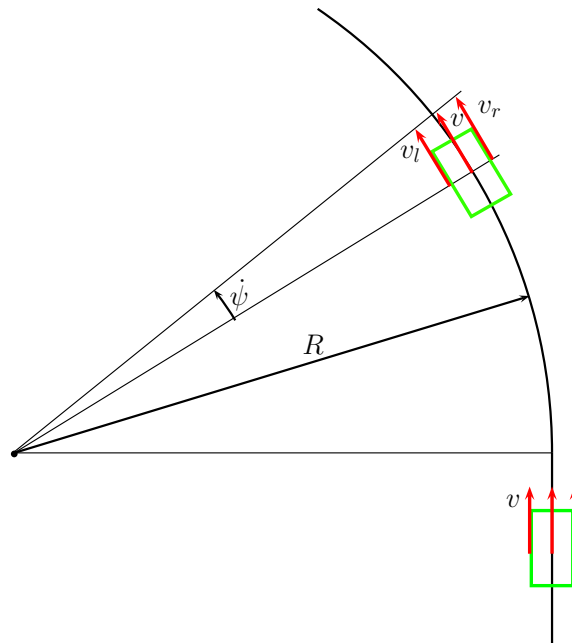
$$\Delta F = \frac{M_z}{0,495} \quad (4.55)$$

$$\sum F = F_h \pm \frac{\Delta F}{2} \quad (4.56)$$

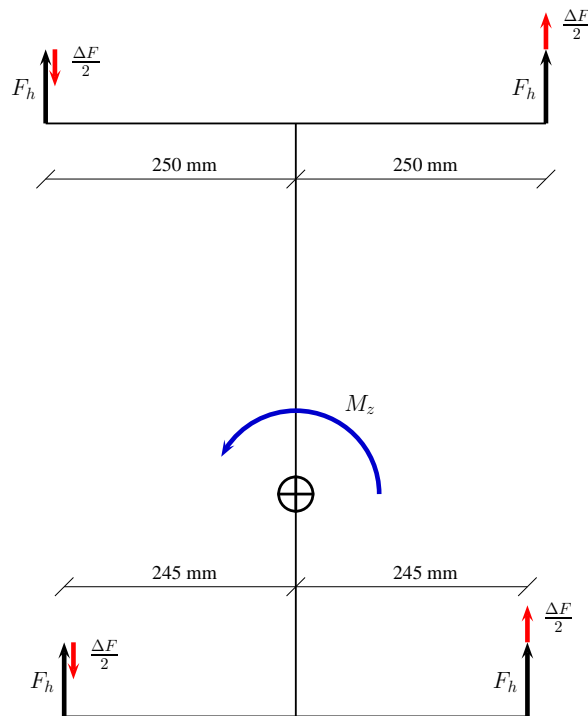
$$\Delta M = 0,085\Delta F \quad (4.57)$$

$$\sum M = M_h \pm \Delta M \quad (4.58)$$

Az erővektorok, valamint az eredőjüként adódó M_z nyomaték a 4.29. ábrán látható.



4.28. ábra. A jármű sebességvektorai ívmenetben



4.29. ábra. A keréktalpponti erők

5. fejezet

Eredmények összegzése

A modellautóval kapcsolatos kutató- és fejlesztőmunkát három nagy feladatkörre lehet bontani, melyek külön-külön más-más szakterületet ölelnek fel és különböző kihívások elé állították a szerzőt. A dolgozat az agymotoros technológiában rejlő lehetőségek, valamint a szabályozás fejlesztésének irányait bemutató szakirodalmi áttekintésen alapszik.

Az első feladat a kiindulási alapot adó Baja 5B modellautó átépítését és az ehhez szükséges mechanikai alkatrészek megtervezését, gyártatását és szerelését jelentette. A tervezési feladat bonyolultságát az adta, hogy a meglévő futómű- és kerékgeometriához, valamint a motor méreteihez és rögzítési pontjaihoz kellett alkalmazkodni. Ez az első futóműnél jelentett komoly kihívást, ugyanis rendkívül szűk hely állt rendelkezésre a motor rögzítésére, a motor tengelyén egy mágnes elhelyezésére, valamint ennek síkjával párhuzamosan, tőle 0.5 mm távolságra egy nyákon lévő szenzor illesztésére. A feladat sikeres végrehajtásával egy könnyen szerelhető, egytengelyűen illesztett, az adott helyen pontosan elférő, precíz megoldás született. A kerék motorhoz történő rögzítésénél a szintén erősen korlátozott geometriai méretek mellett az illesztés kapott nagy szerepet. Végül egy bonyolult geometriájú, ám precízen gyártott alkatrész felelt meg minden kritériumnak. A hátsó futóműnél az adott geometriához jól alkalmazkodó megoldás született, ugyanis változtatható kerékösszetartás mellett is biztosított a mágnes és a szenzor egymással való párhuzamossága. Az alkatrészek ALMgSi1 (EN AW 6082) alumínium alapanyagból kerültek gyártásra, ily módon a kis súly és magas szakítószilárdság is biztosított. A kész darabokat minden tekintetben könnyen és precízen lehet szerelni, mind az illesztett felületek, mind a szűk helyek tekintetében.

A második nagy témakört az agymotoros modellautó architektúrájának megtervezése és az egyes részek egyben való integrációja jelentette. A cél moduláris felépítésű jármű volt annak érdekében, hogy az egyes alrendszerek szimultán fejlesztése lehetővé váljék, valamint bizonyos modulok későbbi továbbfejlesztésének eredménye is könnyen integrálható legyen. Az architektúra építőelemeit a központi vezérlőegység, a négy motorvezérlő, a kormány szervó, a szenzormodul, a power management, valamint a rádiófrekvenciás kommunikációt intéző egység adják. A tervezett architektúra CAN kommunikációs protokoll alkalmazásával valósul meg, mely biztosítja a részek egyértelműen definiálható kapcsolattartását, esetleges későbbi továbbfejlesztését, vagy új egységek integrálását. A központi vezérlőegység intézi az egyes alrendszerek hiba vagy kalibrációs üzeneteinek feldolgozását, a rádiófrekvenciás modulon keresztül fogadja a kezelőszemély szándékát, a

szenzoregységtől a legyezési szögsebességet, s ezek felhasználásával a rajta futó szabályozás kimenetét kiküldi a motorvezérlőknek, valamint a kormány szervónak. A motorvezérlők nyomatékigényt, míg a szervó kormány szög igényt kap CAN-en keresztül. A power management szolgáltatja az vezérlőelektronikák számára az 5V-os tápfeszültséget, valamint a motorok és a szervó számára is a tápellátást. Emellett ellenőrzi az akkumulátorok állapotát és arról szükség esetén tájékoztatja a központi egységet.

A harmadik feladatkört a szabályozó megtervezése jelentette. A cél legyezési szögsebességet, mint referenciajel követő szabályozó fejlesztése volt minimális túllendülés és gyors beállási idő biztosítása mellett, az aktuátorok korlátainak figyelembe vételével. Az irodalom kutatás eredményeire építve, a szerző a szabályozási feladatot kétszintű szabályozó alkalmazásával oldotta meg. A felső szint intézi a jármű mozgásával kapcsolatos számításokat, míg az alsó szint a fentről kapott beavatkozójelet osztja szét az egyes aktuátorok között. A felső szintű szabályozás tervezése a dinamikai modell felállításával kezdődött, mely biciklimodell alkalmazásával valósult meg, majd a mozgásegyenletek kerültek felírásra. Az állapotteres felíráshoz a ψ legyezési szögsebesség (yaw rate), valamint a β oldalkúszás lettek kiválasztva. Az ily módon definiált, szabályozni kívánt rendszer két bemenetű (δ kormány szög, M_z legyezési nyomaték a keréktalpponti erőkből), egy kimenetű ($\dot{\psi}$). A rendszer nem integráló tulajdonságú, tehát a referenciajel követéshez struktúra módosítás alkalmazására volt szükség. Az állapot-visszacsatolás erősítési tényezőjének számítását a szerző LQR módszer alkalmazásával oldotta meg. Mivel az állapotok közül csak a $\dot{\psi}$ -t méri a szenzoregység, ezért állapotbecslő alkalmazására volt szükség, melynek L erősítési tényezője szintén LQR módszerrel került kiszámításra. Az aktuátorok energiakorlátosságának figyelembe vétele szaturációs blokk, míg a szenzor zaj egy kimenetre adott zavarással lettek figyelembe véve. Az eredményeket mind lineáris, mind nemlineáris Matlab Simulink modellek alkalmazásával kerültek kiértékelésre, és a szabályozó analízisét és hangolását is ezek segítségével végezte el a szerző. Az eredményeket kiértékelve kimutatható, hogy a referenciajel követése megvalósul, a kettő közti eltérés, valamint a minőségi tulajdonságok és a beavatkozókkal szemben támasztott igények a költségfüggvény q és r mátrixai segítségével jól hangolhatóak.

5.1. Kitekintés

Az agymotoros hajtásban rejlő lehetőségek mélyebb megismeréséhez a kutatás során megtervezett modellautó egy rugalmas, a jövőbeli konkrét célokhoz jól igazítható alapot biztosít. Az autó egyes egységeinek összeépítése és a szabályozó modellautón történő implementálása után annak identifikációjára kerül sor. A jövőben a szabályozó továbbfejlesztése mellett, a modellautó különböző szenzorokkal, kamerával való bővítésével új funkciók integrálására nyílik lehetőség. Az alsó szintű szabályozás optimalizálása ajánlott, a felső szintű szabályozó továbbfejlesztésének első lépését pedig a referenciajel képzési eljárás kiterjesztése, valamint a hosszirányú dinamika figyelembe vétele jelenthetné, melyekkel lehetővé válna a trajektóriakövetés. Ajánlott továbbá a hurokátvitel visszaállítási eljárás (LTR, Loop Transfer Recovery) alkalmazása. [7] A performanciák dinamikus súlyozása érdekében hasznos lenne frekvenciasúlyok alkalmazása, a külső zavarások hatásának minimalizálása érdekében pedig ajánlott a H_∞ szabályozási stratégia alkalmazása [17].

Irodalomjegyzék

- [1] Ferdinand Porsche élettörténete. <http://www.jarmunaplo.hu/ferdinand-porsche-elete/>.
- [2] A Ford eWheelDrive hajtása. <http://www.azauto.hu/2013/07/26/a-ford-ewheeldrive-hajtasa/>.
- [3] A Lohner-Porsche kerékagyba épített elektromotoros hajtású autó 1900-ban, 110 éve mutatkozott be a Párizsi Világkiállításon. http://autovezetes.network.hu/blog/kozlekedes_klub_hirei/a-lohner-porsche-kerekagyba-epített-elektromotoros-hajtasu-auto-1900-ban-110-eve-mutatkozott-be-a-parizsi-vilagkiállitason.
- [4] József Bokor and Péter Gáspár. *Irányítástechnika*. TYPOTEX, 2008.
- [5] Prof. József Bokor, Prof. Péter Gáspár, Szilárd Aradi, Péter Bauer, Alfréd Csikós, István Gőzse, Tamás Luspay, András Mihály, Balázs Németh, János Polgár, Alexandros Soumelidis, István Szászi, and Tamás Tettamanti. *Irányítástechnika gyakorlatok*. TYPOTEX, 2013.
- [6] Farbod Fahimi. Full drive-by-wire dynamic control for four-wheel-steer all-wheel-drive vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 51(3):360–376, 2013.
- [7] Péter Gáspár. Állapotmegfigyelő tervezése.
- [8] János Gyevik, Attila Csiszár, and Kálmán Rózsahegyi. Dsp alkalmazása a szabályozástechnikában. In *Infomatika a felsőoktatásban 2005*, 2005.
- [9] Tamás Gyukics. Kormány- és fékrendszer intergált irányításának tervezése menetstabilitás növelése érdekében. Master's thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2010.
- [10] Yutaka Hirano. Integrated vehicle control of an in-wheel-motor vehicle to optimize vehicle dynamics and energy consumption. In *10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2012.
- [11] Jeongmin Kim and Hyunsoo Kim. Electric vehicle yaw rate control using independent in-wheel motor. In *Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07*, pages 705–710, 2007.

-
- [12] W Li, Tec Potter, and Rp Jones. Steering of 4wd vehicles with independent wheel torque control. *Vehicle System Dynamics*, 29(sup1):205–218, 1998.
- [13] Russell P. Osborn and Taehyun Shim. Independent control of all-wheel-drive torque distribution. *Vehicle System Dynamics*, 44(7):529–546, 2006.
- [14] Rajesh Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. Springer, 2006.
- [15] Takashi Sugano, Hitoshi Fukuba, and Takamasa Suetomi. A study of dynamics performance improvement by rear right and left independent drive system. *Vehicle System Dynamics*, 48(11):1285–1303, 2010.
- [16] Béla Takarics. *TP modell transzformáció alapú csúszómód szabályozás és súrlódás kompenzáció*. PhD thesis, Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi Egyetem, 2011.
- [17] Rongrong Wang, Hui Zhang, and Junmin Wang. Linear parameter-varying controller design for four wheel independently-actuated electric ground vehicles with active steering systems. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, PP:1–1, 2013.
- [18] Thomas Weiskircher and Steffen Müller. Control performance of a road vehicle with four independent single-wheel electric motors and steer-by-wire system. *Vehicle System Dynamics*, 50(sup1):53–69, 2012.
- [19] Lu Xiong and Zhuoping Yu. *Electric vehicles*, chapter 4 Vehicle Dynamic Control of 4 In-Wheel-Motor Driven Electric Vehicle, pages 67–106. InTech, 2011.
- [20] Lu Xiung and Zhuoping Yu. Control allocation of vehicle dynamics control for a 4 in-wheel-motored ev. In *2009 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System*, 2009.