



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

DIPLOMATERV

Budapest, 2013.



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

AGYMOTOROS HAJTÁSÚ MODELLAUTÓ SZABÁLYOZÁSA ÉS ÉPÍTÉSE

Diplomaterv

Lang András

Konzulens:
Prof. Gáspár Péter

2013.

Nyilatkozat önálló munkáról, hivatkozások átvételéről

Alulírott Lang András kijelentem, hogy diplomatervem 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.

Lang András

Köszönetnyilvánítás

Mindenek előtt szeretném megköszönni szüleimnek és családomnak, hogy az elmúlt sok-sok év alatt mindenben támogattak e cél eléréséhez.

Köszönöm Dr. Gáspár Péternek, hogy lehetőséget biztosított az MTA SZTAKI, Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratóriumában végzett kutatásra. Köszönöm szakmai és emberi támogatását, amellyel a kutatás, valamint a diploma dolgozat írása során végigkísért.

Köszönöm Bakos Ádámnak a sok segítséget, rendelkezésemre állást, valamint közös lelkesedést a célért, amellyel támogatta munkámat. Köszönöm Gőzse Istvánnak, Regula Gergelynek, Dr. Soumelidis Alexandrosnak, Dr. Németh Balázsnak, a labor többi munkatársának, továbbá Mihály Andrásnak mind szakmai segítségüket, mind pedig a motiváló közeget, amellyel nagyban hozzájárultak a kutatás sikeréhez.

Összefoglaló

A kutatás témája agymotoros hajtású modellautó tervezése, megépítése és szabályozásának 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 autómoddellen 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 munka főbb részei a fedélzeti architektúra megtervezése és a csoportmunkában zajló fejlesztés összefogása, a mechanikai tervezés, valamint a szabályozó tervezés voltak. 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 belső-égésű motorral hajtott modellautó átépítéséhez szükséges mechanikai alkatrészek tervezése, gyártatása 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 hierarchikus irányítástervezési struktúrával rendelkező, elosztott szabályozás felső- és középső szintjének megtervezése a szerző feladatát képezték. A tervezés hangsúlyos és részletes kidolgozásra kerülő része a felső szintű legyezési dinamika szabályozása volt, emellett a hosszirányú dinamika rövid ismertetése és a nyomatékelosztást intéző középső szint megalkotása volt a feladat. A legyezési dinamika szabályozásánál a minőségi kritériumok megfogalmazásra kerülnek, majd a mechanikai modellből felállított matematikai modellel építve állapotter-reprezentáció kerül felírásra. A szabályozási feladatot lineáris kvadrátikus (LQR) szabályozóval, állapotbecslő (LQ) alkalmazásával oldja meg. Az állapotbecslő tervezését a hurokátvitel visszaállítás (LTR) módszerének alkalmazásával egészíti ki, majd a szabályozót Matlab Simulink környezetben teszteli lineáris és nemlineáris tesztmodellek alkalmazásával. Ezen szabályozó tervezésének ismertetése az elemzéssel zárul. A hosszirányú dinamika érintése után a dolgozat ismerteti a nyomatékelosztás problémáját és kitekintést ad a továbbfejlesztési irányokra. A dolgozat az alkalmazott technológia és a szabályozó skálázhatóságának bemutatásával zárul.

Abstract

Wheel hub motor driven model car control and construction

The subject of the research is to design an in-wheel-motored model vehicle, its construction and the development of control. The aim of the work at the Systems and Control Lab of the MTA SZTAKI is to get acquainted with the possibilities 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 fulfill as well as the steps of the design and construction. The main parts of this study are the onboard architecture's design and the coordination of the teamwork development, the mechanical design and the control's design. The benefit of the system's modularity is the ease of extensibility and its parts can be conveniently replaced. Beside the description of the systemic design and concept, the study presents thoroughly the design, manufacturing and assembling of the new mechanical parts. The motors' control, the electronic parts and the implementation on the microcontrollers and microprocessors has been realized in close cooperation with the researchers at the laboratory. The document contains the brief summary of these parts, and continues with to the control development. The structure of control is hierarchical and distributed; the design of high and middle level control was the author's task. During the design emphasis was put on the high level control's yaw dynamic part which was explained in detail. In addition, the task included a short description of the longitudinal dynamics and the torque allocation's establishment on the middle level. In the yaw dynamic's control, 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. The controller solves the task via linear quadratic control (LQR) and state estimator (LQ). The design of the state estimator has been completed by the Loop Transfer Recovery (LTR) method. The controller has been tested in Matlab Simulink environment using linear and nonlinear test models. This control's part ends with the analysis. After the short description of the longitudinal control, the paper presents the allocation's problem and gives an outlook towards future work. Finally the study represents the scalability of the technology and the control.

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	3
2. Az agymotoros hajtás áttekintése	6
2.1. Az agymotoros hajtás előnyei és hátrányai	7
2.2. A kerékagymotor bemutatása	7
3. A modellautó konstrukciója	8
3.1. Kiindulási modellautó	8
3.2. A fedélzeti rendszer architektúrája	9
3.3. Új futómű alkatrészek	10
3.3.1. Első futómű	11
3.3.2. Hátsó futómű	15
3.3.3. A mechanikai tervezés eredménye	16
3.4. Központi vezérlőegység	18
3.5. Kerékajtások	18
3.6. Kormány szervó	19
3.7. Inerciális szenzormodul	19
3.8. Akkumulátor- és energiafelügyeleti egység	19
3.9. Rádiófrekvenciás kommunikáció	20
4. Szabályozó fejlesztése az agymotoros hajtású járműhöz	21
4.1. Hierarchikus irányítástervezési struktúra, elosztott szabályozás	21
4.2. A legyezési dinamika felső szintű szabályozása	23
4.2.1. A szabályozáshoz alkalmazott modell	23
4.2.2. Szabályozási feladat	27
4.2.3. Referenciajel képzése	28
4.2.4. Állapot-visszacsatolás tervezése LQR módszerrel	29

4.2.5.	Állapotbecslő tervezése LQ módszerrel	33
4.2.6.	Zavarások, szaturáció figyelembe vétele	35
4.2.7.	Lineáris és nemlineáris tesztmodellek	36
4.2.8.	A legyezési dinamika szabályozásának elemzése	38
4.3.	A hosszirányú dinamika felső szintű szabályozása	41
4.4.	Nyomatékszétosztás az egyes kerekre	43
4.4.1.	Hátsókerék hajtású modell	43
4.4.2.	Négykerék hajtású lineáris modell	44
4.4.3.	Négykerék hajtású nemlineáris modell	45
4.4.4.	A középső szintű szabályozás értékelése	47
4.5.	Alsó szintű szabályozás	48
5.	Skálázhatóság	49
5.1.	A CarSim szimuláció eredménye	51
6.	Eredmények összegzése	54
6.1.	Tovább lépés	56

Ábrák jegyzéke

2.1. A Lohner-Porsche	6
2.2. Ford-Schaeffler agymotor	7
3.1. A Baja 5B modellautó és a főbb méretei	8
3.2. A fedélzeti rendszer architektúrája	9
3.3. Az első futómű bak	11
3.4. A rögzítőcsavar	12
3.5. Az első rögzítőgyűrű	12
3.6. Az ellengyűrű	13
3.7. A hüvelyek, bennük a mágnessel	13
3.8. Az első futómű	14
3.9. A motor rögzítése az első futóműbakhoz	14
3.10. Hátsó futómű bak	15
3.11. A hátsó rögzítőgyűrű	16
3.12. A hátsó távtartó gyűrű	16
3.13. A hátsó futómű	17
3.14. A hátsó mágnes és a szenzor elhelyezkedése	17
3.15. Turnigy SK3 6354	18
4.1. Hierarchikus struktúrájú, elosztott szabályozás	22
4.2. Az alkalmazott biciklimodell	23
4.3. Az első kerék sebességkomponensei és oldalkúszása	24
4.4. A hátsó kerék sebességkomponensei és oldalkúszása	24
4.5. Kettős sávváltás teszt	28
4.6. Állapot-visszacsatolt alapmodell	29
4.7. A struktúra módosítással kiegészített modell	30
4.8. A válaszfüggvény és a beavatkozójelek különböző Q mátrixok esetén	31
4.9. A válaszfüggvény és a beavatkozójelek különböző r mátrixok esetén	32
4.10. Az állapotbecslővel kiegészített modell	33
4.11. Az eredeti és a megfigyelővel kiegészített rendszer frekvenciafüggvényei	34
4.12. Szenzorajjal, valamint szaturációval bővített modell	35
4.13. A referenciajel és a válaszfüggvény szenzoraj esetén	36
4.14. A lineáris és nemlineáris modell válaszfüggvényei a referenciajellel	38
4.15. A nemlineáris tesztmodellel kapott eredmény különböző Q mátrixok esetén	39
4.16. A nemlineáris tesztmodellel kapott eredmény különböző r mátrixok esetén	40

4.17. A hosszirányú dinamika szabályozásának modellje	42
4.18. A sebességkövetés	42
4.19. A négykerék hajtású lineáris elosztási modell	44
4.20. A négykerék hajtású nemlineáris elosztási modell	46
4.21. A jármű sebességvektorai ívmenetben	47
5.1. Szimuláció CarSim környezetben	49
5.2. Kanyarodás felülnézetből CarSim környezetben	50
5.3. A legyezési szögsebesség követése CarSim környezetben	51
5.4. A kormányszög alakulása CarSim környezetben	52
5.5. A legyezési nyomaték alakulása CarSim környezetben	52
5.6. A motornyomatékok alakulása CarSim környezetben	52
5.7. Az oldalkúszás alakulása CarSim környezetben	53
5.8. A kerekenkénti slip alakulása CarSim környezetben	53

Táblázatok jegyzéke

3.1. A Baja 5B modellautó méretei	8
3.2. Kiindulási paraméterek	10
3.3. A maximális kerekenkénti terhelések	10
3.4. Az átépített modellautó új paraméterei	16

1. fejezet

Bevezetés

A dolgozat témája agymotoros hajtású modellautó tervezése, megépítése és szabályozásának fejlesztése. Az MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet, Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratóriumában végzett munka célja az elektromos gépjárművek hajtására alkalmas agymotoros technológiában rejlő lehetőségek megismerése és továbbfejlesztése egy lehetséges szabályozás megtervezésével és annak egy modulárisan felépülő 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 képezi 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 nagymértékben támogatja az elméleti kutatás gyakorlatba történő átültetését és sok kihívást rejt magában.

1.2. Problémafelvetés

A feladat első 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. Az architektúra átgondolása, a mechanikai tervezés, valamint a szabályozó megtervezése mellett a szerző feladata a többi részegység fejlesztésének összefogása.

A feladat második része, vagyis az agymotoros 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 abban áll, 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 harmadik részét a szabályozófejlesztés jelenti. A rendszer összetettsége miatt ajánlott hierarchikus járműirányítási struktúra alkalmazása az egyes tervezési szintek szétválasztására, valamint elosztott szabályozás tervezése a legyezési valamint a hosszirányú dinamika szabályozására. A felső szintű szabályozó legyezési dinamikát kezelő részénél a feladatot legyezési szögsebességet, mint referenciajelet követő szabályozó tervezése és tesztelése jelenti. Itt a minőségi tulajdonságok megfogalmazása, a szabályozási modell felállítása, majd a szabályozó tervezése a feladat, melyet lineáris kvadratikus szabályozóval és a mért állapotok hiányossága miatt állapotmegfigyelő tervezésével kell megoldani. A tervezés eredményeit lineáris és nemlineáris tesztmodellek alkalmazásával Matlab Simulink környezetben kell elemezni. A hosszirányú dinamika figyelembevételénél a már meglévő modellre alapozva, állandó sebesség követése a feladat. A felső szintű szabályozók mellett a középső szintű szabályozás is a dolgozat tárgyát képezi, amelynél komoly kihívást jelent a több bemenetű, több kimenetű modell, vagyis amikor a négy keréken oly módon kell szétosztani a nyomatékot, hogy a legyezési szögsebesség, és lehetőség szerint a hosszirányú sebesség is a referenciaértékét kövesse.

1.3. Célkitűzés

A dolgozat konkrét célja agymotoros hajtású modellautó építése egy Baja 5B alapmodellből kiindulva. Az autót beltéri, vagy tiszta útfelületű kültéri környezetben lehessen használni 10 m/s sebességhatárig és 6 m/s²-es gyorsulás korlátig. A platformot moduláris felépítés kell jellemezze, ezzel egyszerűsítve a szimultán fejlesztést, valamint a későbbi, alrendszereket 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, valamint a hosszirányú dinamikát állandó sebesség tartásával figyelembe vevő szabályozó tervezése és realizálása Matlab Simulink környezetben. A megvalósított szabályozót elemezni és a minőségi tulajdonságokra hangolni kell. A tervezésnél szem előtt tartandó a skálázhatóság, vagyis, hogy mind a technológia, mind a tudás hasznosítható legyen valós gépjárművek fejlesztése esetén is.

1.4. Irodalomkutatás

Az agymotoros hajtás alkalmazásától, a benne rejlő lehetőségek egyre szélesebb körű kihasználásán át, a minőségi tulajdonságok javításáig, valamint hibatűrő rendszerek megalkotásáig az elmúlt másfél évtized kutatásai jól kivehető ívet írnak le. A '90-es években indult kutatások járművek stabilitásának javítására, valamint a gépjárművek kormánymű nélküli kormányzására irányultak, melyek a négy kerék különböző mértékű, szabályozott hajtásával valósultak meg. [12] Egy másik lehetséges járműirányítási feladat hátsókerék hajtású járművek stabilizálása és dinamikai tulajdonságaik javítása. A hátsókerék hajtotta gépjárművek ívmenetben történő gyorsításkor könnyen kitörnek, 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 kitörés jelenségét a hátsó keréknél ébredő keréktalpponti erők szabályozásával lehet elkerülni oly módon, hogy az első kerekek kúszását figyelembe véve, határhelyzetben mindig az első kerekek csúszzanak meg először. Ezzel biztosítható a gépjármű alulkormányzottsága, 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) figyelembevételével 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 ($\dot{\psi}$), valamint az oldalkúszás (β). A modellben lévő hajtóerők lehetnek fékezőerők is. Egyszerűsítésként a modellen nem vették figyelembe a kerekenként eltérő súrlódási viszonyokat, valamint az esetleges széllökéseket sem. Az elosztás végül az allokációs hiba minimalizálását valósítja meg a korábban említett kényszerek figyelembevétele mellett oly módon, hogy figyelembe veszi a gumibroncsok adhéziós görbéit, az eltérő vertikális terheléseket, és a különböző hossz- és keresztirányú erőket. A módszertől a motorok energiafogyasztásának minimalizálása is várható. [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 nyomatékelosztás paraméterek, a jármű irányára és gyorsulására gyakorolt hatását többek között Box-Behnken kísérlettel lehet eldönteni. PI szabályozás alkalmazását ajánlják, ahol a legyezési szög visszacsatolásával 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 együtthatóval történő figyelembevétele. Ennél a módszernél a legyezési szögsebességet szabályozó algoritmusba építették a kívánt legyezési nyomaték egyes kerekek közötti szétosztását, a csúszómód kontrollt (Sliding Mode Control) felhasználva. A performanciák ezzel a módszerrel is elérhetőek. [11] A csúszómód szabályozás alkalmazásával változó paraméterű, nemlineáris rendszerek robusztus szabályozása valósítható meg. [8] „A csúszómód szabályozás performancia érzéketlen az ismeretlen paraméterekre és a paraméter változásokra, 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.” A tervezéskor figyelembe kell venni, hogy a szabályozó valós időben való futása csak kis számítási igény esetén lehetséges. [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 szabályozottak, 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 elha-

nyagolható a hossz, a kereszt, valamint a legyezési dinamika egymásra hatása sem. A menetdinamikai tulajdonságok további finomítása érhető el ezen szempontok figyelembevételével, a három különböző dinamika egyidejű szabályozásával. A jármű paraméter bizonytalanságát kezelve megtervezhető egy csattogás-mentes szabályozás, mely dinamikusan alkalmazkodó határréteg vastagság bevezetésével érhető el, valamint végeredményül robusztusabb rendszer adódik. [6]

Az eddigi kutatásokra alapozva, a dolgozatban egy hierarchikus felépítésű, elosztott szabályozó megtervezése a cél, ahol a felső szintű szabályozás külön-külön biztosítja a legyezési szögsebesség, valamint az állandó hosszirányú sebesség, mint referenciajelek követését. A legyezési dinamikát kezelő szabályozónál az LQR szabályozóhoz kétdimenziós állapottér kerül felírásra, állapotai $\dot{\psi}$ és β . A nem mért állapotok visszacsatolása érdekében LQ állapotbecslő kerül alkalmazásra, majd az analízissel és hangolással zárul a felső szintű szabályozó fejlesztése. A felső szintű szabályozóból három beavatkozójel igény adódik át az alacsonyabb szintekre. Egyrészt a legyezési dinamikából származó kormányszög (δ) és legyezési nyomaték (M_z), másrészt a hosszirányú dinamikából adódó vonóerő (F_v). A középső szintű szabályozó feladata az egyes motorokra elosztani a felső szintről származó M_z és F_z beavatkozójelet. Az elosztási szintről az egyes motorokhoz tartozó nyomatékigény adódik át az alsó szintű motorszabályozókra, a felső szintről pedig közvetlenül a δ kormányszög a szervó vezérlőjére. Az alsó szintű motorszabályozók feladata a középső szintről kapott nyomatékigény referenciaként való követése.

2. fejezet

Az agymotoros hajtás áttekintése

A kerékagymotoros hajtás gondolata a 19. században indult útjára, amikor Ferdinand Porsche megtervezte az első agymotor hajtotta gépjárművet [3]. Az 1900-ban rendezett Párizsi Világkiállításon a tervező ezzel az autóval elnyerte a kiállítás különdíját [1], majd a modell szériagyártásba került, és Lohner-Porsche néven vált híressé (2.1. ábra). Ebben a járműben jelent meg először a kerékagymotor, ahol a villamosmotor tekercselése került a motor belső részébe, míg a mágnesek a külső gyűrűre, s a motort a kerékbe építve a külső gyűrű közvetlenül hajtotta a kereket. [3] A kerékagyba épített motor koncepciója, a benne rejlő lehetőségek miatt újból és újból felkelti a mérnökök érdeklődését, ám széles körben elterjedni még nem tudott. A technológiát alkalmazzák a közösségi közlekedés területén, mint például a Mercedes-Benz Citaro G BlueTec®-Hybrid autóbusznál, az elektromos kerékpároknál, valamint a személyautóknál is keresik az alkalmazási lehetőségeket. Az alábbi két alfejezetben rövid összefoglaló olvasható az agymotoros hajtás 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 első-, vagy hátsókerék-hajtás kiváltására vagy négykerék hajtásra. Kiváltható vele a belsőégésű motortól a hajtórudakig a teljes hajtásrendszer, ám a súlyos motorok miatt 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 a villamosmotorok generátorüzemben történő alkalmazásával visszatáplálást 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 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. Kiindulási modellautó

Az agymotoros hajtású gépjárműmodell megépítése egy Baja 5B 1:5-ös méretarányú off-road modell átalakításával valósult meg. A 23 ccm-es belsőégésű motorral szerelt eredeti modell, hátsó kerék hajtással és első kerék kormányzással rendelkezett. Az off-road jármű dupla keresztlengőkaros futóművének paramétereinek nagy része állítható csavarok, vagy illesztőalátétek segítségével. A héjszerkezetű váz alumíniumból (6061 T6) készült. Az eredeti modellt és befoglaló méreteit a 3.1. ábra mutatja, méreteit részletesen 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
Tömeg	9.6 kg

3.1. táblázat. A Baja 5B modellautó méretei

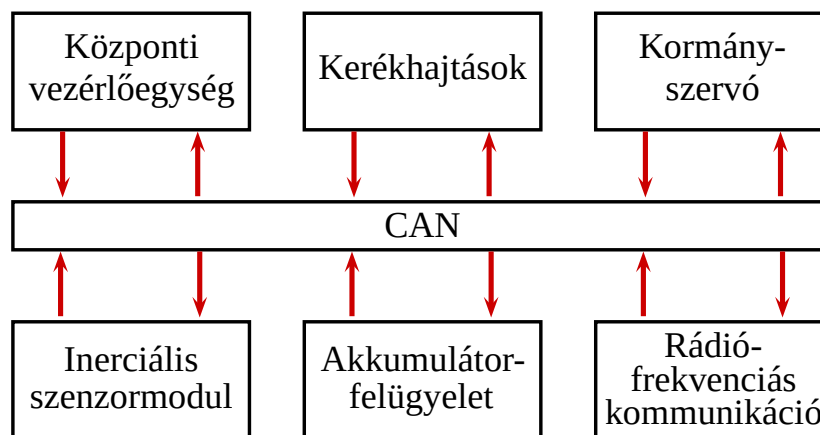


3.1. ábra. A Baja 5B modellautó és a főbb méretei

Forrás: <http://www.hpiracing.com>

3.2. A fedélzeti rendszer architektúrája

A dolgozat tárgyát képező, agymotoros hajtású modellautó fedélzeti rendszerének architektúrája az előírt funkciók ellátása mellett, a moduláris felépítés szem előtt tartásával került megtervezésre. A tervezett rendszer hat modulból épül fel, melyek az alábbiak: központi vezérlőegység, kerékajtások, kormány szervó, inerciális szenzormodul, akkumulátor- és energiafelügyeleti egység, valamint rádiófrekvenciás kommunikációs modul. Bekapcsoláskor elsőként az akkumulátor- és energiafelügyeleti egység lép működésbe, majd amikor már stabilan működik és elvégezte az akkumulátorok állapotának feltérképezését, 5 V-os tápfeszültséget ad a többi egységnek is. Miután minden egység elindult és jól működik, a hajtások is tápfeszültséget kapnak, 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 nyomatékigényt, míg a szervónak a kormány szög kívánt értékét küldi ki. Minden egyes motorhoz külön szabályozóegység tartozik, mely gondoskodik róla, hogy a kért nyomaték a motorokon megjelenjen, valamint a központi egység számára a szögsebesség aktuális, mért értékét is ez az egység továbbítja. A motorok kiválasztása és beépítése is szorosan kapcsolódik az architektúra tervezéséhez. A kormány szervó a kért kormány szöget az első kerekeken realizálja. A modellautó legyezési szögsebességét az inerciális szenzormodul méri, a referenciajelet pedig a rádiófrekvenciás modulon keresztül kapja a rendszer, mindkettő a CAN hálózaton keresztül kommunikál a központi egységgel. A fedélzeti rendszer architektúráját a 3.2. ábra szemlélteti.



3.2. ábra. A fedélzeti rendszer architektúrája

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 integrálása.

3.3. Új futómű alkatrészek

A mechanikai tervezés a szerző feladata volt, s ezt a motoroknak a kerekek és a futóművek közé történő rögzítésére szolgáló egyedi alkatrészek tervezése, gyártása és szerelése jelentette. A 3D-s modellek megalkotása, a tervezés, valamint a műhelyrajzok elkészítése a SolidEdge program alkalmazásával valósultak meg. A feladat nehézsége abban rejlett, hogy a meglévő futóműelemek és a kiválasztásra került motor geometriai mértéi adottak voltak, erősen korlátozva a tervezés szabadságát. A tervezés során felmerült több lehetséges megoldás közül a célnak leginkább megfelelő, vagyis a becsült terheléseknek ellenálló, kotyogásmentes, egyszerű és lehetőség szerint minél olcsóbban gyártható megoldás került kiválasztásra.

A tervezés első lépését az érintett futóműalkatrészek méreteinek felvétele és modelljének SolidEdge környezetben történő felépítése jelentette. Ezzel párhuzamosan terheléseket befolyásoló paraméterek rögzítésére került sor, mely értéke a 3.2. táblázat tartalmaz.

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 kiindulási paraméterek és a geometriai méretek alapján lettek becsülve. Az oldalirányú erő maximuma a legnagyobb sebesség és 4.7 m fordulókör sugár figyelembevételével mellett adódott, ahol a 4.7 m a 4.2.3. fejezetben bemutatásra kerülő, méretarányosan lekicsinyített kettős sávváltás teszt legkisebb fordulási sugara. A 3.3. táblázat a becsült, kerekenkénti maximális nyomatékot, valamint a maximális 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

Az egyes alkatrészek a fenti becsült terhelések figyelembevételével mellett kerültek megtervezésre. A terhelésekre való méretezést segítették a meglévő eredeti alkatrészek is, amelyeket az eredeti modellt érő terhelésekre terveztek, melyek az eredeti jármű nagyobb tömege, magasabb végsebessége, valamint terepen való alkalmazása miatt jóval nagyobbak a jelenlegi céljárművet érő várható terheléseknél. Ebből kiindulva, és hasonló szilárdsági tulajdonságokkal rendelkező alapanyagot választva az eredeti alkatrészek mértéit biztonságos alapnak lehetett venni. A következő fejezetekben bemutatásra kerülő alkatrészeket AlMgSi1 (EN AW 6082) alumínium alapanyagból készültek, annak alacsony sűrűsége, 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. Első futómű

Az első futómű eredeti konstrukciója a következőképp állt össze. A jármű vázán rögzített csuklókból induló lengőkarok, valamint a közös rugó és csillapító egység egy futóműbakban futottak össze. A bakban volt csapágyazva egy tengely, melyre rögzítőcsavar volt illesztve és elfordulás ellen biztosítva. A rögzítőcsavaron ült a kerék, elfordulás ellen egy hatlapú felületen illeszkedve, lecsúszás ellen pedig anyacsavarral rögzítve. A 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 egy anyacsavar, valamint 4 kisebb csavar segítségével. A motort a futóművön egy rögzítőgyűrű, valamint egy erre csavart, a futóműbak (3.3. ábra) egyik vállfelületén felütköző ellengyűrű tartja a 3.9. ábrán látható módon. A motor tengelyére két vékony hüvely illeszti a mágnes, a vele szemben elhelyezkedő szenzort tartalmazó nyák pedig az ellengyűrűn kapott helyet. Az egyes alkatrészek részletes ismertetése az alábbiakban olvasható. A teljes konstrukciót a 3.8. ábra mutatja be.



3.3. ábra. Az első futómű bak

Rögzítőcsavar

A kerék motoron történő rögzítése egy speciális rögzítőcsavar tervezésével valósult meg. Feladata a kerék motorhoz történő rögzítése, a nyomaték 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 rögzítés érdekében. A 3.4. ábrán látható a rögzítőcsavar végleges formája. Az alkatrész a három említett terhelést az alábbiak szerint viszi át.

- A menesztésnél rendkívül fontos volt a kerék és a motor kottyanásmentes illesztése annak érdekében, hogy a motorszabályozást minél pontosabban lehessen megvalósítani. A keréken, a menesztéshez rendelkezésre álló hatlapú felület többszöri mérésből lehetett következtetni annak tűrésére és erre alapozva tűrni az új alkatrészen kialakításra kerülő felületet.
- 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.
- 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.



3.4. ábra. A rögzítőcsavar

Első rögzítőgyűrű

Az első rögzítőgyűrű feladata a rögzítőcsavarnál felsorolt terhelések átvitele a motorról a futóműbak felé. A motor és a rögzítőgyűrű között úgy a menesztést, mint mindkét irányú erőt erőkötéssel 4db M4-es csavar viszi át, a motor állórészének homlokfelületén kialakított menetes furatokat felhasználva. Az alkatrészeiről a futómű felé szétválnak a funkciók. Az axiális erőket egy, a rögzítőgyűrű egy menetes részére csavarható, 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 egy illesztett hengerpalást felületen kerülnek át a futóműre. A rögzítőgyűrű a 3.5. ábrán látható.



3.5. ábra. Az első rögzítőgyűrű

Ellengyűrű

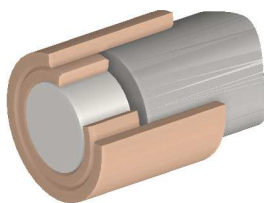
Az ellengyűrű elsődleges feladata az első rögzítőgyűrű futóműbakhoz történő rögzítése. Az első rögzítőgyűrűhöz csavarmenettel kapcsolódik, és a futóműbak egy vállfelületén felülve lehet megfeszíteni. A meghúzása külön kialakított horony, és erre a célra gyártott célszerszám segítségével valósul meg. Másodlagos feladata a nyák rögzítése, mely az ellengyűrű homlokfelületén felfeküdve, 4db M1,4-es csavarral kerül rögzítésre. Az ellengyűrűt a 3.6. ábra mutatja. Mivel rendkívül szűk hely állt rendelkezésre, annak érdekében, hogy a nyák és a rajta elhelyezett elektronika egyrészt elférjen, másrészt az elektronikus alkatrészek ne érintkezhessenek a futómű fém alkatrészeivel, az elektronika tervezőjével szoros együttműködésre és iterációra volt szükség.



3.6. ábra. Az ellengyűrű

Mágnes tartó hüvelyek

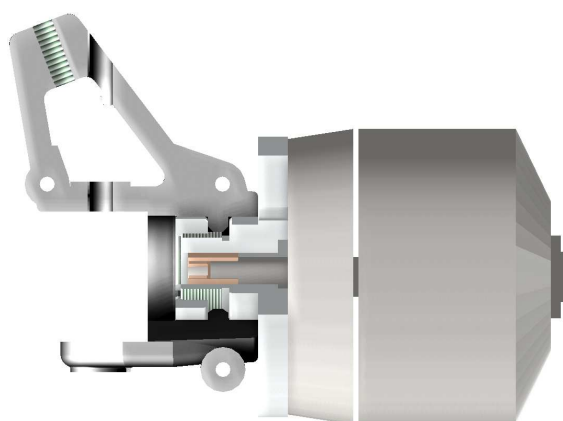
Az $\varnothing 6$ mm mágnes $\varnothing 8$ mm-es motortengelyen történő rögzítését két rézhüvely valósítja meg. A mágnes a kisebbik hüvelyben ül, amely a nagyobbik hüvelyben helyezkedik el. A nagyobb átmérőjű hüvely hosszabb, mint a kisebb, s a fennmaradó része a korábban méretre vágott motortengelyre van tolva oly módon, hogy a szenzor és a mágnes között 0.5 mm rés legyen. Az alkatrészeket ragasztó rögzíti egymáshoz. A két hüvely, valamint a bennük elhelyezkedő mágnes a 3.7. ábrán látható.



3.7. ábra. A hüvelyek, bennük a mágnessel



3.8. ábra. Az első futómű



3.9. ábra. A motor rögzítése az első futóműbakhoz

3.3.2. Hátsó futómű

A hátsó futómű eredeti konstrukciója annyiban hasonlít az első futóműnél ismertetett felépítéshez, hogy a lengőkarok, valamint a rugó és csillapító egység egy futóműbakban futnak össze. Azonban ez a hátsó bak (3.10. ábra) eltér az elsőtől, ugyanis az eredetileg hátsó kerék hajtású modellnél a féltengelyeknek helyet kellett biztosítani a differenciálmű és a kerekek között. Ezen kívül a hátsó baknál rendelkezésre álltak csavarhelyek, egy speciális, csapágyakat tartó elem rögzítése céljából. A hátsó futómű kerékösszetartása különböző szögű, ék jellegű alátétekkel volt változtatható. A kerekek rögzítése szintén rögzítőcsavar és anya segítségével valósult meg. A rendelkezésre álló nagyobb hely, valamint a csavarhelyek nagyban megkönnyítették a tervezést az első futóműhöz képest, ám az adott geometriához itt is alkalmazkodni kellett, valamint meg kellett oldani, hogy különböző kerékösszetartások esetén is biztosított legyen a rögzítendő mágnes és a szenzor párhuzamossága.

A hátsó futómű konstrukciója

A kerék motoron történő rögzítése, az első futómű konstrukciójával teljes mértékben megegyezik, ugyanaz a rögzítőgyűrű alkalmazható. A motort a futóműbakkal egy hátsó rögzítőgyűrű kapcsolja össze úgy, hogy a gyűrű és a futóműbak közé a kerékösszetartást beállító alátétek az eredeti módon beépíthetők maradtak. A rögzítőgyűrűre egy távtartó gyűrű ültethető, s ezen fekszik fel a szenzort tartó nyák (3.13. ábra). A távtartót és a nyákot 4db M1,4-es csavar rögzíti. A mágnes elhelyezése az első futóműnél leírt módon történik a 3.14. ábrán látható módon. A teljes, szerelt hátsó futómű a 3.13. ábrán látható.



3.10. ábra. Hátsó futómű bak

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.



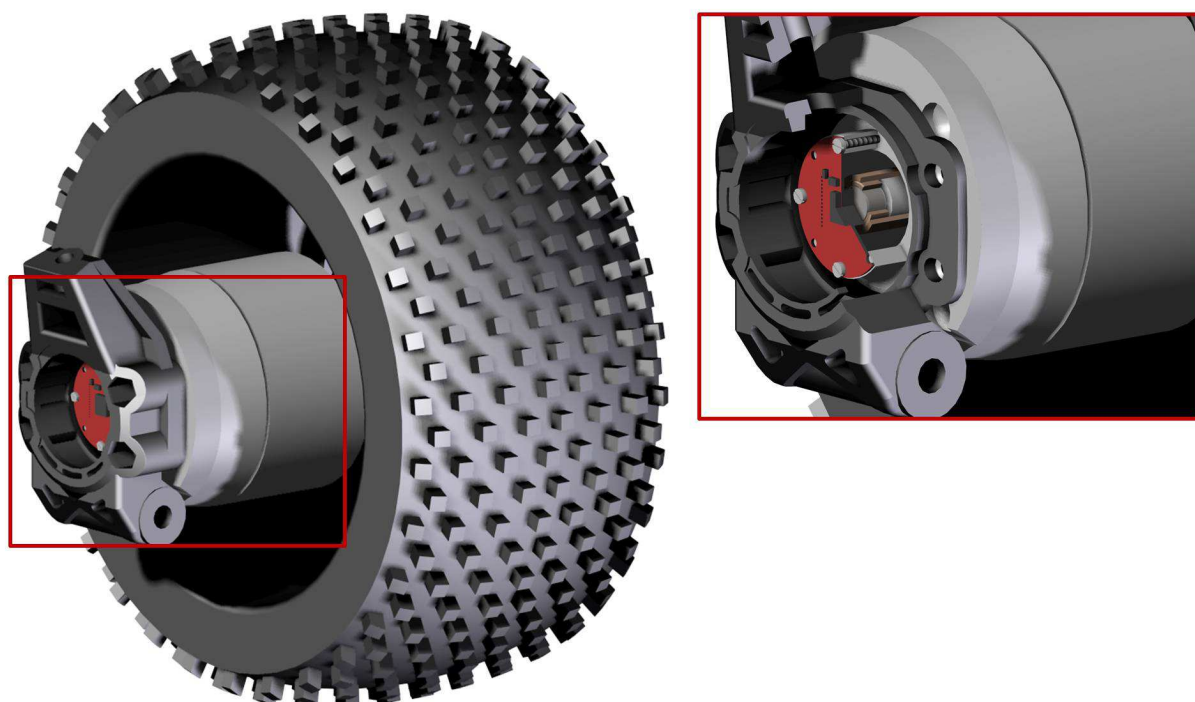
3.12. ábra. A hátsó távtartó gyűrű

3.3.3. A mechanikai tervezés eredménye

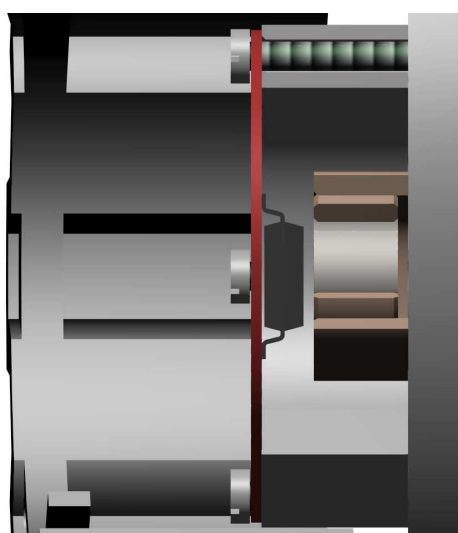
A megtervezett alkatrészek gyártatása után az új konstrukciók összeszerelése következett. Minden alkatrész könnyen és gyorsan szerelhető, a szerelés kézi erővel és egyértelműen kivitelezhető. Az illesztett felületek precízen illeszkednek a meglévő alkatrészekben. Mivel a hely szűke miatt nem volt mód minden csavarkapcsolat biztosítására, amennyiben a jármű tesztelése után szükségesnek látszik, a végső összeszereléskor ajánlott ezen csavarkapcsolatok ragasztóval történő rögzítése. Az átalakítások hatására a modellautó egyes paraméterei (nyomtáv, tömeg) megváltoztak, ezeket a 3.4. táblázat tartalmazza.

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

3.4. táblázat. Az átépített modellautó új paraméterei



3.13. ábra. A hátsó futómű



3.14. ábra. A hátsó mágnes és a szenzor elhelyezkedése

3.4. Központi vezérlőegység

A központi vezérlést egy Raspberry Pi típusú, 700 MHz-es processzorral szerelt számítógép végzi. Az egységen Linux környezetben futtatható 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 a kormányuszókat és ezeket 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. Kerékhajtások

A modellautó hajtására külső forgórészű, állandómágneses szinkronmotorok lettek kiválasztva. Mivel ebben a méretben nem állt rendelkezésre tényleges agymotor, repülőmodellekhez tervezett Turnigy SK3 6354 motorok kerültek kiválasztásra a kívánt nyomatékok figyelembevételével (3.15. ábra). Lévé, hogy a motorok mechanikai terhelések szempontjából összetettebb igénybevételnek vannak kitéve ebben a konstrukcióban, mint amire tervezték őket, a lehető legvastagabb tengelyű ($\varnothing 8$ mm) kivitel került kiválasztásra. Emellett a terhelések minimalizálása érdekében kis sebesség és sík talaj került előírásra.



3.15. ábra. Turnigy SK3 6354

Forrás: <http://www.rcmodellek.hu>

A hajtás mezőorientált áramszabályozást alkalmaz, vagyis a tápláló áramok fázishelyzetét a forgórész aktuális szögének figyelembevételével állítja elő, tehát az áramot a forgórész mindenkor szöghelyzetéhez igazítja. 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 nemlineáris karakterisztikákkal rendelkező motorral szemben a szabályozott hajtás kívülről már lineáris tulajdonságot mutat. További előnye, hogy a motor álló helyzetben is képes nyomatékot kifejteni, mely az autó indításánál kap fontos szerepet, valamint a motor nem esik ki a szinkronból, és csökkenthető a lüktetőnyomatéka.

A motor szöghelyzetének mérése egy speciális mágnes és egy IC segítségével történik. A mágnes a motor tengelyére rögzítve, a lapjával párhuzamos síkú IC előtt 0.5 mm-re forog, és az IC 4 Hall elem segítségével méri a szöghelyzetet, s ebből számolja a szögsebességet.

A motorok táplálását biztosító teljesítményelektronika egy MOSFET-ekből felépített, kapcsolóüzemű, PWM vezérléssel rendelkező áramkör. A motorok nyomatéka a tápláló áramok amplitúdójával a mezőorientált szabályozás miatt egyenesen arányos. A motor és a szabályozás alkotta közös rendszer így egy nyomaték bemenettel és fordulatszám kimenettel jellemezhető rendszerként működik, így a nyomatékból adódik a fordulatszám.

3.6. Kormány szervó

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

3.7. Inerciális szenzormodul

A modellautó legyezési szögsebességének mérését egy kompakt inerciális szenzormodul végzi. Az MTA SZTAKI-ban, modellrepülőök 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 szenzoraj $\pm 0.0174 \text{ rad/sec}$ -ra adódott korábbi mérések során.

3.8. Akkumulátor- és energiafelügyeleti egység

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 indul el, majd stabil működése esetén ellenőrzi az akkumulátorok feszültség szintjét és amennyiben megfelelő, 5 V-os tápfeszültséget ad a többi egységnek. Amikor már minden alrendszer felállt, a hajtások is megkapják a szükséges tápfeszültséget. 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

Szabályozó fejlesztése az agymotoros hajtású járműhöz

Az agymotoros hajtású modellautó szabályozási feladata két részre bontható. Az első a legyezési dinamika szabályozása, ahol a cél referencia legyezési szögsebesség követése minimális túllendüléssel és gyors beállási idővel, a szenzor zaj figyelembevételével. A második feladat a hosszirányú dinamika szabályozása, a cél konstans referenciasebesség tartása a különböző ellenállások zavarásként való figyelembevételével. A szabályozó tervezésekor figyelembe veendőek a villamosmotorok, mint aktuátorok energiakorlátai.

4.1. Hierarchikus irányítástervezési struktúra, elosztott szabályozás

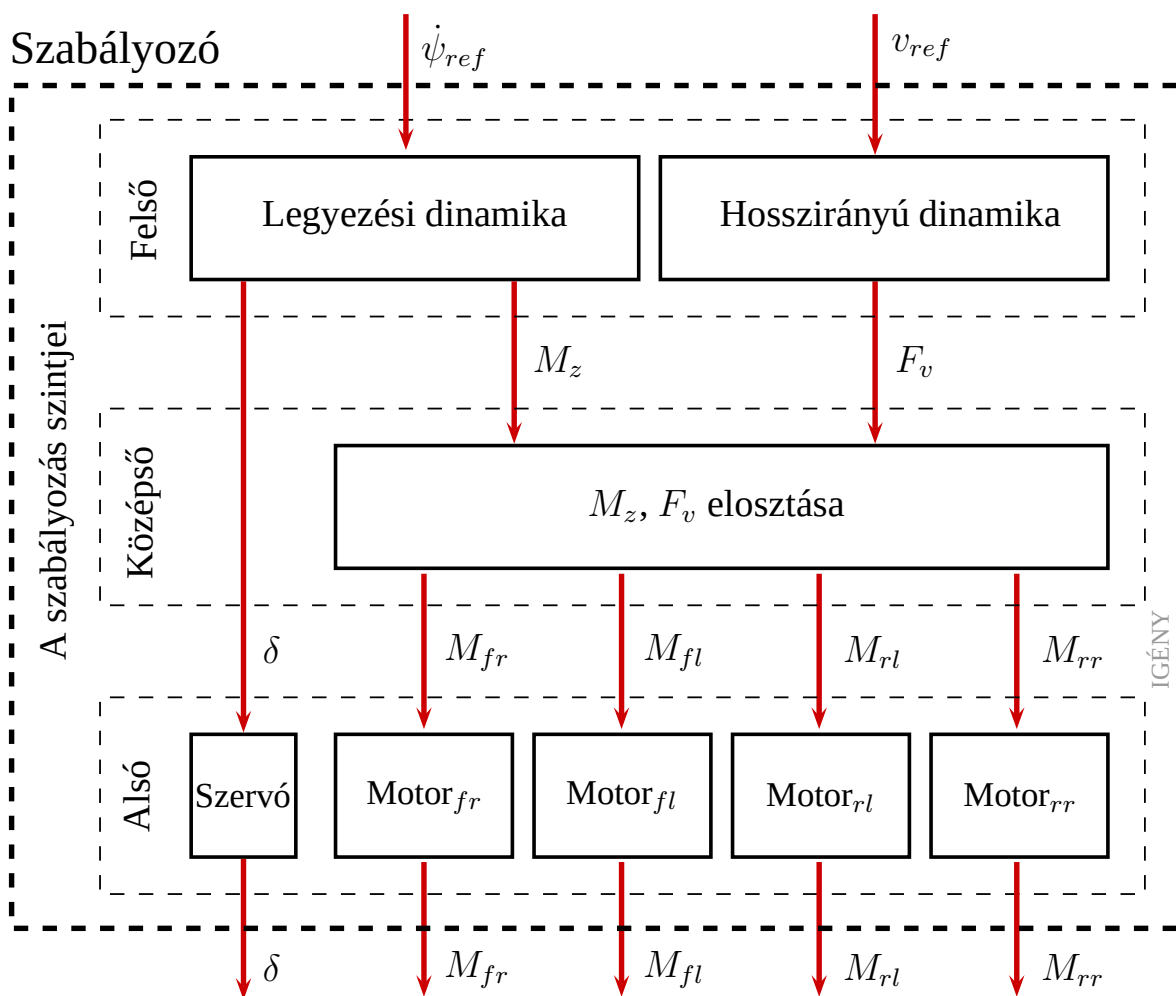
Az agymotoros hajtású jármű irányítástervezésénél hierarchikus struktúra alkalmazása ajánlott, amint az több szakirodalomban is olvasható (ld. például [19, 20]). Előnyös tulajdonsága, hogy rendkívül összetett rendszerek esetén a különböző tervezési feladatokat szétválasztva, az egyes alrendszerekre már egyszerűbben, átláthatóbban lehet szabályozót tervezni. A dolgot tárgyat képező modellautó esetén alkalmazva a módszert, három tervezési szint különböztethető meg. A felső szint a jármű mozgását, valamint a referenciajeleket figyelembe véve általános beavatkozójelekre oldja meg a szabályozási feladatot. A középső szint ezeket az általános beavatkozási igényeket osztja el az egyes aktuátorok között, majd a beavatkozók szabályozását és a beavatkozási igények realizálását az alsó szintű hajtásszabályozás intézi.

A járművel kapcsolatban két szabályozási cél került megfogalmazásra. Az első a legyezési, a második pedig a hosszirányú dinamikával foglalkozik. Ezek a felső szinten, elosztott (distributed) szabályozási módszer alkalmazásával kerülnek megtervezésre, vagyis a két szabályozási célt egymástól függetlenül valósítja meg egy-egy szabályozó, majd ezek eredményét veszi át a középső tervezési szint. Esetünkben a legyezési dinamikához tervezett felső szintű szabályozó, a jármű mozgása és a referencia legyezési szögsebesség ($\dot{\psi}_{ref}$) figyelembevételével két beavatkozójellel oldja meg a szabályozási feladatot. Az egyik a δ kormányzög, míg a másik egy M_z legyezési nyomaték. A hosszirányú dinamika szabályozása szintén a jármű mozgásegyenletéből indul ki, továbbá a v_{ref} referencia sebességből,

és egy F_v eredő vonóerőre oldja meg a feladatot.

A középső szintű szabályozó feladata a fentről kapott M_z nyomaték, valamint az F_v vonóerő ismeretében a keréktalpponti erők és ennek megfelelően a motornyomatékok számítása. A nyomatékelosztásnál figyelembe kell venni a gépjármű geometriai paramétereit mellett a kanyarodási ív sugarát, és hangsúlyt kell fektetni a kerekek tapadási határon belül maradására. A középső szintű szabályozó a δ kormányyszöveget nem kezeli, kimenete a négy motorral szemben támasztott nyomatékigény. Az alsó szintű szabályozás feladata a nyomatékigények realizálása a motorokon.

A szabályozó architektúráját a 4.1. ábra szemlélteti.



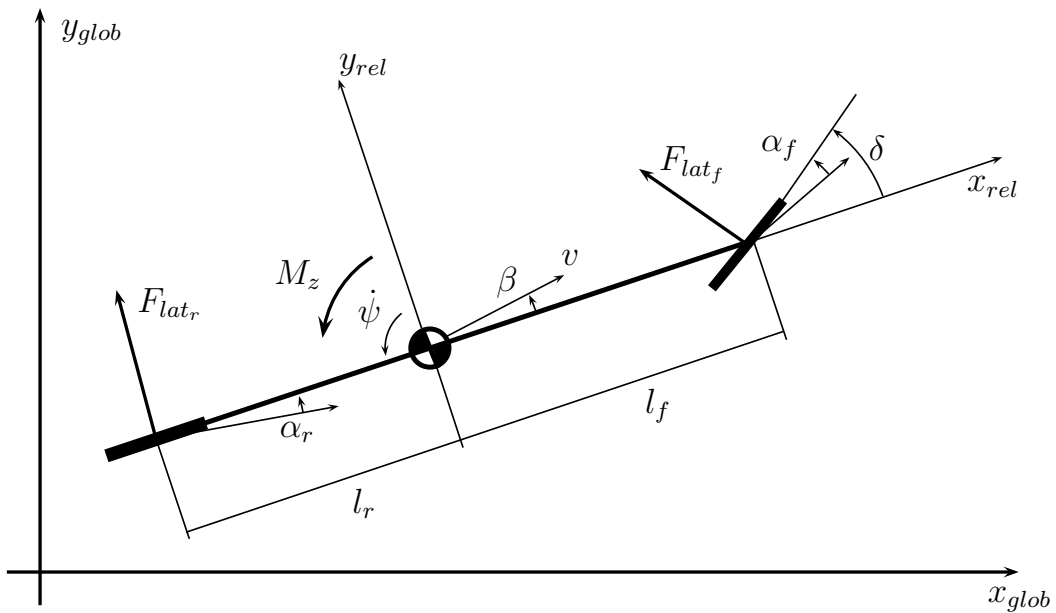
4.1. ábra. Hierarchikus struktúrájú, elosztott szabályozás

4.2. A legyezési dinamika felső szintű szabályozása

4.2.1. A szabályozáshoz alkalmazott modell

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 egy-egy virtuális kerékre redukálása, majd e két képzeletbeli kerék elhelyezése a gépjármű hossz tengelyében. A biciklimodell felállítása és a képletek felírása nagy mértékben támaszkodik korábbi kutatómunkákra, ld. [5, 14]. A dolgozat tárgyát képező járműhöz tervezve, a modell is első kerék kormányzású. Az alkalmazott modell beavatkozói a δ kormányaszög, valamint az M_z legyezési nyomaték, mely a későbbiekben a négy keréken ébredő keréktalpponti erők súlypont körüli forgatónyomatékainak eredőjeként adódik. A modell figyelembe veszi a kerekek oldalirányú merevségi tényezőjét, a jármű oldalkúszását, valamint az ezekből származó oldalirányú erőket is. A kerék oldalirányú merevségi tényezője megadja, hogy adott járműnél, adott keréken, egységnyi szögben futás hatására milyen oldalirányú erő ébred. Az oldalirányú erők ebből következően az adott virtuális kerék keréktalpponti oldalkúszásának és az oldalirányú merevség szorzatával egyenlőek.



4.2. ábra. Az alkalmazott biciklimodell
Saját szerkesztés [5] alapján

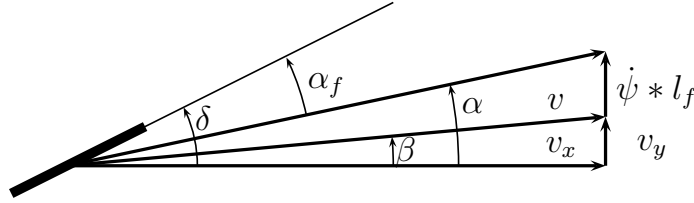
A 4.2. ábrán látható a biciklimodell, valamint a legfontosabb változók, ahol $\dot{\psi}$ a legyezési szögsebesség, v a sebesség, l_f az első kerék és a súlypont távolsága, l_r a hátsó kerék és a súlypont távolsága, β a jármű oldalkúszási szöge, α_f az első kerék oldalkúszási szöge, α_r a hátsó kerék oldalkúszási szöge, míg F_{lat_f} és F_{lat_r} az oldalkúszásból származó oldalirányú erők.

A 4.2. ábrán látható módon a relatív koordináta-rendszer x tengelye a jármű hosszten-

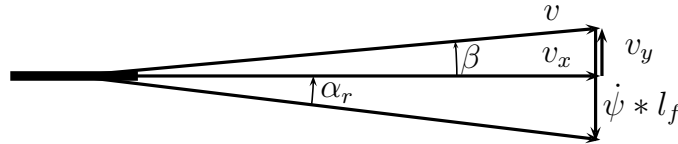
gelyével azonos irányban, annak súlypontjába helyezett origóval értelmezett, az y tengely pedig erre merőlegesen, a vízszintes síkban helyezkedik el. A z , függőleges tengely körüli forgás a jármű legyezési szögsebessége, pozitív iránya az óramutató járásával ellentétes irányban értelmezett.

Az első kerék δ szöggel való elkormányzásának hatására az autó súlypontbeli sebességvektorának iránya megváltozik, és az új irány a kúszás miatt nem esik egybe sem az első kerék irányával, sem pedig a jármű hossz tengelyének irányával, hanem ez utóbbival β szöget zár be. A keréktalpponton ez még nem jelent megcsúszást, csak kúszást, mely a gumiabroncs deformációjával magyarázható. A megcsúszással jelen dolgozat nem foglalkozik.

A keréktalppontokon a β -től eltérő oldalkúszások ébrednek, melyek definíció szerint a sebességvektortól mutatnak a kerék iránya felé. [14] Ezek értékét 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 összegzésből adódnak a keresett szögeértékek 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 kerékkel 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 között előírt nyomaték vihető át, s ezek eredője a legyezési szögsebesség befolyásolására is alkalmas, ennek modellbe történő integrálása alapvető.

Az egyes kerekre adott nyomatékokból (a csúszási határ alatti tartományt feltételezve) a kerék sugarának ismeretében (annak deformációját elhanyagolva) adódnak a keréktalpponti erők, s ezek súlypontra vonatkozó forgatókarját ismerve számítható a járműre vonatkozó z tengely körüli forgatónyomaték. Így a bal első kerék által ébredő legyezési nyomaték:

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

ahol $M_{z_{fl}}$ a bal első motor súlypontra vonatkozó, z tengely körüli forgatónyomatéka, F_{fl} a bal első keréken ébredő keréktalpponti erő, M_{fl} 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 kerekken ébredő keréktalpponti erők z tengelyre számított előjelhelyes nyomatékának eredőjeként adódó nyomaték (4.13. egyenlet) már könnyen integrálható a hagyományos modellbe.

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

A mozgásegyenletek felírása

A legyezési szögsebesség követési feladatához két mozgásegyenlet felírása ajánlott. Az első az oldalirányú erők eredőjének egyenlete, a második a legyezési nyomatékok eredőjének egyenlete. [5] A jármű ívmenetben ébredő centripetális ereje az oldalkúszásokból származó oldalirányú erőkből, míg a legyezési szöggyorsulása azok súlypont körüli forgatásából és az M_z nyomatékból fejezhetőek ki. A geometriai méretek, valamint a külső erők és nyomatékok ismeretében az alábbi egyenletek adódnak.

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:

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

$$J\ddot{\psi} = c_fl_f(\delta - \beta - \frac{\dot{\psi}l_f}{v}) - c_rl_r(-\beta + \frac{\dot{\psi}l_r}{v}) + M_z \quad (4.18)$$

Áttérés állapotter-reprezentációra

A 4.16., valamint a 4.18. egyenleteket továbbvive, azokat $\ddot{\psi}$ és $\dot{\beta}$ -ra rendezve érdemes áttérni állapotter-reprezentációra, amennyiben az állapotok, a beavatkozójelek, valamint a kimenet az alábbiak:

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

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 állapotter felírásra:

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

$$y = Cx \quad (4.23)$$

ahol az állapotter-reprezentáció mátrixai:

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

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

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

4.2.2. Szabályozási feladat

A szabályozási feladat referenciajel-követés, vagyis a $\min \left\{ \left| \dot{\psi}_{ref} - \dot{\psi} \right|_{t \rightarrow \infty} \right\}$ 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 kormányszög, valamint az M_z legyezési nyomaték jelentik.

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

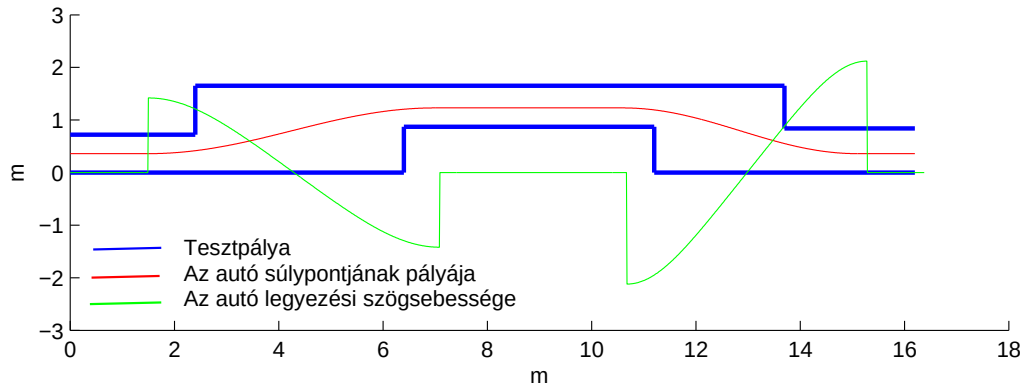
A szabályozót a modellautón történő alkalmazás előtt mind lineáris, mind nemlineáris Matlab Simulink modellen tesztelni és hangolni kell.

4.2.3. Referenciajel képzése

A legyezési dinamikával kapcsolatos szabályozási feladat a szakirodalomban, általában a $\dot{\psi}$ referenciajel követése. A trajektóriakövetés, vagy ψ legyezési szög követése ekkor még nem valósul meg a kettő közti integrálás miatt. Az útvonalkövetéshez megfelelő referenciajel képzés külön kutatási feladatot és témakört ölel fel, mellyel ez a kutatás nem foglalkozik. Ebben a munkában referenciajelként, az ISO/TR-3888 szabványban definiált kettős sávváltás 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_{iv} 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 ψ 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 adódnak az egységnyi megtett útszakaszokhoz tartozó x értékek. Ezekben a pontokban alkalmazva az alábbi képleteket megkapjuk a $\dot{\psi}$ legyezési szögsebességet a hely függvényében. A 4.5. ábrán látható a pálya, az autó középvonala, valamint az ehhez szükséges legyezési szögsebesség az s függvényében.

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

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



4.5. ábra. Kettős sávváltás teszt

4.2.4. Állapot-visszacsatolás tervezése LQR módszerrel

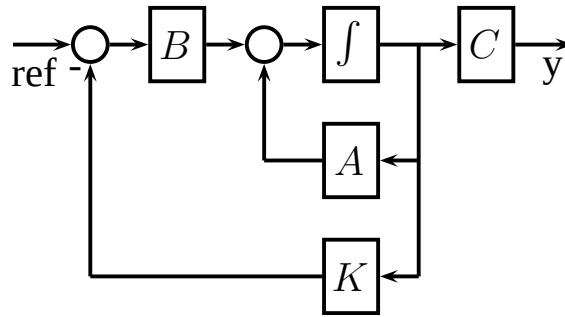
A szabályozótervezés első lépése az állapot-visszacsatolás megvalósítása volt. Az x állapotot a visszacsatolás blokkvázlatát a 4.6. ábra mutatja, míg az állapotegyenlet az alábbi:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.29)$$

$$u = -Kx + r \quad (4.30)$$

$$\dot{x} = (A - BK)x + Br \quad (4.31)$$

$$y = Cx \quad (4.32)$$



4.6. ábra. Állapot-visszacsatolt alapmodell

A visszacsatolás erősítési mátrixának számításához Lineáris Kvadratikus Szabályozási módszer (LQR, Linear Quadratic Regulator) került alkalmazásra. 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. Ily módon a 4.6. ábrán látható eredeti modelltől az a 4.7. ábrán látható kiegészített rendszer adódik. Az állapottér dimenziójának növekedésével 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 állapottér-reprezentációja, kimentí egyenlete, valamint mátrixai az alábbiak:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + Bu + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (4.33)$$

$$y = C \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{c_f l_f^2 + c_r l_r^2}{J_v} & -\frac{c_f l_f - c_r l_r}{J} & 0 \\ -\left(\frac{c_f l_f - c_r l_r}{mv^2} + 1\right) & -\frac{c_f + c_r}{mv} & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{c_f l_f}{J} & \frac{1}{J} \\ -\left(\frac{c_f}{mv} + 1\right) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad (4.37)$$

Az LQR tervezés költségfüggvénye, vagyis a minimalizálandó funkcionál az alábbi:

$$J(x, u) = \frac{1}{2} \int_0^\infty [x(t)^T Q x(t) + r u(t)^2] dt \quad (4.38)$$

ahol $Q = Q^T$, $Q \geq 0$ és $r > 0$, továbbá az x már a z -vel kiegészített, háromdimenziós modell állapotvektora.

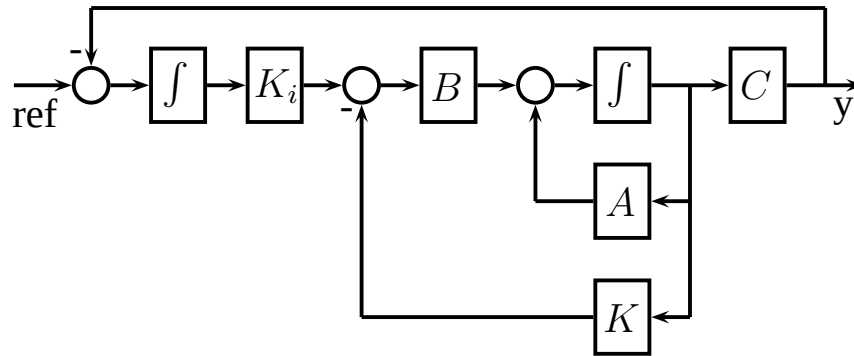
Az optimális visszacsatolás akkor valósul meg, amikor

$$K^T = r^{-1} B^T P \quad (4.39)$$

ahol P kielégíti a Control Algebrai Riccati Egyenletet (CARE), vagyis

$$A^T P + P A - P B r^{-1} B^T P + Q = 0, \quad P > 0 \quad (4.40)$$

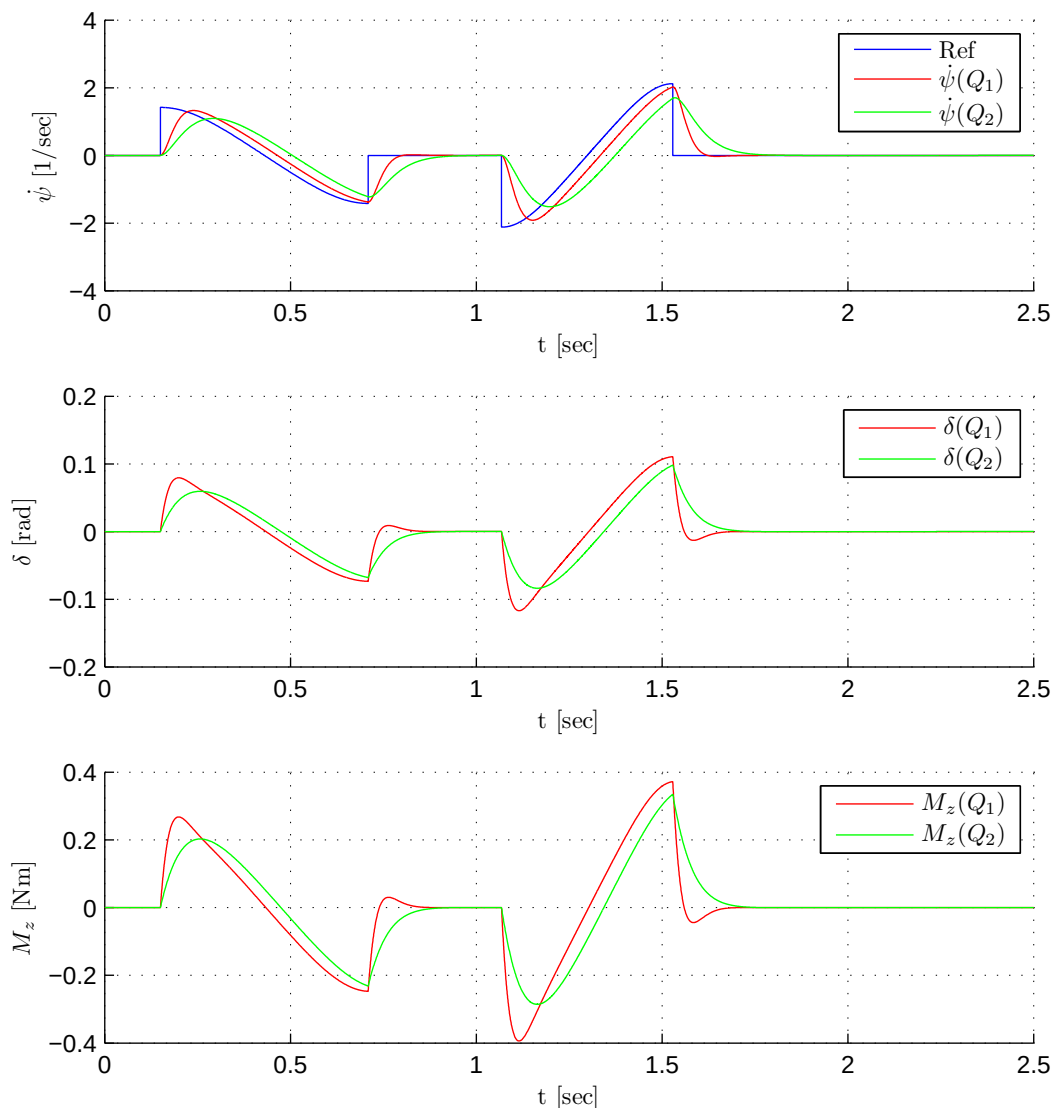
A költségfüggvény Q mátrixa az állapotokat, míg r mátrixa a bemeneteket súlyozza. A mátrixok megfelelő értékét növelve a hozzájuk tartozó állapotot vagy beavatkozójelet büntetjük, vagyis a Q mátrixszal az állapotoktól való eltérést, míg az r értékeivel a beavatkozójelek energiáját.



4.7. ábra. A struktúra módosítással kiegészített modell

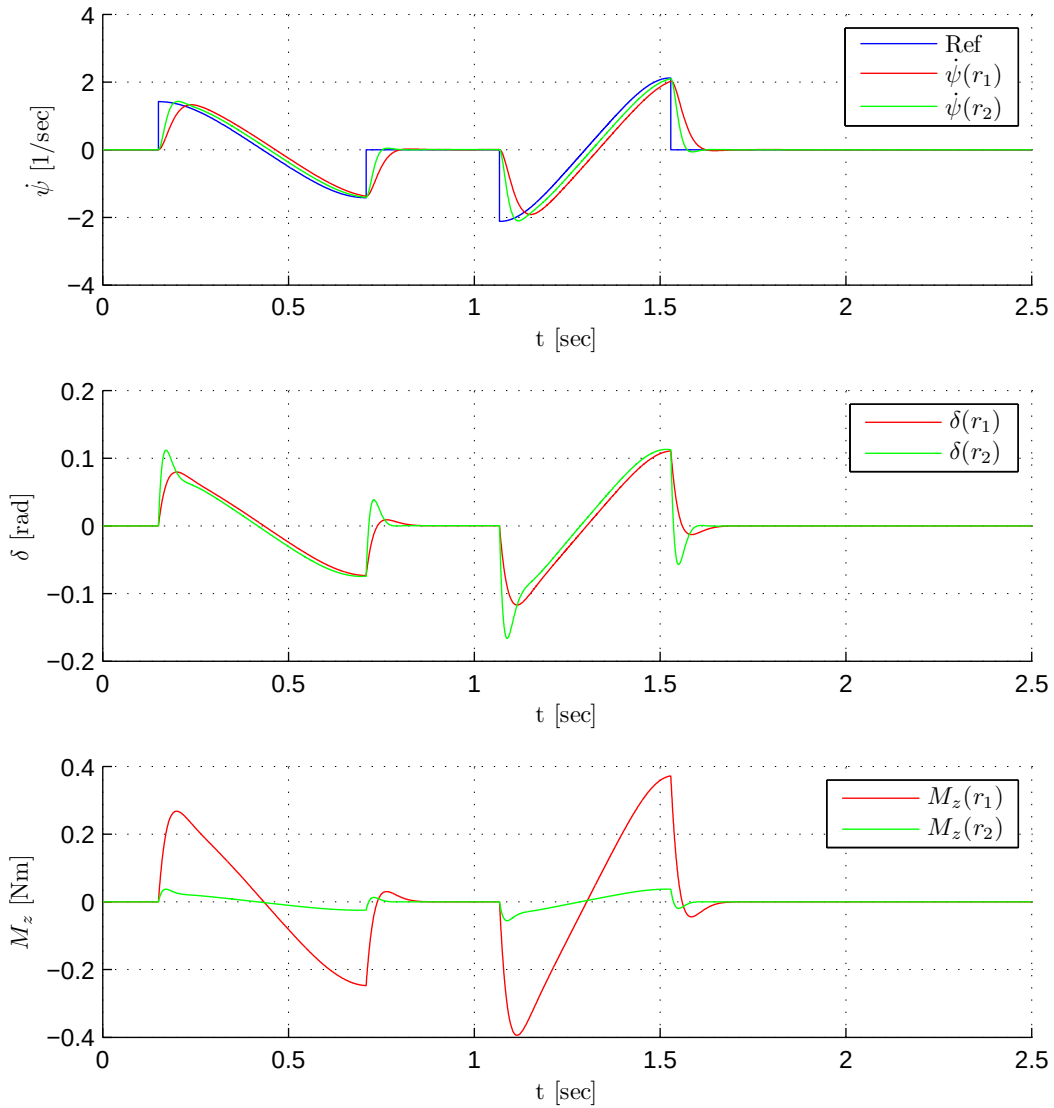
A tapasztalatokra alapozva a c_r és c_f paraméterek úgy lettek felvéve, hogy a gépjármű stabil tartományban mozogjon. A pontos szabályozás érdekében fontos lenne az oldalirányú merevségek kimérése, ám ennek megvalósítására ebben a kutatásban nem volt lehetőség.

A referenciajel-követés a 4.8. felső ábrán látható módon megvalósul, az LQR szabályozásnak köszönhetően a Q és r mátrixok segítségével a minőségi tulajdonságok hangolhatóvá váltak. A Q mátrix változtatásának hatására a 4.8. ábrán látható módon alakul a válaszfüggvény, a δ kormányyszög, valamint az M_z legyezési nyomaték. Megfigyelhető, hogy a követési hiba súlyának növelésével, valamint a ψ súlyának csökkentésével a követés pontosabban valósul meg, de nőnek az aktuátoroktól elvárt beavatkozási igények.



4.8. ábra. A válaszfüggvény és a beavatkozójelek különböző Q mátrixok esetén
 $Q_1 = \text{diag} [10^{-3}, 1, 10^4]$, $Q_2 = \text{diag} [10^{-2}, 1, 10^3]$, $r = \text{diag} [10^3, 1]$

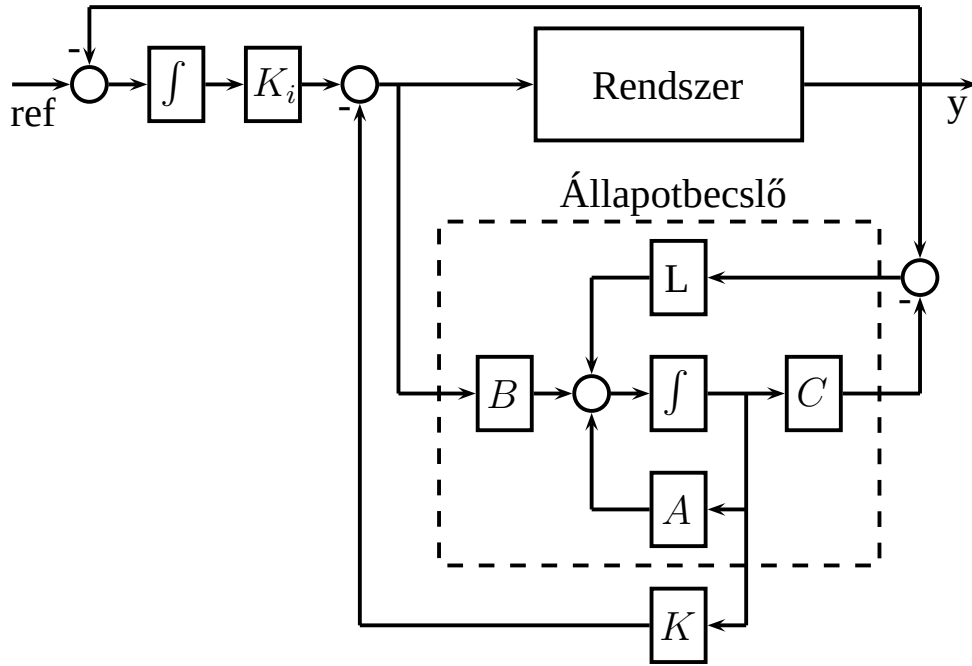
Az r mátrix értékeinek megadásával a beavatkozók energiáját lehet súlyozni, melynek hatását a kimenetre, valamint az egyes beavatkozójelekre a 4.9. ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy a kormánysszög súlyozótényezőjét csökkentve pontosabb referenciajel követés valósítható meg, ám bizonyos értékek alatt túszerű karakterisztikák adódnak, melyet a kormánymű, mint energiakorláatos aktuátor, már nem tud lekövetni.



4.9. ábra. A válaszfüggvény és a beavatkozójelek különböző r mátrixok esetén
 $r_1 = \text{diag} [10^3, 1]$, $r_2 = \text{diag} [10^2, 1]$, $Q = \text{diag} [10^{-3}, 1, 10^4]$

4.2.5. Állapotbecslő tervezése LQ módszerrel

Az eddigi rendszer hiányossága, hogy a három állapot közül a β oldalkúszást nem ismerjük, így a szabályozás megfelelő működéséhez állapotbecslő alkalmazása szükséges. Ennek megtervezése az eredeti, kétállapotú rendszerre valósult meg, a harmadik állapot becslésére nem volt szükség.



4.10. ábra. Az állapotbecslővel kiegészített modell

A megfigyelővel kiegészített modellt a 4.10. ábra mutatja. Mivel a rendszer lineáris, alkalmazható a szeparációs elv, ami kimondja, hogy a rendszer és a megfigyelő egymástól függetlenül tervezhető. Az állapotbecslő L erősítési tényezője (esetünkben vektora) mind pólusallokációs, mind Lineáris Kvadratikus (LQ, Linear Quadratic) módszerrel számolható, ebben a kutatásban ez utóbbi került alkalmazásra. A megfigyelő LQ tervezésének költségfüggvénye, vagyis a minimalizálandó funkcionál az alábbi:

$$J(x, y) = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left[x(t)^T W x(t) + v y(t)^2 \right] dt \quad (4.41)$$

ahol $W = W^T$, $W \geq 0$ és $v > 0$.

Az optimális megfigyelő erősítési vektorára teljesülnie kell, hogy

$$L = S C^T v^{-1} \quad (4.42)$$

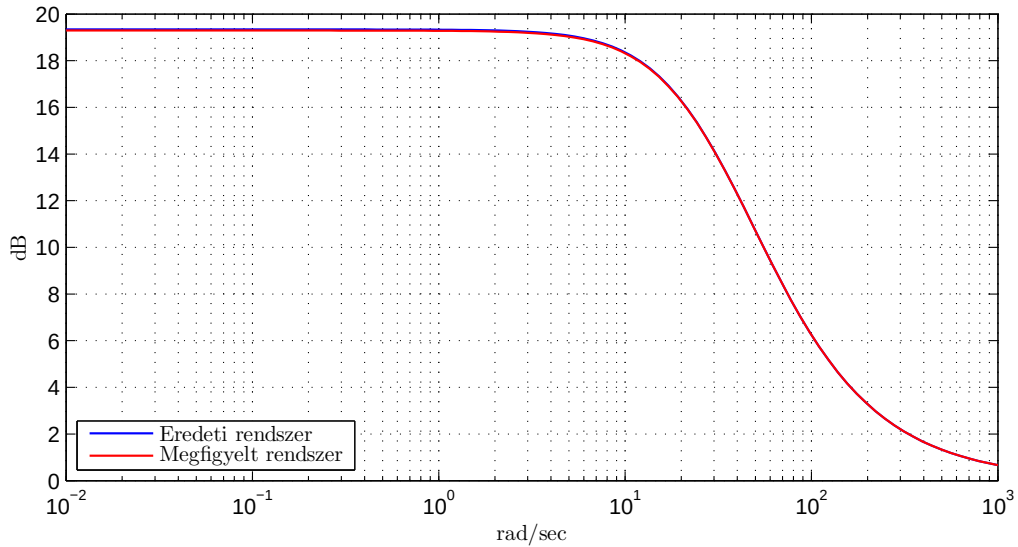
ahol $S = S^T$ kielégíti a Filter Algebrai Riccati Egyenletet (FARE), vagyis

$$A S + S A^T - S C^T v^{-1} C S + W = 0, \quad S > 0 \quad (4.43)$$

A költségfüggvényben a W mátrix a minőségi tulajdonságokat, vagyis a performanciákat, míg a v mátrix a kimenetet súlyozza. A W és v megválasztásával hangolhatóvá válik az állapotbecslő.

A robusztusság biztosítása LTR módszerrel

Az eredetileg optimálisan tervezett LQR rendszert az állapotbecslő elronthatja, ugyanis a bemeneteként alkalmazott adott pillanatbeli u és y értékei alapján becsli a következő időpillanatban alkalmazandó u értéket, így x és $\hat{x}$ között csúszás van. Emiatt performanciavesztéssel, mint például az egyes kerekek megcsúszásával, kipörgésével kell számolni, továbbá a rendszer robusztussága sem biztosított. A performanciavesztés megszüntetésének és a rendszer robusztusságának biztosításához egy lehetséges mód a Hurokátvitel Visszaállítás (LTR, Loop Transfer Recovery) alkalmazása. Ennél a technikánál az állapotbecslő W mátrixát úgy súlyozzuk, hogy a dinamika gyors legyen, vagyis az időbeli késés lecsökkenjen. A módszer alkalmazásával elérhető, hogy a rendszer dinamikája megközelítse az eredetileg optimálisan tervezett rendszer dinamikáját még jelentős mértékű zajok esetén is. [7] A megfigyelő nélküli, valamint a megfigyelővel kiegészített rendszer frekvenciafüggvényei a 4.11. ábrán láthatók. Látható, hogy az új rendszer jól közelíti az optimális rendszert, így a szabályozás robusztusnak tekinthető.



4.11. ábra. Az eredeti és a megfigyelővel kiegészített rendszer frekvenciafüggvényei
 $Q = \text{diag} [10^{-3}, 1, 10^4]$, $r = \text{diag} [10^3, 1]$, $W = \text{diag} [1, 1]$, $v = \text{diag} [1]$

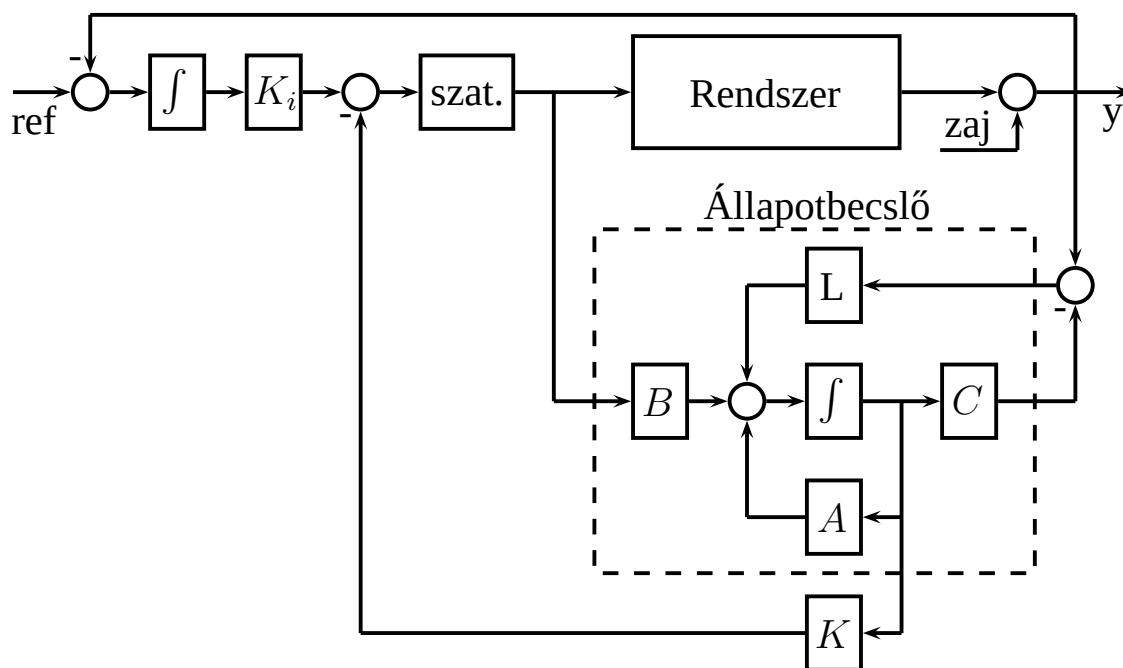
4.2.6. Zavarások, szaturáció figyelembe vétele

Zavarások

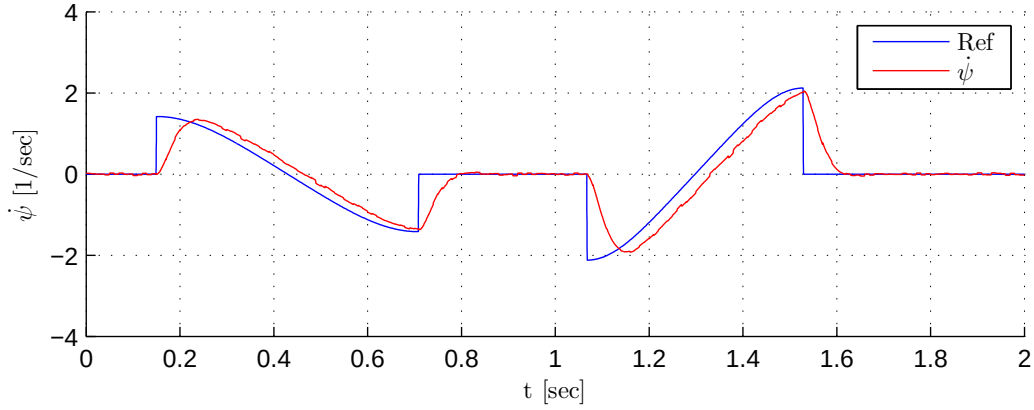
A gépjárművön történő implementálás előtt a szabályozót hangolni kell az esetlegesen felmerülő zajok kezelésére is. A lehetséges zajforrások közül a szenzorzaj vizsgálata történt meg az ismert $\pm 0.0174 \text{ rad/sec}$ szenzorzaj alapján. Ezt a zajértéket a gyakorlatban még befolyásolják a rezgések is, ám ezek jelenleg elhanyagolásra kerültek. Egy véletlenszám generáláson alapuló zajt téve a kimenetre, az állapotbecslővel kiegészített szabályozó eltérést mutatott az eredeti rendszerhez képest. A gyors beállási idő, a minimális túllendülés, valamint a bemenetek véges voltának figyelembevételével történt az L súlyozó vektor értékeinek hangolása.

Szaturáció

A bemenetek, vagyis a nyomaték és a kormánysszög véges fizikai korlátainak figyelembevétele egy-egy szaturációs blokk segítségével valósult meg. A 4.12. ábra mutatja a szenzorzajjal, valamint a szaturációs blokkal kiegészített modellt, míg a 4.13. ábra a szenzorzajjal terhelt rendszer válaszfüggvényét és a referenciajelet. A Q és r mátrixok megválasztása után a szaturációs blokkok segítségével ellenőrizve lett a beavatkozók energiakorlátossága.



4.12. ábra. Szenzorzajjal, valamint szaturációval bővített modell



4.13. ábra. A referenciajel és a válaszfüggvény szenzoraj esetén
 $Q = \text{diag} [10^{-3}, 1, 10^4]$, $r = \text{diag} [10^3, 1]$, $W = \text{diag} [1, 1]$, $v = \text{diag} [1]$

4.2.7. Lineáris és nemlineáris tesztmodellek

A szabályozó modellautón történő tesztelése előtt sor került annak analízisére Matlab Simulink környezetben mind lineáris, mind nemlineáris dinamikai modell alkalmazásával. A lineáris dinamikai modell a 4.2.1. 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 közelítések 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:

$$\alpha_f = \delta - \alpha \quad (4.44)$$

$$\alpha_r = \arctan \left(-\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_r}{v \cos \beta} \right) \quad (4.45)$$

ahol

$$\alpha = \arctan \left(\tan \beta + \frac{\dot{\psi} l_f}{v \cos \beta} \right) \quad (4.46)$$

Az oldalirányú erő:

$$F_{lat} = c\alpha \quad (4.47)$$

Az oldalirányú erő y irányú komponense:

$$F_{lat_f y} = c_f \alpha_f \cos \alpha \quad (4.48)$$

$$F_{lat_r y} = c_r \alpha_r \cos \alpha_r \quad (4.49)$$

Az oldalirányú erő x irányú komponense:

$$F_{lat_fx} = -c_f \alpha_f \sin \alpha \quad (4.50)$$

$$F_{lat_rx} = -c_r \alpha_r \sin \alpha_r \quad (4.51)$$

A nyomatékok eredője:

$$M_{z_{fl}} = F_{fl} l_{fl} = \frac{M_{fl}}{R} l_{fl} \quad (4.52)$$

$$M_z = M_{z_{fr}} - M_{z_{fl}} - M_{z_{rl}} + M_{z_{rr}} \quad (4.53)$$

Mozgásegyenletek:

Y irányú erők eredője:

$$ma_{cp} = F_{lat_fy} + F_{lat_ry} \quad (4.54)$$

$$a_{cp} = \frac{v^2}{R_{iv}} = v\omega = v(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \quad (4.55)$$

$$mv(\dot{\psi} + \dot{\beta}) = F_{lat_fy} + F_{lat_ry} \quad (4.56)$$

Z tengely körüli nyomatékok eredője:

$$J\ddot{\psi} = F_{lat_f} l_{f_{mod}} - F_{lat_r} l_{r_{mod}} + M_z \quad (4.57)$$

ahol $l_{f_{mod}}$ és $l_{r_{mod}}$ az oldalirányú erők súlypontra vonatkozó nyomatékkarja.

X irányú erők eredője:

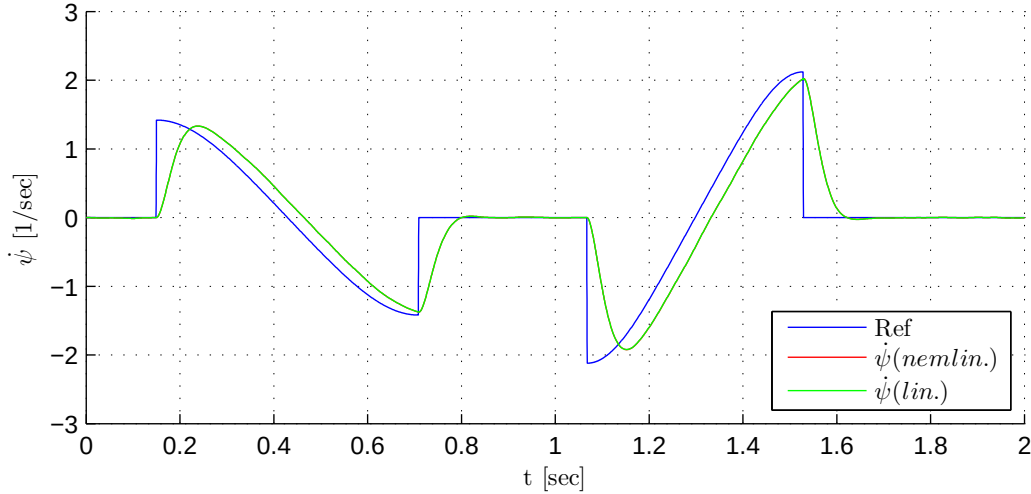
$$m(1 + \gamma)a = F_{lat_fx} + F_{lat_rx} + F_v \quad (4.58)$$

$$F_v = F_{fr} + F_{fl} + F_{rl} + F_{rr} \quad (4.59)$$

Az y irányú erők és a z tengely körül forgató nyomatékok eredőjét továbbvive (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.

4.2.8. A legyezési dinamika szabályozásának elemzése

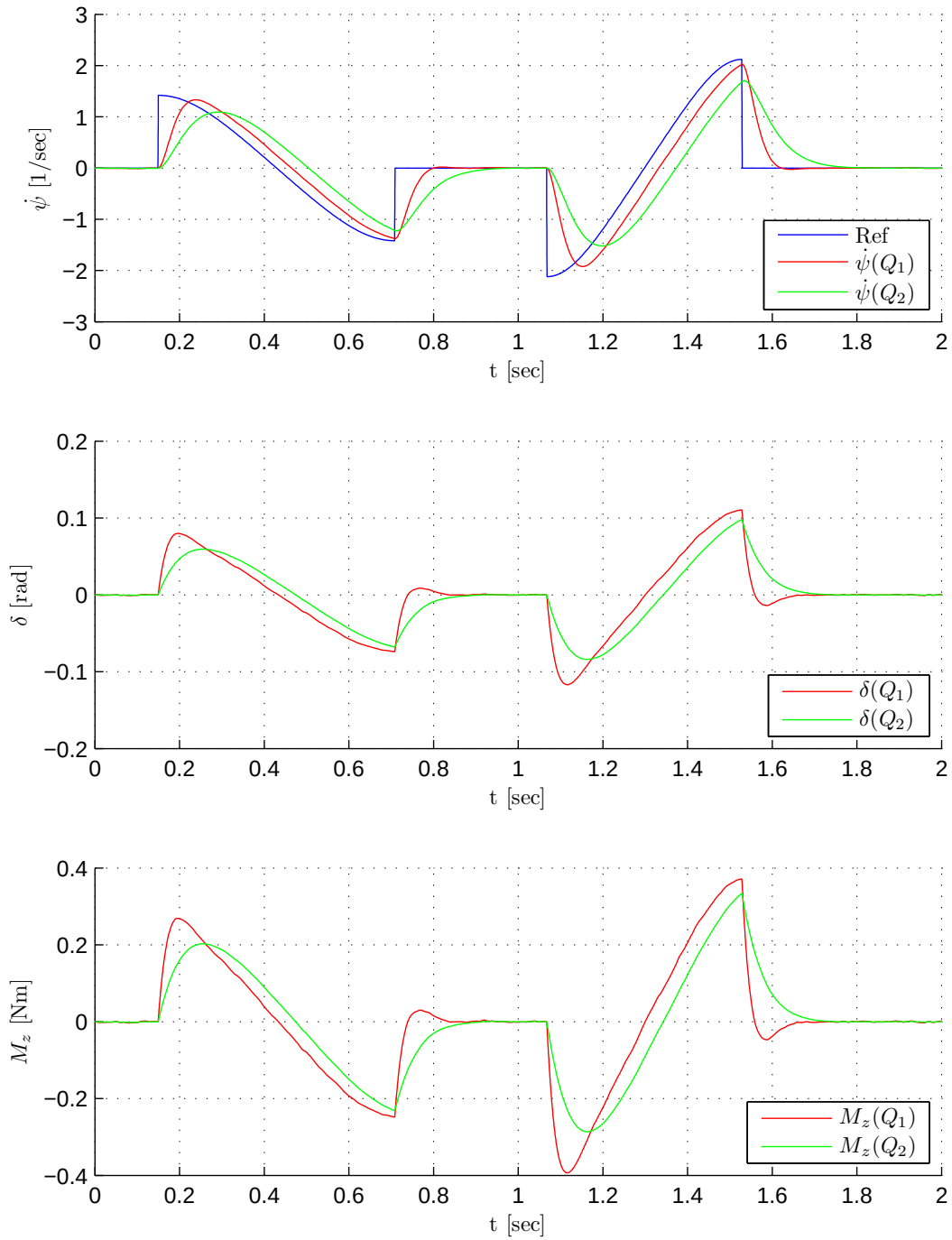
Az LQ módszerrel szabályozott, állapotbecslővel, zavarással és szaturációs blokkal kiegészített rendszer analízise lineáris és nemlineáris modellek alkalmazásával valósult meg. A 4.14. ábrán látható a rendszer kettős sávváltás teszt referenciajellel adott válaszfüggvénye. Az ábrán a lineáris és nemlineáris válasz gyakorlatilag egybeesik, a kettő közötti különbség 10^{-3} nagyságrendű, így a részletes elemzés a nemlineáris rendszerre került elvégzésre.



4.14. ábra. A lineáris és nemlineáris modell válaszfüggvényei a referenciajellel
 $Q = \text{diag} [10^{-3}, 1, 10^4]$, $r = \text{diag} [10^3, 1]$, $W = \text{diag} [1, 1]$, $v = \text{diag} [1]$

Az analízis eredménye, hogy a referenciajel-követés megvalósul, a szabályozó Q és r mátrixai segítségével a szabályozás hangolható mind a jelkövetés minőségi tulajdonságai, mind a beavatkozójelek nagyságának tekintetében. A 4.15. felső ábra a nemlineáris rendszer válaszát mutatja két különböző Q mátrix esetén. Látható, hogy a $\dot{\psi}$ állapotnak kis súlyszámot választva és a hibajelnek nagy súlyt adva, a szabályozás pontosabb referenciajel-követést valósít meg. Ugyanakkor a középső és alsó ábrákon megfigyelhető, hogy a gyorsabb és pontosabb referenciajel-követéssel nagyobb csúcsok és gradiensek mutatkoznak a beavatkozójeleken.

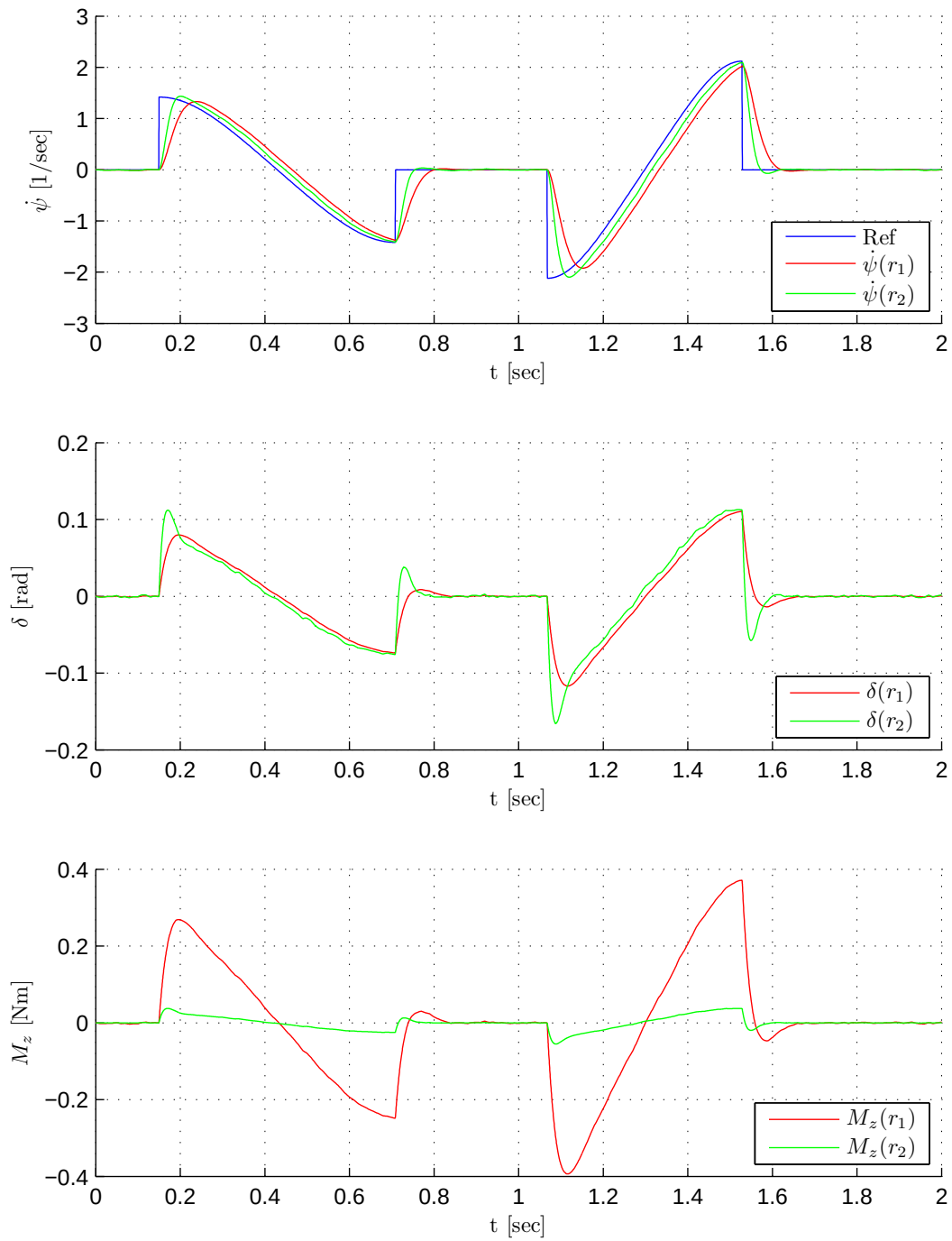
Az r mátrix értékválasztásának hatását a 4.16. ábra mutatja két különböző súlyozás esetén. Látható, hogy a második esetben, vagyis amikor a kormányászög a kisebb súlyt kapta, a δ igény lengéseket és hegyes csúcsokat tartalmaz, míg a nyomatékigény gyakorlatilag elhanyagolhatóan kicsi. Ezzel szemben az első esetben, a kormányászög igény ideálisnak mondható, mert amellet, hogy sem lengéseket, sem kiugró csúcsokat nem tartalmaz, maximális értéke is alacsonyabb, és ebben az esetben a legyezési nyomaték is részt vesz a gépjármű kormányzásában.



4.15. ábra. A nemlineáris tesztmodellel kapott eredmény különböző Q mátrixok esetén

$$Q_1 = \text{diag} [10^{-3}, 1, 10^4], \quad Q_2 = \text{diag} [10^{-2}, 1, 10^3], \quad r = \text{diag} [10^3, 1]$$

$$W = \text{diag} [1, 1], \quad v = \text{diag} [1]$$



4.16. ábra. A nemlineáris tesztmodellel kapott eredmény különböző r mátrixok esetén
 $r_1 = \text{diag}[10^3, 1]$, $r_2 = \text{diag}[10^2, 1]$, $Q = \text{diag}[10^{-3}, 1, 10^4]$
 $W = \text{diag}[1, 1]$, $v = \text{diag}[1]$

4.3. A hosszirányú dinamika felső szintű szabályozása

A legyezési dinamika szabályozása mellett a hosszirányú dinamikát kezelő szabályozó fejlesztése is a tervezési feladat részét jelenti. Jelen dolgozatban a hangsúly a szabályozótervezésnél a legyezési dinamikán volt, így a hosszirányú szabályozó csak tervezési szinten valósult meg. A kiindulási modell ebben az esetben egy egyszerű, egyenes pályán mozgó jármű lehet, ahol az ellenálláserők, azok ismeretének hiányában zavarásként veendőek figyelembe. A mozgásegyenlet az alábbi:

$$F = m(1 + \gamma) \ddot{x} \quad (4.60)$$

$$F = F_v + F_{ell} \quad (4.61)$$

Ahol m a jármű tömege, γ a forgó tömegek tényezője (mérendő), F_v a négy kerék eredő vonóereje, míg az F_{ell} az ellenálláserők eredője. Az ellenálláserő a gördülési- és légellenállásból, az emelkedő ellenállásából, valamint az oldalkúszások miatt ébredő oldalirányú erők hosszirányú tényezőjéből adódnak. Mivel az ellenálláserők zavarásként vannak figyelembe véve, a szabályozó által számolt F beavatkozással ez esetben az F_v -nek felel meg, azaz $F_v = F$. A súrlódás és a motor ellenállási erejével nem kell számolni, ugyanis ezeket a motorszabályozó veszi figyelembe. A gumi és a talaj közötti kúszást elhanyagolva, a jármű sebessége a kerekek szögsebességének mérésével ismertnek tételezhető fel a $v = r\omega$ képlet alapján. Mivel a feladat referencia sebesség követése, az állapottér-reprezentációra való áttéréshez az alábbi állapotvektor, beavatkozással, valamint kimenet ajánlott:

$$x = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix}; \quad u = F; \quad y = \dot{x} \quad (4.62)$$

A 4.60. egyenletet rendezve adódik az alábbi állapottér-reprezentáció:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.63)$$

$$y = Cx \quad (4.64)$$

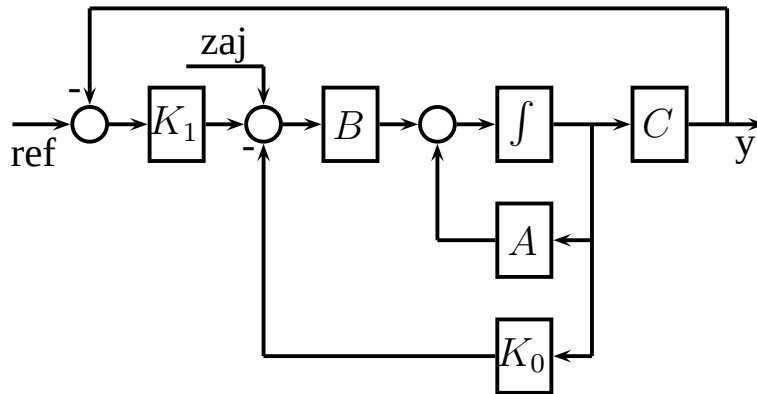
ahol a rendszer mátrixai:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

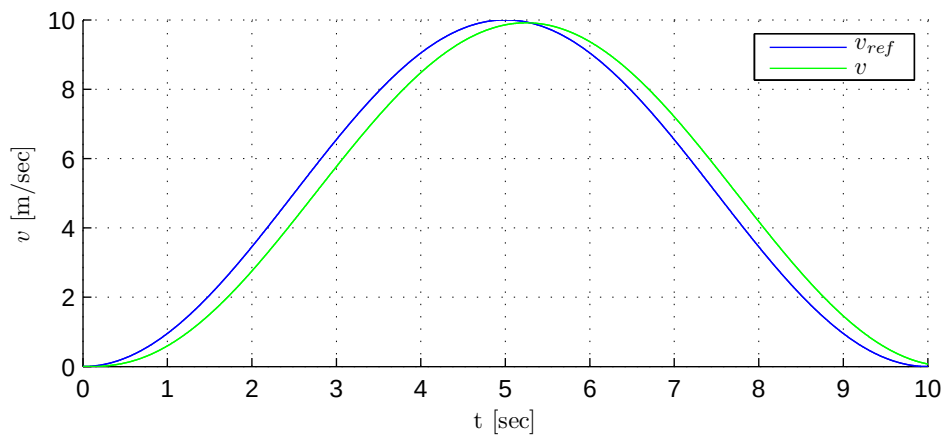
$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m(1+\gamma)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

Mivel a rendszer integráló tulajdonságú és az első állapot megegyezik a kimenettel, a referenciajel-követéshez állapotszeparálás módszere alkalmazható. A szabályozó modellje a 4.17. ábrán látható. Az állapot-visszacsatolás erősítési tényezője mind pólusallokációs, mind LQR módszerrel számítható. A szabályozás által számított beavatkozással, vagyis F_v értéke a középső szintű szabályozóhoz kerül a négy kerék közötti elosztásra.



4.17. ábra. A hosszirányú dinamika szabályozásának modellje



4.18. ábra. A sebességekvetés

A referenciajel-követés a 4.18. ábrán látható módon megvalósul ebben a modellben, ám a későbbiekben olvasható CarSim környezetben futtatott szimulációk során a szabályozás még nem bizonyult megfelelőnek. Ennek oka a jelentős egyszerűsítésekben és a linearizált modellben keresendő, s mivel ebben a munkában a hangsúly a legyezési dinamika felső szintű szabályozásán van, a hosszirányú dinamika szabályozásának pontosítása még nem valósult meg. A hosszirányú dinamika kezelése CarSim környezetben végül egy mások által ajánlott és hangolt arányos integráló (PI, Proportional Integral) szabályozással valósult meg.

4.4. Nyomatékszétosztás az egyes kerekre

Az elosztási feladat összetett menetdinamikai és szabályozástechnikai problémákat rejt magában, s ebben a dolgozatban ezek megoldására nem kerülhetett sor, de három szabályozási modell került felállításra a témakörrel kapcsolatos problémafelvetés és a továbbfejlesztés irányának megmutatása céljából.

A felső szintű szabályozóktól érkező M_z legyezési nyomaték, valamint az F_v vonóerő négy keréken történő elosztása a középső szintű szabályozó feladata, míg a δ kormányszög kezelésére ezen a szinten nincs szükség. Az M_z a keréktalpponti erők súlypontra számított forgatónyomatékának eredőjeként, míg az F_v vonóerő a keréktalpponti erők eredőjeként adódik. A kerekenkénti nyomatékok szétosztásánál többek között az alábbi szempontokat kell figyelembe venni:

- a keréktalpponti erők oldalanként egyezzenek meg
- a kerek ne csússzanak meg, ne pörögjenek ki
- a motorok energiakorlátosak
- a hosszirányú sebesség csökkenhet vészhelyzetben
- a gumik egyenletesen és minél kisebb mértékben kopjanak

Három modell került felállításra, melyek bemutatása az alábbi fejezetekben olvasható. Az első modell egy hátsókerék hajtotta modell, ahol mind az F_v vonóerő, mind az M_z nyomaték a hátsó kerekre oszlik el. A második egy lineáris modell, mely nem veszi figyelembe az első tengelyek elkormányozottságából eredő erőkar változást. A harmadik modell kezeli az első kerek kormányzásából származó erőkar hosszváltozását is.

4.4.1. Hátsókerék hajtású modell

A hátsókerék hajtotta modell egyenletei az alábbiak:

$$F_v = F_{rr} + F_{rl} \quad (4.68)$$

$$M_z = F_{rr}l_{rr} - F_{rl}l_{rl} \quad (4.69)$$

$$l_{rr} = l_{rl} = \frac{n_r}{2} \quad (4.70)$$

$$M_{rr} = RF_{rr} \quad (4.71)$$

$$M_{rl} = RF_{rl} \quad (4.72)$$

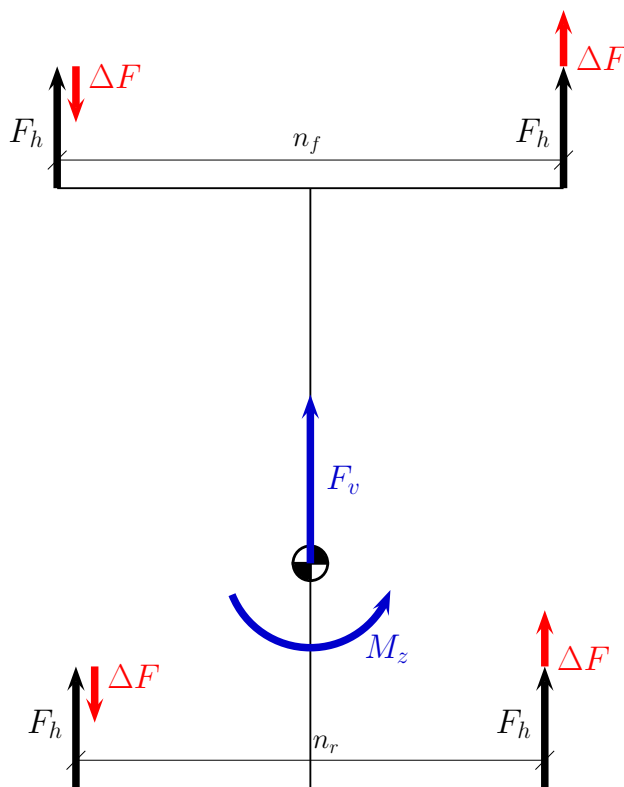
ahol F_{rl} a bal hátsó, F_{rr} pedig jobb hátsó keréken ébredő keréktalpponti erők, míg l_{rl} és l_{rr} a hozzájuk tartozó, súlypont körüli fogatókarok, melyek a hátsó nyomtáv (n_r) felével egyenlőek. Az M_{rr} és M_{rl} pedig az egyes motoroktól elvárt nyomatékigények. A modell szimulációs környezetben való tesztelését és ennek eredményét az 5. fejezet tartalmazza.

4.4.2. Négykerék hajtású lineáris modell

A modellben minden kerék keréktalpponti ereje két vektor összegeként adódik. Egyrészt az F_v vonóerőt négyfelé osztva minden kerékhez egy F_h hajtóerő tartozik, másrészt ehhez az F_h hajtóerőhöz adódik vektoriálisan a legyezési nyomaték megvalósítására hivatott pozitív, vagy negatív irányú erővektor. A legyezési nyomatékot adó oldalankénti keréktalpponti erők különbsége a nyomtávok figyelembevételével számítható, erőpárokat véve alapul. A ΔF erőkülönbség a jobb és bal oldal közötti szétosztásakor a belső íven $-\Delta F$ -et, míg a külső íven $+\Delta F$ -et kell a meglévő F_h hajtóerőhöz adni. Az alábbi egyenletek eredménye, hogy az oldalankénti erők elől-hátul megegyeznek, valamint eredőjüként F_v súlypontra vonatkozó forgatónyomatékuk eredőjeként pedig M_z adódik. Az erővektorok, valamint az M_z nyomaték a 4.19. ábrán látható.

$$F_v = F_{fr} + F_{fl} + F_{rl} + F_{rr} \quad (4.73)$$

$$M_z = F_{fr}l_{fr} - F_{fl}l_{fl} - F_{rl}l_{rl} + F_{rr}l_{rr} \quad (4.74)$$



4.19. ábra. A négykerék hajtású lineáris elosztási modell

$$l_{fr} = l_{fl} = \frac{n_f}{2} \quad (4.75)$$

$$l_{rr} = l_{rl} = \frac{n_r}{2} \quad (4.76)$$

$$F_h = \frac{F_v}{4} \quad (4.77)$$

$$M_z = n_f \Delta F + n_r \Delta F \quad (4.78)$$

$$\Delta F = \frac{M_z}{n_f + n_r} \quad (4.79)$$

A kerek 85 mm-es sugarának figyelembevételével számítható a motoroktól elvárt nyomaték.

$$F_{fr} = F_h \pm \Delta F, \quad M_{fr} = RF_{fr} \quad (4.80)$$

$$F_{fl} = F_h \pm \Delta F, \quad M_{fl} = RF_{fl} \quad (4.81)$$

$$F_{rl} = F_h \pm \Delta F, \quad M_{rl} = RF_{rl} \quad (4.82)$$

$$F_{rr} = F_h \pm \Delta F, \quad M_{rr} = RF_{rr} \quad (4.83)$$

A modell hiányossága, hogy jelentős mértékben elkormányzott első kerek esetén a keréktalppontokon ébredő erők súlypontra vonatkozó forgatókarja jelentős mértékben változhat, így a belső íven lévő kerék karja csökkent, a külső íven lévőé pedig nő. Ennek hatására a nő a belső ív felé forgató nyomaték, ezért a δ kormányszöget figyelembe vevő szabályozás alkalmazása ajánlott.

4.4.3. Négykerék hajtású nemlineáris modell

A modell már figyelembe veszi a kormányszög változásából adódó forgatókar változásokat is. A felállításra került modell egyenletei a 4.20. ábrán látható szerkesztésből következnek.

$$F_v = F_{fr} + F_{fl} + F_{rl} + F_{rr} \quad (4.84)$$

$$M_z = F_{fr}l_{fr} - F_{fl}l_{fl} - F_{rl}l_{rl} + F_{rr}l_{rr} \quad (4.85)$$

$$l_{fr} = \left(\frac{n_f}{2} + l_f \tan \delta_r \right) \cos \delta_r \quad (4.86)$$

$$l_{fl} = \left(\frac{n_f}{2} - l_f \tan \delta_l \right) \cos \delta_l \quad (4.87)$$

$$l_{rr} = l_{rl} = \frac{n_r}{2} \quad (4.88)$$

$$(4.89)$$

Figyelembe véve, hogy oldalanként meg kell egyezzenek a keréktalpponti erők ahhoz, hogy a kerek ne csússzanak meg, vagy pörögjenek ki, a fenti egyenleteket az alábbiak szerint érdemes rendezni.

$$F_r = F_{fr} = F_{rr} \quad (4.90)$$

$$F_l = F_{fl} = F_{rl} \quad (4.91)$$

$$M_z = F_r (l_{fr} + l_{rr}) - F_l (l_{fl} + l_{rl}) \quad (4.92)$$

$$F_v = 2F_r + 2F_l \quad (4.93)$$

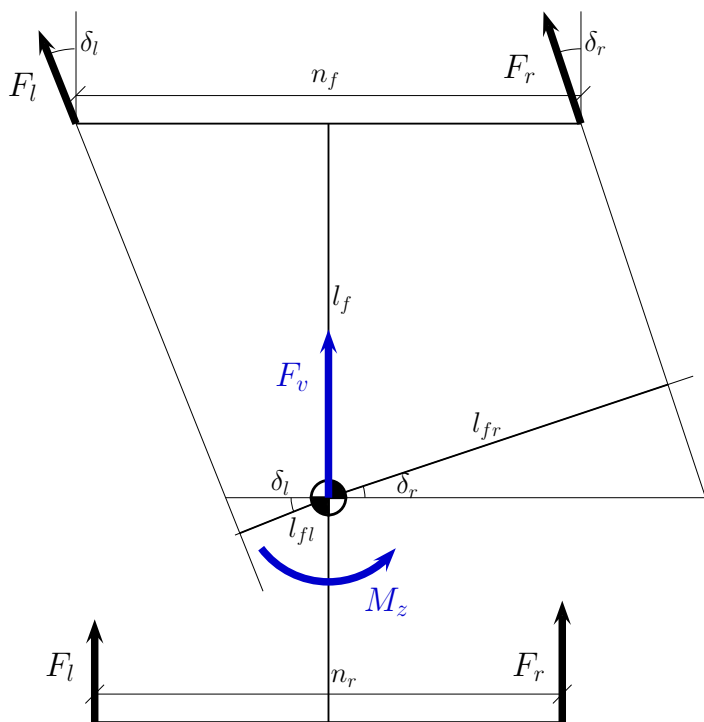
Az egyenleteket F_r -re, vagy F_l -re rendezve megkaphatjuk az oldalankénti erőket. Ez a módszer alkalmazható a lineáris modellnél is $\delta = 0$ -át feltételezve. A módszerrel a lineáris modellhez hasonlóan az oldalankénti erők megegyeznek, továbbá az eredőjüként F_v , súlypontra vonatkozó forgatónyomatékuk eredőjeként pedig M_z adódik.

$$M_{fr} = RF_{fr} \quad (4.94)$$

$$M_{fl} = RF_{fl} \quad (4.95)$$

$$M_{rl} = RF_{rl} \quad (4.96)$$

$$M_{rr} = RF_{rr} \quad (4.97)$$



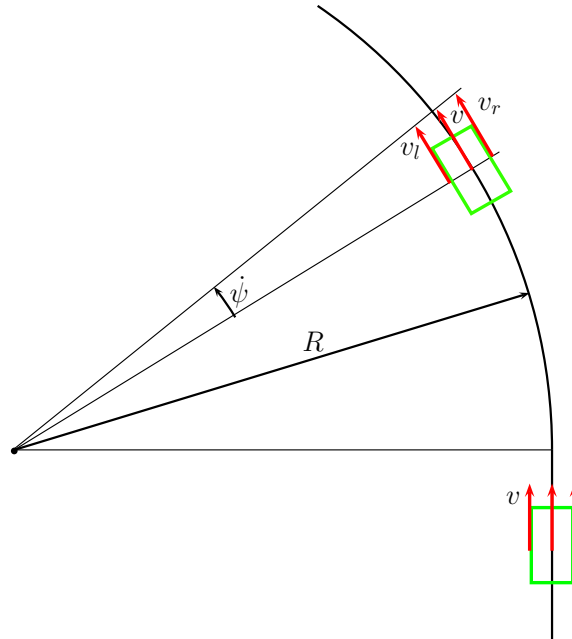
4.20. ábra. A négykerék hajtású nemlineáris elosztási modell

4.4.4. A középső szintű szabályozás értékelése

Az F_v vonóerő, valamint az M_z legyezési nyomaték elosztása mindhárom esetben megvalósult, a négy keréktalpponti erő eredője mindegyik modellben konstans, értéke F_v , és a súlypontra vonatkozó forgatónyomatékuk eredője M_z . Ennek ellenére egy fontos kérdésben még nem jelentenek ideális megoldást a fenti modellek.

Ahhoz, hogy a jármű mind a négy kereke megcsúszás, vagy kipörgés nélkül gördüljön, az alábbiaknak kell teljesülniük. Amíg a gépjármű egyenesen halad, a kerekek fordulatszámuk meg kell egyezzen. Amikor ívmenetben halad, a $v = R_{iv}\omega$ képlet alapján a belső kereknek kisebb, míg a külsőnek nagyobb fordulatszámon szükséges forogniuk az ív sugarának függvényében, ahogy azt a 4.21. ábra mutatja. Feltételezve, hogy az útfelület konstans μ -vel jellemezhető, az egyes motorokkal szemben támasztott nyomatékigények aránya a fordulatszámokból következik.

Azonban mindhárom modellben, a szabályozás hangolásától függően egyazon ívhez és sebességhez különböző legyezési nyomatékigények érkezhettek a felső szintű szabályozó felől, így nem biztosított, hogy a fordulatszámok által meghatározott arányok teljesüljenek, vagyis, hogy minden kerék sebessége megfelel az adott ívben való, adott sebességgel történő haladásnak. Más szóval a kerekek megcsúszhatnak vagy kipöröghetnek, s ezáltal a jármű stabilitása megszűnhet. Ennek mértéke a hangolástól és az elosztási szabályoktól függ, a jármű mozgására gyakorolt hatását érdemes további vizsgálatoknak alávetni. Ennek a problémának a mélyebb elemzése, valamint további elosztási szabályok tervezése érdekében valós, vagy szimulációs környezetben való tesztelés és elemzés elvégzése ajánlott. Egy lehetséges szimulációs szoftver a CarSim, melynek alkalmazásával mind a szabályozó pontosabb hangolása, mind az esetleges hibák feltérképezésére lehetőség van. A CarSim környezetben elvégzett tesztelés az 5. fejezetben olvasható.



4.21. ábra. A jármű sebességvektorai ívmenetben

4.5. Alsó szintű szabályozás

Az alsó szintű szabályozás feladata a δ kormányszög, valamint a középső szintű szabályozó által kért motoronkénti nyomatékigények megvalósítása a villamosmotorokon. Az alsó szintű szabályozó tervezése és fejlesztése nem a szerző feladatát képezte, ezt, mint kész egységet kezelte a tervezés során. A hajtások nyomatékszabályozással rendelkeznek, és a felső szintről érkező nyomaték referenciajel-követését valósítják meg a 3.5. fejezetben ismertetésre került mezőorientált szabályozás alkalmazásával.

5. fejezet

Skálázhatóság

A dolgozat célja az elektromos gépjárművek hajtására is alkalmas agymotoros hajtás és a benne rejlő lehetőségek megismerése és továbbfejlesztése. A cél elérésének fontos eszköze lehet egy modellautó megalkotása, mivel ennek tervezésével rengeteg tudás és tapasztalat szerezhető, melyeket a későbbiekben valós gépjárművekhez kapcsolódó kutatásokban és fejlesztésekben lehet hasznosítani. Ezt szem előtt tartva a tervezés során, mind a jármű fedélzeti rendszerének architektúrája, mind a szabályozás architektúrája, mind pedig a szabályozás mindhárom szinten úgy lett megtervezve, hogy azt, vagy az abból nyert tudást valós járműipari alkalmazásoknál lehessen hasznosítani.

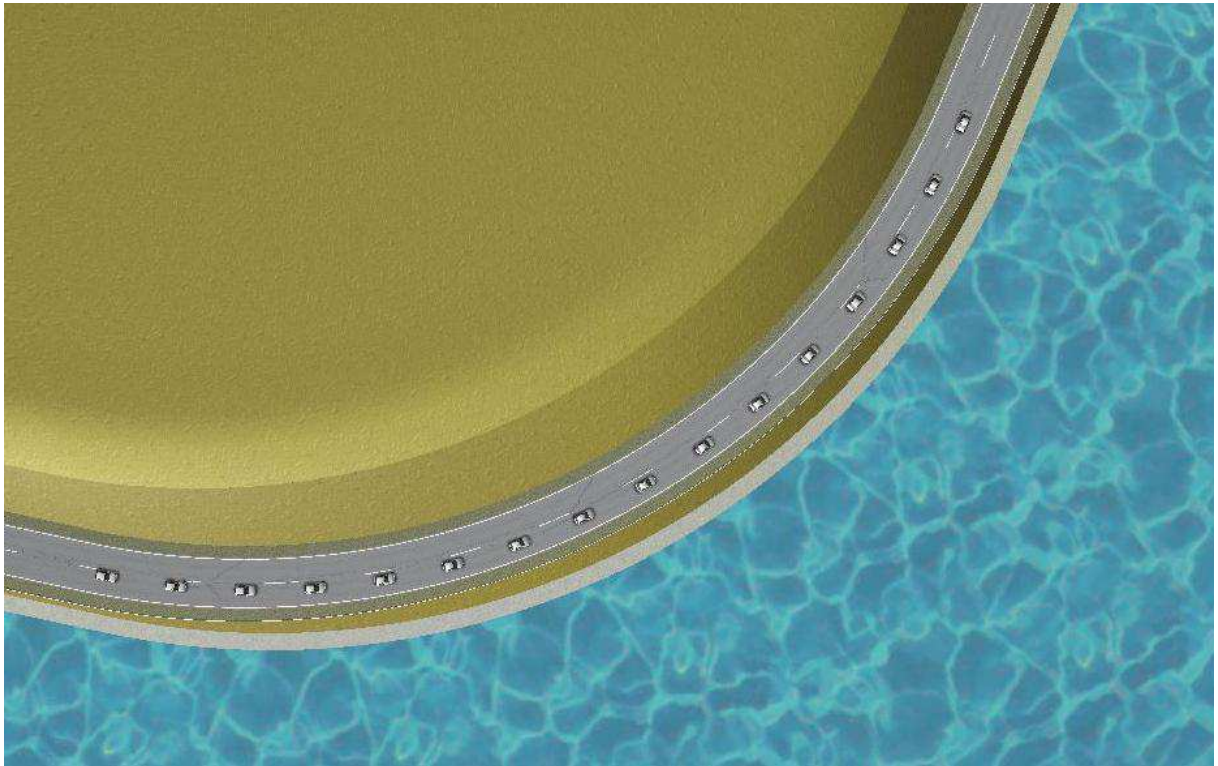


5.1. ábra. Szimuláció CarSim környezetben

A dolgozatban ismertetésre kerülő jármű fedélzeti rendszerének architektúrája nagy mértékben hasonlít a valós járművekéhez, annak moduláris felépítését, valamint a CAN kommunikációs hálózatot tekintve. A hierarchikus, elosztott szabályozás is alkalmas valós járműipari alkalmazásokra, és a dolgozat hangsúlyos eleme, a felső szintű szabályozás legyezési dinamikát kezelő része is skálázható. Ennek bizonyítására, valamint tesztelésére a CarSim szimulációs szoftver került alkalmazásra, ahol a Matlab Simulinkben futó szabályozót valósághoz közeli környezetben lehet kipróbálni, szükség esetén javítani, hangolni. A CarSim szoftver szimulálja a gépjármű teljes menetdinamikai modelljét a beavatkozótól a gumimodellekig, valamint az úttestet és a környezeti tényezőket is.

A szimulációhoz a legyezési és hosszdinamika szabályozása, valamint a középső szinten megvalósuló elosztás egy közös modellbe került. A modell bemenetei a $\dot{\psi}_{ref}$ és v_{ref} referenciajelek, míg a kimenetei a δ kormányszög és a négy motornyomaték. A szimulációs környezetben egy Ford Ka személyautó került kiválasztásra, melynek valós paramétereit a szoftver tartalmazza. A jármű hajtásrendszerét külön lehet definiálni, olyan opció került kiválasztásra, melyben a négy kerék nyomatékát külön-külön lehet megadni. Útvonal gyanánt egy kanyargós tengerparti út lett kiválasztva, míg az útfelület és a gumik közötti súrlódási tényező konstans.

A szabályozó a valós jármű paramétereit és az LQ súlyozómátrixok alapján kiszámolja az erősítési mátrixokat, majd ezek alapján a Simulink környezetben futtatható a teljes szabályozás. A Simulink modell tartalmaz egy CarSim blokkot, melynek bemenetei a kormányszög és a négy motornyomaték, míg kimeneteiből származik a $\dot{\psi}_{ref}$ és v_{ref} , továbbá kivezetésre került a ψ , a kerekenkénti slip és a β oldalkúszás.

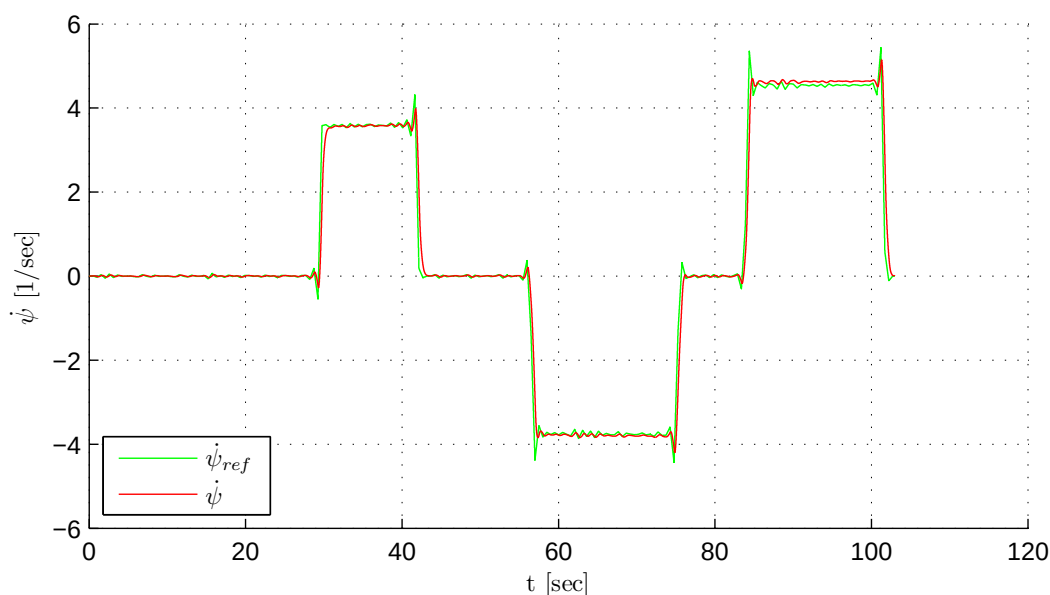


5.2. ábra. Kanyarodás felülnézetből CarSim környezetben

5.1. A CarSim szimuláció eredménye

A Simulink modell futtatása után akár animációval, akár a kivezetett jelek ábrázolásával lehetőség nyílik a szabályozó elemzésére. Az CarSim-ben történő analízisnél a legyezési dinamikát az ismertetett, állapotbecslővel kiegészített szabályozó kezelte, míg hosszirányú dinamikát a már korábban említett PI típusú szabályozó. Mindhárom középső szintű modell tesztelése megvalósult, és ezek közül egyelőre a hátsókerék hajtású elosztási stratégiával sikerült a kívánt célt elérni, így az ezzel kapcsolatos eredmények részletes bemutatására kerül sor.

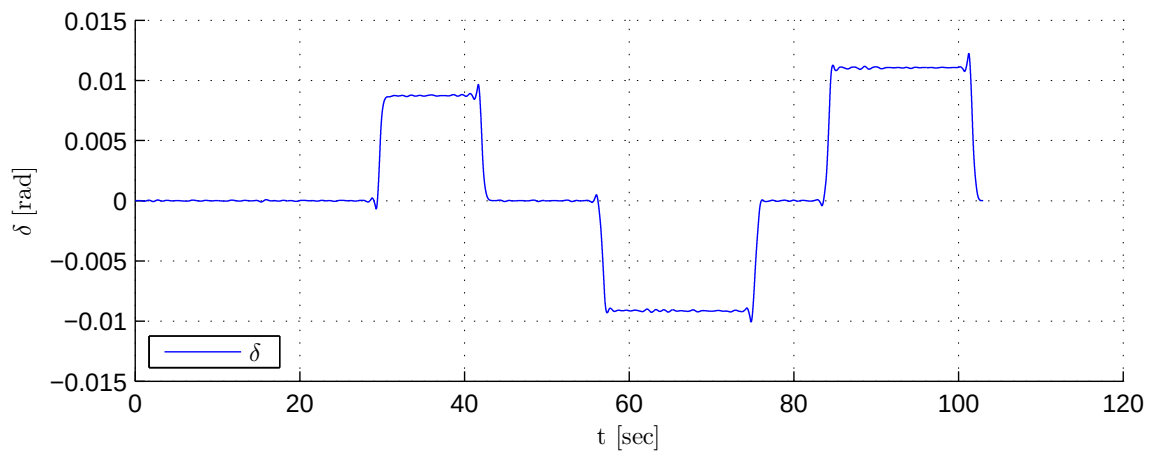
Az analízis során a felső szintű szabályozás legyezési dinamikát kezelő része hangolhatónak és skálázhatónak bizonyult. A Q és r mátrixok megfelelő hangolásával a jármű legyezési dinamikája megfelelt az elvárásoknak. A referencia legyezési szögsebesség követése az 5.3. ábrán látható módon valósult meg.



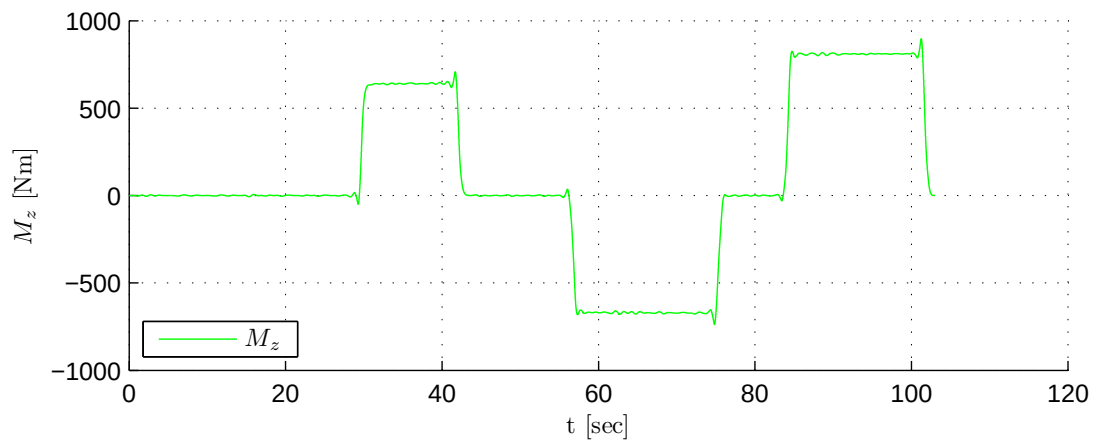
5.3. ábra. A legyezési szögsebesség követése CarSim környezetben

A tesztelés 10 m/s-os sebességnél zajlott le, ennél a sebességnél az ideális súlyozásnak a $Q = \text{diag}(10^{-3}, 1, 10^6)$, és az $r = \text{diag}(10^6, 0.00037)$ bizonyult. Ennél a hangolásnál a szabályozó által számolt δ kormányzög és az M_z legyezési nyomaték alakulás az adott útszakaszon az 5.4. és az 5.5. ábrákon látható.

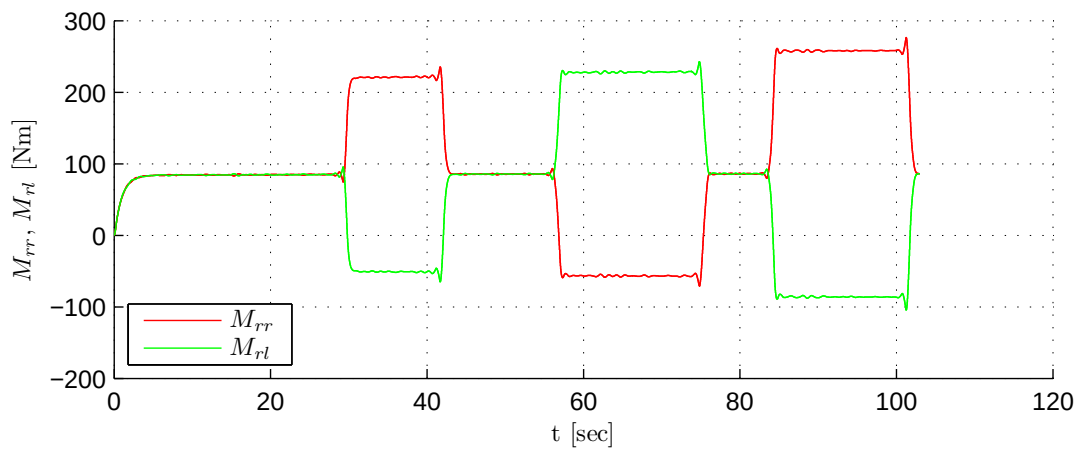
A középső szintű szabályozó a hátsó kereken realizálja mind a vonóerőt, mind a legyezési nyomatékot. A kerekenkénti nyomatékigény alakulása az 5.6. ábrán látható, maximuma 280 Nm körül alakult, amelynek teljesítésére képesek a jelenlegi, személyautók hajtására tervezett agymotorok.



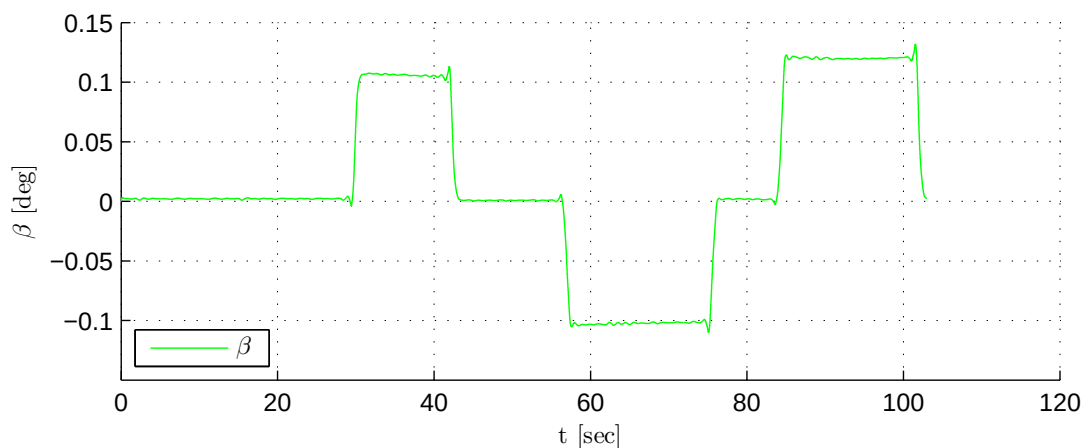
5.4. ábra. A kormányszög alakulása CarSim környezetben



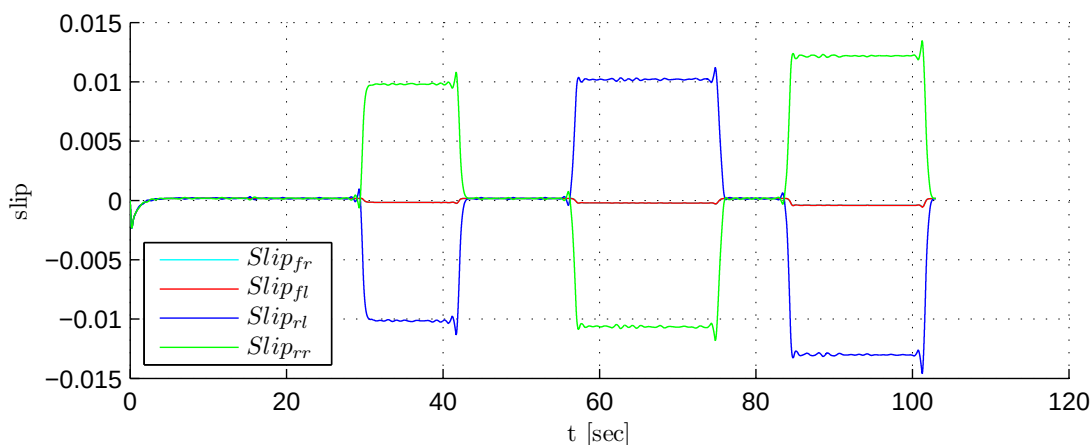
5.5. ábra. A legyezési nyomaték alakulása CarSim környezetben



5.6. ábra. A motornyomatékok alakulása CarSim környezetben



5.7. ábra. Az oldalkúszás alakulása CarSim környezetben



5.8. ábra. A kerekenkénti slip alakulása CarSim környezetben

A jármű oldalkúszásának alakulását mutatja az 5.7., valamint a kerekenkénti slippet az 5.8. ábra.

A modell nagy sebességen (30 m/s) történő tesztelésekor a hátsó kerék hajtású járműveknél tapasztalható kitörés jelensége mutatkozott. Ennek kivédése a kerekenkénti slipek figyelembevételével lehet szabályozást tervezni. A szabályozás a slip nagyságát figyelve megcsúszáskor csökkentené a hátsó motorok által kifejtett nyomatékot a tapadási határig. Ekkor a jármű lassulna, ami ez esetben indokolt, ugyanis az úttartás prioritást élvez a sebességtartással szemben. Viszont itt egy szabályozástechnikai probléma jelentkezik: a legyezési dinamika mozgásegyenleteiben és így a szabályozási modellben is konstans paraméterként van a sebesség figyelembevétel, s ahhoz, hogy a sebesség megváltozása-kor a jármű legyezési dinamikáját leíró modell továbbra is érvényes legyen, figyelembe kellene venni a sebesség változását. Erre lehetőséget biztosíthatna a későbbiekben lineáris paraméterváltozós szabályozó alkalmazása, ahol a szabályozó a sebesség változásától függetlenül garantálná a performanciákat.

6. fejezet

Eredmények összegzése

A cél, vagyis az elektromos gépjárművek hajtására alkalmas agymotoros technológia megismerése és fejlesztése, egy modellautó tervezésén és szabályozás fejlesztésén keresztül megvalósult. A skálázhatóság a tervezés során fontos szerepet kapott, mely megnyilvánul mind a jármű fedélzeti rendszer architektúráján, mind a szabályozás architektúráján és módszerén. 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, így módon a kis súly és magas szakítószilárdság is biztosított. A kész darabokat minden tekintetben könnyen és precízen lehet szerelni, mind az illesztett felletek, mind a szűk helyek tekintetében.

A második nagy témakört az agymotoros modellautó architektúrájának megtervezése és a csoportban történő fejlesztés összefogása 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 motorszabályozó, a kormány szervó, a szenzormodul, az akkumulátor- és energiafelügyeleti egység, valamint a

rádiófrekvenciás kommunikációt intéző egység adják. A tervezett architektúra CAN kommunikációs protokoll alkalmazásával valósul meg, mely biztosítja a részegységek 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 motorszabályozóknak, valamint a kormány szervónak. A motorszabályozók nyomatékigényt, míg a szervó kormányzó szögigényt kap CAN-en keresztül. Az akkumulátor- és energiatápellátó egység szolgáltatja az elektronikák 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 szabályozó megtervezése jelentette. Az elsődleges cél, legyezési szögsebességet, mint referenciajelet követő szabályozó fejlesztése volt minimális túllendülés és gyors beállási idő biztosítása mellett, az aktuátorok energia korlátainak figyelembevételével. Emellett a dolgozatnak érintenie kellett a hosszirányú dinamika szabályozásának kérdését is, valamint kitekintést adnia a négy kerékre történő elosztás problémakörére. Az irodalomkutatás eredményeire építve, a szerző a szabályozási feladatot hierarchikus architektúrájú, elosztott szabályozó alkalmazásával oldotta meg. Az alkalmazott szabályozási struktúra felső szintjét két független szabályozó alkotja, melyek közül az egyik a ψ_{ref} legyezési szögsebesség, másik a v_{ref} hosszirányú sebesség referencia-követését valósítja meg. Az első a δ kormányzószöggel és egy M_z legyezési nyomatékkal, míg a második az F_v vonóerővel oldja meg a feladatot. Az M_z -t és az F_v -t veszi át a középső szintű szabályozó, mely ezek négy keréken történő elosztásáért felel. A δ a felső szintről egyből az alsó szintű szabályozójához jut. Az alsó szintű szabályozók feladata a motoronkénti nyomatékigény, valamint a szervó esetén a kormányzószögigény megvalósítása az egyes aktuátorokon.

A felső szintű szabályozás tervezése a dinamikai modell felállításával kezdődött, mely biciklimodell alkalmazásával valósult meg, majd a mozgásegyenletek kerültek felírásra. Az állapotterez felírásához a $\dot{\psi}$ legyezési szögsebesség, valamint a β oldalkúszás kerültek kiválasztásra. Az így módon definiált, szabályozni kívánt rendszer két bemenetű (δ , M_z), egy kimenetű (ψ) MISO rendszert alkot. A rendszer nem integráló tulajdonságú, tehát a referenciajel követéshez struktúra módosítás alkalmazására volt szükség. Az állapotvisszacsatolás erősítési tényezőjének számítását a szerző LQR módszer alkalmazásával oldotta meg. Mivel az állapotok közül csak a ψ -t méri a szenzoregység, ezért állapotbecslő alkalmazására volt szükség, melynek L erősítési tényezője LQ módszerrel került kiszámításra. Az állapotbecslővel kiegészített rendszer robusztussága LTR módszerrel került biztosításra. Az aktuátorok energiakorlátosságának figyelembevétele szaturációs blokkal történt, míg a szenzor zaj egy kimenetre adott zavarással lett figyelembe véve. Az eredmények 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 beavatkozókhoz szemben támasztott igények a költségfüggvény Q és r mátrixai segítségével jól hangolhatóak.

A felső szintű szabályozást a dolgozat érinti, majd áttér a középső szinten történő elosztási problematika bemutatására. A feladatot három modell segítségével ismerteti,

melyek közül az egyikre részletes szimulációt mutat be a CarSim szoftver alkalmazásával. A legyezési dinamika felső szintű, valamint az elosztási feladat középső szintű szabályozásának működése, hangolhatósága, valamint skálázhatósága e szimulációs környezetben lett elemézve. Az analízis eredménye azt mutatta, hogy a szabályozás a referenciajel-követést megvalósítja, hangolása lehetséges, valamint valós gépjárművek esetén is biztosítani tudja a kívánt performanciákat.

6.1. Tovább lépés

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 után a szabályozó modellautón történő implementálása szükséges, majd annak identifikációjára kell sor kerülni. A legyezési dinamika felső szintű szabályozásának továbbfejlesztésére az aktuátor dinamika integrálása, valamint LPV szabályozás tervezése ajánlott, mely lehetővé tenné, hogy változó sebesség esetén is megfelelően működjön a szabályozás. Amennyiben nem a szimulációs környezetben, hanem a modellautón kell trajektória-követést megvalósítani, a referenciajel képzési eljárás kiterjesztése elengedhetetlen. A hosszirányú dinamika továbbfejlesztése és elemzése a CarSim szoftver alkalmazásával ajánlott, s szintén ennek segítségével elemezhető a középső szintű szabályozás négykerék hajtású modellje is, melyhez az elosztási szabályok finomítása és a prioritások definiálása szükséges.

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-vilagkiallitason.
- [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.