



Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Kari Tudományos Diákköri

Konferencia

2012



BICIKLI MENETDINAMIKÁN ALAPULÓ BLOKKOLÁSGÁTLÓ SZABÁLYOZÓ FEJLESZTÉSE

Készítette: Nagy Klaudia

Szak: Mérnök informatikus BSc

Évfolyam: 4. évfolyam

Küldő intézmény neve: Pannon Egyetem, Veszprém

Témavezető: Dr. Fodor Dénes (egyetemi docens)

Mérnöki Kar, Alkalmazott Gépészet Intézeti Tanszék

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás	1
1. Bevezetés.....	2
2. Blokkolásgátló rendszer.....	3
3. Korábbi megoldások kerékpár ABS-re	5
4. Kerékpár menetdinamikája.....	7
4.1. A kerékpár és az útfelület közötti kapcsolat	8
4.2. A kerékpár dinamikája	10
4.3. Dinamikai modell implementálása	16
5. A kerékpár ABS prototípus bemutatása	19
5.1. Keréke sebesség-szenzorok	21
5.2. Hidraulikus nyomásszenzorok.....	23
5.3. ABS HECU	23
5.4. Vezérlő számítógép	25
5.5. A/D szenzor klaszter	26
6. Külső és belső kommunikációs hálózat	27
6.1. Belső kommunikáció.....	27
6.1.1. Fizikai réteg	27
6.1.2. Az üzenetek keretformátuma	29
6.1.3. A kerékpár modulok üzenetei	31
6.2. Külső kommunikáció.....	33
6.2.1. Kerékpár monitorozó szoftver.....	33
7. Blokkolásgátló rendszer vezérlése	34
7.1. Hardveres és kommunikációs megkötések.....	34
7.2. A vezérlő algoritmus	36
8. Elért eredmények.....	40
9. Összefoglalás.....	42
10. Irodalomjegyzék.....	43

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Fodor Dénes témavezetőmnek, hogy lehetőséget biztosított munkám sikeres elvégzéséhez és a TDK dolgozatom megírásához. Köszönöm önzetlen támogatását, és mindazon tudást, amelyet e munka során szerezhettem tőle.

Továbbá köszönet illeti a Continental Automotive Hungary Kft. vezetőit és munkatársait, Veit Hauptmann-t, Frank Weyhmüller-t és Jakab Róbertet, hogy biztosították a fejlesztés során felhasznált eszközöket és a folyamatos konzultációs lehetőségeket.

Hálás köszönettel tartozom továbbá az Alkalmazott Gépészet Intézeti Tanszék, Járműrendszertechnikai Csoport munkatársainak, Enisz Krisztiánnak, Speiser Ferencnek, Tóth Péternek és Bicsérdi Balázsnak, akik nélkülözhetetlen tanácsokkal láttak el, és a szakmai fejlődésemmel elengedhetetlen támogatást nyújtottak.

1. Bevezetés

A járműiparban manapság az egyik legfontosabb szempont a járművek tervezése és fejlesztése során a biztonság. Az autósokat és a motorkerékpárt használókat több összetett aktív és passzív biztonsági rendszer védi [1][2], melyek segítségével elkerülhetővé válhatnak a balesetek vagy csökkenthető a balesetben szerzett sérülések súlyossága. Ugyanakkor a kerékpárok esetében aktív biztonsági rendszerek nem állnak rendelkezésre.

A probléma megoldására a Continental Automotive Hungary Kft. és a Pannon Egyetem Mérnöki karának közreműködésével elindult egy kutatás, melyben az autókban és a motorkerékpárokból már alkalmazotthoz hasonló blokkolásgátló rendszer kerékpárra történő integrálása volt a cél, így biztosítva azt, hogy kritikus helyzetekben a kerékpár megcsúszásának mértékét egy még megfelelő tartományon belül lehessen tartani, így megőrizve az irányíthatóságot és stabilitást, ezzel segítve a vezetőt a baleset elkerülésében.

A dolgozat célja egy a hidraulikus fékrendszerrel felszerelt biciklik esetén alkalmazható menetdinamikán alapuló ABS (blokkolásgátló rendszer) vezérlőalgorithmus kifejlesztése, mely képes külön-külön illetve összehangolva is szabályozni a kerekekhez tartozó féknyomást, így a kerekek csúszásának mértékét. A vezérlőalgorithmus nem csak szimulációs környezetben, hanem valós körülmények közti tesztelése is rendkívül fontos, így ezen cél érdekében elkészült egy motorbicikliknél alkalmazott ABS aktuátor részén alapuló prototípus, illetve komplett tesztkörnyezet, mely magába foglalja a bicikli hidraulikus rendszerének módosítását, a szükséges szenzorok felszerelését, illetve a vezetékek nélküli és CAN hálózaton alapuló kommunikációs rendszer kiépítését.

2. Blokkolásgátló rendszer

A blokkolásgátló rendszer (Anti-lock Braking System, ABS) a járművek menetbiztonságáért felelős aktív biztonsági eszköz. A rendszer lényege, hogy az útviszonyokhoz mérten egy erőteljes fékezéseknél a kerekek megcsúszásának mértékét egy optimális tartományon belül tartja, így a fékek folyamatosan a maximális erő kifejtés közelében dolgoznak. Ennek köszönhetően a kerekek nem blokkolnak és a jármű mindvégig irányítható marad a forgó kerekek következtében, így az észlelt akadály fékezéssel és kormányzással elkerülhető, továbbá a rendszer csúszós utakon segíthet meggátolni a jármű megpördülését is. A balesetek elkerülésén kívül még a blokkoló kerekek okozta jelentős mértékű gumiabroncs károsodás is elkerülhető a használatával, fontos azonban megjegyezni, hogy a rendszer nem minden esetben csökkenti a fékutat, sőt egyes esetekben megnövelheti azt, ugyanakkor a stabilitás fenntartása többnyire lényegesebb.

A blokkolásgátló rendszer kétkerekű járművek esetén való figyelembe vétele során további feladatokat lát el, melyek kerekenként eltérőek lehetnek [3].

A hátsó keréknek kanyarodás esetén rendkívül fontos szerepe van. A legtöbb kétkerekű jármű esetén kanyarodás közben a sofőr valamilyen mértékben oldalra dől. Egy esetleges erőteljes fékezés során az oldalra dőlés következtében a hátsó gumiabroncs könnyen elvesztheti a tapadását, aminek köszönhetően oldalirányba kicsúszhat a jármű, így eséses baleset következhet be.

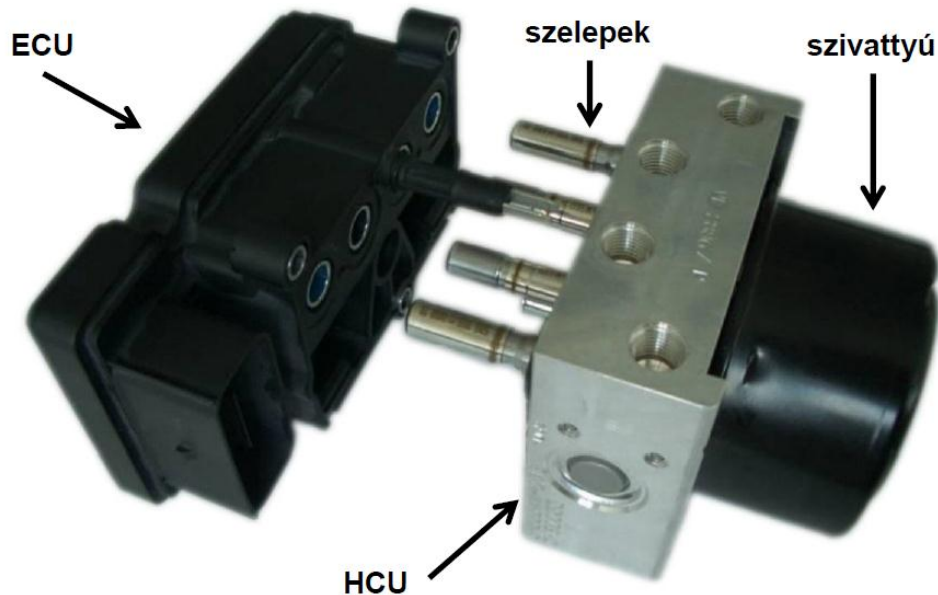
Az első kerék kulcsfontosságú szerepet tölt be az irányíthatóság megőrzésében, az elemelkedés illetve átfordulós balesetek megakadályozásában. A jármű nagy sebességről történő, csupán első keréken való fékezése következtében a hátsó kerék elemelkedhet a talajtól, így vezetve átfordulós balesethez.

A blokkolásgátló rendszerek többnyire egy elektronikus (Electronic Control Unit, ECU) és egy hidraulikus vezérlőegységből (Hydraulic Control Unit, HCU) épülnek fel (2-1. ábra).

Az elektronikus vezérlőegység egy olyan beágyazott számítógép, mely a kommunikációs interfészről (például CAN-en) érkező adatok, valamint a belső szenzorok felől érkező jelek feldolgozásáért felelős, valamint a beérkező adatokat felhasználva egy belső vezérlő algoritmus alapján képes döntést hozni egy esetleges beavatkozásról.

A hidraulikus vezérlőegység egy olyan hidraulikus szabályozó, mely többnyire több fékkörön képes párhuzamosan beavatkozni, vagyis külön vezetékrendszerben képes szelepek segítségével egymástól függetlenül szabályozni a nyomás értékeit. A legtöbb HCU egység

rendelkezik fékkörönként egy tartállyal valamint egy szivattyúval, melyek a nyomásértékek csökkentésében és helyreállításban játszanak fontos szerepet.



2-1. ábra: Blokkolásgátló rendszer általános felépítése

A blokkolásgátló rendszerekben alkalmazott hidraulikus vezérlőegység többnyire a szelepállapotok kombinációinak megfelelően három állapotot vehet fel, melyek segítségével változtathatóak a fékrendszerben lévő nyomásértékek, így modulálva a kerekre ható fékerőt. Az egyszerűbb ABS-ek kétállapotú szelepekkel rendelkeznek, melyek csak nyitott és zárt állapot között kapcsolhatóak, ugyanakkor léteznek olyan összetett rendszerek, melyek esetén a szelepek több köztes pozíciót is felvehetnek a nyitott és zárt állapot között, így lehetővé téve a nyomás értékek precízebb szabályozását.

A szelepek alapbeállítás esetén nyomásáteresztő/növelő állapotban vannak, ahol a járművet vezető személy szabadon fékezhet, így az általa kifejtett féknyomás a nyitott beömlő szelepen keresztül áramolhat a rendszerbe.

A HCU nyomástartó állapotában a vezető nem tud hatást gyakorolni a fékerőre, mert a szelepek közötti nyomás állandó marad, így stabil fékerőt biztosít.

A HCU nyomáselengedő állapotában a fékek felől az olaj egy tartályba folyik és a folyadékot később az ECU kérésére a szivattyú visszanyomja a főfékhengerébe [4].

3. Korábbi megoldások kerékpár ABS-re

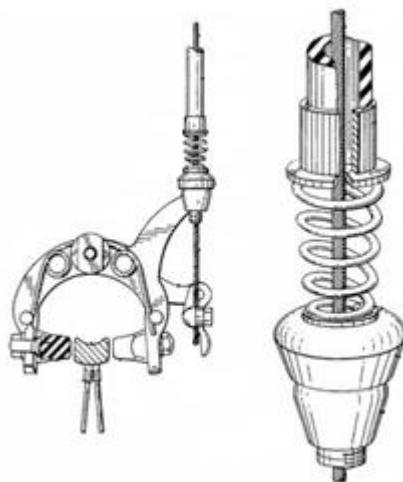
Napjainkban komplett elektronikus, kerékpárra szerelt blokkolásgátló rendszer kereskedelmi forgalomban még nem kapható. Több próbálkozás is volt az elmúlt időszakban, melyek többsége házilag készített megoldás. Ezen fejlesztések hatékonysága és megbízhatósága megkérdőjelezhető.

Annak ellenére, hogy elektronikus megoldások még csak kezdetlegesen jelentek meg, már több mechanikus blokkolásgátló eszköz konstrukciója is fellelhető a piacon. Az egyik ilyen egy mechanikus elven működő eszköz, melyet bovdenes kerékpárokhoz alkalmaznak, a BUDBRAKE (3-1. ábra), melynek működéséről semmilyen információt nem lehet tudni.



3-1. ábra: BUDBRAKE mechanikus blokkolásgátló

A mechanikai megoldások többsége valamilyen rugóerő segítségével igyekszik megakadályozni azon mértékű fékerő létrehozását a fékeknél, mely a kerek blokkolásához vezetne. Elterjedt megoldás (3-2. ábra) és napjainkban gyakran alkalmazzák ezt a módszert, bár működőképessége és hatékonysága csak bizonyos körülmények között igazolható.

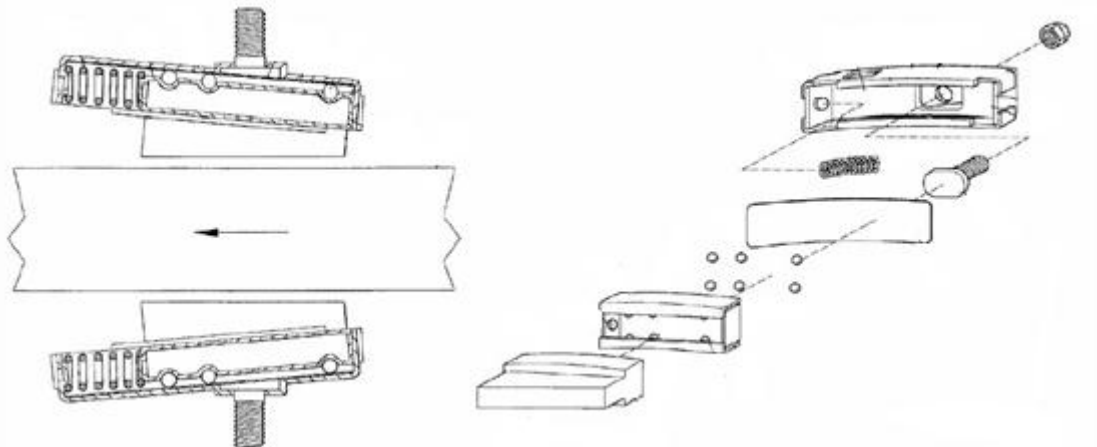


3-2. ábra: Rugós eszköz beiktatása a fékbovdenbe

Összetettebb megvalósítás, ahol nem a bovden megszakításával kell beépíteni az eszközt, hanem a fékpofákat kell módosítani. Ennél a megoldásnál egy ferde pályán rugóerő ellenében a szerkezet bizonyos mértékű megcsúszást enged, ezzel biztosítva a kerekek továbbfordulását blokkolás esetén (3-3. ábra).

Működése azon alapul, hogyha a kerék leblokkol, az azzal jár, hogy a fékpofák és a kerék egymáshoz viszonyított mozgása megszűnik, a fékpofák a mozgás irányában a kerékkel együtt rugóerő ellenében elmozdulnak, így a ferde kialakítású fészekben azok elcsúszva eltávolodnak a felnitől, így lecsökken az az erő, ami a fékpofákat a felnihez szorította, melynek eredményeképp a kerék újra forogni kezd.

Gyakorlatban a fő problémát ennél a megoldásnál a sofőr viselkedése szokta jelenteni. Ha fék „meglazul”, a fékkarra kifejtett erő következtében, a sofőrök többsége még jobban behúzza azt, így újra blokkolóra fékeződik a kerék. Ez egészen addig tart, míg a rugó annyira meg nem feszül, hogy már nem tud a fékpofa hátrébb csúszni és eltávolodni a felnitől, így nem tudja ellátni a feladatát [3].



3-3. ábra: A fékpofába épített rugós fékerő határoló

4. Kerékpár menetdinamikája

Egy megfelelően működő blokkolásgátló rendszer vezérlésére szolgáló algoritmus létrehozásához fontos megismerni, hogy a kerékpárra milyen erők hatnak illetve hogyan viselkedik a fékezési manőverek során. Ennek leírásához rendkívül fontos a kerékpár dinamikájának megismerése [5][6].

A kerékpár alapvetően instabilnak tekinthető, elegendően lassú haladás mellett imbolyogni kezd. Amint a kerékpár gyorsulni kezd, stabilitása egyre nő. A kerékpár egyenes vonalú, előre haladó mozgásában klasszikusan három féle tartomány adható meg, melyek között folyamatos az átmenet, viszont határai erősen függenek a kerékpár és a vezető össztömegétől, valamint kerékpár geometriai felépítésétől, és a mindezekből függő súlypont helyzetétől [7]:

- Az alacsony sebességű, nagyjából 20 km/h-ig tartó tartományban az önstabilizáló mechanizmusok (melyeket főleg a kerékpárok Coriolis-erői hoznak létre), még csekélyek. A vezetőnek meg kell próbálnia kormányzással és súlypontáthelyezéssel a billenési pontot alacsonyan tartani. Ennek a billenési pontnak a magassága elsősorban a jármű tömegétől és a súlypontnak a kerékpár felfekvési vonalától való távolságától függ;
- A 20 és 40 km/h közötti tartomány átmeneti fázis az önstabilizáló mechanizmusok létrejöttében;

- A nagysebességű, kb. 40 km/h feletti tartományban már a forgó- és centrifugális erők dominálnak. Kormánymozgatásokat és súlyáthelyezést csak az útvonal változtatására használ a sofőr.

A fenti tartományokon belüli stabilitást számos eltérő mozgás negatívan befolyásolja, melyek közül a legfontosabbak:

- A kerékpárt használó személy a jármű hajtásából adódóan egy 2-3Hz frekvenciájú komplex szinuszoidális rezgő mozgást, azaz kilengést hoz létre;
- Alacsony sebesség mellett egy rezgő, kanyarodó mozgás is megfigyelhető, többnyire 5-9 Hz frekvenciájú kilengés esetén;
- A kerékpár olyan nem „rezgő viselkedése” során, mikor a súlypontra ható centrifugális és nehézségi erő eredője a jármű vonalával nem párhuzamosan hat, dőlés illetve borulás történhet.

Ezen hatások külsőleg könnyedén megfigyelhetőek, ugyanakkor leírásuk már nehezebb. A blokkolásgátló rendszerek szempontjából a legfontosabb a hosszirányú dinamika leírása, melynek ismeretével már létrehozható egy elégséges, illetve megfelelő módon beavatkozó algoritmus.

4.1. A kerékpár és az útfelület közötti kapcsolat

A kerékpár menetdinamikája és irányítása szempontjából az útfelület és a gumibroncs között ható erőknek döntő szerepük van, mivel egyedül ezek az erők jelentik a kapcsolatot a jármű és az út között.

A függőleges terhelés és a deformáció következtében a gumi nem egyetlen ponton érintkezik az úttal, hanem egy nullától különböző nagyságú felületen, az érintkezési felületen. Feltételezve, hogy a gumira ható erő ($\bar{F}_{kerék}$) az érintkezési felület közepén hat, az $\bar{F}_{kerék}$ erő felbontható egy horizontális, azaz az útfelület síkjában ható ($\bar{F}_{hor}$) és egy normál, vagyis függőleges komponensre ($\bar{F}_z$) (4.1.). A horizontális erő tovább bontható egy x , azaz hosszanti ($\bar{F}_x$) valamint egy y , azaz oldalirányú ($\bar{F}_y$) komponensre (4.2.).

$$\bar{F}_{kerék} = \bar{F}_{hor} + \bar{F}_z \quad (4.1.)$$

$$\bar{F}_{hor} = \bar{F}_x + \bar{F}_y \quad (4.2.)$$

A normál irányú erő jelenléte előfeltétele a horizontális erőnek. A két erő kapcsolata jellemezhető a súrlódási együtthatóval.

Ha a két felület mozgásban van egymáshoz képest, akkor csúszási súrlódási erőről, a relatív mozgás hiányában pedig tapadási súrlódási erőről lehet beszélni. Mindkét esetben elmondható, hogy a súrlódási erő függ a két érintkező felület mikroszkopikus tulajdonságaitól és a közöttük levő nyomóerőtől. A gumibroncs esetén a nyomóerő a normál irányú erő, míg a súrlódási erő a horizontális erő. A súrlódás jellemzésére be lehet vezetni a súrlódási együtthatót (μ) (4.3.), amely a horizontális és vertikális erő hányadosa, és melyet szokás normalizált súrlódási erőnek is nevezni.

$$\mu = \frac{F_{hor}}{F_z} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} \quad (4.3.)$$

A tapadási súrlódási együtthatónak van egy maximális μ_{max} értéke. A csúszási súrlódási együttható értéke ennél mindig kisebb. A súrlódási koefficiens maximális értéke meghatározza, hogy a gumi mekkora tapadási erőt tud biztosítani egy adott függőleges terhelés mellett. Nagyon lényeges, hogy μ_{max} értéke az útfelület milyenségétől, illetve minőségétől függően változik (1. táblázat).

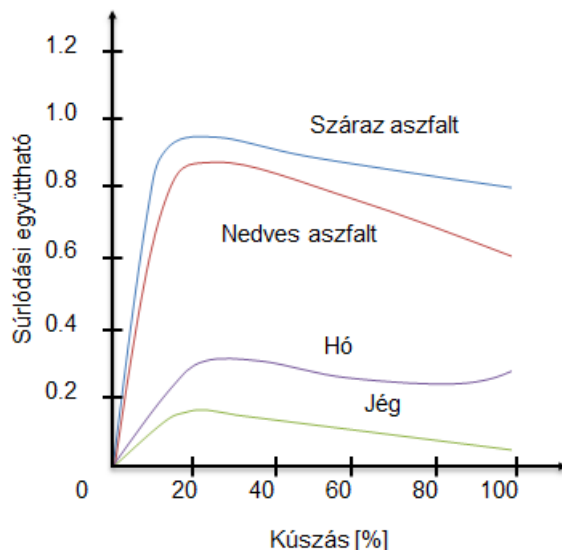
Útfelület	μ_{max}
Száraz aszfalt	0,95
Nedves aszfalt	0,75
Laza hó	0,2
Jég	0,1

1. táblázat: Példa a maximális súrlódási együtthatók értékére

A súrlódási együttható mellett az egyik leglényegesebb fogalom a kúszás, mely gyorsuló, lassuló illetve kanyarodó jármű esetén szinte mindig jelentkezik. A jelenség lényege, hogy a gumibroncs talajra fekvő felületén levő gumirészecskék parciális csúszása miatt a jármű sebessége ($v_{kerékpár}$) és a kerék kerületi sebessége ($v_{kerék}$) között különbség keletkezik. A kúszás a (4.4.) képlet szerint adható meg.

$$s = \frac{v_{kerékpár} - v_{kerék}}{v_{kerékpár}} \quad (4.4.)$$

A kúszás és a súrlódási együttható nem független értékek, a közöttük levő kapcsolat eltérő útfelületek esetén a különböző kúszási-súrlódási együttható görbe segítségével adhatóak meg (4-1. ábra) [1].

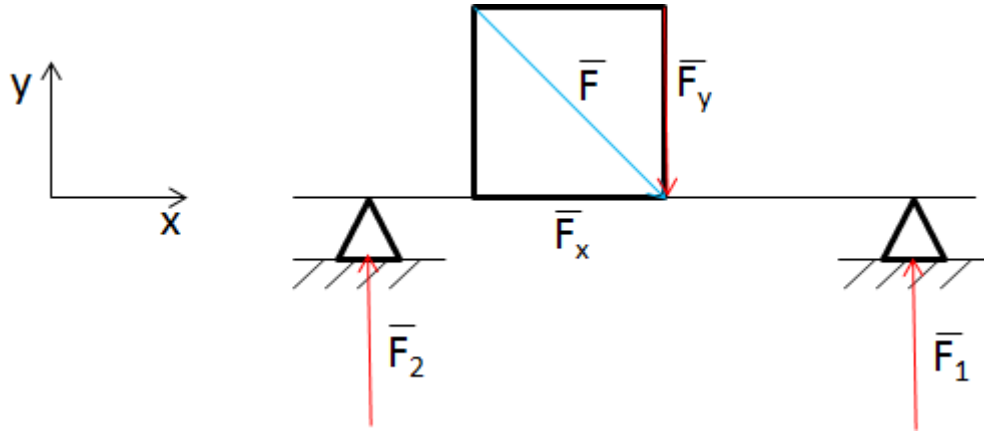


4-1. ábra: Kúszási-súrlódási együttható görbe

Minden útfelület esetén egy eltérő meredekségű lineáris szakasz után a kúszás-súrlódási együttható görbe eléri a maximális súrlódási együttható értéket (μ_{max}). Ha a kúszás tovább nő a maximális súrlódási együtthatónál mért értéknél, akkor az adott kerék fokozatosan elveszti a tapadást. Száraz útfelület esetén nagyobb tapadás érhető el, mint nedves felületen.

4.2. A kerékpár dinamikája

A kerékpár viselkedésének megismeréséhez rendkívül fontos a ráható erőhatások megismerése illetve felírása. A kerékpár két ponton való érintkezése miatt instabilnak tekinthető, viszont a rendszer dinamikai tulajdonságainak felírása szempontjából jelen helyzetben stabilként vehető figyelembe. Az egyensúlyi állapot meglétehez a 4-2. ábrán látható, illetve a (4.5.) és (4.6.) egyenletek által leírt feltételeknek kell teljesülnie.

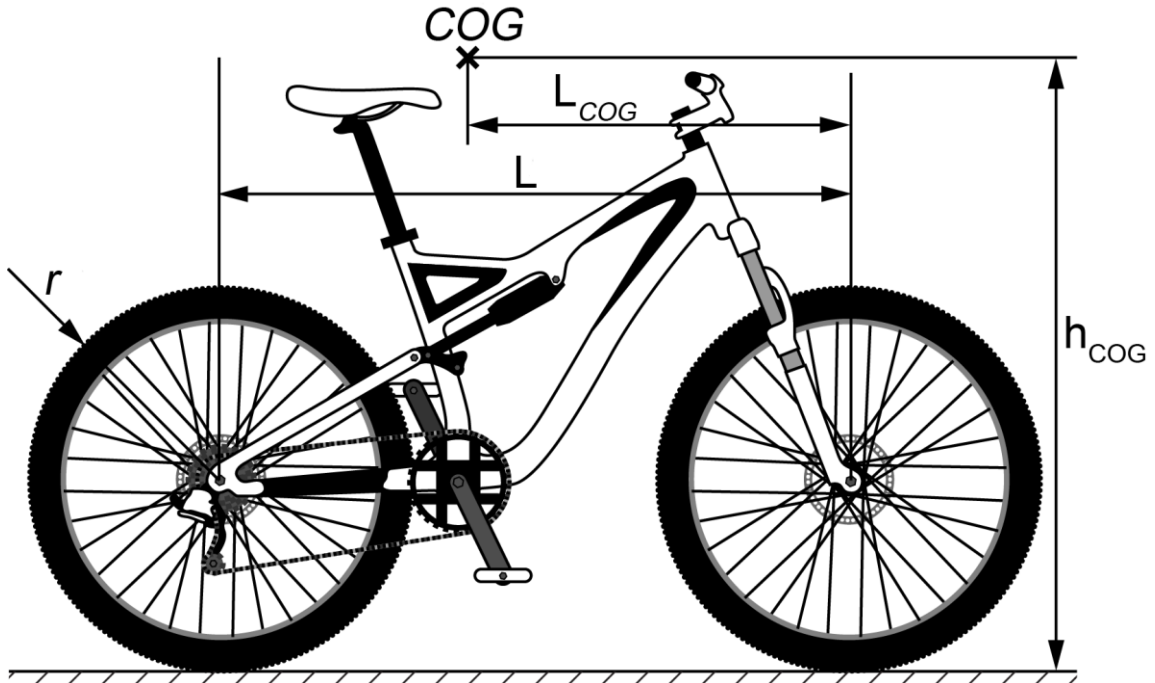


4-2. ábra: Egyensúlyi állapot feltételei

$$\sum_{i=1}^N \bar{F}_{i,y} = 0 \quad \sum_{j=1}^N \bar{F}_{j,x} = 0 \quad (4.5.)$$

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_y = 0 \quad (4.6.)$$

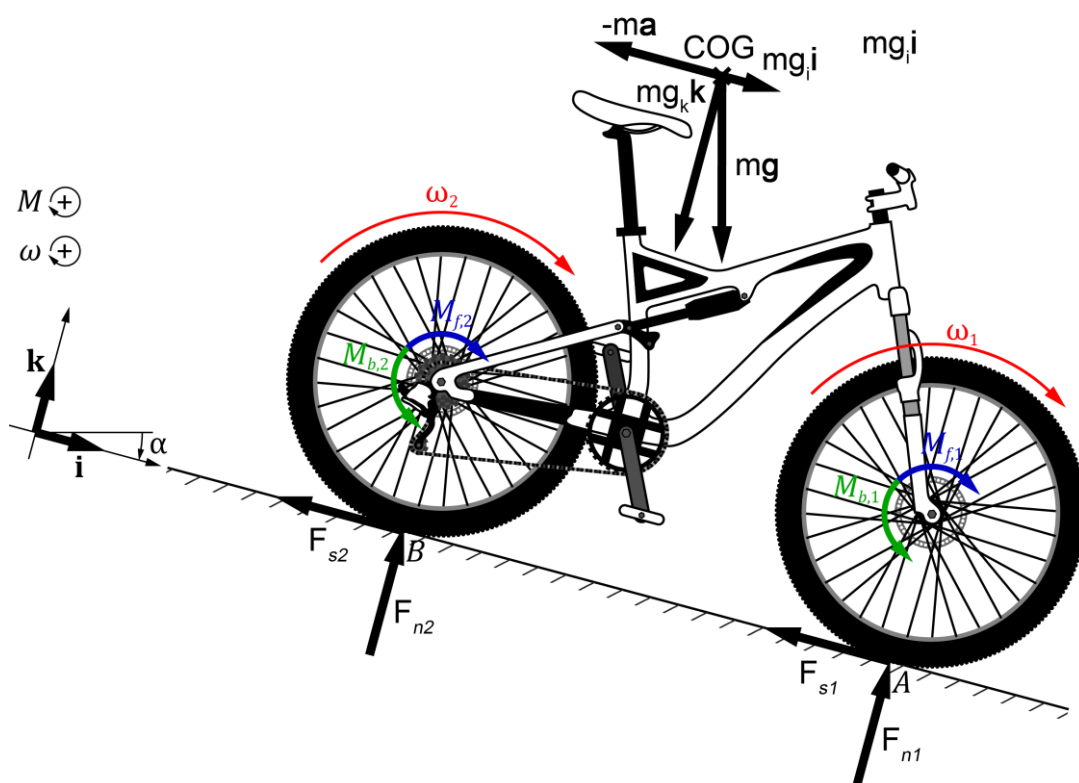
A kerekek egy-egy fix alátámasztási ponton keresztül érintkeznek a talajjal. A modell szempontjából a leglényegesebb a vízszintes úton történő egyenes irányú haladás, illetve a lejtőn való egyenes vonalú mozgás vizsgálata, melyekhez nélkülözhetetlen a kerékpár geometriájának leírása (4-3. ábra).



4-3. ábra: A kerékpár geometriai jellemzői

A geometriai jellemzők közül az L a tengelytávolság, L_{COG} a tömegközéppont elhelyezkedése az első kerék középpontjához viszonyítva, h_{COG} a tömegközéppont magassága, míg r a kerekek sugara (mely jelen esetben megegyezik mindkét kerékre). A COG (center of gravity) a sofőrrel együtt tekintett kerékpár tömegközéppontját jelöli.

A blokkolásgátló rendszer szempontjából a leglényegesebb a fékezés közben a kerékpárra ható erők vizsgálata mind vízszintes, mind lejtős terepen (4-4. ábra).



4-4. ábra: Bicikli modell α dőlésszögű lejtőn fékezéskor

Vízszintes fékezés esetén felírhatóak a kerékpárra ható erők. Az a a tömegközéppont lassulása, m a kerékpár össztömege sofőrrel együtt, mg a súlyerő, míg F_{s1} és F_{s2} a súrlódási, az F_{n1} és F_{n2} a tartóerők (4.7., 4.8.) az első illetve a hátsó keréknél. Ezen erőket ismerve, felírhatóak az erőegyenletek (4.9., 4.10.), illetve a tartóerők, feltételezve hogy ahol a $g \cdot L_{COG} / L$ érték állandó, azaz konstans.

$$F_{n1} = m \cdot \left(g - \frac{g \cdot L_{COG} + a \cdot L_{COG}}{L} \right) \quad (4.7.)$$

$$F_{n2} = m \cdot \left(\frac{g \cdot L_{COG} + a \cdot h_{COG}}{L} \right) \quad (4.8.)$$

$$\sum F_x = m \cdot a = F_{s1} + F_{s2} \quad (4.9.)$$

$$\sum F_y = 0 = F_{n1} + F_{n2} - m \cdot g \quad (4.10.)$$

Egy α dőlésszögű lejtőn lefelé illetve felfelé történő haladás közbeni fékezés esetén, hasonlóan a sík terephez, felírhatóak az erőegyenletek (4.11, 4.12).

$$\sum F_x = m \cdot a = F_{s1} + F_{s2} + m \cdot g_x \quad (4.11.)$$

$$\sum F_y = 0 = F_{n1} + F_{n2} - m \cdot g_y \quad (4.12.)$$

A g_x és g_y függ a lejtő α szögétől, ha az α szög pozitív, akkor a kerékpár a lejtőn lefele halad, ha negatív, akkor felfele, ha pedig nulla, akkor vízszintes az útfelület (4.13., 4.14.).

$$g_x = -g \sin(\alpha) \quad (4.13.)$$

$$g_y = -g \cos(\alpha) \quad (4.14.)$$

Az erő és nyomatékegyenletek felhasználásával (későbbiekben kifejtésre kerül (4.27. és 4.28.)) a tartóerőket és a tőlük függő súrlódási erőket is meg lehet határozni (4.15., 4.16.).

$$F_{n1} = -m \cdot g_y - \frac{m \cdot (g_x + a - g_y)}{\mu_1 - \mu_2} \quad (4.15.)$$

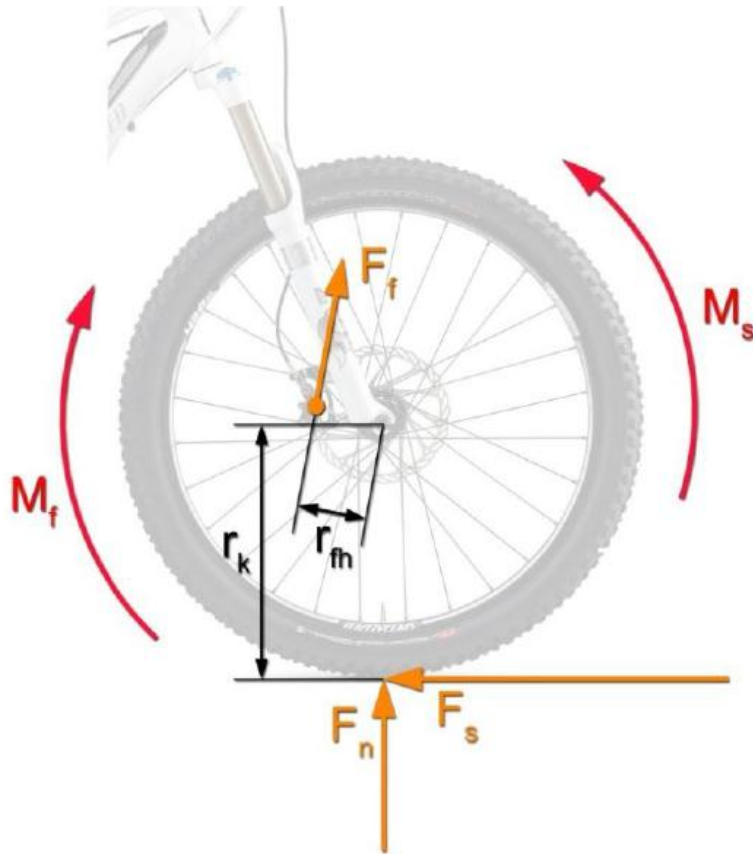
$$F_{n2} = \frac{m \cdot (g_x + a - g_y)}{\mu_1 - \mu_2} \quad (4.16.)$$

A vízszintes útfelületen és a lejtőn való haladásakor egyaránt felírhatóak a súrlódási erők, a tartóerők és a súrlódási együtthatók (előlső (μ_1), illetve hátsó (μ_2) kerék esetén) szorzataként (4.17., 4.18.).

$$F_{s1} = \mu_1 \cdot F_{n1} \quad (4.17.)$$

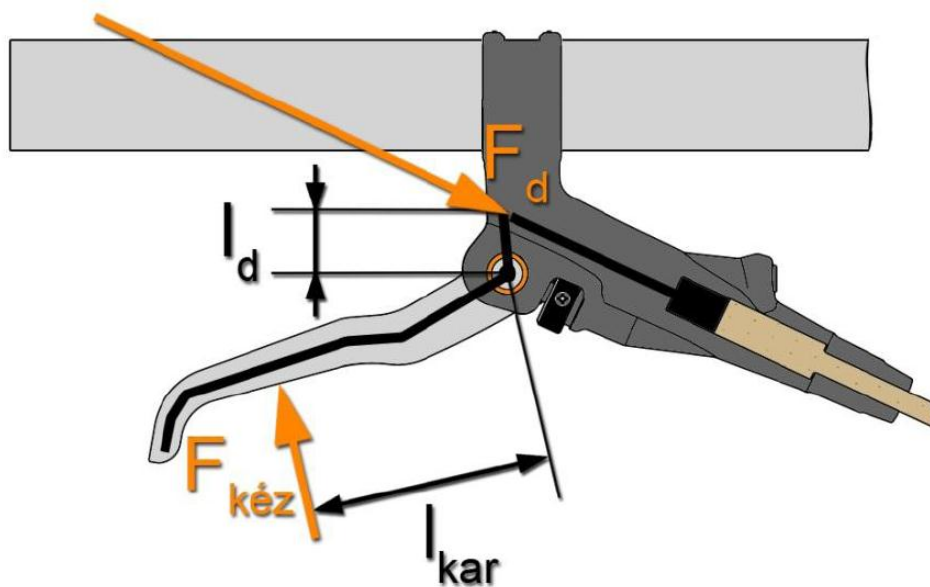
$$F_{s2} = \mu_2 \cdot F_{n2} \quad (4.18.)$$

A dinamikának mind vízszintes, mind lejtőn illetve emelkedőn történő haladás esetén fontos eleme a fékdinamika (4-5. ábra). Ezen komponens vizsgálata során mind a kerékpár tömegének tehetetlensége, mind a hidraulikus alkatrészek hatásfoka valamint a kerekek sugarának a megváltozása is figyelmen kívül lett hagyva.



4-5. ábra: A fékezett keréken fellépő erők

A hidraulikus fékrendszerrel szerelt kerékpár esetén a sofőr a fékezéshez szükséges erőhatásokat a fékkarral hozza létre különböző áttételezések segítségével (4-6. ábra).



4-6. ábra: A fékkar mechanikai áttétele

A fékkar mechanikai áttétele (i_{mech}) felírható a forgásponttól a kézhez illetve a forgásponttól a dugattyúig vett erőkar hosszából (l_{kar} illetve l_d) (4.19.).

$$i_{mech} = \frac{l_{kar}}{l_d} \quad (4.19.)$$

A fékkar mechanikai áttétele illetve a fékkarra kézzel kifejtett erő ($F_{kéz}$) segítségével pedig megadható a dugattyúra ható erő (F_d) (4.20.), amiből a dugattyú (fő-fékhenger) keresztmetszetének (A_d) ismeretében számolható a rendszernyomás (P) (4.21.) valamint a hidraulikus áttétel (i_h) (4.22.).

$$F_d = i_{mech} \cdot F_{kéz} \quad (4.20.)$$

$$P = \frac{F_d}{A_d} = \frac{i_{mech} \cdot F_{kéz}}{A_d} \quad (4.21.)$$

$$i_h = \frac{2}{A_d} \quad (4.22.)$$

A korábban felírt áttételek segítségével kiszámítható az együttes áttétel ($i_{\ddot{o}}$) (4.23.)

$$i_{\ddot{o}} = i_{mech} \cdot i_h \quad (4.23.)$$

melyből illetve a féktárcsa súrlódási tényezőjéből (μ_f), fékezett kerék sugarából (r_k), illetve a fékhengerek a tengelytől való távolságából (r_{fh}) következik a kerékre ható tényleges fékerő (4.24.), valamint a fékező erő a gumiabroncon (F_s) (4.25.).

$$F_{\ddot{o}} = F_{kéz} \cdot i_{\ddot{o}} \cdot \mu_f \quad (4.24.)$$

$$F_s = \frac{F_{\ddot{o}} \cdot r_{fh}}{r_k} = \frac{F_{kéz} \cdot i_{\ddot{o}} \cdot \mu_f \cdot r_{fh}}{r_k} = \frac{F_{kéz} \cdot \frac{2 \cdot l_{kar}}{(l_d)^2} \cdot \mu_f \cdot r_{fh}}{r_k} \quad (4.25.)$$

A gumiabroncon valamint az egyszerre két fékhengeren (F_f) (4.26.) ható fékező erő alapján kiszámolhatóak a kerékre ható súrlódási (M_s) (4.27.) illetve fékező (M_f) (4.28.) nyomatékok.

$$F_f = 2 \cdot P \cdot A_{fh} \cdot \mu_f \quad (4.26.)$$

$$M_s = F_s \cdot r_k \quad (4.27.)$$

$$M_f = F_f \cdot r_{fh} = F_{k\acute{e}z} \cdot i_{\acute{o}} \cdot \mu_f \cdot \mu_{fh} \quad (4.28.)$$

Ha M_s és M_f értéke azonos, a kerék leblokkol és a jármű sebességéből származó stabilitása csökken, illetve megszűnik.

4.3. Dinamikai modell implementálása

A fenti egyenleteket felhasználva megtörtént egy sík terepen haladó kerékpár dinamikai modelljének létrehozása. Ehhez nélkülözhetetlen volt meghatározni a kerékpár tömegközéppontjának gyorsulását, sebességét (v) (4.29.) valamint a kerékre érvényesnek tekintett csúszásmentes szögsebességet (ω_v) (4.30.)

$$a = \frac{dv_v}{dt} = \frac{\Sigma F_f}{m} \Rightarrow v_v(t) = \int_0^t \frac{\Sigma F_f}{m} d\tau + v_0 \quad (4.29.)$$

$$\omega_v = \frac{v_v}{r_k} \Rightarrow r_k \frac{d\omega_v}{dt} = \frac{\Sigma F_f}{m} \quad (4.30.)$$

ahol v_0 a 0 időpillanatban a tömegközéppont sebessége.

Ha a kerekek sugara jelentős mértékben változhat, ami bonyolítja a matematikai leírást, azonban a kerékpárok kerekeinek geometriai viszonyai miatt a kerékre eső terhelés nem tud jelentős sugárváltozást előidézni, mivel a kerék sugarának nagy részét a fémből készült merevített felni teszi ki. Ha a jármű a függőleges tengelye körül is forog, azaz például csúszik vagy kanyarban fékez, akkor a csúszásmentes szögsebesség értéke kerekenként különböző lehet.

A korábban felírt egyenletek alapján meghatározható az adott kerékhez tartozó nyomatékegyenletet (4.31.).

$$\Theta_w \frac{d\omega_w}{dt} = M_s - M_f \quad (4.31.)$$

A nyomatékegyenlethez több megkötés is tartozik. A féknyomaték mindig ellentétes előjelű, mint a kerék pillanatnyi szögsebessége (ω_w) (a kerekek előre haladáshoz tartozó forgásirányát véve pozitív forgásiránynak, illetve az ebbe az irányba forgató forgatónyomaték a pozitív előjelű), ha az nem nulla, ha pedig a kerék blokkol, akkor legfeljebb akkora az abszolút értéke, mint a súrlódási erő nyomatékának. Továbbá a féknyomaték csak csökkenteni tudja a kerék szögsebességét.

A fentiek alapján már felírhatóak a kerékpár mozgását leíró differenciálegyenlet-rendszerek (4.32., 4.33.).

$$\frac{dv_v}{dt} = r_k \frac{d\omega_v}{dt} = \frac{\Sigma F_f}{m} = \mu_1 \cdot F_{n1} + \mu_2 \cdot F_{n2} \quad (4.32.)$$

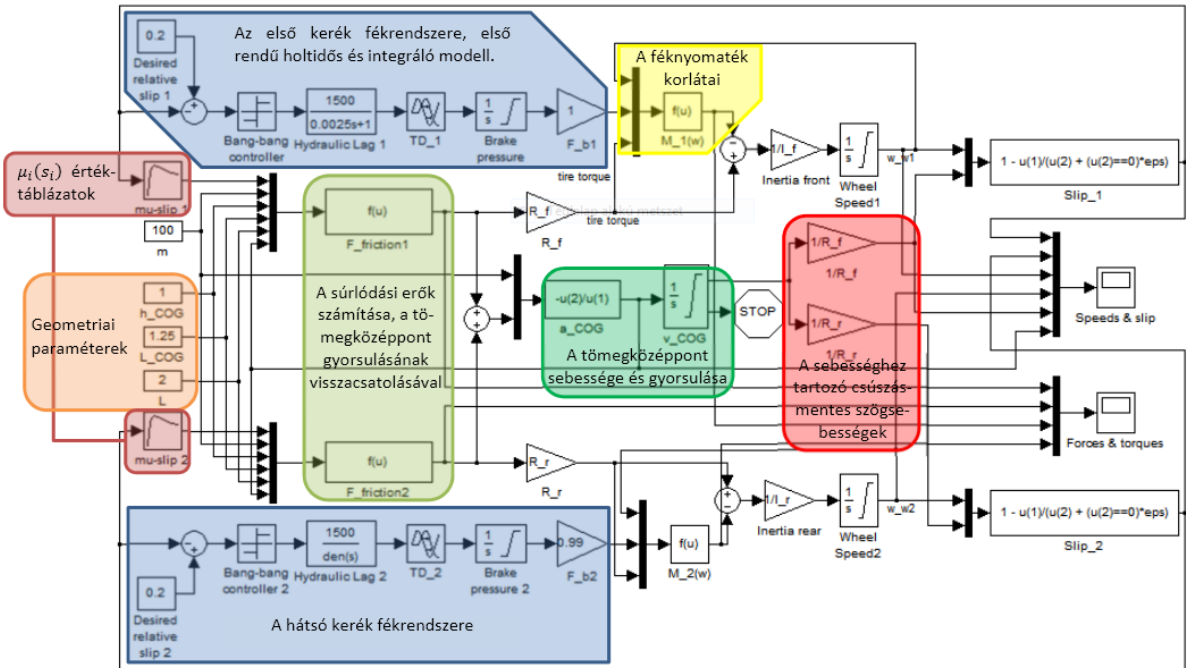
$$\theta_w \frac{d\omega_w}{dt} = F_f \cdot r_k - M_f \quad (4.33.)$$

ahol a kezdeti feltételeket a (4.34.) és (4.35.) egyenlet adja meg.

$$v_v(0) = v_0 \quad (4.34.)$$

$$\omega_{w,i}(0) = \omega_v(0) = \frac{v_0}{r_k} \quad (4.35.)$$

A fent meghatározott egyenletek alapján létre lett hozva egy kerékpár dinamikai modell, mely MATLAB/Simulink környezetben került implementálásra (4-7. ábra). A modell célja, hogy szimulált körülmények között lehessen vizsgálni a kerékpár viselkedését a fékezési folyamat során.



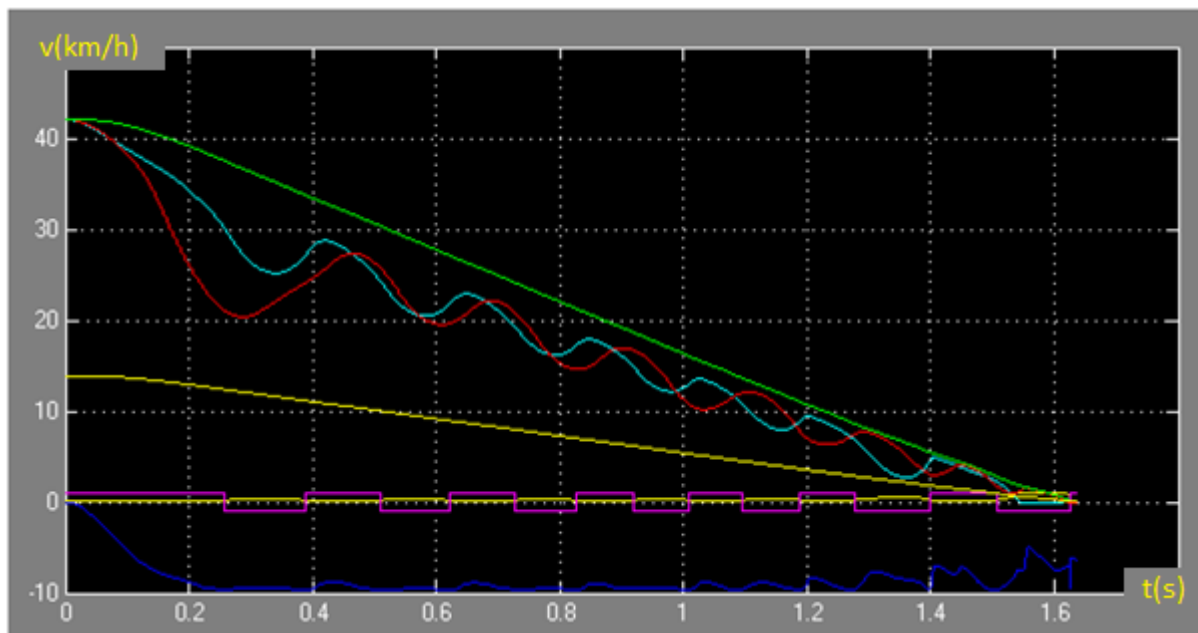
4-7. ábra: Egy sík terepen haladó kerékpár dinamikai modellje

A modell a két kerék viselkedését teljesen függetlenül képes kezelni valamint a kerekhez tartozó fékvezérléseknél is megtartja ezt a függetlenséget. A modellben mindkét kerékhez tartozik egy-egy értéktáblázat, melyben az adott kerékhez tartozó számított kúszás értékből adódó súrlódási együttható értékek találhatóak. Ezen együtthatók és megadott geometriai paraméterek figyelembe vételével meghatározható a megfelelő kerékhez tartozó

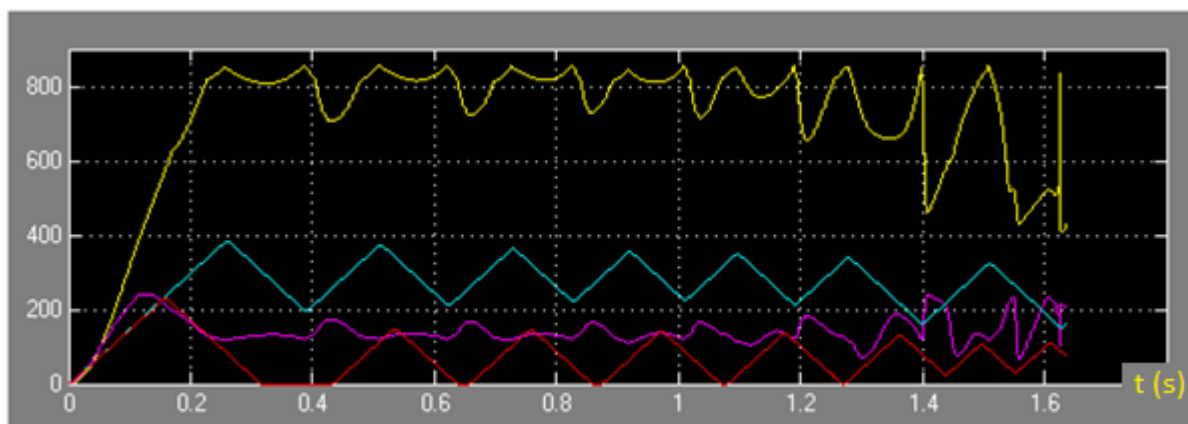
súrlódási erő illetve a tömegközéppont sebességének valamint gyorsulásának mértéke. Ezen megalkotott rendszerben a tömegközéppont a kerékpárhoz rögzítettnek tekinthető, viszont a valóságban ez a pont nagyban függ a kerékpárt vezető személy tömegétől és elhelyezkedésétől. A kerékpár referencia sebességének meghatározásához szükséges a sebességhez tartozó csúszásmentes szögsebességek számolása. A teljes modell alegységeként a két kerékhez tartozik egy-egy elsőrendű holtidős integráló modell, mely a fékrendszerek vezérléséért felelős. Figyelembe véve ezen egységet, a hozzátartozó féknyomaték korlátokat és a rendszer többi meghatározott paraméterét, a modell kiszámítja a kerék sebességeket és a hozzájuk tartozó kúszás értékeket, valamint a kerékpárra ható erőket és nyomatékokat.

A modell szimuláció során a kerékpár és az azt vezető személy össztömege 100 kg-nak, az útfelületet pedig száraz aszfaltnak lett megválasztva, azaz $\mu(s)$ maximális értéke 1-nek tekinthető. A kerékpár közel 40 km/h-ról való vészfékezése során a lassulása közel g nagyságú, ezáltal közel 1,65s idő alatt megállítható. A kezdeti tesztek során egy egyszerű kétállapotú ABS vezérlő a került implementálásra.

A tesztek során a modelltől elvárt megfelelő működés volt tapasztalható, mely mérési eredményekkel igazolható (4-8, 4-9. ábrák).



4-8. ábra: A „Speeds & slip” oszcilloszkóp kimenete. A zöld vonal a csúszásmentes szögsebesség, a cián az első, a piros a hátsó kerék szögsebessége, a sárga vonal a kerékpár tömegközéppontjának sebessége, a magenta színű az első kerék bang-bang kontrollerejének kimenete, a 0 és 1 közötti sárga vonal az első kerék csúszása, a kék grafikon alul pedig a kerékpár lassulása.



4-9. ábra: A súrlódási erők és a féknyomatékok (a „Forces & torques” oszcilloszkóp képe). A sárga grafikon az első kerékre ható súrlódási erő (N), a cián az első kerékre ható féknyomaték (Nm), a magenta a hátsó kerékre ható súrlódási erő (N), a piros a hátsó kerékre ható féknyomaték (Nm).

A hátsó kerékre ható súrlódási erő egyszer sem csökkent nullára, azaz a hátsó kerék nem emelkedett el a talajtól. A fékezés során tapasztalt nagy lassulás elérésében a tömegközéppont rögzítettsége is közre játszott.

A 4-8. ábrán látható, hogy az első és hátsó kerekek szögsebességének szakaszossága az ABS megfelelő működését mutatja, ezzel a rendszer a kerekek csúszásának értékét 20% körül tartja, így maximális lassulás érhető el. Megfigyelhető, hogy a kerékpár első kerekére fékezéskor jóval nagyobb terhelés jut, így nagyobb a normálerő, és nagyobb fék nyomatékkal jóval nagyobb súrlódási erő hozható létre, mint a hátsó keréken.

5. A kerékpár ABS prototípus bemutatása

A vezérlő algoritmusok valós körülmények között történő teszteléséhez szükség volt egy blokkolásgátló rendszerrel szerelt prototípus kerékpár létrehozására. A prototípus alapját képező kerékpár egy, a Specialized cég által gyártott Stumpjumper FSR Comp, mely különleges vázgeometriával rendelkezik, első- és hátsó felfüggesztését tekintve egyaránt légtesztkópos. A teleszkópok keménysége és visszacsillapítása a biciklis tömegéhez és a terepviszonyokhoz állítható. A kerékpáron hidraulikus fékrendszer található, mely Avid gyártmányú, Elixir R SL típusjelű fékkarokból és két dugattyús, féktárcsákkal ellátott féknyergekből áll.

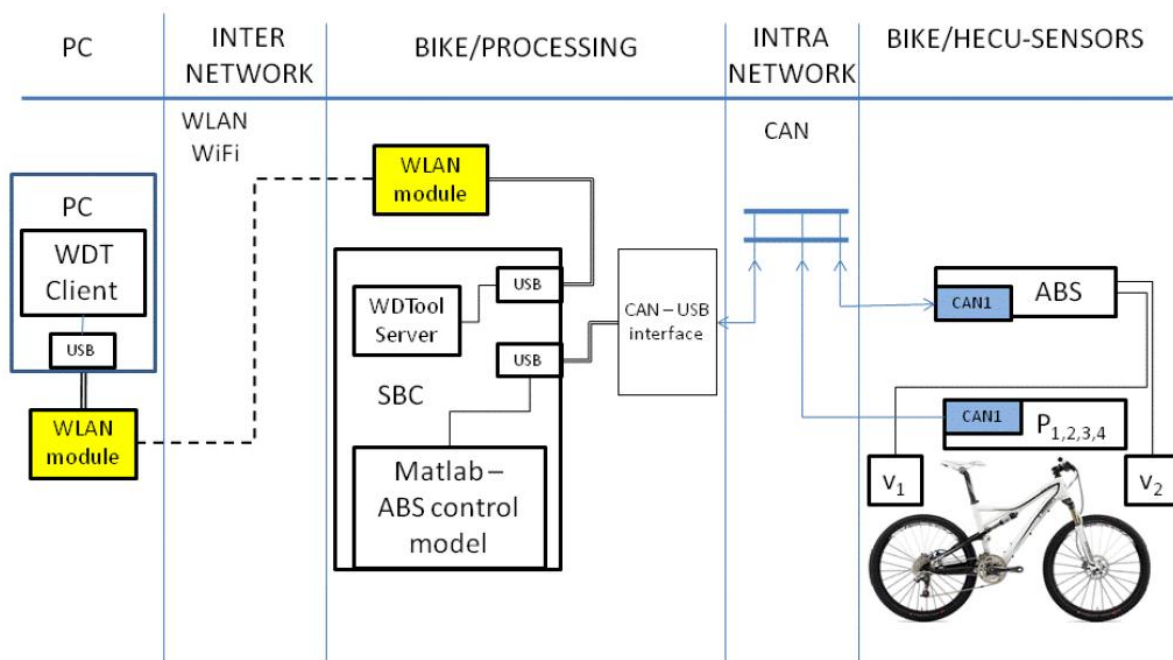
Az ABS funkcionalitás megvalósításához a kerékpárra három új egység került felszerelésre, melyek a fékkörökben lévő nyomás modulálására képes HECU (Hydraulic Electronic Control Unit), ennek vezérlésére szolgáló SBC (Single Board Computer) és a

fékrendszer különböző nyomásértékeiről információt adó A/D (Analóg/Digitális) szenzor klaszter. Mindhárom modul egy CAN (Controller Area Network) hálózaton kommunikál egymással. A kerékpár menetdinamikai tulajdonságairól beépített sebesség- és nyomásszenzorok szolgálnak információval. Az (5-1.) ábrán a fejlesztések során használt kerékpár látható, melyen a hátul található tartódoboz tartalmazza a kerékpár optimális működéséhez szükséges hardvereket és eszközöket.



5-1. ábra: ABS rendszerrel felszerelt kerékpár

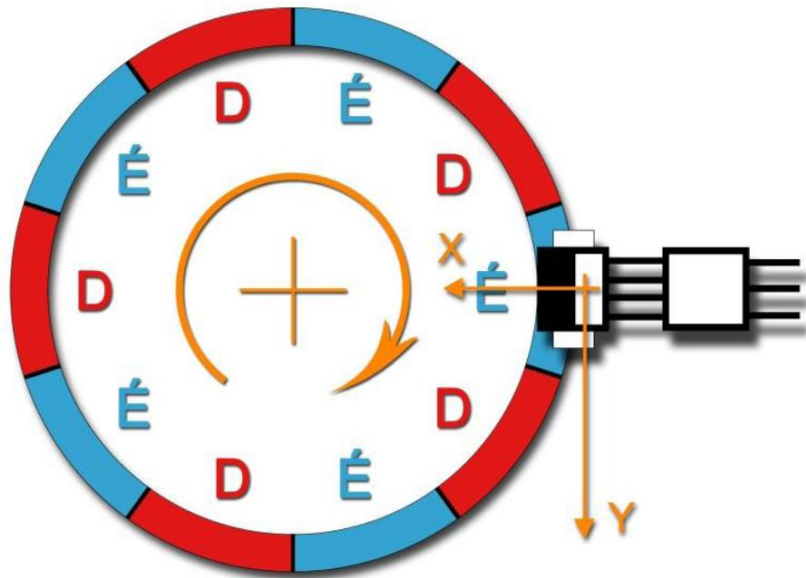
A kerékpár moduljaink összekapcsolódását az 5-2. ábra mutatja. A HECU-hoz közvetlenül csatlakozó kerék sebesség- és nyomásszenzorok által mért értékek egy közös CAN hálózaton keresztül továbbítódnak az SBC felé. Az SBC-n található MATLAB modell a hálózaton beérkező paraméterek alapján vezérli a HECU működését. A kerékpár modulok működésének figyelemmel kísérése vezeték nélküli hálózaton keresztül történik egy SBC-n futó szerveralkalmazás segítségével, mely adatokat küld egy személyi számítógépen levő kliensalkalmazás számára.



5-2. ábra: A kerékpár modulok topológiája

5.1. Keréksebesség-szenzorok

Az ECU által biztosított feszültséggel ellátott négy aktív keréksebesség szenzor a mágneses térerősség változásainak érzékelésével detektálja a kerékpár adott kerekéhez tartozó valós sebességet. A térerősség változásainak hatására a szenzorok azzal megegyező frekvenciájú feszültségimpulzusokat küldenek az ECU-hoz, mely a beérkező értékeket képes feldolgozni. A kétfajta szenzor alkalmazása azon cél érdekében történt, hogy a későbbiekben meghatározható legyen, milyen felbontású és típusú szenzor szükséges a hatékony beavatkozáshoz.



5-3. ábra: Forgási irány meghatározása mágnesesség alapján

A kerékpár haladási iránya pozitív forgásiránynak tekinthető, amennyiben ezen irány az Y-nal megegyezik (5-3. ábra). A számítások során ezen irány logikai 0 értéket vesz fel.

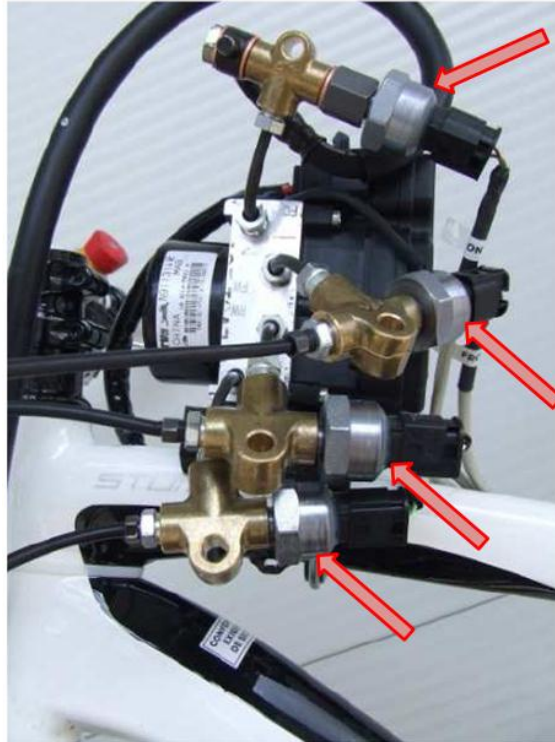


5-4. ábra: A kerékpárra szerelt sebességszenzorok

A négy aktív szenzor (5-4. ábra) közül kettő a féktárcsákon található nyílásokat érzékeli, a másik kettő a felnire felhelyezett, váltakozó pólusú mágnes szalagok alapján képes érzékelni az északi és déli pólusok váltakozását. A két mérési módszer közötti váltás a kerékpár hátulján elhelyezett kapcsolóval lehetséges. A nagyobb felbontás elérése miatt a mágnes szalagos módszer került felhasználásra.

5.2. Hidraulikus nyomásszenzorok

A hidraulikus nyomásszenzorok (HPS - Hydraulic Pressure Sensor) (5-5. ábra) az A/D szenzor klaszter segítségével információt tudnak szolgáltatni a kerékpár fékrendszerében uralkodó nyomásról. A kerékpáron négy PS60SI típusú nyomásszenzor került alkalmazásra, melyek egy adapter segítségével csatlakoznak a HCU-ra.



5-5. ábra: Hidraulikus nyomásszenzorok

Mindkét fékkörhöz két-két nyomásszenzor tartozik, melyek a be- és kimeneti oldali szelepeknél helyezkednek el, így lehetővé téve a vezető által kifejtett és a féknyereg dugattyúira ható nyomásérték mérését, mely adatok digitalizálást követően a CAN hálózatra kerülnek.

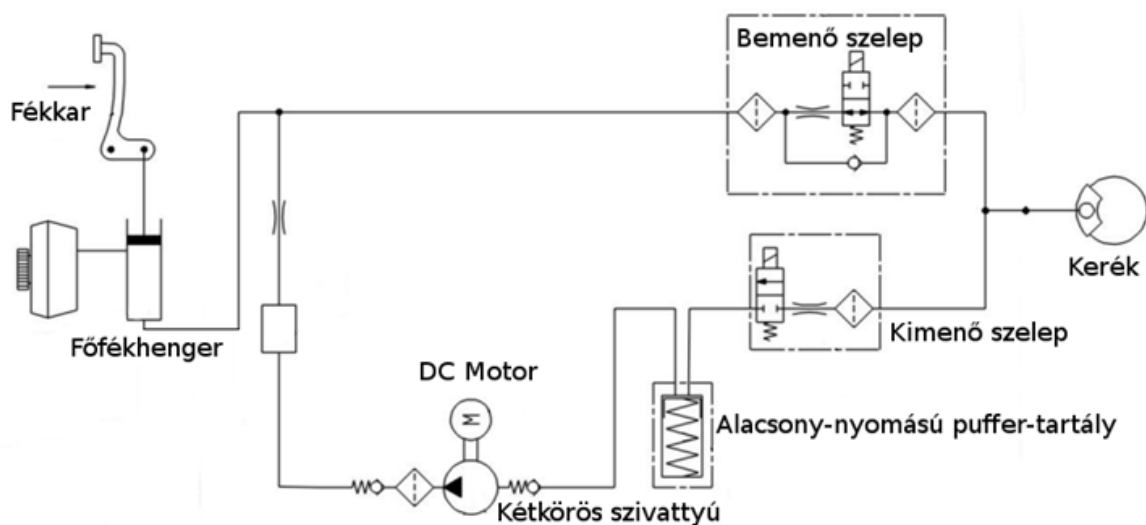
5.3. ABS HECU

A kerékpárra felszerelt, hidraulikus fékrendszerhez tartozó MK2-2 (ER2-2) típusú motorkerékpár ABS (5-6. ábra) HECU, egy hidraulikus fékerő szabályozóból (HCU), valamint egy elektronikus vezérlőegységből (ECU) épül fel. Az ABS a kerékpár vázának felső csövén helyezkedik el, hogy a vezetőt ne akadályozza a bicikli hajtásában.



5-6. ábra: Kerékpárra felszerelt ABS

A kerékpár két fékkörből épül fel, melyben a nyomást a HCU külön-külön képes szabályozni, melyhez egy ki- és bemenő oldali kétállapotú szolenoid szelep illetve egy alacsony-nyomású puffer tartály tartozik (5-7. ábra). Ezen szelepek a féknyomás csökkentését, míg a pumpák a féknyomás visszatáplálását végzik. A két fékkör közös, kétkörös szivattyúját egy DC motor működteti.



5-7. ábra: A kerékpár egyik fékköre

A HCU a vezérlőegységnek megfelelően három állapotot vehet fel, ezáltal változtatva a fékrendszerben lévő nyomásokat, így modulálva a kerekekre ható fékerőt.

Nyomásáteresztő/növelő állapotban a szelepek alaphelyzetben vannak, ami a bejövő oldali szelep nyitott, a kimenő oldali szelep zárt állapotát jelenti. Ebben a helyzetben a vezető

szabadon fékezhets, így az általa kifejtett féknyomás a nyitott beömlő szelepen keresztül a féknyereg dugattyúiba jut.

A HCU nyomástartó állapotban van, ha a bemenő és kimenő oldali szelepek egyaránt zárva vannak, tehát a bemenő oldali szelep aktiválva van. Ebben az esetben a vezető nem tud hatást gyakorolni a fékerőre, mert a szelepek közötti nyomás állandó marad, így stabil fékerőt biztosít a féknyereg dugattyúin keresztül.

A HCU nyomáselegendő állapota akkor áll fenn, ha a mindkét szelep nyitott helyzetben van, tehát a kimenő oldali szelep aktiválva van. Ilyenkor a féknyereg dugattyúiból az olaj az alacsony-nyomású puffertartályba folyik. A tartályba került folyadékot később az ECU kérésére a szivattyú visszanyomja a fékkar főfékhengerébe.

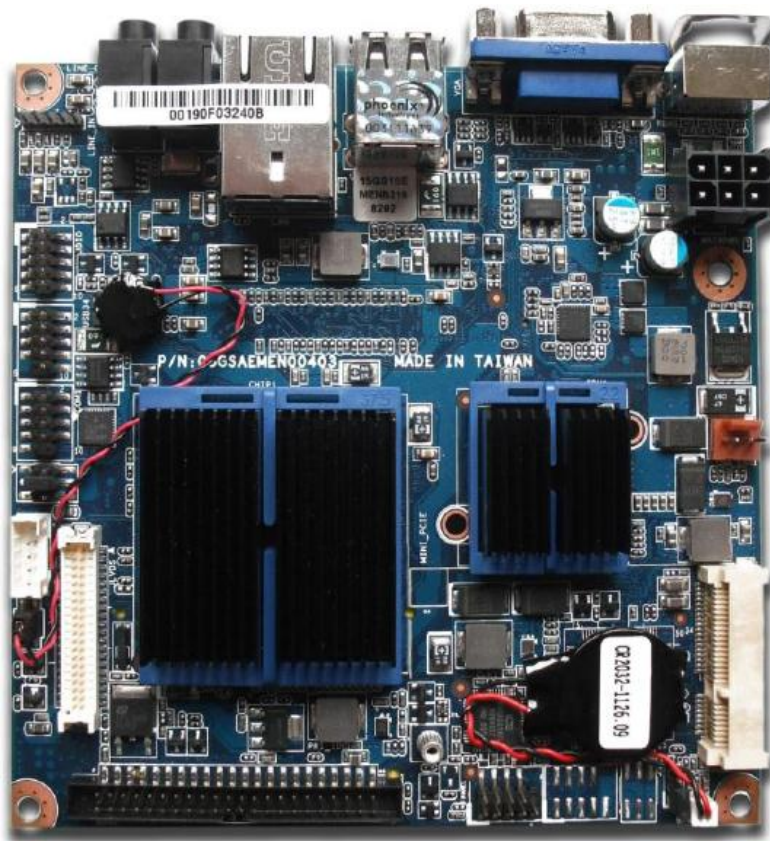
A bemenő és kimenő szelepeket nem szabad egyszerre aktiválni, vagyis a bejövő szelep zárt és a kimenő szelep nyitott állapota egyszerre nem engedélyezett, mert ebben az esetben hidraulikus rövidzár keletkezik.

A hidraulikus szabályozó egység vezérlését az eredeti motorkerékpáron az ECU végzi, de a rajta futó algoritmus nem képes egy bicikli fékerőinek megfelelő modulálására, így a vezérlőegységen a Continental Automotive Hungary Kft. saját, belső, módosított szoftvere fut, mely lehetővé teszi az ABS külső vezérlését, oly módon, hogy CAN üzenetek formájában lehet kérni az ECU-t, hogy milyen állapotba kapcsolja a HCU-t.

5.4. Vezérlő számítógép

Az ABS vezérlő algoritmus futtatásáért egy BCM gyártmányú NX15MXL típusú NanoITX-méretű SBC (Single Board Computer) (5-8. ábra) felel, mely a következő hardver egységekből épül fel:

- Intel Atom processzor (1,6GHz)
- 1GB RAM
- 16GB CF memóriakártya (háttértároló)
- PW 120 P PICO S-ATA (12V-os tápegység)
- König CMP-WNUSB31 (150Mbps-os USB-s WiFi)



5-8. ábra: A kerékpárnál alkalmazott vezérlőegység (SBC)

A vezérlőegységként működő SBC a kerékpár hátuljára erősített tartódobozban helyezkedik el, melynek feladata az ECU-tól valamint az A/D szenzor klasztertől kapott paraméterek alapján a HECU vezérlése. Tápellátása 12V-os kisméretű akkumulátorral és PW 120 P PICO S-ATA tápegységgel biztosítható.

Az SBC modulra egy Microsoft Windows XP Embedded 2009-es operációs rendszer, valamint az alaplap, a WiFi és a CAN adapter driver programja, a .NET 4.0-as verziójú keretrendszere és a MATLAB 2007a került telepítésre.

Az SBC egy IXXAT USB-to-CAN compact CAN interfészen keresztül csatlakozik a hálózathoz.

5.5. A/D szenzor klaszter

Az analóg-digitális átalakító feladata a fékrendszer nyomásértékeit monitorozó hidraulikus nyomásszenzorok által szolgáltatott analóg jel digitalizálása és továbbítása CAN üzenetek formájában.

Az A/D szenzor klaszter tartalmaz egy AD789 analóg-digitális átalakítót (ADC - Analog – Digital Converter), mely 16 analóg bemenetéből négyet használ fel a hidraulikus nyomásszenzorokhoz.

Az ADC-től a digitalizált nyomásértékeket egy PIC18F25K80 típusú mikrokontroller SPI (Serial Peripheral Interface) buszon keresztül kéri le, majd egy MCP2551 CAN illesztő segítségével kiküldi a buszra.

6. Külső és belső kommunikációs hálózat

A prototípus rendelkezik egy belső és egy külső kommunikációs hálózattal is. A belső kommunikációs hálózaton az elektronikus vezérlőegység, a szenzorklaszter és a vezérlő számítógép kommunikál. A külső kommunikációs hálózaton lehetőség van a vezérlő számítógéphez kívülről csatlakozni és monitorozni a viselkedését valamint szükség szerint beavatkozni.

6.1. Belső kommunikáció

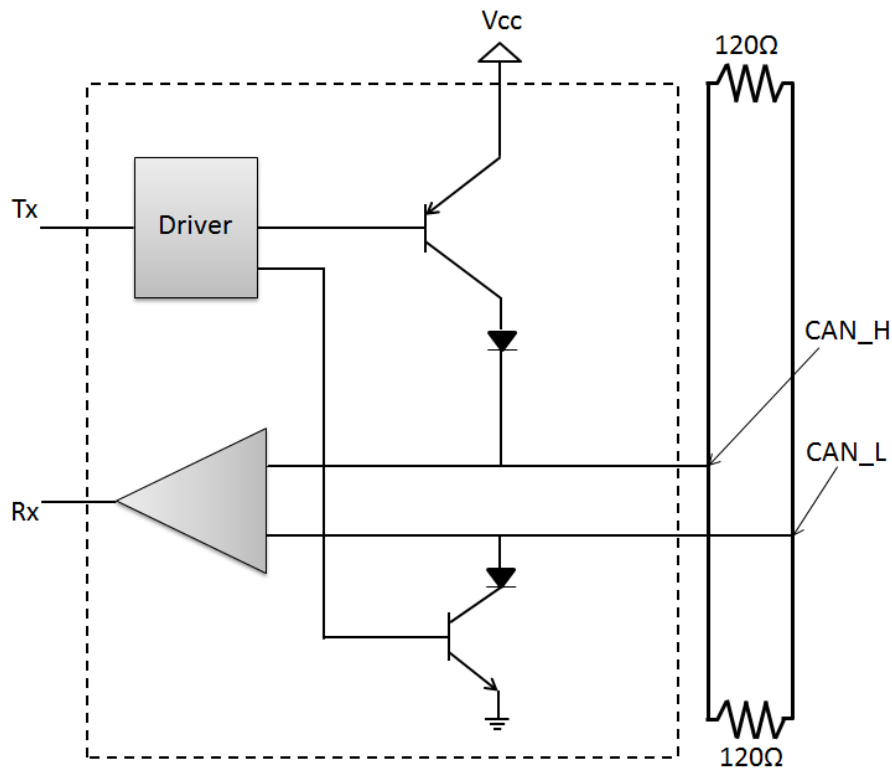
A blokkolásgátló rendszerek többsége valamilyen módon kommunikál más vezérlőegységekkel. Ez többnyire CAN busz illetve protokoll [8] segítségével történik. Így a fejlesztések során is ez a buszrendszer került felhasználásra.

A CAN (Controller Area Network) egy olyan soros kommunikációs protokoll, amelyet megbízhatósága és nagy biztonsága miatt gyakran alkalmaznak elosztott, valós idejű rendszerek esetén. Kedvező árfekvésének, egyszerűségének és megfelelő sebességének köszönhetően gyorsan elterjedt, és ma már nem csak a járműipar alkalmazza, hanem az ipar számos területén bizonyított.

6.1.1. Fizikai réteg

A CAN szabvány több különböző fizikai réteget definiál a buszhoz, melyek meghatározzák a kommunikációs vonal feszültség szintjei, maximális sebessége és hibatűrése szempontjából. A blokkolásgátló rendszerek szinte mindegyike High-Speed CAN típusú buszon keresztül kommunikál. Az ilyen kommunikációt alkalmazó egységek legalább egy érpárt használnak a kommunikáció megvalósítására és akár 1 Mbit/s sebesség is elérhető a hálózaton. Az érpár közül az egyik a CAN high (CAN-H), a másik a CAN low (CAN-L) elnevezést kapta és mindkét végükön egy 120 Ohm-os ellenállással vannak lezárva. A kommunikációban

résztvevő csomópontok egy CAN adó-vevő (CAN-transceiver) segítségével csatlakoznak a buszra (6-1. ábra).



6-1. ábra: CAN adó-vevő vázlatos felépítése

Alaphelyzetben a CAN-L jelű vezeték potenciálja a magasabb, így minden csomópont két TX tranzisztora zárt állapotban van, amely a szabvány szerinti 1-es bitnek megfelelő állapot. A CAN buszon az 1-es érték a recesszív, míg a 0-s a domináns állapot, melynek következtében bármely csomópont, amely 0-s értéket akar kitenni a buszra, felül tudja írni az 1-es értéket. Ez az esemény úgy mehet végbe, hogy a TX tranzisztorok nyitásával megnöveli CAN-H potenciálját és lecsökkenti CAN-L-ét, így domináns 0 érték kerül a buszra és a CAN-H jelű vezeték potenciálja lesz a nagyobb értékű. Ebből kifolyólag a CAN hálózaton mindig a csomópontok által közvetített értékek „logikai és” értéke jelenik meg.

A bitek kiolvasását a CAN adó-vevőben egy komparátor végzi, ami a két vezeték feszültségkülönbsége alapján dönti el az éppen olvasott bit értékét. Ez a megvalósítás a differenciális buszrendszer, nagy előnye hogy védelmet nyújt az elektromágneses zavarok ellen, hiszen a zavarok mindegyik kábel potenciálját egyenlő mértékben befolyásolják.

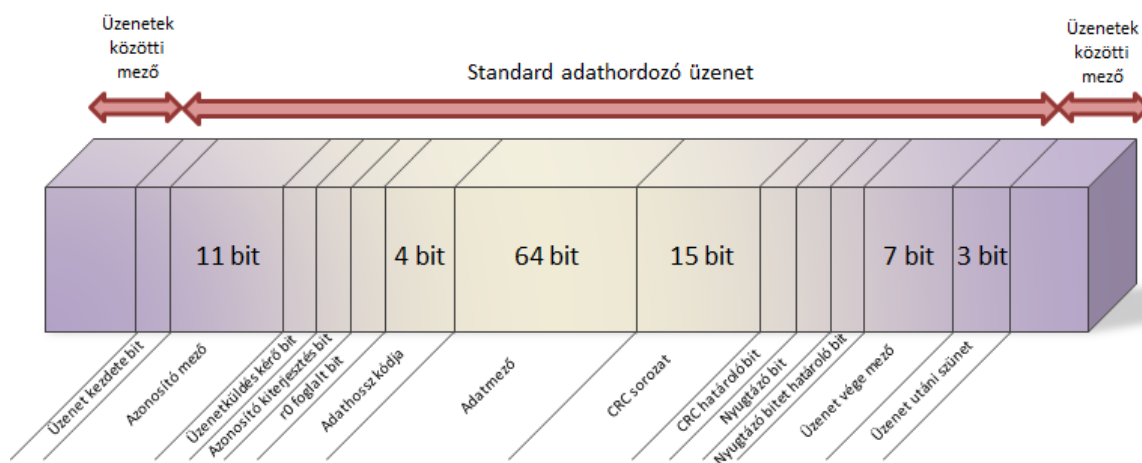
A CAN multi-master architektúrájú, azaz az adó-vevőkkel csatlakozó csomópontok teljesen egyenrangúak. Mivel a CAN eseményvezérelt kommunikációs protokoll, így minden

csomópont tetszőleges időpontban adhat, illetve minden egyes csomópont látja a buszon levő információt, mely a kommunikáció üzenetszórásos jellegére utal. Annak eldöntése, hogy melyik csomópont adhat a csatornán ún. nem destruktív arbitrációval történik.

A CAN busz aszinkron kommunikációt biztosít a csomópontok között, tehát nincs közös órajel, aminek segítségével az egységek szinkronizálhatnák magukat a buszhoz. Ezen probléma kiküszöbölésére a csomópontok bitbeültetést használnak, minden 5 egyforma bit után egy azokkal ellentétes bit kerül továbbításra. Ennek köszönhetően az NRZ (Non Return to Zero) kódolás ellenére is lesz él, melynek segítségével a CAN csomópontok szinkronizálhatják magukat.

6.1.2. Az üzenetek keretformátuma

A CAN protokoll két adatformátumot támogat a CAN 2.0A specifikáció szerinti normál (6-2. ábra) és a CAN 2.0B szerinti kiterjesztett formátumot, a két típus közötti különbséget lényegében csak az azonosító mező hossza határozza meg. A projekt során az egyes modulok normál adatkereteket használnak az információcseréhez, ezért a továbbiakban csak a normál formátum részletes ismertetésre kerül sor.



6-2. ábra: Standard formátumú CAN üzenet felépítése

A busz mindaddig recesszív (1) értéket vesz fel, amíg rajta semmilyen üzenet nem továbbítódik. Amint egy csomópont csomagot szeretne küldeni, domináns 0 állapotba húzza a vonalat egy bitidőre, azaz elküld egy startbitet. A többi csomópont ennek hatására elkezd a szinkronizációt, eközben az adó folytatja a keret továbbítását. A kereteken belül a bitsorozat mezőkre van osztva, melyek különböző funkciókat látnak el.

Az azonosító mezőben található az üzenet azonosítója, mely 11 bit hosszú és szerepe szerint azonosítja az üzenet tartalmát, ezáltal a vevő egységek eldönthetik, hogy szükségük van-e az üzenet további feldolgozására; valamint, ha egyszerre több csomópont kezd el adni, akkor a mező segítségével dől el, hogy melyik szerzi meg a jogot a busz további használatára. Ez a folyamat a nem destruktív arbitráció, mely során minden állomás, amikor a buszra kíván írni, egyúttal visszaolvassa az arra rákerülő bitet is, azonban ha a kettő nem egyezik meg, akkor abbahagyja a buszra való írást és egy későbbi alkalommal megpróbálja az üzenetét újra elküldeni a vonalon. Ez az eset akkor fordulhat elő, amikor a csomópont recesszív (1) bitet ír a buszra és eközben egy másik vezérlő domináns (0) bitet küld. Az arbitrációs folyamatból valamint az azonosító MSB (Most Significant Bit) bitjéből adódóan az alacsonyabb azonosítójú üzenetek magasabb prioritással rendelkeznek a buszon.

Az azonosító mezőben helyezkedik el még az Üzenetkérést küldő (RTR) bit, melynek funkciója a keret típusának jelzése (adatkeret vagy egy adatot nem tartalmazó kérés keret). Adatkeret esetén a bit értéke 0. Az RTR bit is részt vesz az arbitrációs folyamatban, ezért az adatküldésnek nagyobb a prioritása, mint a kérésnek.

A vezérlési mező az Azonosító kiterjesztés (IDE) bittel kezdődik, mely a normál és kiterjesztett formátum közül választ, CAN 2.0A esetén ez mindig 0. Ezt követi egy későbbi felhasználásra fenntartott bit, majd az Adathossz kódja, mely négy bit hosszú, és az adatmezőben lévő bájtok számát adja meg.

Az adatmező úgynevezett csatornákra (szignálok) bontható, melynek mérete 1 és 64 bit között változhat. Az adatmezőben maximálisan 8 bájtnyi adat kerülhet továbbításra. Az egyes csatornák egymástól függetlenül is értelmezhető adatokat hordoznak. Bájtrendjük alapján a csatornák tartalmazhatnak Intel, illetve Motorola formátumú adatokat. Intel formátumnál az MSB bit a legnagyobb, Motorola formátumnál pedig a legkisebb címen van tárolva, esetünkben Motorola formátum került alkalmazásra. A csatornába elhelyezhetők a szokványos adattípusok, mint például az előjeles, vagy előjel nélküli egész, és lebegőpontos értékek is.

Az adatmezőt egy 15 bit hosszúságú CRC ellenőrző összeg követi, melyet a vevő és az adó csomópont az eddig elküldött, illetve fogadott bitek alapján számol. Abban az esetben, ha a fogadó fél által számolt ellenőrző összeg nem egyezik az üzenetben lévővel, átviteli hiba történt és a fogadott keret eldobásra kerül.

Az ellenőrző összeget egy nyugtázó mező követi, mely két recesszív bitből áll. Az első mező ún. Nyugtázó bitet azok a csomópontok, melyek hibátlanul tudták fogadni az üzenetet domináns értékre állítják, ezáltal a küldő fél megbizonyosodhat arról, hogy legalább

egy másik egység sikeresen olvasta az üzenetét. Az ezt követő recesszív bit csupán a nyugtázó mező végét jelzi.

Az üzenet végét egy hét recesszív bitből álló üzenet vége mező jelzi, melyre nem érvényes a bitbeültetési szabály. A többi csomópont ebből tudja, hogy vége az üzenetnek. Ezután minimálisan hárombitnyi szünet következik, majd csak ezután van lehetőség egy újabb üzenet küldésére a buszon.

6.1.3. A kerékpár modulok üzenetei

A rendszer működéséhez elengedhetetlenül fontos a CAN üzenetek továbbítása. A hálózaton négyféle üzenet kerül kiküldésre, melyek különböző információkkal szolgálnak a rendszer állapotáról. Minden üzenet 8 byte hosszúságú és 10ms-onként kerül továbbításra a buszon, így az üzenetek megkülönböztetése azok azonosítójával lehetséges. Eszerint az alábbi üzenetek kerültek definiálásra:

- ID: 0x260 – A sebesség szenzoroktól érkező sebesség értékeket tartalmazó csomag (6-3. ábra).

	7	6	5	4	3	2	1	0
0	7 Első kerék sebesség	6	5	4	3	2	1	0
1	15 Első kerék sebesség	14	13	12	11	10	9	8
2	23 Hátsó kerék sebesség	22	21	20	19	18	17	16
3	31 Hátsó kerék sebesség	30	29	28	27	26	25	24
4	39	38	37	36	35	34	33	32
5	47	46	45	44	43	42	41	40
6	55	54	53	52	51	50	49	48
7	63	62	61	60	59	58	57	56

6-3. ábra: Sebesség üzenet felépítése

- ID: 0x200 – A nyomás szenzoroktól érkező nyomás értékeket tartalmazó csomag (6-4. ábra).

	7	6	5	4	3	2	1	0
0	7 Első Bemenő Nyomásérték	6	5	4	3	2	1	0
1	15 Első Bemenő Nyomásérték	14	13	12	11	10	9	8
2	23 Első Kimenő Nyomásérték	22	21	20	19	18	17	16
3	31 Első Kimenő Nyomásérték	30	29	28	27	26	25	24
4	39 Hátsó Bemenő Nyomásérték	38	37	36	35	34	33	32
5	47 Hátsó Bemenő Nyomásérték	46	45	44	43	42	41	40
6	55 Hátsó Kimenő Nyomásérték	54	53	52	51	50	49	48
7	63 Hátsó Kimenő Nyomásérték	62	61	60	59	58	57	56

6-4. ábra: Féknyomás értékeket jelző üzenet felépítése

- ID: 0x120 – HCU aktuális állapotáról információt nyújtó csomag (6-5. ábra).

	7	6	5	4	3	2	1	0
0	7 Hátsó bemenő	6	5 Hátsó kimenő	4	3	2	1	0
1	15 Első bemenő	14	13 Első kimenő	12	11 Pumpa	10	9	8
2	23	22	21	20	19	18	17	16
3	31	30	29	28	27	26	25	24
4	39	38	37	36	35	34	33	32
5	47	46	45	44	43	42	41	40
6	55	54	53	52	51	50	49	48
7	63	62	61	60	59	58	57	56

6-5. ábra: HCU aktuális állapotát jelző üzenet felépítése

- ID: 0x100 – Aktuációs kéréseket tartalmazó csomag (6-6. ábra).

	7	6	5	4	3	2	1	0
0	Pumpa kérés				Hátsó Kimenő Szelep	Első Kimenő Szelep	Hátsó Bemenő Szelep	Első Bemenő Szelep
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								

6-6. ábra: Aktiválás – kérés csomag felépítése

6.2. Külső kommunikáció

A külső kommunikáció vezeték nélküli hálózat segítségével történhet szabványos IEEE 802.11 b/g Wi-Fi protokoll segítségével. Lehetőség van speciális monitorozó program illetve hagyományos távoli asztal elérés segítségével történő adatátvitelre is.

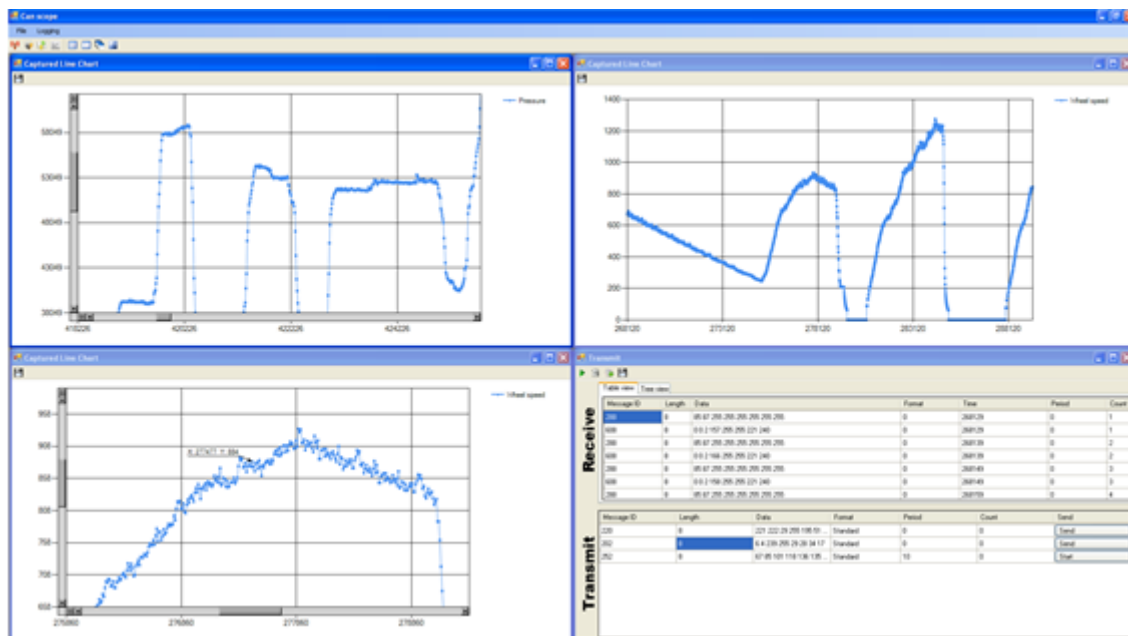
6.2.1. Kerékpár monitorozó szoftver

A kerékpár viselkedésének vizsgálatára, valamint a CAN hálózatának felügyeletére implementálására került egy monitorozó alkalmazás (6-7. ábra)

A megvalósított szoftver szerver-kliens architektúrán alapszik. A kiszolgáló a kerékpár SBC modulján működik párhuzamosan a MATLAB modellel és egy további USB-CAN interfész segítségével fogadja az összes CAN hálózatra kerülő keretet. Az olvasott üzeneteket további feldolgozás nélkül azonnal továbbítódnak egy Wi-Fi kapcsolaton keresztül a klienshez.

Egy személyi számítógépen futó ügyfél program fogadja ezen üzeneteket és a felhasználó igénye szerint megjelenítheti az egyes szignálokban lévő értékeket, vagy a CAN keretek teljes tartalmát. A program lehetőséget biztosít üzenetek naplózására és különböző formátumokba való mentésére a további adatfeldolgozás megkönnyítése érdekében.

A szoftver működésének köszönhetően a mozgásban lévő kerékpár sebesség értékei, a fékrendszerében uralkodó nyomásértékei és az aktuációs kérések közel valós időben monitorozhatóak.



6-7. ábra: A kifejlesztett szoftver felhasználói felülete

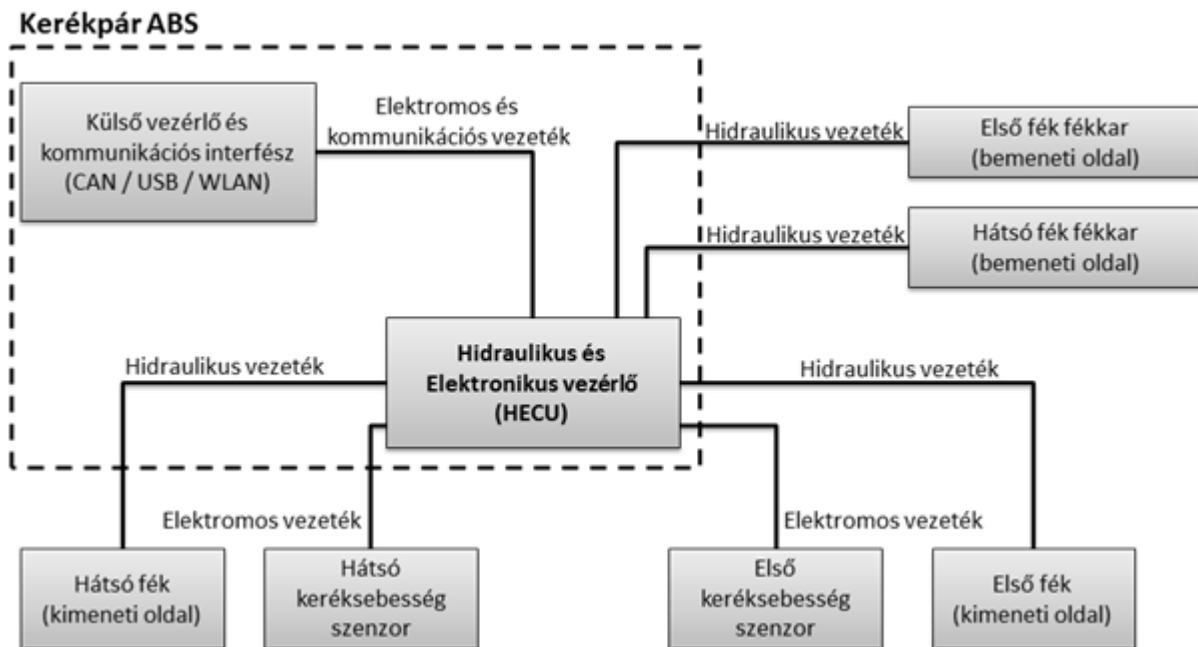
7. Blokkolásgátló rendszer vezérlése

A MATLAB/Simulink környezetben elkészített modell teszteléséhez kiépítésre került egy szoftveres tesztkörnyezet (7-1. ábra), mely megfelelő körülményeket biztosít a vezérlő algoritmus helyes működésének kipróbálásához. Az algoritmusok teszteléséhez szolgáló rendszer nem kötött adott hardver eszközhöz, csupán előfeltételekkel él a HECU állapotaira és kommunikációs vonalaira vonatkozóan.

7.1. Hardveres és kommunikációs megkötések

A kiépített tesztkörnyezetben a központi szerepet a hidraulikus és elektronikus vezérlő egység (HECU) tölti be, mely a szenzoroktól beérkező paraméterek alapján képes szabályozni a rendszer működését. A sofőr az első és/vagy a hátsó fékkar behúzásával tudja változtatni a rendszerben uralkodó nyomást, ezáltal képes előidézni a kerékpár lassulását. A szenzorok által mért sebességértékek alapján a HECU modulálja a féknyomást és ennek megfelelően szabályozza a kerék sebességét. A HECU-nak az általános három állapottal kell rendelkeznie:

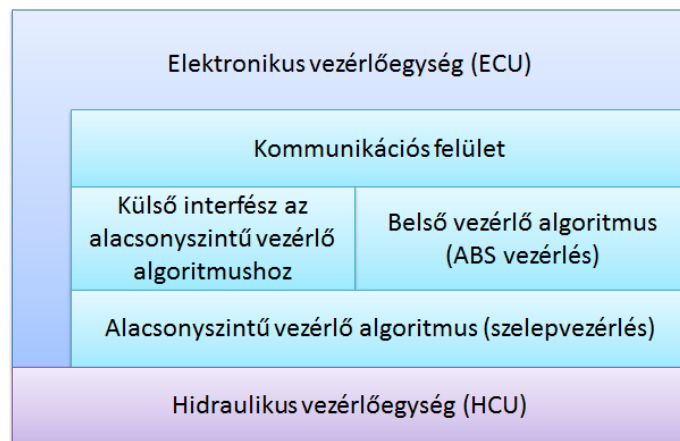
- Nyomásáteresztő;
- Nyomástartó;
- Nyomáselengedő.



7-1. ábra: A tesztkörnyezet felépítése

A kommunikációt tekintve is több megkötéssel él a tesztkörnyezet. Biztosítania kell egy az alacsony műveletek elérésére lehetőséget adó kommunikációs interfészt (7-2. ábra). Normál esetben az ECU-n fut egy belső vezérlő algoritmus, mely dönt arról, hogy a HCU milyen állapotba kerüljön. A külső vezérléshez emellé vagy ehelyett szükséges még egy külső interfész az alacsony szintű szelepállapot állító réteghez, melynek segítségével a CAN buszon érkező üzeneteket felül lehet bírálni a belső algoritmus által választott állapotot, illetve ha nincs belső algoritmus, megadni, hogy milyen állapotba kerüljön a HCU.

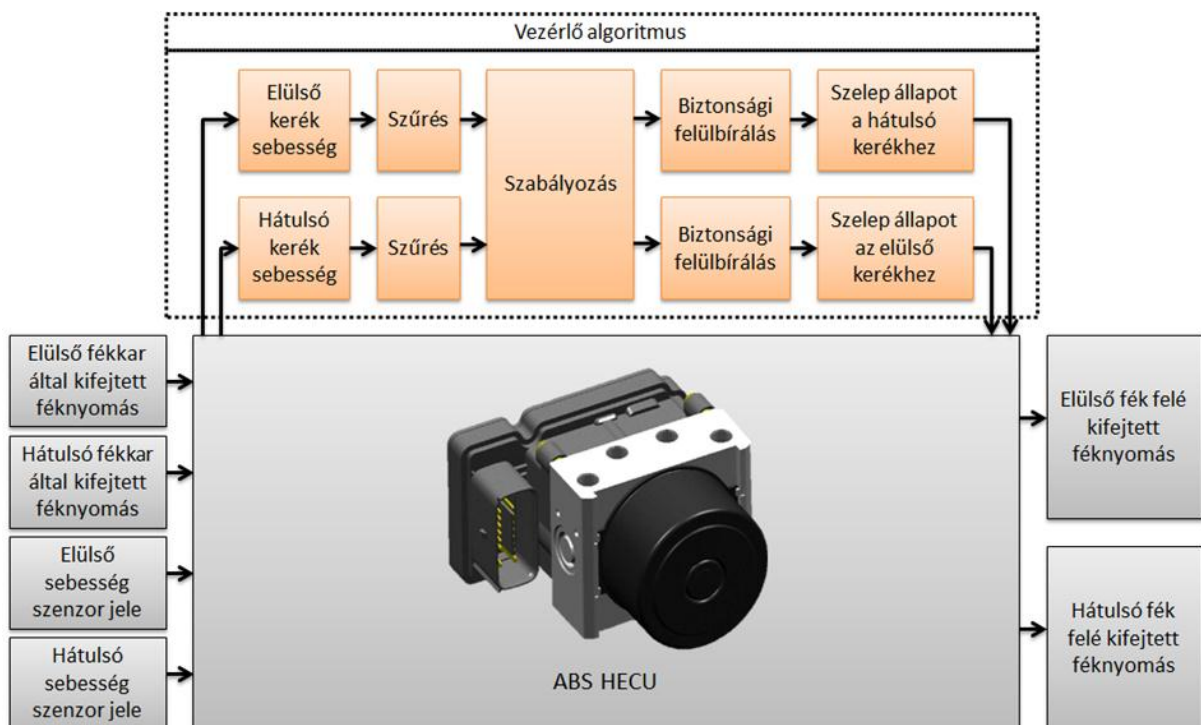
A HECU-nak CAN buszon keresztül rendszeres időközönként el kell küldenie a keréksebesség értékeket.



7-2. ábra: Kerékpár ABS HECU belső felépítése

7.2. A vezérlő algoritmus

A szabályozási folyamatot a szenzorok felől CAN-en érkező információk indítják el (7-3. ábra). A beérkező adatokat a HECU továbbítja az SBC-n futó MATLAB modell felé, amelyen a vezérlést végző szabályozó algoritmus fut. A kapott paramétereket az algoritmus feldolgozza és elindítja a szabályozás folyamatát. A szenzorok felől érkező jelek környezeti hatások okozta zajossága miatt a folyamat során szűrési mechanizmus megalkotása vált nélkülözhetlenné a további szabályozás pontos végrehajtása érdekében.



7-3. ábra: A szabályozási kör részei

A szűrés során az aktuális sebességértéket az utolsó N darab beérkező szűretlen sebesség jel átlagával helyettesíti (7.1.).

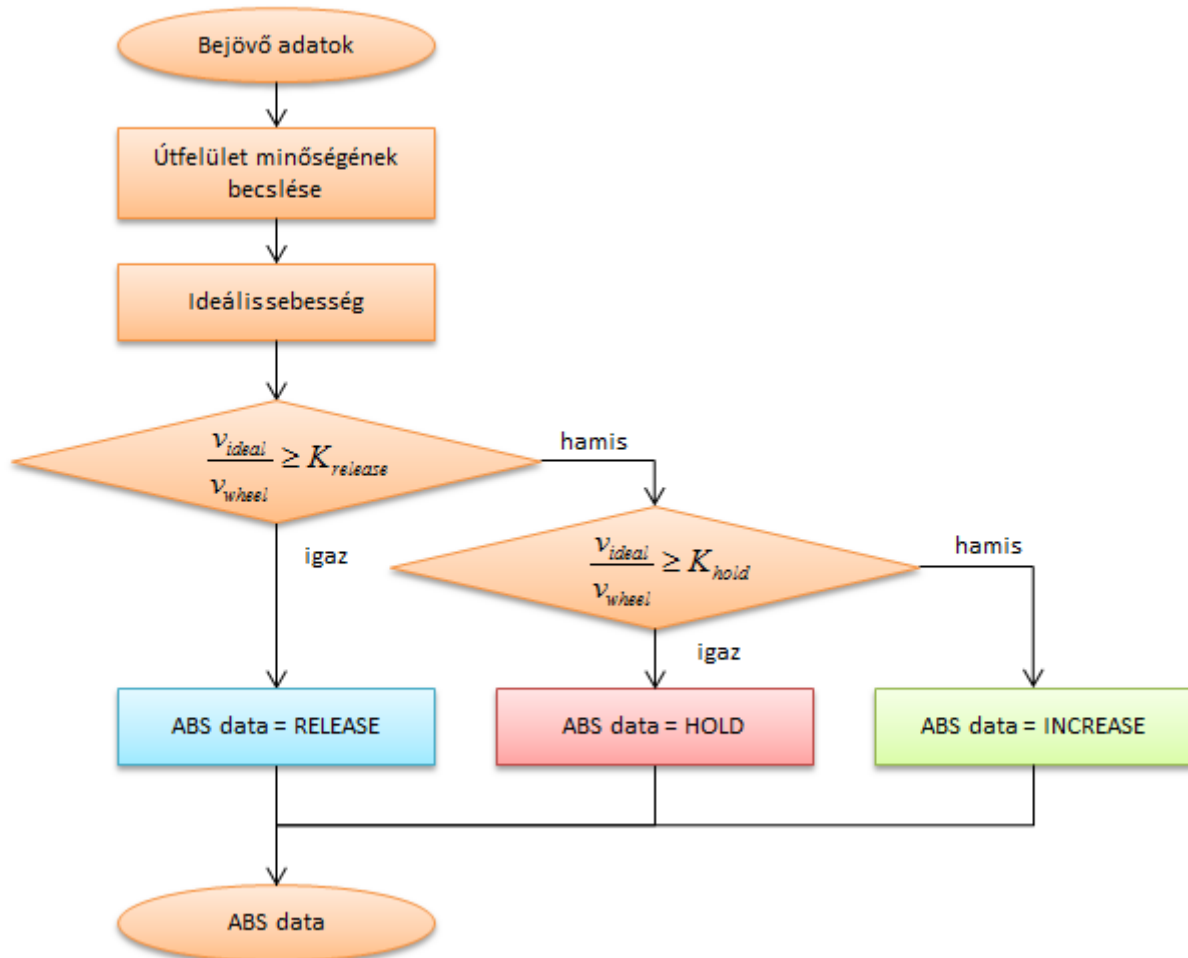
$$v_{filtered}(n) = \frac{\sum_{i=n-K}^n v_{unfiltered}(i)}{K+1} \quad (7.1.)$$

ahol:

- n Az aktuális időpont (lépés);
- $v_{filtered}$ Szűrt keréksebesség;
- K A szűrés mértéke, azaz hány visszamenőleges szűretlen sebességjel legyen figyelembe véve a szűrésnél;
- $v_{unfiltered}$ Szűretlen keréksebesség.

A szűrés mértékét a jel zajosságának illetve a megengedett maximális jel elcsúszásnak (mivel a szűrés bizonyos mértékű késleltetést okoz a sebesség jelben) függvényében lehet finomhangolni.

A szűrést követően megkezdődik maga a vezérlési eljárás (7-4. ábra). Jelenleg egy kerékdinamikát figyelembe vevő algoritmus van használatban. A szabályozási folyamat mindkét kerék esetében azonos algoritmussal történik, viszont a kerékpár kerekeire ható különböző mértékű terhelés és erőhatások miatt a paraméterek eltérőek lehetnek az algoritmus tekintetében.



7-4. ábra: A vezérlő algoritmus folyamatábrája

A szabályozási folyamathoz szükség van egy az adott útfelület függvényében ideálisnak tekintett lassuláshoz tartozó sebesség meghatározására (7.2.). A legmegfelelőbb szabályozás eléréséhez szükség lenne az adott útfelület minőségének és milyenségének becslésére, mely jelenleg is fontos kutatási terület, ami nagymértékben növelheti a beavatkozás hatékonyságát, oly módon, hogy az útfelület minőségének és milyenségének függvényében változtatható az ideális lassulás.

$$v_{ideal}(n) = N \cdot S(n) + v_{start}(n) \quad (7.2.)$$

ahol:

- v_{ideal} Ideális sebesség;
- N Az utolsó érvényes keréksebesség (v_{start}) óta eltelt idő (eltelt ciklusok száma);
- S Meredekségi érték;
- v_{start} Kiindulási sebesség (utolsó érvényes keréksebesség).

A meredekségi érték (S) egy a maximális lassulás és az algoritmus ciklus idejéből származtatható érték, mely a működés során dinamikusan változhat az útviszonyoknak megfelelően (egy állandó érték mellett is megfelelően működik az algoritmus eltérő útfelületek esetén, csupán csökken a hatékonysága), míg a kiindulási sebesség (v_{start}) az utolsó csúszásmentes állapothoz tartozó érték. Maga az algoritmus egy állapotgép, mely a HECU állapotai (RELEASE a nyomáscsökkentés, HOLD a nyomástartás, INCREASE a nyomásáteresztés) között váltogat annak megfelelően, hogy a bejövő keréksebesség hogyan viszonyul az ideális lassítási sebességhez. Az állapot kiválasztása a (7.3.), a (7.4.) és a (7.5.) egyenletek alapján történik.

$$ABSdata(n) = RELEASE \text{ ha } \frac{v_{ideal}(n)}{v_{filtered}(n)} \geq K_{release}(n) \text{ és } v_{ideal}(n) > v_{limit}(n) \quad (7.3.)$$

$$ABSdata(n) = HOLD \text{ ha } \frac{v_{ideal}(n)}{v_{filtered}(n)} \geq K_{hold}(n) \text{ és } \frac{v_{ideal}(n)}{v_{filtered}(n)} < K_{release}(n) \text{ és } v_{ideal}(n) > v_{limit}(n) \quad (7.4.)$$

$$ABSdata(n) = INCREASE \text{ ha } \frac{v_{ideal}(n)}{v_{filtered}(n)} < K_{hold}(n) \text{ vagy } v_{ideal}(n) < v_{limit}(n) \quad (7.5.)$$

ahol:

- ABS_{data} Kért állapot;
- $v_{filtered}$ Aktuális szűrt keréksebesség;
- $K_{release}$ Nyomáscsökkentéshez tartozó határérték;
- K_{hold} Nyomástartáshoz tartozó határérték;
- v_{limit} ABS működésének sebesség határa (ez alatt nem kér aktuálást az ABS).

Ha az aktuális szűrt sebesség kis mértékben az ideális alá esik, de még egy adott határértéken belül marad, akkor az ABS nyomástartási módba vált (7.4.), míg ha a szűrt sebesség a nyomástartási sáv alsó határértéke alá kerül, akkor nyomáscsökkentési állapotba kerül az ABS (7.3.). Minden más esetben az ABS nyomásnövelést hajt végre (7.5.).

A v_{start} érték minden ciklusban a (7.6.) és (7.7.) egyenlet szerint módosul.

$$v_{start}(n) = v_{filtered}(n) \text{ ha } v_{ideal}(n) \leq v_{filtered}(n) \quad (7.6.)$$

$$v_{start}(n) = v_{start}(n) \text{ ha } v_{ideal}(n) > v_{filtered}(n) \quad (7.7.)$$

Ha az ideális lassítási sebességnél magasabb a szűrt keréksebesség, illetve ha csak kis mértékben alacsonyabb, akkor a keréksebességet érvényesnek tekinti az algoritmus (azaz a kerék nem csúszik), és átengedi a sofőr által kifejtett nyomást. Ha magasabb az aktuális szűrt sebesség az ideálisnál, akkor azt tekinti a kiindulási sebességnek (v_{start}) a számolásokhoz (7.6.), egyébként a kiindulási sebesség megtartja korábbi értékét (7.7.).

A rendszernek minden időpillanatban el kell tudni döntenie, hogy a kerék vajon blokkol-e vagy sem, erre a kerék fordulatszámának alakulásából következtet. Attól a pillanattól, ahol a WSS jele már nem elegendően nagy frekvenciájú az ABS szoftver jelfeldolgozó moduljának, az ABS szabályozás befejeződik, és a vezetőknek kell a blokkoló kerekű járművet egyensúlyban tartania. Ezt finom kormánymozdulatokkal, egyensúlyáthelyezésével, vagy lábának letámasztásával érheti el. Ez a legkisebb sebesség általában 5 km/h.

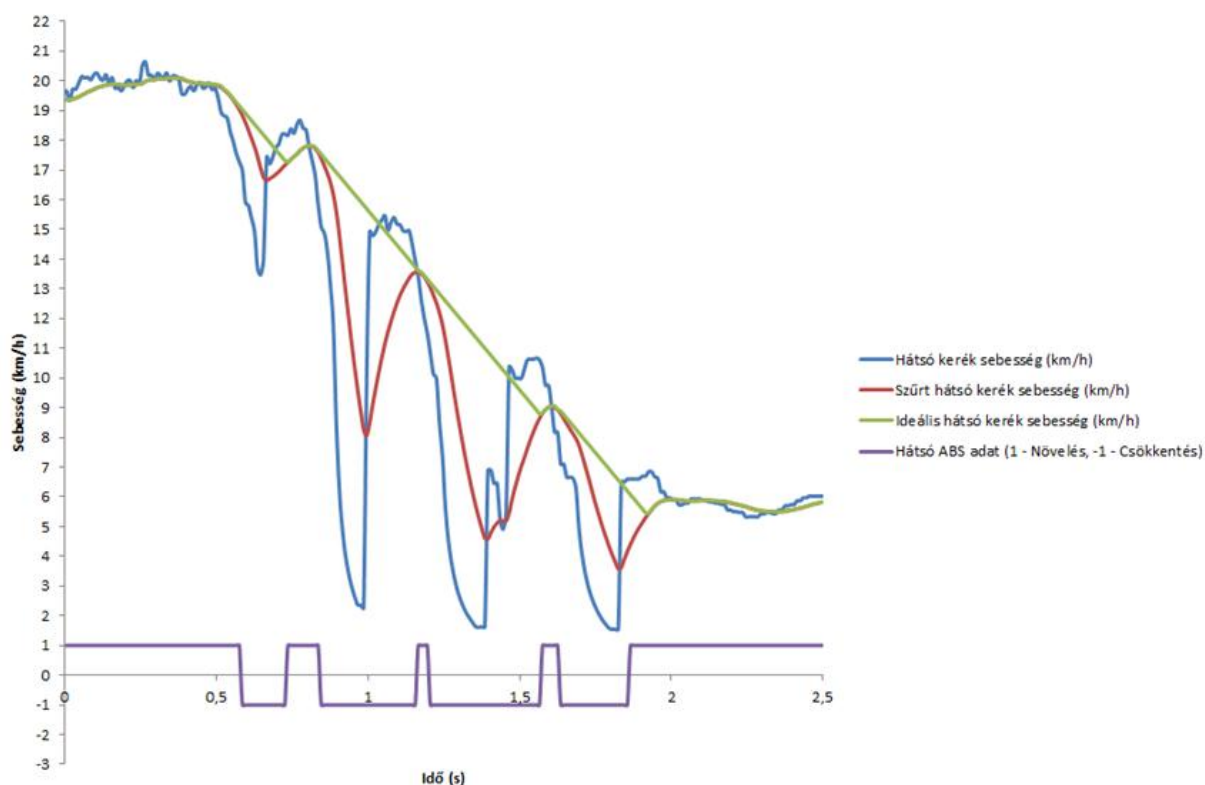
A vezérlési algoritmus lefutása után történik még egy felülbírálati rész, erre akkor lehet szükség, ha HECU hajlamos túlmelegedni a gyakori szelepaktywálás miatt, ilyenkor rövid ideig alap állapotba kell állítani bizonyos mennyiségű aktiváció után, azaz rövid ideig pihentetni kell a HECU szelepeit. További funkciója a hibakezelés, ha esetlegesen hibás értékek érkeznének a szenzoroktól, ez a blokk még felülbíráhatja az állapotokat. A fent definiált folyamat (eljárás) végén a HECU megkapja az utasítást arra vonatkozóan, hogy milyen állapotba lépjen (nyomáscsökkentés, -tartás, -áteresztés).

8. Elért eredmények

Lehetőség volt az elkészült prototípust és algoritmust valós körülmények között kipróbálni. A mérések elvégzéséhez a Continental Automotive Hungary Kft. által biztosított tesztpálya szolgált, melyen egyenes illetve lejtős, száraz aszfalt burkolat állt rendelkezésre.

Az elkészített mérések azt igazolják, hogy az ABS helyesen működik valós környezetben is, hiszen egy körülbelül 20 km/h-ról való vészfékezés esetén nem volt tapasztalható sem kicsúszás, sem eséses baleset (8-1. ábra).

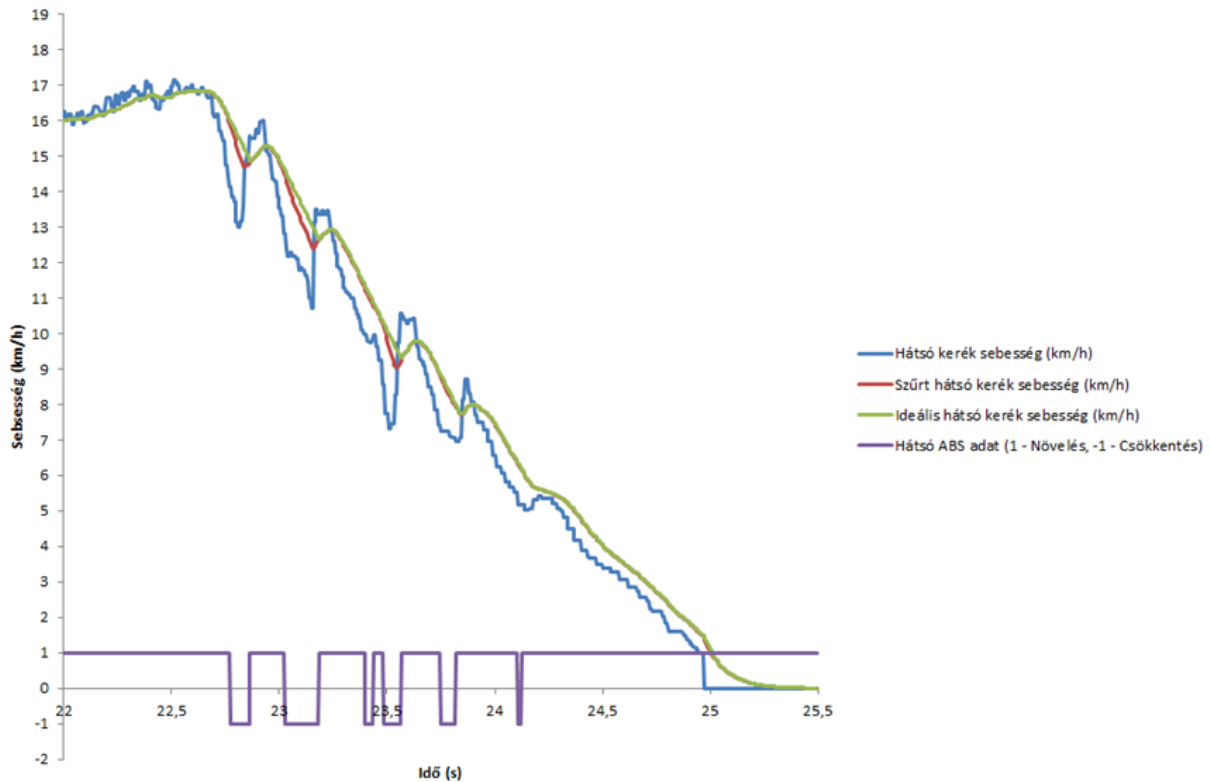
A mérések során biztonsági okokból csak a hátsó kerék ABS-hez tartozó algoritmus helyessége került vizsgálatra, mely a 8-1. ábra szerinti eredményekkel szolgált. Fontos megjegyezni, hogy ezeknél a teszteknel az ABS csak a nyomáscsökkentés és áteresztés állapotok között kapcsolhatott.



8-1. ábra: Tesztpályán mért sebesség és ABS aktuációs értékek (vésefékezés 20 km/h-ról)

Egy vésefékezési manőver során a szűretlen hátsó kerék sebesség (kék) rövid időn belül nagyon nagy ugrásokat eredményezett, emiatt szűrt sebesség jel nélkül a mérések téves információval szolgáltak volna. A szűrt kerék sebesség értéket (vörös) az algoritmus átlagolással határozza meg, melynek köszönhetően ugyan „kisimul” és valamelyest késik a jel, ugyanakkor a beavatkozás szempontjából a megfelelőhöz közelebb álló jelet produkál. Az ideálisnak tekintett hátsó kerék sebességhez (zöld) mérten határozza meg az algoritmus, hogy történik-e beavatkozást vagy sem. Amennyiben beavatkozást történik, úgy az ABS adat (lila) 1 (átersztés/növelés) vagy -1 (csökkentés) értéket vesz fel a nyomásértékek módosításának megfelelően.

A kapott mérési eredményeken látható, hogy az algoritmus által használt több paraméter is finomhangolásra szorul. Ezen pontosításoknak köszönhetően a 8-2. ábra szerinti teszteredmények sokkal kifinomultabb szabályozásra utalnak, ahol hatékonyabb és pontosabb beavatkozás figyelhető meg.



8-2. ábra: Tesztpályán mért eredmények finomhangolás után (vérszfékezés 17 km/h-ról)

Minden mért és számolt érték a finomításoknak köszönhetően pontosabbá vált, tisztult a szűretlen sebességjel, ezáltal a belőlük számolt átlagolt sebességérték is közelíti az ideális értéket. A vérszfékezés során hamarabb történik és sokkal gyakoribb az ABS által való beavatkozás, ezáltal biztonságosabbá válik a sofőr számára ezen manőver végrehajtás.

A kapott mérési eredmények az algoritmus és a prototípus sikeres működését igazolják, így ennek köszönhetően a további fejlesztések és kutatások már elkezdődtek, melyek biztató eredménnyel szolgálhatnak.

9. Összefoglalás

A megvizsgált menetdinamikai tulajdonságok alapján megalkotásra került egy kerékpár ABS prototípus, melyen az elkészült vezérlőalgoritmus tesztelése történt. Ezen algoritmus mind szimulációs környezetben, mind valós körülmények között sikeres eredményt szolgáltatott, mely során az első és hátsó kerékre való ABS beavatkozás vizsgálata megfelelőnek bizonyult. A tesztek során az algoritmus finomhangolása vált szükségessé, mellyel a mért adatok pontosabb eredményt szolgáltatottak.

Az elért eredmények láttán nagy előrelépés várható a kerékpárral kapcsolatos biztonsági eszközök fejlesztésében. Számos lehetőség nyílik újabb és újabb fejlesztésekre a prototípus kapcsán, ami kényelmesebbé és megbízhatóbbá teszi a rendszert.

Ahogy az autókban, úgy a kerékpárnál is szükség van referencia sebesség meghatározására, amely blokkolt kerekek mellett is képes a kerékpár sebességének megállapítására. Egy autóhoz képest ezen érték felkutatása még több paramétertől függő változó lesz, hiszen míg az autó egy stabilnak tekinthető rendszer, addig a kerékpár instabilan viselkedik. Figyelembe kell tehát venni a fejlesztések során az oldalirányú erőket, a kanyarodás mértékét, a kanyarodás szögét, a biciklit vezető személy súlyának eloszlását és ez által a kerékterhelést.

A projekt kapcsán igény merült fel egy olyan LabVIEW környezetben készített program létrehozására, amely pontosan ugyanazon funkciókat látja el a kerékpár ABS működésében, mint a MATLAB modell, viszont ennek alkalmazásával könnyebb idővezérelt algoritmust készíteni, így a szabályozás is optimálisabb lehet.

További fejlesztési tervek közé tartozik egy olyan mobiltelefon készülékre írt, Android operációs rendszeren futó program, mely képes valós időben vezetékek nélküli hálózat segítségével monitorozni a szenzorok aktuális értékeit. Ezen elképzelés egy kiaknázatlan innovációs lehetőség a járműipar számára.

Jelenleg is zajlik a prototípuson található hardver eszközök méretbeli csökkentése és optimalizálása, mely a kerékpáron való elhelyezésének függvényében változtathatja a jármű súlyeloszlását. Ezen optimalizálási folyamattal elérhetővé válna, hogy sofőr nélkül a kerékpár mindkét kerekén közel azonos legyen a terhelés.

10. Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Peter E. Rieth, Stefan A. Drumm, Michael Harnishfeger, *Electronic Stability Program: The brake that steers*, verlag moderne industrie, 2002, pp. 16-26.
- [2] Fredrik Gustafsson, Automotive Safety Systems, *Replacing costly sensors with software algorithms*, IEEE Signal Processing Magazine, Volume 26, Issue 4, July 2009
- [3] Nick Ritsema, SukhbirSingh, Steve Stone, Mike Taylor: Anti-lockBraking System for Mountain Bikes
- [4] Kőfalusi Pál ,:ABS-től az ESP-ig Elektronikus menetdinamikai szabályozó rendszerek, Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft., 2005

- [5] IEEE Control Systems Magazine , *Bicycle Dynamics and Control*, Volume 25, Issue 4, Aug. 2005, pp. 26-47.
- [6] IEEE Control Systems Magazine, *Single-Track Modeling and Control*, 2006, pp. 34-61.
- [7] IEEE Control Systems Magazine (2010). *Stabilization of a RiderlessBicycle*, Volume 30, Issue 5, Oct. 2010, pp. 23-31.
- [8] CAN Specification version 2.0., Robert Bosch GmbH, 1991