

Elektromechanikus ékfék modellezés és szimuláció

Electromechanical Wedge Brake Modeling and Simulation

Dr. FODOR Dénes¹, FODOR Botond²

¹ Széchenyi István Egyetem, Audi Hungária Járműmérnöki Kar,
Járműhajtás Technológia és Teljesítményelektronika Tanszék
9026 Győr, Egyetem tér. 1.

² Széchenyi István Egyetem, Audi Hungária Járműmérnöki Kar,
Járműmérnök BSc hallgató, gyakornok Audi Hungária Zrt.
9026 Győr, Egyetem tér. 1.

fodor.denes@ga.sze.hu, botond197@gmail.com

Abstract

In today's vehicle industry, X-by-wire technologies are gaining increasing importance, especially in fully electric vehicles. This paper presents the design steps of an electromechanical bicycle wedge brake that utilizes brake-by-wire technology. It discusses the role of Anti-lock Braking Systems (ABS) and Brake-by-Wire (BBW) technologies in the bicycle industry and summarizes how these solutions contribute to improving rider safety. Subsequently, a Model-Based Design workflow is introduced to support the development of an ABS control strategy for electronic wedge-brake mechanisms based on brake-by-wire principles. As a first step, the longitudinal dynamic model of a bicycle is presented, which enables a detailed investigation of wheel lock-up phenomena. After establishing the baseline model, a control algorithm is implemented to prevent wheel lock-up during braking. The study also examines how the control algorithm affects the braking distance of the bicycle. Following the evaluation of ABS brake systems in bicycle applications, the paper summarizes the next steps in the development process of the brake system.

Keywords: brake-by-wire, wedge brake, Model-Based Design, control algorithm, Anti-lock Braking System

Kivonat

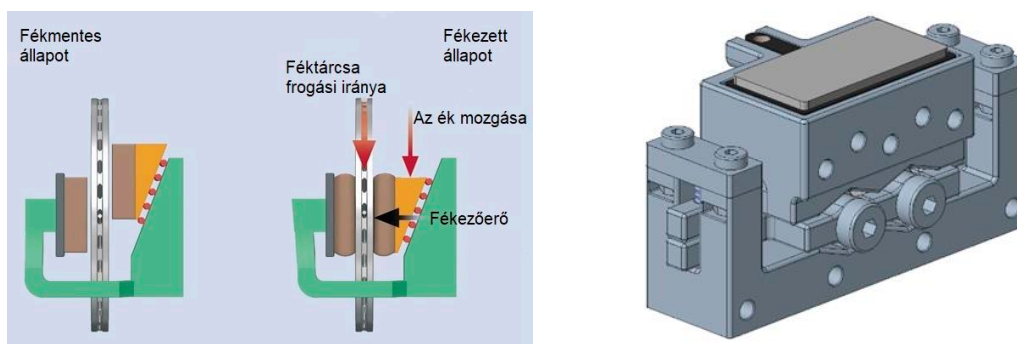
Napjaink járműiparában az „X-by-wire” technológiák egyre nagyobb jelentőséget kapnak, különösen a tisztán elektromos járművek esetében. A tanulmány egy brake-by-wire technológiát alkalmazó elektromechanikus kerékpár ékfék tervezésének lépéseit mutatja be. Ismerteti az blokkolásgátló fékrendszerek (ABS) és a brake-by-wire (BBW) technológiák szerepét a kerékpáripárban, valamint összefoglalja, hogyan járulnak hozzá ezek a megoldások a kerékpárosok biztonságának növeléséhez. Ezt követően bemutatásra kerül egy modellalapú tervezési (Model-Based Design) folyamat, amely brake-by-wire elven alapuló ABS-szabályozás fejlesztését célozza elektronikus ékfék mechanizmusokhoz. Első lépésként ismertetésre kerül a kerékpár hosszirányú dinamikai modellje, amely lehetővé teszi a kerékblokkolás részletes vizsgálatát. Az alapmodell létrehozása után egy szabályozó algoritmus kerül implementálásra a fékezés közbeni kerékblokkolás megelőzésére. A vizsgálat kiter arra is, hogy a szabályozó algoritmus miként befolyásolja a kerékpár fékútját. Az ABS fékrendszerek kerékpáros alkalmazásának értékelése után a tanulmány összefoglalja a fékrendszer-fejlesztés következő lépéseit.

Kulcsszavak: elektronikus vezérlésű fékrendszer, ékfék, modellalapú tervezés, szabályozó algoritmus, blokkolásgátló fékrendszer

1. AZ ÉKFÉK MECHANIKÁJA

1.1 Az ékfék működési elve és 3D modellje

Az ékfék olyan fékrendszer, amely az ékhatás elvén működik, és súrlódás segítségével lassítja vagy állítja meg a járművet. A rendszer egyik fontos jellemzője az úgynevezett **öngerjesztő hatás**, amelynek következtében a fékezőerő részben önmagát erősíti. Ennek köszönhetően a fékezési folyamat során kisebb működtető energia szükséges, így a rendszer alkalmazása egy teljes járműrendszer szintjén energiamegtakarítást eredményezhet. Az ékfék rendszer általában egy vagy két ék alakú elemet tartalmaz, amelyek geometriai kialakítása biztosítja a gerjesztő hatás létrejöttét. Az ékfék működését az **1. ábra** szemlélteti [1,2,3,4].



1. ábra. Az ékfék két végállapota, valamint 3D modellje Creo programból

Amikor a fékezési parancs – a fékpedál vagy fékkar segítségével – aktiválódik, a fékrendszer működésbe lép. Ennek hatására az ék elmozdul és a féktárcsára a fékpofákon keresztül szorítóerőt fejt ki. A folyamat tovább növeli a súrlódási erőt, így egy **öngerjesztő fékezési folyamat** jön létre [7]. A projekt kulcsfontosságú eleme a kettős-ék elv alkalmazása, amely két csapágy segítségével valósul meg. Ez a megoldás biztosítja az ék stabil és pontos mozgását a fékrendszer aktiválásakor, valamint a fékhatás önerősítő mechanizmusának kihasználását [5,6].

1.2 Kerékpáron történő alkalmazás

Az ékfék adaptációja virtuális környezetben egy tárcsafékes biciklihez az alábbi ábrán látható.

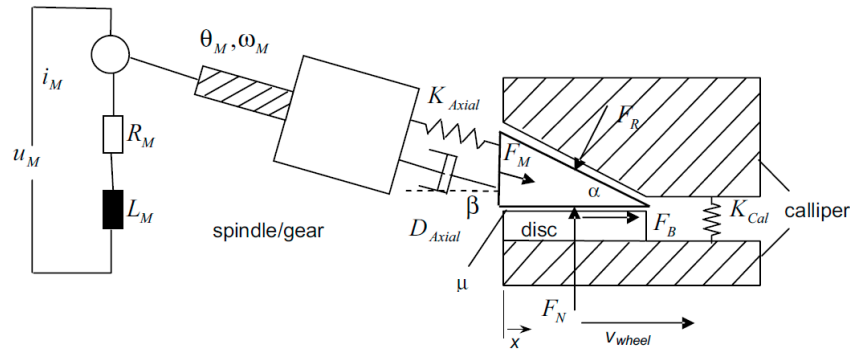


2. ábra. Ékfék adaptációja

2. AZ ÉKFÉK MODELLEZÉSE

2.1 Az ékfék matematikai leírása

Az ékfék matematikai modelljének levezetéséhez a 3. ábrán látható mechanikai struktúrából indulunk ki. Az ékre (melynek szöge α) a következő erők hatnak: egy aktuációs (motor) erő F_M , egy normál irányú erő (F_N), a féktárcsa és az ékre szerelt fékbetétek közötti súrlódási együtthatótól (μ) függő F_B fékezőerő és egy F_R reakcióerő, amely merőleges az ékélre, ahol a súrlódás elhanyagolható [8,9,10].



3. ábra. Az elektronikus ékfék egyszerűsített modellje

A matematikai levezetésnél azt az esetet vesszük figyelembe, amikor az ékre ható erő vízszinteshez viszonyított szöge (β) megegyezik az ék α szögével. Ebben az esetben az aktuációs erő iránya és a fékezőerő közötti összefüggés kedvezőbb. Az x koordinátát a féktárcsával párhuzamosan definiálva, az alábbi összefüggés írható fel:

$$m \cdot a_x = F_m \cdot \cos\beta + F_f - F_g \cdot \sin\alpha$$

ahol még:

m - az ék tömege; a_x - az ék x irányú gyorsulása; F_g - a görgő és az ék között fellépő normálerő; F_f - a fékező amelynek kifejezése:

$$F_f = \mu \cdot F_N$$

az ék x irányú gyorsulása:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2}$$

A fentiek alapján az ék x és y irányú elmozdulásra az alábbi differenciálegyenleteket kapjuk:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F_m \cdot \cos\beta + \mu \cdot F_N - F_g \cdot \sin\alpha$$

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \tan\alpha = F_m \cdot \sin\beta - F_N + F_g \cdot \cos\alpha$$

A fenti két összefüggés összevonásából az alábbi egyenletet kapjuk:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \cdot (1 + (\tan\alpha)^2) = F_m \cdot (\sin\beta \cdot \tan\alpha + \cos\beta) + F_N \cdot (\mu - \tan\alpha)$$

A féktárcsa és az ék között fellépő normálerő kifejezhető a rugóállandó és a csillapítási tényező segítségével:

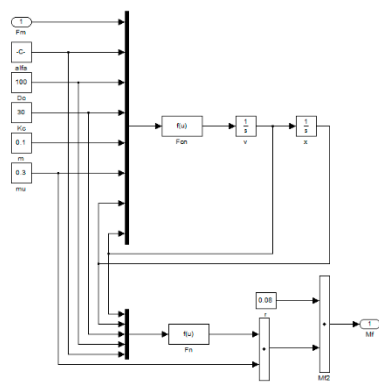
$$F_N = \tan\alpha \left(K_c \cdot x + D_c \cdot \frac{dx}{dt} \right)$$

Mivel $\beta \approx \alpha$, a fenti differenciálegyenlet az alábbira redukálódik:

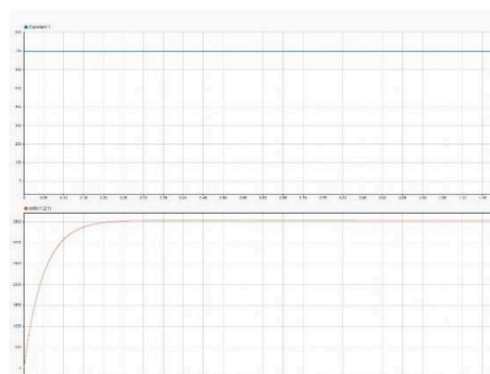
$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{m \cdot (1 + (\tan\alpha)^2)} \cdot \left(\frac{1}{\cos\alpha} \cdot F_m + \tan\alpha \cdot \left(K_c \cdot x + D_c \cdot \frac{dx}{dt} \right) \cdot (\mu - \tan\alpha) \right)$$

2.2 Az ékfék rendszer Simulink modellje

Az ékfék rendszer Simulink modelljét mutatja a 4. ábra, mely a fentebb tárgyalt matematikai egyenletek alapján került implementálásra. A modell bemenete a villamos aktuátor által szolgáltatott F_m működtető erő, míg kimenete az M_f féknyomaték. Az 5. ábrán pedig egy modell validációs futtatást láthatunk [11,12].



4. ábra. Az ékfék Simulink modellje



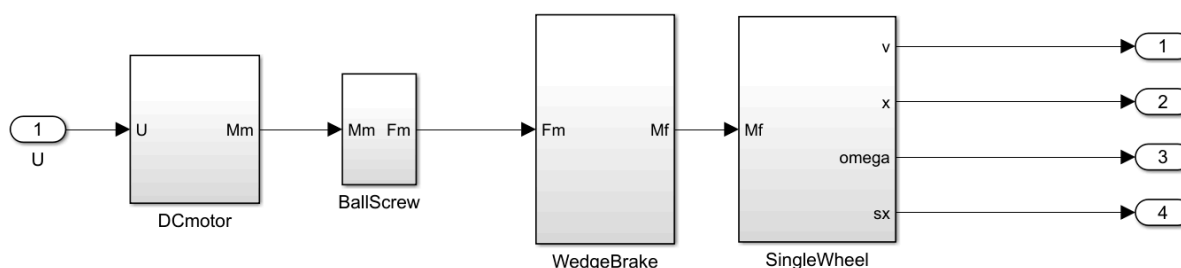
5. ábra. A működtető (fent) és a fékerő (lent)

2.3 Az ékfék-rendszer nyílt-hurkú irányítása

Mivel az ékfékre vonatkozó matematikai modellek már rendelkezésre állnak, a rendszer Simulink környezetbe implementálható, amely lehetővé teszi a rendszerszintű vizsgálatokat. Az áttekinthetőség érdekében a modellt négy fő alrendszerre tagoltuk:

- DC-motor
- golyósorsós kapcsolat
- ékfék modell
- hosszirányú egykerekes modell

A megvalósított rendszer és annak alrendszerei a 6. ábrán láthatók. Az ábrán jól elkülönülnek az egyes felépítési egységek határai, valamint azok bemenetei és kimenetei, illetve a teljes rendszer bemenő és kimenő jelei is.



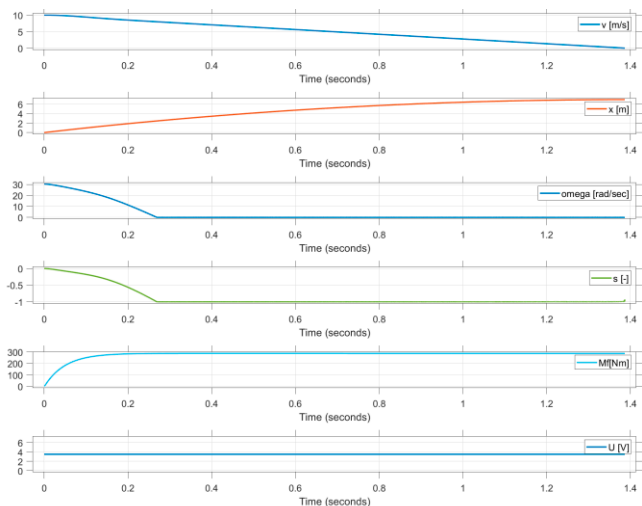
6. ábra. Az ékfék modell és alrendszerei Simulink-ben

Bemenet: U - DC-motor bemeneti feszültsége

Kimenetek:

v - a kerék hosszirányú sebessége; x - a kerék által megtett út; ω - a kerék szögsebessége; s_x - a kerék csúszása

Az ábrán az is megfigyelhető, hogy az egyes alrendszerek kimeneteit a következő alrendszerek bemeneteire vezetjük, és a modell nem tartalmaz visszacsatolási hurkot, vagyis nyílt hurkú irányítási rendszerről van szó. Ez a nyílt hurkú megvalósítás elegendő ahhoz, hogy megvizsgáljuk a rendszer választását a DC-motor különböző bemeneti feszültségeire.



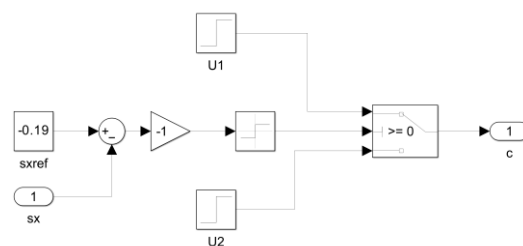
v [m/s]: a kerékpár pillanatnyi sebessége
 x [m]: a kerék által megtett távolság (fékút)
 ω [rad/sec]: a kerék pillanatnyi forgási sebessége
 s : a kerék csúszása, slip
 M_f [Nm]: adott pillanatban kifejtett fékezőnyomaték
 U [V]: adott pillanatban táplált feszültségjel

7. ábra. Nyílt hurkú rendszer válasza $U = 3.5V$ DC-motor bemenet esetén

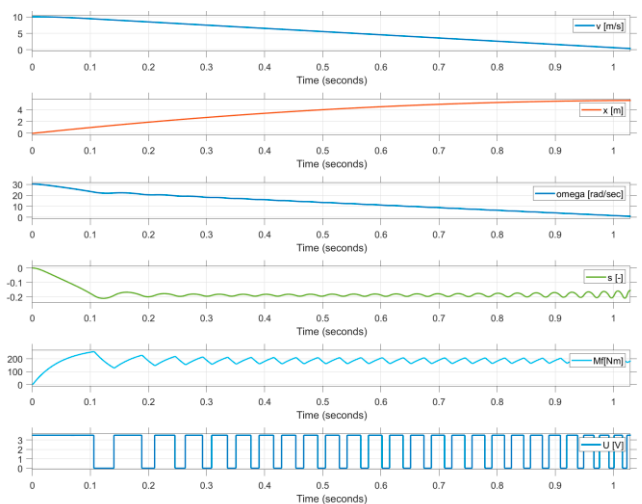
Ha a szimulációt állandó, $U = 3.5V$ bemeneti feszültség mellett futtatjuk, a fenti eredményeket kapjuk. A szimuláció alapján jól látható, hogy a fékezés kezdetén mind a v sebesség, mind a kerék ω szögsebessége csökkenni kezd. A szögsebesség azonban gyorsan eléri a $\omega=0$ értéket, vagyis a kerék blokkol. A blokkolás a kerékcsúszás s értékén is egyértelműen megfigyelhető, mivel a szögsebesség nullára csökkenésekor a csúszás értéke -1 -re esik.

2.4 Az ékfék rendszer zárt-hurkú szabályozása

A kerék blokkolásának elkerüléséhez olyan szabályozó algoritmus alkalmazása szükséges, amely a DC-motor U bemeneti feszültségét vezérli. Ennek megvalósítására kezdetben kétpont (bang-bang) szabályozót alkalmazunk. A vezérlő az aktuális csúszási értéket, s -t egy referencia csúszási értékkel, s_{ref} -el hasonlítja össze.



8. ábra. A kétpont szabályozó működési elve



v [m/s]: a kerékpár pillanatnyi sebessége
 x [m]: a kerék által megtett távolság (fékút)
 ω [rad/sec]: a kerék pillanatnyi forgási sebessége
 s : a kerék csúszása, slip
 M_f [Nm]: adott pillanatban kifejtett fékezőnyomaték
 U [V]: adott pillanatban táplált feszültségjel

9. ábra. A rendszer viselkedése szabályozó algoritmus alkalmazása esetén

A szabályozó két állapotban működhet:

Ha $s_{ref} \leq s$: az aktuális csúszási érték nagyobb, mint a referencia, így nincs szükség beavatkozásra [$U=3.5V$]

Ha $s_{ref} > s$: az aktuális csúszási érték kisebb, mint a referencia, tehát a szabályozó aktív [$U=0V$]

A szimuláció futtatása után a 9. ábrán látható eredményeket kapjuk. Az alkalmazott kétpont szabályozó hatására a kerék csúszása s nem csökken a referenciaérték s_{ref} alá, mivel ilyenkor a szabályozó beavatkozik, és a bemeneti feszültséget $U = 0V$ -ra csökkenti. Ennek következtében a fékezónyomaték is mérséklődik, így a kerék nem blokkol, hanem szögsebessége a kerékpár haladási sebességével összhangban, folyamatosan csökken. A megvalósított szabályozással nemcsak a kerék szögsebességének egyenletes csökkenése biztosítható, hanem a fékút is csökken.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány célja az elektromechanikus kerékpár-ékrendszerű fék fejlesztésének bemutatása. Ennek keretében ismertetjük a kerékpáron alkalmazható blokkolásgátló rendszer működési elvét, valamint az ék-fék-alapú ABS-rendszer fejlesztésének kezdeti lépéseit. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a szabályozással ellátott ékfékrendszer képes a jármű hatékony lassítására a kerék blokkolása nélkül. A fejlesztés következő szakaszában az ékfékmechanizmus prototípusának megvalósítása, valamint egy fejlettebb szabályozási algoritmus alkalmazása jelenthet további előrelépést annak érdekében, hogy az ékfékrendszer különböző üzemi körülmények között is megbízhatóan működjön.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1.] M. Bohner, S. Leyer, R. Gscheidle, W. Pichler, W. Saier, H. Schmidt, P. Siegmayer, H. Zwickel: *Gépjárműszerkezetek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, Magyarország, 2013, 372
- [2.] A. Semsey, R. Roberts: 'Simulation in the Development of the Electronic Wedge Brake', *SAE Technical papers*, 2006.04.03, 14
- [3.] L. M. Ho, R. Roberts, H. Hartmann, B. Gombert: 'The Electronic Wedge Brake – EWB', *SAE Technical papers*, 2006.10.08, 12
- [4.] Juliana Baron, Bernd Gombert: 'Intelligent Wedge Brake', *dSPACE NEWS*, 2007
- [5.] J. Balz, K. Bill, J. Böhm, P. Scheerer, M. Semsch: 'Konzept für eine elektromechanische Fahrzeugbremse', *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, 1996, 328-333.
- [6.] SR Handel GmbH, www.at-rs.de, Was wurde eigentlich aus der Keilbremse?, 2023.03.24, <https://www.at-rs.de/beitrae/items/was-wurde-eigentlich-aus-der-keilbremse.html>
- [7.] Balogh L., Németh H.: Önerősítő mechanizmusok fejlesztése fékrendszerekhez, *ATZ/MTZ worldwide az interneten*, vol. 9, no 3-4, 2009, 76-79.
- [8.] J. Fox, R. Roberts, C. Baier-Welt, L. M. Ho, L. Lacraru and B. Gombert: 'Modeling and Control of a Single Motor Electronic Wedge Brake', *Journal of passenger cars: Electronic and electrical systems*, Vol. 116, no. 7, 2007, 321-331.
- [9.] H. Hartmann, M. Schautt, A. Pascucci and B. Gombert: 'eBrake® - The Mechatronic Wedge Brake', *Journal of passenger car: Mechanical systems journal*, Vol. 111, no. 6, 2002, 2146-2151.
- [10.] G. K. Joo, J. K. Myoung, K. K. Jong, N. Ki-Han: 'Developing of Electronic Wedge Brake with Cross Wedge', *SAE Technical papers*, 2009.04.20, 7
- [11.] Bence Nagy, Dénes Fodor: *Theoretical investigation and simulation of a brake-by-wire based bicycle wedge brake*, 2023
- [12.] Weinhoff Krisztián: *Az elektronikus ékfék vizsgálata véges elemes módszerrel*, 2017