

Technológiai demonstrációs rendszer hajtástechnikai és fékezési vizsgálatokhoz

Technological Demonstration System for Drive Engineering and Braking Applications

DOMOKOS István¹, FEKETE-SZŰCS Dániel

¹Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4,
<https://mecheng.unideb.hu/>

Abstract

This paper presents the design and application of a technological demonstration system developed for the investigation of drive engineering and braking processes. The system enables the experimental analysis of the dynamic behavior of rotating components and the thermal loading of braking systems. A novel approach based on energy conservation and thermodynamic principles is proposed for evaluating brake system performance. Unlike conventional methods, which rely primarily on heat flux density, the presented method considers both energy accumulation and heat dissipation within the system. The measurement setup integrates rotational speed and temperature monitoring, allowing the determination of time-dependent system behavior. The developed model provides a more accurate description of the thermal processes occurring during braking and serves as a basis for further experimental validation and numerical simulation.

Keywords: brake system, disc brake, thermal loading, energy-based analysis, thermodynamic model, heat conduction, finite element simulation

Kivonat

A tanulmány egy hajtástechnikai és fékezési folyamatok vizsgálatára alkalmas technológiai demonstrációs rendszer tervezését és alkalmazását mutatja be. A berendezés lehetőséget biztosít a forgó tömegek dinamikai viselkedésének, valamint a fékszerkezetek hőterhelésének kísérleti elemzésére.

A szerzők egy energetikai és termodinamikai alapokra épülő új módszert javasolnak a fékberendezések vizsgálatára, amely a hagyományos, hőáramsűrűség-alapú megközelítéssel szemben figyelembe veszi az energiafelhalmozódást és a hőelvonást is. A mérőrendszer fordulatszám- és hőmérsékletmérésen alapul, lehetővé téve az időfüggő folyamatok elemzését. A kidolgozott modell pontosabb képet ad a fékezés során lejátszódó termikus folyamatokról, és alapot biztosít további kísérleti és numerikus vizsgálatokhoz.

Kulcsszavak: fékszerkezet, tárcsafék, hőterhelés, energetikai analízis, termodinamikai modell, hővezetés, végeselemes szimuláció

1. BEVEZETÉS

1.1. Téma jelentősége

A fékszerkezetek fékbetéteit felületi nyomásra és hőterhelésre kell ellenőrizni. A felületi nyomásra való ellenőrzést nem részletezzük, [1] alapján a módszer egyszerűen értelmezhető. Megjegyezzük, hogy a jelen cikkünkben ismertetett módszer mellett ezt az ellenőrzést is el kell végezni. Ugyancsak [1] alapján a hőterhelésre való ellenőrzést az ún. "hőáramsűrűség (q_h [W/mm²]) alapján végezzük. A hőáramsűrűség a valóságban a fékterhelés és a fékbetét felületének hányadosa. A fékbetétek gyártói a fékbetét anyagára megengedett maximális hőáramsűrűséget megadják. A megengedett érték nem haladhatja meg a konkrét fékberendezésben számított értéket.

A fent említett eljárás a fékbetét, illetve a teljes fékberendezés túlméretezéséhez vezet. A módszer kizárólag a bevezetett fékterhelésre koncentrál, nem veszi figyelembe azt a tényt, hogy a fék üzem közben hűl is. Igaz továbbá, hogy a disszipálni kívánt kinetikai energia, amely belső energiává alakul, nemcsak a fékbetétet melegíti, hanem hővezetés által a féktárcsát, fékdobot, csatlakozó alkatrészeket stb. is. A módszer ezt nem veszi figyelembe, ez a túlméretezés oka. Igaz továbbá az is, hogy eljárása kizárólag a fékbetétre

koncentrálnak [1, 2]. A fékezés során a féktárcsa (fékdob) is melegszik. A fékberendezés tervezése során, különös figyelemmel a tárcsa (dob) anyagának helyes megválasztására, ezt is figyelembe kell venni. Sok esetben szükséges hőálló ötvözetek alkalmazása. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a fékbetéthez kapcsolódó alkatrészek melegedését is figyelembe kell venni a tervezés során.

Miután megmutattuk, hogy a hagyományos módszer részben túlméretezéshez vezet, más szempontból pedig veszélyes is, hiszen a csatlakozó alkatrészek melegedésére nem figyel, új módszert javasolunk a probléma pontosabb kezelésére.

A mérési infrastruktúrára és energetikai szemléletre épülő vizsgálati megközelítés nem előzmény nélküli. A szakirodalomban számos példa található olyan egyedi mérőrendszerek fejlesztésére, amelyek célja a valós gépészeti folyamatok pontosabb modellezése és az elméleti összefüggések kísérleti validálása. A Debreceni Egyetemen korábban forgácsolóerő-mérés céljából kifejlesztett mérőrendszer is hasonló mérnöki szemléletet követett, ahol a mérési architektúra és az adatfeldolgozási eljárás együttesen szolgálta az energetikai és mechanikai modellek ellenőrzését [5].

Emellett a gépészeti rendszerek üzemi viselkedésének vizsgálata során kiemelt jelentőséggel bír a felületi állapot, a kopási mechanizmus és az anyagszerkezeti változások elemzése. Olyan kutatások, amelyek valós üzemi igénybevételnek kitett gépészeti elemek felületének és technológiai módosításainak hatását vizsgálják, rámutatnak arra, hogy a mechanikai és tribológiai tényezők közvetlenül befolyásolják a rendszer megbízhatóságát és élettartamát [2, 6]. A kopásálló bevonatok – például termikus szórással és lézeres újraolvasztással előállított NiCrBSi rétegek – alkalmazása tovább erősíti azt a mérnöki megközelítést, hogy a hő- és mechanikai terhelés együttes vizsgálata elengedhetetlen a nagy igénybevételű alkatrészek esetében [7].

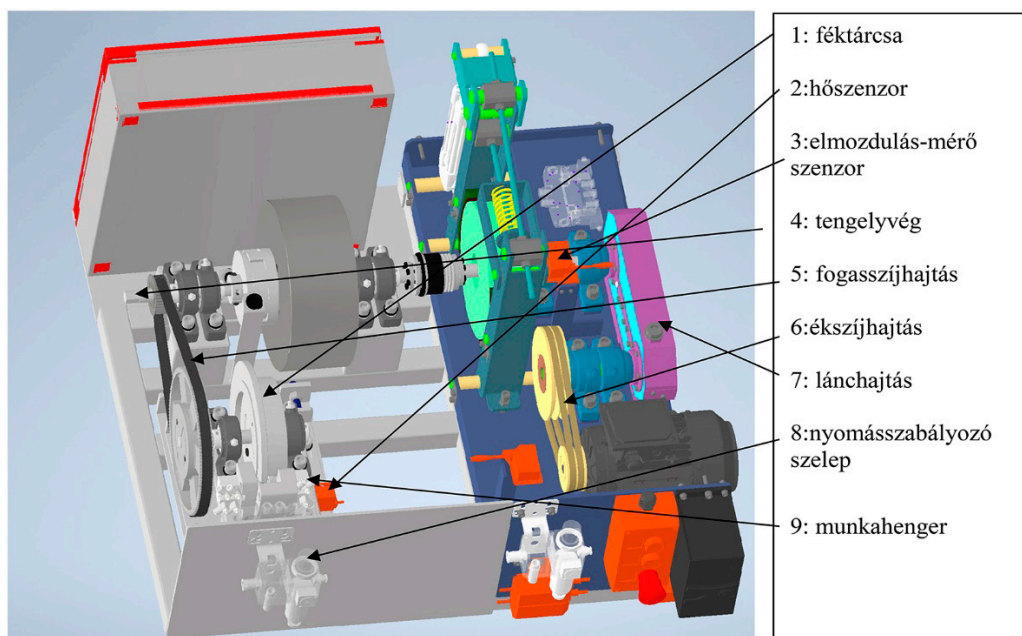
A jelen tanulmányban ismertetett módszer és mérőrendszer ebbe a kutatási irányba illeszkedik, kiterjesztve azt a fékberendezetek energetikai és termodinamikai alapú ellenőrzésére

1.2. Célkitűzések

Jelen cikkünk elsődleges célja, hogy a fékberendezések komplex, melegedésre való ellenőrzését energetikai és termodinamikai elvekre lehessen visszavezetni. Az energia-megmaradás elvének felhasználásával azt mondjuk, hogy a disszipálható kinetikai energia a fékberendezés alkatrészeiben felhalmozódó belső energia és a hűtés által a rendszerből kivezetett energia összege. Mindenki számára nyilvánvaló, hogy mind a melegedés, mind a hűtés szempontjából a probléma instacionárius, vagyis a fizikai mennyiségek időfüggését is figyelembe kell venni. Az általunk fejlesztett mérőrendszer esetében a léghűtésből származó energia-eltávolítás egyrészt jelentéktelen, másrészt lassú forgás esetén nem függ a tárcsa (dob) szögsebességétől.

1.3. A mérőrendszer ismertetése

A 1. ábra mutatja a mérőrendszer kialakítását.



1. ábra. A mérőrendszer kialakítása

A berendezés célja kettős:

- Oktatási célra fejlesztett demonstrációs prototípus az alkalmazott részegységek és a szerkesztési irányelvek bemutatására.
- Mérőrendszer a különböző részegységek dinamikai viselkedésének modellezésére és a fékberendezések melegedésének mérésére.



2. ábra. A megépített mérőrendszer

Esetünkben a második funkciót használjuk fel. Terjedelmi korlátokra hivatkozva nem soroljuk fel a mérőrendszer valamennyi elemét (mérőerősítők, A-D konverter, digitális adatgyűjtő, számítógép, feldolgozó alkalmazás), csak a legfontosabb részegységekre koncentrálnunk. A fékezést négydugattyús, pneumatikus működtetésű tárcsafékkal valósítjuk meg. Ez azért előnyös, mert a “8” nyomásszabályozó szeleppel és a rajta található nyomásmérővel pontosan be tudjuk állítani a munkanyomást, ezáltal ismerjük a fékbetéteket a tárcsára nyomó erőt, tehát féknyomatékokat tudunk meghatározni. Az elmozdulásmérőkkel közvetve mérni tudjuk a forgó tömegek fordulatszámait (A-D átalakítás után, NI cRio digitális adatgyűjtő és LabView alkalmazás segítségével).

2. A MÉRÉS FOLYAMATA

Az alábbi pontban részletesen ismertetjük a mérés folyamatát, illetve az alkalmazott elhanyagolásokat.

2.1. A féktárcsa és a betét közti súrlódási tényező meghatározása

A fékbetét és a tárcsa közötti súrlódó erő meghatározásához a Coulomb-féle súrlódási törvényt használjuk. Tudjuk, hogy a súrlódási tényező a hőmérséklet függvényében kismértékben változik, tehát a mérés előtt néhány fékezéssel a berendezést üzemmeleg állapotba hozzuk. A pontos mérés érdekében nem vesszük figyelembe a fékbetét gyári adatait, saját eredményeket használunk. A mérést álló gépen végezzük.

A mérés folyamata:

1. A nyomásszabályozó szelepen beállítjuk a munkanyomást.
2. A munkahengerek dugattyúátmérőiteik ismeretében kiszámítjuk a fékbetéteket és a tárcsát összeszorító normálerőt.
3. A tárcsaféket befékezzük.
4. A “4” jelű tengelyvégre digitális nyomaték-mérő kulcsot illesztünk és a fékre nyomatékot fejtünk ki mindaddig, amíg a tárcsa éppen nem mozdul meg. A mért nyomatékot feljegyezzük.
5. A tárcsa geometriájának ismeretében (a fékbetét középpontjának elhelyezkedése a tárcsán) a nyomatékból és az előbb említett tárcsa-sugárból a tangenciális erő már kiszámítható, két darab fékbetétet figyelembe véve.
6. A tangenciális és a normálerő hányadosa adja a súrlódási tényezőt.

2.2. Fordulatszám mérése

A hajtó villanymotor háromfázisú, aszinkron motor, melynek táplálásáról frekvenciaváltó gondoskodik. A frekvenciaváltóval tudjuk beállítani a féktárcsa kívánt fordulatszámát. Köztudott, hogy az aszinkron motornak mindig van szlip-je, illetve az ékszíjhajtás is rugalmas szlip-pel dolgozik. Ennek értelmében a gerjesztő frekvenciából nem lehet közvetlenül következtetni a féktárcsa szögsebességére, tehát a fordulatszám közvetlen mérésére van szükség. Ezt a "3" jelű, lézeres elmozdulásmérő segítségével oldjuk meg. A kétpofás fék dobjára 2 mm vastagságú, fényvisszaverő elem van ragasztva, melynek tengelyirányú elmozdulását a lézeres szenzor méri. A szenzor analóg jelét digitalizáljuk, a cRio adatgyűjtő és a LabView alkalmazás segítségével felállítjuk a fordulatszám-idő függvényt.

Az indítási tranziens jelenségek lejátszódása után az állandósult fordulatszámot feljegyezzük, majd az $\omega = 2\pi n$ összefüggésből kiszámítjuk a tárcsa szögsebességét. Megjegyzés: a szenzor nem a tárcsa fordulatszámát méri közvetlenül, hanem a kétpofás fék dobjának (közvetve a fogaszíj hajtás hajtó tengelyének) fordulatszámát. Ez nem okoz gondot, hiszen az áttétel ismeretében a tárcsa fordulatszáma és szögsebessége megadható. A fogaszíj nem csúszik meg, tehát itt szlip-ről nem lehet beszélni. Igaz ugyan, hogy üzem közben a fogaszíj longitudinális lengéseket végez, de ez az indítási tranziens jelenségek lezajlása után jelentéktelen hatású.

2.3. Hőmérsékletek mérése

A féktárcsa koszorújának hőmérsékletét (ennek mentén érintkezik a tárcsa a fékbetétekkel) germánium lencsés, érintkezés nélküli hőszennel mérjük. A szenzor mérőerősítőjének analóg jelét digitalizáljuk és cRio adatgyűjtő, valamint LabView alkalmazás segítségével felállítjuk a hőmérséklet-idő függvényt. A kapcsolódó alkatrészek (a tárcsa agya, a tengely, a fékdugattyúk) hőmérsékletét kézi, érintkezés nélküli hőmérővel mérjük. A mérést kezdetben hideg fékkel kell végezni, illetve fel kell jegyezni a berendezés hőmérsékletét a mérés megkezdése előtt. Az alkalmazott féknyomaték pontosan meghatározható, még ezen mérés előtt [3].

A mérés menete a következő:

1. A frekvenciaváltón beállítjuk a kívánt gerjesztési frekvenciát.
2. A frekvenciaváltó kezelő paneljén a "start" gombot megnyomva a forgás elindul. Vigyázni kell rá, hogy a fékek (a másik a kétpofás fék, amely ebben a kísérletben nem játszik szerepet) kiengedett állapotban legyenek.
3. A fordulatszámot az előbb ismertetett módon mérjük, illetve kivárjuk, amíg a forgás szögsebessége állandósul.
4. A gép kezelő paneljén megnyomjuk a "fékezés" gombot. Ennek hatására a motor az alkalmazott mágneskapcsoló segítségével galvanikusan leválasztásra kerül a frekvenciaváltóról, a frekvenciaváltó leáll, a tárcsafék az elektromágneses működtetésű 5/2 pneumatikus szelep hatására fékezni kezd. Mindezek a folyamatok egyszerre zajlanak le.
5. A LabView alkalmazás paneljén (a géphez kapcsolt számítógép kijelzőjén) megjelenik a fordulatszám-idő, illetve a hőmérséklet-idő függvény. A számításokhoz ezeket tároljuk és később felhasználjuk.
6. A fékezés során a kézi, érintkezés nélküli hőmérővel mérjük a tárcsa agyának és a fékdugattyúknak a hőmérsékletét, az adatokat feljegyezzük.

3. A PROBLÉMA ELMÉLETI ANALÍZISE

Ahogy az a bevezetőben említettük, a megoldást energetikai elvekre vezetjük vissza. Azt mondjuk, hogy a gép forgó tömegeiben tárolt kinetikai energiák összege egyenlő a berendezés alkatrészeiben felhalmozódó belső energiák összegével. Ha a hűtést is figyelembe vesszük, a hűlés során a rendszerből a környezetbe távozó energiát a belső energiák összegéből ki kell vonni.

Elhanyagolások:

- Nem vesszük figyelembe az ékszíjak, a lánc és a fogaszíj által tárolt kinetikai energiát.
- A relatíve lassú forgás miatt a léghellenállást elhanyagoljuk.

- Nem vesszük figyelembe a csapágyak, a lánc, az ékszíjak és a fogaszíj súrlódását. A nagy tehetetlenségi nyomatékú fékdobban, a lendkerékben, valamint az összes többi forgó tömegben tárolt kinetikai energia ezen súrlódási veszteségekhez képest olyan nagy, hogy az említett elhanyagolás nem befolyásolja jelentősen a mérés pontosságát.
- A féktárcsa nem belső hűtésű, illetve lassan forog, tehát a statikus elmélet jól használható. Ez alapján számítjuk az agy hűtéséből származó energiát is. Ebben a tekintetben a többi csatlakozó alkatrész hűtését nem kell tekintetbe venni, mert 2.3 fejezet alapján ezek jelentéktelen mértékben melegednek fel, illetve felületeik is kicsik. A fékbetét a tárcsát közvetlenül melegíti, illetve hőenergiájának egy részét a fékdugattyúknak adja át, tehát jelentős hűlésről itt sem lehet beszélni.
- Az egyszerűbb számítások miatt azt mondjuk, hogy a fékbetét és a féktárcsa hőmérséklete a fékezés során kiegyenlítődik. Rövid fékezési idő esetén ez nyilvánvalóan nem következik be. Az elhanyagolás mégsem durva, mert a fékbetétek tömege elhanyagolható a féktárcsához képest.

Megjegyzés: A villanymotor rotorjának kinetikai energiáját a motor katalógusából [4] nyert tehetetlenségi nyomaték és az első elmozdulásmérő adatából vett szögsebesség alapján lehet számítani. A fentiek alapján írható, hogy:

$$\sum_{i=1}^n E_{kin i} = \sum_{j=1}^k \Delta E_{h j} + \sum_{l=1}^m \Delta E_{c l},$$

ahol $E_{kin i}$ a forgó tömegekben tárolt kinetikai energia,
 $E_{h j}$ az egyes alkatrészek belső energiái,
 $E_{c l}$ a hűlésben részt vevő alkatrészekeken értelmezett energia, mely távozik a rendszerből.

Ezt részletezve a következő írható:

$$\sum_{i=1}^n J_{c i} \frac{1}{2} \omega_i^2 = \sum_{j=1}^k m_j c_j \Delta T_j + \sum_{l=1}^m k_l A_l \Delta T_l t = \int_{t_1}^{t_2} (M \omega) dt$$

ahol $J_{c i}$ az egyes forgó tömegek tehetetlenségi nyomatékai a forgástengelyre nézve,
 ω_i az egyes forgó tömegek szögsebességei,
 m_j a melegedő alkatrészek tömegei,
 c_j a melegedő alkatrészek anyagainak fajhői,
 T_j a melegedő alkatrészek hőmérsékletei,
 k_l a hűtésben részt vevő alkatrészek hőátadási tényezői,
 A_l a hűtésben részt vevő alkatrészek hőátadó felületei,
 M a fékező nyomaték,
 ω a féktárcsa szögsebessége.

Az egyenlet jobb oldalán található kifejezés, mely a féken disszipálódó energiát jelenti, egyszerűsíthető, mert a nyomaték állandó, ezért kivihető az integral jel elé. Az állandó nyomaték miatt a szögsebesség-idő függvény lineáris, így az integrálás is egyszerűen elvégezhető. Ez alapján a következőképpen alakul:

$$\sum_{i=1}^n J_{c i} \frac{1}{2} \omega_i^2 = \sum_{j=1}^k m_j c_j \Delta T_j + \sum_{l=1}^m k_l A_l \Delta T_l t = \frac{1}{2} M \omega t^2,$$

ahol t a fékezés teljes időtartama, illetve mivel a fékezés során a tárcsa teljesen megáll, az összefüggésben $\omega=0 = \omega$ szerepel. A hőátadási tényezők az anyagok függvényében (jelenleg csak acél) [5]-ből vehetők, mint irodalmi értékek.

4. ÖSSZEGZÉS ÉS TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK

A bemutatott technológiai demonstrációs rendszer tervezése és kivitelezése sikeresen megvalósult. A berendezés üzemképes, a hajtástechnikai és fékezési alrendszerek stabilan és reprodukálható módon működnek, a mérési infrastruktúra (fordulatszám- és hőmérsékletmérés, adatgyűjtés és feldolgozás) integrációja megtörtént. A rendszer alkalmas a forgó tömegek dinamikai viselkedésének vizsgálatára, valamint fékszerkezetek termikus terhelésének kísérleti elemzésére.

Jelen tanulmány elsődlegesen a berendezés koncepcionális felépítését, mérési architektúráját és az alkalmazható energetikai-termodinamikai modell elméleti alapjait ismertette. A mérési kampány jelenleg

folyamatban van, a kísérletek célja a kidolgozott modell validálása és az egyes elhanyagolások kvantitatív értékelése.

A részletes mérési eredményeket, az energetikai egyenletrendszer numerikus kiértékelését, valamint a végeselemes hővezetési szimulációval történő összehasonlítást egy következő közleményben mutatjuk be. A további publikáció célja a módszer pontosságának, alkalmazhatóságának és mérnöki implementálhatóságának részletes bemutatása.

A rendszer a továbbiakban alkalmas különböző fékszerkezeti konfigurációk összehasonlító vizsgálatára, valamint az energetikai alapú hőterhelési ellenőrzési módszer kísérleti megalapozására.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Tóth-Laboncz J.: Kétpofás fékszerkezet tervezése.
- [2] Fekete-Szücs D.: Design and implementation of a drive system for elevators and cranes. Presentation at the Conference of University of Debrecen, Debrecen, 2024.11.07.
- [3] A hőátadás elmélete. Alfa Laval, <https://www.alfalaval.hu> (Utolsó letöltés: 2026.03.15).
- [4] Mihejev M. A.: A hőátadás gyakorlati számításának alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest, 1990. (Ford.: Horváth Cs.)
- [5] Nemes C., Javorek L., Bodzás S., Pálincás S.: The Measurement of The Three Components of The Cutting Force During The Turning Process. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 2019, 4(1), 139–146. <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.17>
- [6] Pálincás S., Fazekas L., Gindert-Kele Á., Molnár A.: Investigation of tillage elements of agricultural machinery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 393, 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012028>
- [7] Molnár A., Buza G., Fazekas L., Pálincás S., Gindert-Kele Á.: Thermal Sprayed and Laser Remelted Wear Resistant NiCrBSi Coatings. In: Bodzás S., Mankovits T. (szerk.) *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2017)*. University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 2017, 358–365.