

MAGNETORHEOLÓG TENGELYKAPCSOLÓ OPTIMALIZÁLÁSI LEHETŐSÉGEI

OPTIMIZATION OF MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCHES

Horváth Péter PhD, Törőcsik Dávid,
Széchenyi István Egyetem, Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék

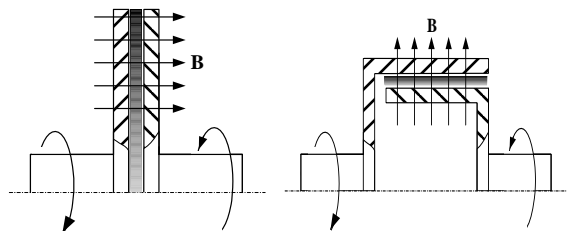
ABSTRACT

In the last decade the magnetorheological fluid gained application in many devices. This paper deals with its application in clutches. The most important issue regarding industrial application is the magnitude of transmissible torque. The paper presents insight into the basics of magnetorheology and deals with determination of the optimal magnetic flux density distribution over the radius of the plate.

1. BEVEZETÉS

Annak ellenére, hogy a magnetorheológ folyadék (MRF) ipari alkalmazása csak egy dekádra tekint vissza, máris komoly eredményeket ért el vele különféle rezgéscsillapító rendszerekben (épület és híd, mosógép), aktív és félaktív felüggesztés terén, valamint az utóbbi időben tengelykapcsolókban és fékekben [1], [2]. A tengelykapcsolóban történő alkalmazásának előnyös tulajdonságai a következőkben foglalhatók össze:

- az átvitt nyomaték jól szabályozható
- rövid, néhány század másodperces kapcsolási idő
- nincsenek mozgó elemek, ezért kis kopás
- a villamos információ közvetlen feldolgozása
- lengésektől mentes összekapcsolás kis relatív sebességeknél is.

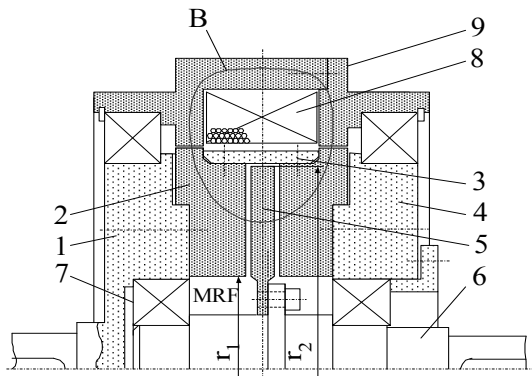


1. ábra. Tárcsás és hengeres MR tengelykapcsoló

Szerkezeti kialakítását tekintve az MR tengelykapcsoló tárcsás és hengeres kivitelű lehet (1. ábra). A tárcsás kivitel egyszerűbben gyártható, de üresjárású nyomatéka nagyobb a centrifugális erő hatására a külső sugáron bekövetkező részecskecsúszás következtében.

Mindkét változat hátrányos tulajdonságaként meg kell említeni a gerjesztéshez szükséges állandó energia felhasználást, a tömítési nehézségeket, valamint az MRF nagy mágneses ellenállását és öregedését. Ez ideig az elterjedtebb alkalmazást a kis teljesítménysűrűség, valamint a korlátozott átvihető nyomaték gátolta. A MRF folyamatos fejlesztése, a mágneses kör egyre pontosabb méretezése, jobb mágneses anyagok alkalmazása és a konstrukció javítása révén manapság sikerült elérni azt a teljesítménysűrűséget és átvihető nyomatékot, ami járművekben való alkalmazását is lehetővé teszi. A MAGNA Powertrain összerék-hajtáshoz kifejlesztett hengeres kivitelű tengelykapcsolójával alapkivitelben átvihető nyomaték 700 Nm, bolygóművel egybeépítve pedig 1300 Nm [3]. Az MR-tengelykapcsoló a nyomatékot merev és csúszó üzemmódban is át tudja vinni. Egyelőre bizonyos nehézséget jelent az üzemmódok közötti átváltás, mivel az átvitt nyomatékban ugrás következik be, amint a csúszás megindul. Hasonló a jelenség a súrlódási tényező hirtelen megváltozásához a nyugvó és mozgásbeli súrlódás határán.

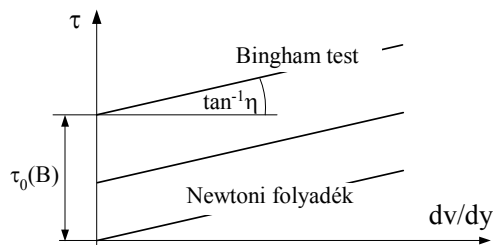
A 2. ábrán egy lemezes MR tengelykapcsoló lehetséges kialakítását látjuk. A tengelykapcsoló 3 fő egységből áll. A jobb oldali 6 tengelyhez csavarozott 5 tárcsából, a bal oldali 1 tengelyhez csavarozott 2 fluxus-vezető gyűrűből és a 3 nem mágneses anyagból készült gyűrűből, valamint az álló 8 tekeresből és 9 ferromágneses zárótagból. A tárcsa és a fluxus-vezető gyűrűk közötti rést MR folyadék tölti ki. Gerjesztett állapotban az MR folyadékban szuszpendált részecskék lánccá állnak össze, mely a határoló felületekhez tapadva megakadályozza azok relatív elmozdulását.



2. ábra. A magnetorheológ tengelykapcsoló vázlatja

2. A MAGNETORHEOLÓG FOLYADÉK FIZIKAI JELLEMZŐI

Az MR tengelykapcsoló legfontosabb része maga a magnetorheológ folyadék. A MRF fő alkotórésze közel gömb alakú, 1-10 μm átmérőjű részecskékből álló ferromágneses vaspor, mely adalékanyaggal ellátott olajban van szuszpendálva. A részecskék közelítőleg gömb alakja gerjesztetlen állapotban kis viszkozitást és az érintkező felületekre nézve csekély koptató hatást jelent. Az adalékanyag fő feladata a részecskék leülepedésének megakadályozása. Ha a MRF-t mágneses térbe helyezzük, a vasrészecskék polarizálódnak és láncokból álló, hálószerű struktúrává állnak össze. Ezek a láncok a folyadék nyírásakor képesek deformálódni (megnyúlni), ezáltal csúsztató feszültséget kifejteni a határoló lapokra, mely érték 30...90 kPa között változik. Az MRF relatív permeabilitása csekély, 5-6 közötti érték. Mágneses tér hiányában a MRF newtoni folyadékként kezelhető. Gerjesztett állapotban a mérnöki alkalmazások számára az (1) összefüggéssel leírható egyszerű Bingham-modell használható az alapvető tulajdonságok jellemzésére (3. ábra).



1. ábra. Az MRF modellje

Két, egymáshoz képest v relatív sebességgel mozgó lap közé helyezett MRF rétegei között gerjesztett állapotban

$$\tau(B, v) = \tau_0(B) + \eta \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

csúsztató feszültséget ébred, ahol
 $\tau_0(B)$ az MRF nyírószilárdságának mágneses indukció nagyságától függő része
 η a folyadék dinamikai viszkozitása
 dv/dy a sebesség-gradiens a résben

3. NÉHÁNY VIZSGÁLANDÓ TERÜLET

A MR tengelykapcsoló újszerűségénél fogva számos tisztázandó elméleti és konstrukciós kérdést vet fel. Csupán néhány kutatási területet említünk az alábbiakban fontossági sorrend nélkül:

- a maximális nyomatékot létrehozó sugár menti $B(r)$ mágneses indukció eloszlás meghatározása adott gerjesztést feltételezve
- a nyomaték növelésének lehetősége a lemezszám sokszorozásával
- a gerjesztési teljesítmény és a nyomaték viszonya
- az MR folyadékréteg optimális vastagsága
- az MR folyadék hőmérsékletének változása a kapcsolási szám függvényében
- a hőmérséklet növekedés nyomatékra gyakorolt hatása
- a lemezek külső és belső sugarának optimális aránya
- a kapcsolási idő minimalizálása a mágneses kör optimalizálásával, a telítődési tartományok és az örvényáramok csökkentésével
- a gerjesztési teljesítmény minimalizálása a mágneses kör, valamint a huzal keresztmetszet optimalizálásával
- a tengelykapcsoló viselkedése megcsúszásakor, az átvihető nyomaték nagysága a relatív szögsebesség függvényében
- az MR folyadék öregedésének hatása
- az MR folyadék tömítésének konstrukciós kérdései.

A továbbiakban csupán az első kérdéskörrel foglalkozunk.

4. OPTIMÁLIS INDUKCIÓ ELOSZLÁS

Az MR tengelykapcsoló tervezésekor alapvető fontosságú cél a maximális nyomaték elérése adott gerjesztés és adott befoglaló méretek (súly) esetén. Mivel a MR folyadék nyírósi-

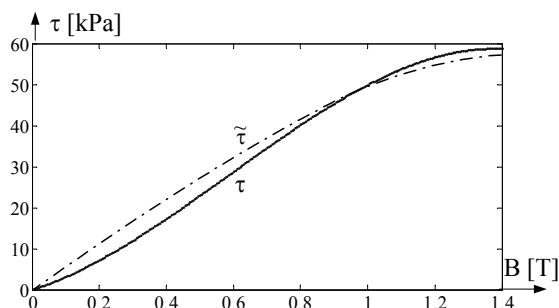
lárdsága a mágneses indukció függvényében adott, ezért a tervezőnek olyan $B(r)$ sugár menti indukció eloszlás megvalósítására kell törekednie, mely az r_0 belső és r_1 külső sugarakkal jellemzett körgyűrű felületen maximális nyomatékot hoz létre. A vizsgálatot egyetlen körgyűrű felületen átvihető nyomaték maximalizálására korlátozzuk. A tengelykapcsoló által egy felületen átvihető nyomaték a

$$T = 2\pi \int_{r_0}^{r_1} \tau(B(r))r^2 dr \quad (2)$$

összefüggéssel számítható. Az egyszerű analitikus megoldás elérése érdekében az MR folyadékot gyártó Lord Corp [4] által közölt $\tau(B)$ függvényt a $0 < B < 1,5$ T tartományban másodfokú parabolával közelítjük az alábbi összefüggés szerint:

$$\tilde{\tau}(B) = K \left[1 - \frac{(B(r) - B^*)^2}{B^{*2}} \right] \quad (3)$$

ahol a legkisebb négyzetek módszerével meghatározott paraméterek értéke $K = 56$ kPa és $B^* = 1,5$ [T] (3. ábra).



3. ábra. Az MRF nyírószilárdsága a mágneses indukció függvényében

Nagyobb mágneses indukció nyilvánvalóan nagyobb nyomatékot eredményez, ezért optimális $B(r)$ eloszlás keresésének csak valamilyen korlátozó feltétel esetén van értelme. Jelen esetben ez a feltétel lehet a mágneses kör

$$\Phi = 2\pi \int_{r_0}^{r_1} B(r)r dr \quad (4)$$

fluxusa, amely arányos a tengelykapcsoló gerjesztésével, áttételezen pedig a gerjesztés fenntartásához szükséges villamos teljesítménnyel. A feladat tehát adott fluxus (gerjesztés), mint

feltétel esetére meghatározni a maximális átvihető nyomatékot létrehozó $B(r)$ függvényt. Mivel jelen esetben egy konkrét mennyiséget (az átvihető nyomatékot) kell maximalizálni egy egyelőre ismeretlen függvénnyel, ezért a kitűzött feladat variációs számítással oldható meg. A feltételes szélsőérték feladatot visszavezethetjük feltétel nélküli szélsőérték feladatra a λ Lagrange-multiplikátor alkalmazásával. Az

$$F[B(r)] = \int_{r_0}^{r_1} [\tilde{\tau}(B(r))r^2 + \lambda B(r)r] dr \quad (5)$$

nyomaték és fluxus értékekből képezett funkcionálnak szélsőérték esetén ki kell elégítenie a

$$\frac{d}{dr} \frac{\partial F}{\partial B'} - \frac{\partial F}{\partial B} = 0 \quad (6)$$

Euler-Lagrange differenciálegyenletet. Mivel az F funkcionál nem függ B deriváltjától, az optimális indukció eloszlás (6)-ból egyszerűen számítható:

$$B_{\text{opt}}(r) = B^* + \frac{\lambda B^{*2}}{2Kr} \quad (7)$$

Az összefüggésben szereplő λ multiplikátor értékét azon feltételből határozhatjuk meg, hogy a $B_{\text{opt}}(r)$ indukció eloszlással számított fluxus egyenlő legyen egy előre választott, állandó értékű \bar{B} indukció által ugyanakkora felületen létrehozott fluxussal:

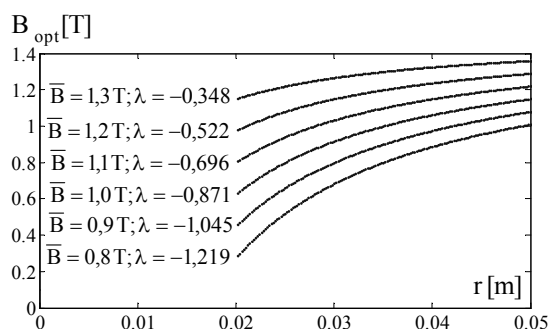
$$\Phi = \bar{B}(r_1^2 - r_0^2)\pi = 2\pi \int_{r_0}^{r_1} B_{\text{opt}}(r)r dr \quad (8)$$

A Lagrange-multiplikátor értéke innen kifejezhető:

$$\lambda = \frac{K(r_0 + r_1)}{B^{*2}} (\bar{B} - B^*) \quad (9)$$

A multiplikátor negatív értékű a megengedett $B < 1,5$ [T] tartományban. A maximálisan átvihető nyomatékot eredményező indukció eloszlást szemlélteti a 4. ábra. A lemez külső sugara $r_1 = 0,05$ m, a belső sugara pedig $r_0 = 0,02$ m volt. Az átlagos indukció értékét $\bar{B} = 0,8 \dots 1,3$ [T] határok között változtattuk. A diagramból megállapítható, hogy kisebb átlagos mágneses indukció esetében az optimális mágneses induk-

ció erősebben változik, a forgástengelyhez közeledve egyre csökken. Nagy átlagos mágneses indukció esetén az optimális mágneses indukció eloszlás közel állandó, jó közelítéssel megegyezik az átlagos mágneses indukció értékével.



4. ábra. Optimális sugár menti indukció eloszlás különböző átlagos indukció értékeknél

A kérdés most az, hogy mennyivel növekszik a tengelykapcsoló átvihető nyomatéka az imént meghatározott optimális $B_{opt}(r)$ eloszlás esetén az állandó, \bar{B} értékű indukcióval számított nyomatékhoz képest. Tekintsük példaként a $r_0=0,02\text{m}$ és $r_1=0,05\text{m}$ sugarú, egyetlen lemezfelülettel átvihető nyomatékot $\bar{B}=0,8\text{ T}$ állandó értékű, illetve az optimálisnak tekintett, (7) összefüggéssel számított

$$B(r) = 1,5 - \frac{0,0245}{r} \quad (10)$$

mágneses indukció eloszlás esetén. Az állandó mágneses indukcióval számított nyomaték (2) szerint

$$T = 2\pi \cdot 56000 \left(1 - \frac{(0,8 - 1,5)^2}{1,5^2}\right) \int_{0,02}^{0,05} r^2 dr = 10,7 \text{ Nm}$$

Az optimális indukció eloszlással számított nyomaték pedig

$$T_{opt} = 2\pi \int_{r_0}^{r_1} \tau(B(r)) r^2 dr = 2\pi \cdot 56000 \cdot \int_{0,02}^{0,05} \left(1 - \frac{0,0245}{r} - 1,5\right)^2 r^2 dr = 10,9 \text{ Nm}$$

Az optimális indukció eloszlás valóban nagyobb nyomatékot eredményez, azonban az elérhető nyomatéknövekedés mindössze 1,6%.

Mint láttuk, a nyomaték növelését az indukció eloszlással sajnálatosan alig lehet befolyásolni, tehát más utat kell választani. A nyomaték fokozásának egyik lehetséges útja a lemezsám növelése, ami viszont a szükséges gerjesztési teljesítményt is növeli. A lemezsám növelésével az MRF nagy mágneses ellenállása következtében az indukció eloszlás egyre egyenletesebbé válik a sugár mentén. Szimulációs vizsgálataink szerint a lemezsámot nem célszerű 30 fölé növelni, mert akkor a nyomaték/gerjesztési teljesítmény viszonya rohamosan csökkenni kezd.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A magnetorheológ tengelykapcsoló elméleti jellegű kérdései közül a maximális nyomatékot eredményező sugár menti mágneses indukció eloszlás analitikus meghatározásával foglalkoztunk. A vizsgálatokból kiderült, hogy reális méret és gerjesztés tartományban az optimális és az állandó értékű indukció eloszlás által létrehozható nyomaték között nincs számottevő különbség. Célszerű tehát eleve az egyszerűbben létrehozható, sugár mentén állandó nagyságú mágneses indukciót megvalósítani.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk a TAMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003 Mobilitás és környezet: Járműipari, energetikai és környezeti kutatások a Közép- és Nyugat-Dunántúli Régióban projekt keretében készült. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

7. IRODALOM

- [1] Lampe, D.: Anwendung von Magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen, www.donnerflug.de/publikationen/antrieb.pdf
- [2] B.M. Kavlicogu, F. Gordaninejad, C.A. Evrensel, N.Cobanoglu, Y. Liu, A. Fuchs: A high-torque magneto-rheological fluid clutch. Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures, San Diego, 2002.
- [3] Gratzner, F, Steinwender, H, Kusej, A: Magnetorheologische Allradkupplungen. ATZ, Jahrgang 10, 2008. p. 902-909.
- [4] www.lord.com/Products-and-Solutions