



Pannon Egyetem
Vegyésmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

Elektroreológiai és magnetoreológiai fluidumok szerkezete és mechatronikai alkalmazásai

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

Mester Sándor
okleveles mechatronikai mérnök

Témavezető:

Dr. Szalai István
egyetemi tanár

2023

Bevezetés

Az intelligens, vagy adaptív anyagok az anyagok olyan csoportját alkotják, melyek előre meghatározható módon megváltoztatják egyes tulajdonságaikat megfelelő külső hatásra [1]. A kis dielektromos permittivitású folyadékban nagyobb permittivitású részecskék diszpergálásával létrehozott elektoreológiai [ER] folyadékokat Winslow írta le először 1949-ben [2]. Ezen folyadékok esetén a viszkozitás megváltozása a diszperzió szerkezeti átalakulásából következik. Megfigyelhető, hogy az elektromos tér hatására a részecskék párokba tömörülnek, majd láncokat, oszlopos szerkezetet alkotnak. A hatás reverzibilis [3]. Az elektoreológiai folyadékok alapvetően egy hordozóanyagból, és egy diszpergált fázisból állnak, valamint adalékanyagokat is tartalmazhatnak pl. a stabilitás növelésének érdekében [4]. A magnetoreológiai (MR) folyadékok az elektoreológiai folyadékokhoz sok tulajdonságban és felhasználási módban hasonlítanak. A magnetoreológiai folyadékok is az intelligens anyagok közé tartoznak, melyeknek különleges tulajdonsága, hogy külső mágneses tér hatására megváltoztatják reológiai tulajdonságaikat [5]. A MR folyadékokról és első felhasználási módjukról Jacob Rabinow [6] publikált, MR folyadékkal működő tengelykapcsolókat ismertetett. A magnetoreológiai folyadékok lágymágneses, mikrométeres átmérővel rendelkező részecskék folyadékba való diszpergálásával készülnek [7]. A részecskék méretükből adódóan nem monodoménus szerkezetűek, azaz több mágneses doménnel rendelkeznek, így önálló mágneses dipólusmomentummal nem rendelkeznek. A magnetoreológiai folyadékok az alapfolyadékból, vagy folyékony fázisból, a benne diszpergált részecskékből, vagy diszpergált fázisból, és adalékanyagokból állnak, hasonlóan az elektoreológiai folyadékokhoz. Az adalékanyagok főleg a részecskék kiülepedését, és a részecskék agglomerációját hivatottak megakadályozni. A lágymágneses részecskék nem állhatnak össze nagyobb részeket alkotva, mivel így a gyorsulna a kiülepedés, a rendszer stabilitása megszűnne. Ebből következik, hogy az ER folyadékokkal ellentétben, ahol felületaktív, vagy más adalékanyag nélkül is lehet egyszerű folyadékot létrehozni, a legegyszerűbb, szilikonolajat és mágneses részecskét tartalmazó MR folyadékhoz is adnak felületaktív anyagot [8].

Az elektoreológiai folyadékok felhasználása azon tulajdonságukon alapszik, hogy külső elektromos térrel reverzibilisen változtatható a látszólagos viszkozitásuk. A kémiai és biológiai területén hatóanyagok célba juttatása és helyben tartása lehet cél. A viszkozitás változtathatóságát sok esetben nyomtérítésként alkalmas eszközök, fékek, lengéscsillapítók felfüggesztések működéséhez használják fel. Az ER folyadékoknak három alapvető technikai felhasználási módját állapították meg: azt, melynél a folyadék felületek közötti nyírása valósul meg; amelyiknél a folyadék szelep módján működtetve az áramlást befolyásolja, és amely esetben a folyadékot összenyomásnak teszik ki [9]. Az MR folyadékok hasonló területeken használhatók fel. Az ipari felhasználási módok között találkozni lehet épületek, járművek, szerszámgépek és hidak lengéscsillapítóival, fékekkel, és alkalmazzák polírozási anyagként is [10]. Kevésbé elterjedt, de alkalmazott felhasználás is ismert kémiai és optoelektronikai jeladóként, hidraulikai szelepekben és tömítésként is [11].

Célkitűzés

A lágy intelligens folyadékok felhasználását befolyásolja az alkalmazott berendezés felépítése, így a kutatás célja a gyakorlati felhasználást meghatározó paraméterek vizsgálata volt. A kísérleti munka során három nagyobb cél került kitűzésre. Megvizsgálom a mono- és bidiszperz láncokban ható erőket. Vizsgálom a nyírt folyadék melegedését térerősség hatása mellett. Magnetoreológiai tengelykapcsolót fejleszték, vizsgálom az átvitt nyomaték nagyságát, és a nyomatékátviteli időállandót.

Elméleti munka

Az első témakör az elektorreológiai folyadékok láncokban ható erőkkel foglalkozik, ami a gyakorlati felhasználások szempontjából is lényegesek. Az elméleti kutatás során megvizsgáltam a végtelen monodiszperz láncban ható erőket, majd zárt formulát adtam a monodiszperz véges láncban, valamint a bidiszperz véges és végtelen láncokban ható erőkre. Levezettem bidiszperz lánc esetén a láncban lévő helyi térerősségeket, valamint vizsgáltam a dielektromos állandó változását a bidiszperz láncokat tartalmazó ER folyadékokban.

Kísérleti munka

A második fejezetben az elektorreológiai folyadékok hőmérséklet-emelkedésének viszkozitásra gyakorolt hatását kutattam. Reométeren végzett mérések alapján az Andrade egyenlet módosításával új összefüggést adtam, mely leírja az elektorreológiai folyadékok viszkozitásának változását a hőmérséklet és az elektromos térerősség függvényében. A formulát egy elektorreológiai tengelykapcsoló melegedésének matematikai modelljén vizsgáltam.

A harmadik téma a magnetoreológiai tengelykapcsolók nyomatékátviteli időállandójának vizsgálata. Egytárcsás és többtárcsás tengelykapcsolók tervezése és építése után az egytárcsás tengelykapcsolónál egységugrás gerjesztéssel vizsgáltam az időállandót, és a matematikai modellje alapján összefüggést adtam a leírására. Többtárcsás tengelykapcsoló esetén rámpafüggvény gerjesztés hatását vizsgáltam. A kutatás célja az időállandók leírása volt a mágneses tér függvényében, hogy a gyakorlati felhasználáskor pontosabban lehessen vezérelni a tengelykapcsolót.

Új tudományos eredmények, tézisek

1. Elméleti számítással vizsgáltam a monodiszperz és bidiszperz elektoreológiai folyadékok véges és végtelen láncokban fellépő erőket, valamint a bidiszperz láncokat tartalmazó ER folyadék dielektromos állandó változását. (Vonatkozó publikációk: [C2], [K1])
 - 1.1. Bidiszperz lánc belső, elektromos térerősségére új összefüggést vezettem le. A két különböző méretű részecske arányában ($\sigma_B/\sigma_A = 1 \dots 10$) vizsgálva a helyi elektromos térerősséget megállapítottam, hogy a kisebb részecskénél növekszik jobban a helyi térerősség.
 - 1.2. A helyi térerősséget felhasználva vizsgáltam a bidiszperz láncban ható erőket. A helyi térerősségekre új formulákat vezettem le bidiszperz lánc esetén, megmutatva azok aszimptotikus viselkedését. Megmutattam, hogy a monodiszperz láncra hasonlóan a véges láncra levezetett összefüggés alacsony részecskeszámok esetén alacsonyabb értéket számít az erőre, mint a végtelen bidiszperz láncra vonatkozó egyenlet. Megállapítottam, hogy a bidiszperz láncban ható erő értéke az azt alkotó részecskékből álló, monodiszperz láncokban ható erők között helyezkedik el.
 - 1.3. Aszimptotikus egyenleteket vezettem le a $\sigma_B/\sigma_A \rightarrow \infty$ határesetben a helyi térerősségekre. Megmutattam, hogy a bidiszperz lánc helyi térerősségeire bevezetett formulák alapján számolt érték megegyezik a határértékszámítás eredményeivel.
 - 1.4. Bidiszperz ER folyadék esetén a Clausius-Mosotti egyenletből kiindulva megvizsgáltam a dielektromos permittivitás változását két különböző koncentrációt alkalmazva. Megállapítottam, hogy a vegyes, bidiszperz láncokat tartalmazó ER folyadék esetén a dielektromos állandó változása az alkotó részecskékből álló monodiszperz láncokat tartalmazó ER fluidum esetén tapasztalható változások közé esik.
2. Anton Paar Physica MCR301 rotációs viszkoziméteren végzett mérések alapján az Andrade egyenlet bővítésével új összefüggést vezettem be az elektoreológiai folyadékok viszkozitásának hőmérséklet- és térerősségfüggésére. (Vonatkozó publikációk: [K2], [K4])
 - 2.1. Három különböző koncentrációjú (10, 20 és 30 m/m%), szilícium-dioxid részecskékből ($\sigma \approx 5 \mu\text{m}$) és polidimetil-sziloxánból álló ER folyadék esetén mértem temperált környezetben a viszkozitást, $T = 293 \text{ K}$ hőmérséklettől $T = 343 \text{ K}$ hőmérsékletig. Az alkalmazott elektromos térerősséget 0 és 1769 kV/m között változtattam. A mérési eredményeket az általam bevezetett összefüggéssel számolt eredményekkel összehasonlítva megállapítottam, hogy az új formula jól írja le a viszkozitás hőmérséklet- és térerősség függését, az eltérések átlagos értéke 10%-os diszperziónál 1,26%, 20%-osnál 3,02%, 30%-os diszperzió esetében 2,73%.
 - 2.2. A bevezetett összefüggést egy elméleti ER tengelykapcsoló modell hőmérséklet-emelkedésének vizsgálatához alkalmaztam. A modellhez a $h = 0,04 \text{ m}$, $r = 0,0133 \text{ m}$, $s = 0,0113 \text{ m}$, $\omega = 4,057 \text{ rad/s}$ és $C = 0,05 \text{ J/K}$ adatokat használtam. A hőmérséklet-változás leírására felírt differenciálegyenletet numerikus módon és sorfejtés alkalmazásával analitikus módon is megoldottam. Megállapítottam, hogy a sorfejtésből az első 5 tag figyelembe vételével már a numerikus számításnál kapott érték érhető el.

Megmutattam, hogy ugyanarra a hőmérsékletre gyorsabban következik be a melegedés a koncentráció és a térerősség növekedésével.

3. Saját fejlesztésű egytárcsás és többtárcsás MR tengelykapcsolók nyomatékátvitelét és nyomatékátviteli időállandóit vizsgáltam különböző MR folyadékok és gerjesztések esetén. (Vonatkozó publikációk: [C1], [K3])

- 3.1. Egytárcsás tengelykapcsolónál Lord MRF-122EG, MRF-132DG, MRF-140CG és 190521-1+20Fe folyadékokat vizsgáltam 11,5 és 46,5 l/perc fordulatszámok, valamint 91 és 155 kA/m mágneses térerősségek mellett. Egységugrás gerjesztést alkalmazva számítottam a nyomatékátviteli időállandót a vizsgált paraméterek és folyadékok esetén.

Megállapítottam, hogy a nyomatékátviteli időállandó az egytárcsás tengelykapcsoló esetében kis mértékben függ csak a fordulatszámtól. Az időállandó értéke a mágneses térerősség növekedésével a fordulatszám függvényében csökkenő tendenciát mutat.

- 3.2. Többtárcsás tengelykapcsolónál megállapítottam, hogy a több folyadékréteg miatt az átvihető nyomaték nagyobb ugyanazt a térerősséget alkalmazva, mint az egytárcsás tengelykapcsoló esetén. Megmutattam, hogy a rámpafüggvény módszer alkalmas MR tengelykapcsolók nyomatékátviteli késleltetési idejének meghatározására.

Bemutattam, hogy rámpafüggvény alkalmazása esetén a késleltetési idők csökkennek a rámpa meredekségének növelésével, míg a fordulatszámtól kevésbé függenek. A teljes késleltetési időt mechanikai, elektronikai és folyadék időállandókra bontva megállapítottam, hogy a mechanikai és elektronikai időállandó független az alkalmazott rámpafüggvény meredekségétől, de befolyásolják a teljes késleltetési időt.

Tézispontok alapjául szolgáló tudományos publikációk, előadások és poszterek

- [C1] **Mester, S.**; Horváth, B., Lukács, A. and Szalai, I.: Investigation of the torque transmission time constant of a multi-disc magnetorheological clutch in the case of ramp function excitation, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (1757-8981 1757-899X): 1246 1 p. 012005. (2022)
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012005>
- [C2] **Mester, S.**; Horváth, B. and Szalai, I.: Polarizabilities and electric field-induced forces in periodic two-component linear dielectric sphere chains, Journal of Molecular Liquids, 370 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120939>
- [C3] **Mester, S.** and Szalai, I.: Temperature and Electric Field Dependence of the Viscosity of Electrorheological (ER) Fluids: Warming up of an Electrorheological Clutch, Hungarian Journal of Industry and Chemistry (0133-0276 2450-5102): 48 2 pp 59-64 (2020)
<https://doi.org/10.33927/hjic-2020-29>
- [K1] **Mester, S.** és Szalai, I.: Az elektorreológiai folyadékok alkalmazása felületi megmunkálásra: a láncképződés vizsgálata, In: Biró, K. Á.; Sebestyén, P. Gy (szerk.) ENELKO 2016 - XVII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2016 - XXVI. Nemzetközi Számítástechika és Oktatás Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2016) pp. 94-98., 5 p., ENELKO, Kolozsvár, Románia, 2016. október 6-9.
- [K2] **Mester, S.** és Szalai, I.: Elektorreológiai folyadékok viszkozitásának hőmérséklet- és térerősség függése, In: Bíró Károly-Ágoston ; Sebestyén-Pál György (szerk.) ENELKO 2017: XVIII. Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2017: XVII. Nemzetközi Számítástechika és Oktatás Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2017) pp. 77-82., 6p., ENELKO, Nagyvárad, Románia, 2017. október 12-15.
- [K3] **Mester, S.** és Szalai, I.: Magnetoreológiai tengelykapcsoló nyomatékviteli időállandójának vizsgálata, In: Barabás, István (szerk.) XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019, Erdélyi Magyar Tudományos Társaság (EMT), (2019) pp. 348-351., 4 p. Nagyvárad, Románia, 2019. április 25-28.

Egyéb tudományos publikációk, előadások

1. Decsi, P.; Bors, Á.; Kocsor, P.; Vörös, B.; Horváth, B.; Guba, S.; Gugolya, Z.; **Mester, S.**; Szalai, I.; A Framework for Demonstration Devices Used in Distance-Learning Environments, Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 49 (1) pp 17-21 (2021)
DOI: <https://doi.org/10.33927/hjic-2021-03>
2. **Mester, S.** and Szalai, I: Torque Transmission Time-Constant Examination of a Disk-Type Magnetorheological Clutch, Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 48 (2) pp 59-64 (2020)
DOI: <https://doi.org/10.33927/hjic-2020-12>
3. Decsi, P.; **Mester, S.** and Szalai, I.: Tárcsás magnetoreológiai tengelykapcsoló modellezése, a rendszer időbeli viselkedésének vizsgálata, In: Barabás, István (szerk.) XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2018,,: Erdélyi Magyar Tudományos Társaság (EMT), (2018) pp. 91-94., 4 p. Marosvásárhely, Románia, 2018. április 26-29.
4. Kapuváry, B.; Molnár, G; **Mester, S.**; Horváth, B. and Szalai, I.: Magnetoreológiai tengelykapcsoló tervezése, építése és nyomatékátvitelének vizsgálata, In: Barabás, István (szerk.) XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2018,,: Erdélyi Magyar Tudományos Társaság (EMT), (2018) pp. 236-239., 4 p. Marosvásárhely, Románia, 2018. április 26-29.

Irodalmi hivatkozások

- [1] N. Shehata, M.A. Abdelkareem, E.T. Sayed, D.E. Egirani, A.W. Opukumo, Smart Materials: The Next Generation, *Encycl. Smart Mater.* (2022) 288–299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00062-0>.
- [2] W.M. Winslow, Induced fibrillation of suspensions, *J. Appl. Phys.* 20 (1949) 1137–1140. <https://doi.org/10.1063/1.1698285>.
- [3] Y.F. Deinega, G. V. Vinogradov, Electric fields in the rheology of disperse systems, *Rheol. Acta.* 23 (1984) 636–651. <https://doi.org/10.1007/BF01438804>.
- [4] Y.D. Liu, H.J. Choi, Electrorheological fluids: Smart soft matter and characteristics, *Soft Matter.* 8 (2012) 11961–11978. <https://doi.org/10.1039/c2sm26179k>.
- [5] P.J. Rankin, J.M. Ginder, D.J. Klingenberg, Electro- and magneto-rheology, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 3 (1998) 373–381. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(98\)80052-6](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(98)80052-6).
- [6] J. Rabinow, The Magnetic Fluid Clutch, *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 67 (1948) 1308–1315. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1948.5059821>.
- [7] C. Rinaldi, A. Chaves, S. Elborai, X. He, M. Zahn, Magnetic fluid rheology and flows, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 10 (2005) 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2005.07.004>.
- [8] G. Bossis, O. Volkova, S. Lacis, A. Meunier, Magnetorheology: Fluids, Structures and Rheology, in: Springer, Berlin, Heidelberg, 2002: pp. 202–230. https://doi.org/10.1007/3-540-45646-5_11.
- [9] A. Khanicheh, D. Mintzopoulos, B. Weinberg, A.A. Tzika, C. Mavroidis, Evaluation of electrorheological fluid dampers for applications at 3-T MRI environment, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics.* 13 (2008) 286–294. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2008.924043>.
- [10] A. Spaggiari, Properties and applications of magnetorheological fluids, *Frat. Ed Integrita Strutt.* 23 (2012) 57–61. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.23.06>.
- [11] D.H. Read, J.E. Martin, Field-structured chemiresistors, *Adv. Funct. Mater.* 20 (2010) 1577–1584. <https://doi.org/10.1002/adfm.200902286>.