

PANNON EGYETEM

MÉRNÖKI KAR / MECHATRONIKAI INTÉZETI TANSZÉK

VEGYÉSZMÉRNÖKI- ÉS ANYAGTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Intelligens anyagok nemlineáris mágneses és elektromos tulajdonságainak vizsgálata

(Examination of electric and magnetic properties of intelligent
materials)

Decsi Péter

Témavezető: Prof. Szalai István

Tudományág: Műszaki tudományok

Program: Intelligens anyagok és technológiák

Zalaegerszeg, 2026

1. Kivonat

Az intelligens anyagok olyan funkcionális rendszerek, amelyek külső gerjesztésre (elektromos, mágneses, mechanikai vagy hőmérsékleti hatásra) gyorsan és reverzibilisen változtatják meg anyagtulajdonságaikat. Jelen értekezés az intelligens anyagok egy fontos részhalmazára, a mágneses folyadékokra fókuszál, és ezek lineáris és nemlineáris dinamikus mágneses viselkedését vizsgálja váltakozó (AC), illetve váltakozó és egyen (AC+DC) mágneses térben. A vizsgálatok középpontjában a frekvenciafüggő komplex szuszceptibilitás és annak magasabb rendű (harmonikus) összetevői állnak, amelyek közvetlen információt adnak a relaxációs folyamatokról, a kölcsönhatásokról és a telítési nemlinearitásról.

A kísérleti munka során egy saját fejlesztésű, kölcsönös indukciós (differenciáltranszformátoros) AC szuszceptométert valósítottunk meg. A referencia- és mintatekerés differenciális kapcsolása, a precíziós áramgenerátoros gerjesztés, valamint a lock-in detektálás lehetővé teszi, hogy a komplex szuszceptibilitás $\chi^*(\omega)$ spektruma reprodukálhatóan meghatározható legyen. A mérőrendszert kereskedelmi mágneses folyadékokkal validáltuk: Ferrotec EMG700 és EMG900 ferrofluidumokkal, valamint Parker MRF-140CG magnetoreológiai folyadékkal. A ferrofluidumoknál a spektrumok jellegzetes relaxációs viselkedést mutatnak, a mérési adatok kvantitatív jellemzésére Cole–Cole típusú illesztést alkalmaztunk, illetve hőmérsékletfüggő mérések alapján aktiválási energia becslést végeztünk. A magnetoreológiai folyadék esetén a kisméretű közel kvázisztatikus tartomány mellett a nagyfrekvenciás veszteségek és a mérőrendszer torzulásai kiemelt értelmezési szempontot jelentenek.

Az elméleti részben a dipoláris keménygömb (DHS) modell Mean

Spherical Approximation (MSA) leírására építve, a Szalai–Dietrich-féle implicit mágnesezettségi egyenletet térerősség szerint hetedik rendig sorfejtettük, és zárt alakú kifejezéseket adtunk a nemlineáris együtthatókra. A sorfejtés és egy Debye-típusú relaxációs közelítés segítségével analitikus formulákat vezetünk le a dinamikus szuszceptibilitás harmonikus komponenseire tisztán váltakozó térben, majd az elméletet kiterjesztettük AC+DC gerjesztésre. A numerikus összehasonlítások alapján a hetendrendű sorfejtés a mérnöki és kísérleti gyakorlatban releváns gyenge és közepes terekben megbízható közelítést ad (tipikusan $H_0^* < 1.4$), míg erős terekben a telítési nemlinearitás miatt a harmonikusok jellegzetes maximumon át elnyomódnak. A dc előmágnesezés szimmetriasértés révén páratlan felharmonikusokat is létrehoz, nagy dc arány esetén pedig gyakorlatilag „kikapcsolja” a nemlineáris választ, ez a jelenség többek között a mágneses részecske képalkotás (MPI) és a mágneses hipertermia térbeli szabályozásában közvetlenül hasznosítható.

Kulcsszavak: intelligens anyagok; mágneses folyadék; ferrofluidum; magnetoreológiai folyadék; komplex szuszceptibilitás; nemlineáris válasz; felharmonikusok; MSA; lock-in detektálás; AC+DC gerjesztés.

2. Bevezetés, célkitűzések

Az intelligens anyagok fejlesztése és vizsgálata az anyagtudomány egyik dinamikus fejlődő területe. Ezek az anyagok és rendszerek külső gerjesztés hatására (például elektromos vagy mágneses térben, mechanikai igénybevételre vagy hőmérsékletváltozásra) képesek megváltoztatni szerkezetüket és ezáltal makroszkopikus tulajdonságaikat. A szabályozhatóság, a gyors válaszidő és az integrálhatóság miatt az intelligens anyagok számos mérnöki alkalmazásban megjelennek szenzorokként, aktuátorokként, illetve adaptív szerkezeti elemekként.

Az értekezés témája az intelligens anyagok közül a mágneses folyadékokhoz kapcsolódik. A ferrofluidumok és magnetoreológiai (MR) folyadékok olyan diszperz rendszerek, amelyekben mágneses részecskék hordozóközegben vannak elosztatva, és külső mágneses tér hatására a rendszer effektív tulajdonságai jelentősen megváltozhatnak. A mágneses folyadékok esetén a mágneses tér nemcsak egyensúlyi mágnesezettséget hoz létre, hanem a váltakozó gerjesztés miatt dinamikus jelenségeket is gerjeszt: a részecskék orientációja és a mágneses momentumok relaxációja frekvenciafüggő, a válasz fáziskéséssel és disszipációval jár. Ezt a viselkedést a komplex mágneses szuszceptibilitás $\chi(\omega)$ írja le.

A gyakorlati alkalmazások jelentős részében azonban nem elegendő a kis terekre érvényes, lineáris közelítés. Közepes és erős gerjesztés esetén a telítési jelenségek, a dipólus-dipólus kölcsönhatások, valamint a mintaszerkezeti hatások nemlineáris választ hoznak létre, amelynek egyik legfontosabb következménye a felharmonikusok megjelenése. A nemlineáris dinamikus válasz kulcsszerepet játszik több modern technológiában is: a mágneses részecske képalkotásban (MPI) a jel alapja a nemlineáris mágnesezettség, míg a mágneses hipertermiában

a veszteségek és a fűtési hatások aktív szabályozása gyakran DC előmágnesezéssel valósul meg.

A fentiek miatt a mágneses folyadékok dinamikus szuszceptibilitásának vizsgálatához olyan kísérleti és elméleti eszköztár szükséges, amely reprodukálhatóan méri a komplex szuszceptibilitás spektrumát, képes kezelni a nemlineáris válasz harmonikus összetevőit, fizikai paraméterekkel (például sűrűség, dipólusmomentum, hőmérséklet) kapcsolatba hozható, ugyanakkor mérnöki szempontból is használható, egyszerű modelleket ad.

A dolgozat fő célkitűzései az alábbiakban foglalhatók össze:

1. Egy kölcsönös indukción alapuló, lock-in detektálású AC szuszceptométer megépítése és mérési protokoll kidolgozása a mágneses folyadékok komplex szuszceptibilitásának meghatározására.
2. A mérőrendszer validálása és mágneses folyadékok (ferrofluidumok és MR folyadék) spektrumainak értelmezése, különös tekintettel a relaxációs viselkedésre, a nem-Debye jellegre és a mérési korlátokra.
3. MSA-alapú (Mean Spherical Approximation) elméleti leírás kidolgozása tisztán váltakozó mágneses térben: a mágneszettségi egyenlet térerősség szerinti sorfejtése, majd a nemlineáris dinamikus szuszceptibilitás harmonikusainak analitikus meghatározása Debye-típusú relaxációs közelítésben.
4. Az elméleti modell kiterjesztése AC+DC gerjesztésre, a szimmetriasértés és a dc tér okozta harmonikus-szerkezet vizsgálata, valamint a sorfejtés érvényességi tartományának számszerű jellemzése.

3. Tézispontok

1. **Mérési módszer fejlesztése** Kidolgoztam és validáltam egy saját fejlesztésű, kölcsönös indukciós (differenciáltranszformátoros) AC szuszceptométert és mérési protokollt, amelyben a differenciális tekercselrendezés, a lock-in detektálás és a precíziós áramgenerátoros gerjesztés reprodukálható komplex szuszceptibilitás-spektrum meghatározását tesz lehetővé, a validáció során alkalmazható kiértékelési eljárásokat (pl. Cole–Cole illesztés, hőmérsékletfüggésből aktiválási energia becslés) és a mérési korlátokból adódó értelmezési szempontokat is rögzítettem.

Kapcsolódó publikációk: [K1], [C1]

- (a) *Lock-in mérés integrálása*: a szekunder tekercsek differenciális csatolásával a lock-in erősítő fázis- és amplitúdóérzékeny detektálását közvetlenül a mintahatásra érzékeny jelre alkalmaztam, ami stabil, reprodukálható komplex (valós+képzetes) mérési eredményt ad.
- (b) *Mérési tartományok és minta-specifikus korlátok*: a mérési beállításokat a mágneses folyadékok fizikai sajátosságaihoz illesztettem (ferrofluidumoknál tipikusan alacsony frekvenciatartomány és kis térerősség a struktúráképződés elkerülésére).
- (c) *Kiértékelési protokoll*: rögzítettem a komplex szuszceptibilitás spektrumának meghatározási lépéseit (amplitúdó- és fázisinformáció a gerjesztéshez képest), és megadtam azokat a gyakorlati ellenőrzéseket, amelyekkel a mérési torzulások (pl. rendszerhatások) elkülöníthetők.
- (d) *Validáció valós mintákon*: a mérőrendszert kereskedelmi mágneses folyadékokkal validáltam (Ferrotec EMG700,

EMG900 ferrofluidumok, valamint Parker MRF-140CG MR folyadék), és bemutattam a spektrumok értelmezésének fő jellegzetességeit.

- (e) *Relaxációs paraméterek kinyerése:* a ferrofluidum spektrumok kvantitatív jellemzésére Cole–Cole illesztést alkalmaztam, továbbá hőmérsékletfüggő mérésekből aktiválási energia becslést végeztem, összekapcsolva azt a relaxációs mechanizmusokkal és lehetséges szerkezeti hatásokkal.

2. **Elméleti modell váltakozó térben** A dipoláris keménygömbmodell MSA-alapú (Szalai–Dietrich-féle) mágnesezettségi egyenletét térerősség szerint hetedik rendig sorfejtettem és zárt alakú kifejezéseket adtam az együtthathókra, majd ezekből Debye-típusú relaxáció beépítésével analitikus formulákat vezettem le a nemlineáris dinamikus szuszeptibilitás harmonikus komponenseire, továbbá numerikusan kijelöltem a közelítés érvényességi tartományát (gyenge mezőkben a negyedik harmonikusig jól használható, nagyobb mezőkben a konvergencia romlik).

Kapcsolódó publikációk: [K2], [C2]

- (a) *Fizikai paraméterkapcsolat:* rögzítettem a dipoláris keménygömbmodell MSA-alapú levezetését, és megmutattam, hogy a sorfejtés együtthathói közvetlen kapcsolatban állnak fizikai paraméterekkel (pl. sűrűség, dipólusmomentum, hőmérséklet).
- (b) *Hetedrendű sorfejtés:* az implicit egyenletet hetedik rendig sorba fejtettem, szimmetria miatt a spontán mágnesezettség és a páros hatványtagok kiesnek, így a releváns nemlineáris együtthathók m_1, m_3, m_5, m_7 adódnak.

- (c) *Statikus–dinamikus kapcsolat és harmonikusok*: megadtam azt a formális kapcsolatot, amellyel a térerősség-függő (statikus) szuszceptibilitásból a dinamikus válasz Fourier-komponensei (0., 2., 4., 6. harmonikus) analitikusan előállíthatók, és bemutattam a harmonikus amplitúdók térerősség-skálázódását.
- (d) *Debye-típusú relaxáció beépítése*: a statikus MSA-eredményeket Debye-típusú relaxációval kiterjesztettem a komplex, frekvenciafüggő esetre úgy, hogy a statikus együtthatók komplex mennyiségekké válnak.
- (e) *Konvergencia és érvényességi tartomány*: numerikusan elemeztem a sorfejtés konvergenciáját, igazoltam, hogy gyenge mezőkben a közelítés kiváló, közepes mezőkben a magasabb harmonikusok érzékenyebbek, és a harmonikus-szám növekedésével a konvergencia romlik.

3. **Sorfejtett modell AC+DC térben** A hetedrendű MSA-sorfejtésen nyugvó leírást AC+DC gerjesztésre általánosítottam, és az $n \leq 4$ harmonikusokra a gyakorlatban közvetlenül használható analitikus spektrum-formulákat adtam, numerikus összevetéssel igazoltam, hogy a közelítés közepes térerősségig megbízható ($H_0^* < 1,4$, tipikusan 0–25 kA m⁻¹), valamint megmutattam, hogy a DC bias szimmetriasértés révén páratlan felharmonikusokat is létrehoz, nagy DC aránynál pedig a nemlineáris válasz célzottan „letiltható”.

Kapcsolódó publikáció: [C3]

- (a) *Gerjesztési alak és szimmetriasértés*: az AC+DC tér esetén a mágneses tér alakja $H(t) = H_{\text{dc}} + H_0 \cos(\omega t)$. A DC

komponens szimmetriasértést okoz, ami új harmonikus-szerkezetekhez vezet.

- (b) *Harmonikus komplex szuszeptibilitások:* a sorfejtett elméletből a lineáris és az $n = 1 \dots 4$ harmonikus komplex szuszeptibilitásai ($\hat{\chi}_0, \hat{\chi}_\omega, \hat{\chi}_{2\omega}, \hat{\chi}_{3\omega}, \hat{\chi}_{4\omega}$) közvetlenül számíthatók analitikus formulák segítségével.
- (c) *Pontosság egzakt referenciához képest:* kvantitatív összevetéssel kimutattam, hogy tipikus bias arány mellett (pl. $H_{dc}^*/H_0^* = 0,2$) $H_0^* \approx 1$ esetén a sorfejtés és az egzakt megoldás spektrumai gyakorlatilag fedésben vannak (a vizsgált komponenseknél 1% alatti eltéréssel).
- (d) *Érvényességi tartomány:* megadtam azt a tartományt, ahol a sorfejtés még megbízható ($0 \leq H_0^* \leq 1,4$), és ezt kísérleti paraméterekre átszámítva a tipikus 0–25 kA m⁻¹ mezőtartománnyal is összekapcsoltam.
- (e) *A sorfejtés korlátainak azonosítása:* rámutattam, hogy nagyobb térerősségek esetén a sorfejtés műtermékeket (lokális maximumok, oszcillációk) mutathat, amelyek az egzakt megoldásban nem jelennek meg, ezért erős terekben a közelítés nem alkalmazható korrekció nélkül.

4. **Egzakt modell AC+DC térben** Meghatároztam a mágneszettség egzakt időfüggvényét az implicit MSA-egyenlet $H(t) = H_{DC} + H_{AC} \cos(\omega t)$ gerjesztés melletti iteratív numerikus megoldásával, majd az így kapott időfüggvényt (valós jelként kezelve) Fourier-analízissel spektrummá alakítottam, és ebből számítottam a harmonikus szuszeptibilitásokat. Az egzakt megoldást referenciaalaként használtam a sorfejtett

leírás pontosságának kvantitatív ellenőrzésére és az erős-térbeli telítési jellegzetességek értelmezésére.

Kapcsolódó publikáció: [C3]

- (a) *Egzakt időfüggvény előállítás:* az MSA-időfüggvényt numerikusan határoztam meg az AC+DC gerjesztés mellett, és bemutattam a $H(t)$ és $M(t)$ időbeli alakulását különböző paramétereknél.
- (b) *Spektrumképzés és harmonikusok:* a mágneszettségi időjelből gyors Fourier-transzformációval spektrumot képeztem, ennek amplitúdóiból számítottam az alapösszetevő és felharmonikusok hozzájárulásait, majd ezekből a harmonikus szuszceptibilitásokat.
- (c) *Referenciaként történő felhasználás:* az egzakt spektrumot a sorfejtett formulák pontosságának ellenőrzésére használtam, és ezzel számszerűen is alátámasztottam a sorfejtés alkalmazhatóságát gyenge–közepes mezőkben, illetve a telítési nemlinearitás megjelenését erősebb mezőkben.

4. Kapcsolódó publikációk jegyzéke

Folyóiratcikkek

[C1] Horváth, B., Decsi, P. és Szalai, I. (2022). Measurement of the response time of magnetorheological fluids and ferrofluids based on the magnetic susceptibility response. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 33(7), 918-927. <https://doi.org/10.1177/1045389X211038697>

[C2] Horváth, B., Decsi, P. és Szalai, I. (2022). Nonlinear contributions to the dynamic magnetic susceptibility of magnetic fluids. *Journal of Molecular Liquids*, 359, 119279. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2022.119279>

[C3] Horváth, B., Guba, S., Decsi, P. és Szalai, I. (2026). Nonlinear dynamic susceptibility of magnetic fluids insymmetry breaking dc magnetic fields. *Journal of Molecular Liquids*, (Bírálat alatt, kézirat száma: MOLLIQ-D-25-05858)

Konferenciaközlemények

[K1] Decsi, P. és Szalai, I. (2020). Alacsony frekvenciás AC szuszceptométer mágneses folyadékok komplex szuszceptibilitásának mérésére. In I. Barabás (Ed.), XXI. Energetika-Elektrotechnika - ENELKO és XXX. Számítástechnika és Oktatás - SzámOkt Multi-konferencia (pp. 29-33). Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság - EMT.

[K2] Horváth, B., Decsi, P. és Szalai, I. (2022). Nonlinear dynamic susceptibility of magnetic fluids in symmetry breaking dc magnetic fields. In: Chemistry, Physics and Biology of Colloids and Interfaces: Book of Abstracts pp. 40-40. , 1 p.