

NYÁRI MARCO¹

EKÖP-KDP Tanulmánykötet

Villamos gép lágymágneses paramétereinek karakterizációja méréstani és
szimulációs módszerekkel

1. Motiváció

A korszerű villamos forgógép fejlesztése során napjainkban már nem csak a kívánt teljesítmény-nyomaték görbe vagy a megfelelő hatásfok elérése áll a középpontban, hanem a megfelelő vibroakusztikai viselkedés kialakítása is. Ez több szempontból is fontos. Az egyik megközelítés az, hogy a nem kívánt növekvő elektromágneses gerjesztőerők káros dinamikus igénybevételnek teszik ki a villamos gép csapágyazását, tengelyét, felfüggesztését, rögzítési pontjait egyszerűen a mechanikai struktúráját. Ennek hatására a mechanikus alkatrészek hamarabb érik el a kifáradási határfeszültséget ezzel csökkentve a rendszer hasznos üzemidejét, élettartamát. A másik megközelítés az, hogy ezen villamos forgógépektől elvárjuk azt, hogy az üzeméből adódó környezeti zajterhelés minimális legyen. Ezért a járműipar egyik, hanem a legfontosabb kulcsteljesítmény mutatója a kívánt zajszint elérése mind önálló egységként mind a járműbe beszerelve hiszen ez a felhasználó komfortérzetéhez hozzájárul üzemeltetés közben.

Ezeknek a vibroakusztikai jellemzőknek a minimalizációjára különféle megfontolásokat vezettek be a villamos gép fejlesztése során. Például milyen pólus-horonyszám párok kritikusak, illetve melyek azok, amelyek nem a gerjesztés szempontjából. Emellett természetesen az állórész slot nyitása, fogak alakja vagy a forgórészen elhelyezett mágnesek pozíciója, fluxus útvonal kialakítása is segítheti ezen gerjesztések csökkentését. Természetesen nem szabad megfeledkezni a motor szabályzó körének megfelelő hangolásáról és a hozzá tartozó teljesítmény elektronika kapcsolóelemeiről vagy akár az kivezérelt állórész áram felharmonikusairól. Mindent figyelembe véve a tervezőasztalon megszületett szimulációs modell merőben eltérhet a realizált villamos gép viselkedésétől. Ez annak is köszönhető, hogy a felépítéshez szükséges kemény és lágymágneses anyagok sem tökéletesen homogének hiába geometriailag teljesítik az elvárt követelményeket.

¹Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Prof. Dr. Kuczmann Miklós, egyetemi tanár, Dr. Németh Zoltán, adjunktus, Vállalati szakértő: Bajtek András, Munkáltató: Robert Bosch Kft.

Továbbá, ha egy állórészre vizsgálunk akkor a megmunkálás és beszerelés során addicionális stressz hat a villamos acélra, ami módosíthatja lokálisan és globálisan is a mágneses paramétereit.

Ezek az inhomogenitások mágneses aszimmetriát okoznak a mágneskörben, amik szintén hozzájárulnak a rossz vibroakusztikai jellemzők kialakulásához. Ha mágneses szempontból vizsgáljuk a légrést akkor az tapasztalható, hogy az indukció harmonikus tartalma növekszik a kerület mentén. Jelen kutatás fókuszában a villamos forgógép lágymágneses állórész teljeskörű karakterizációja áll. Ez alatt értendő a szabványokban meghatározott Epstein teszteken túl a valós applikációhoz közel álló zártmágnesköri karakterizáció kutatását és mérési módszertan kifejlesztését. Ebben a reprezentációban a különböző megmunkálásoknak köszönhető állórész mágneses aszimmetriák által okozott légérs harmonikusok identifikációja lehetővé válik.

2. Kutatási módszertan bemutatása

- a) **Irodalomkutatás:** A kutatás során folyamatos és tervszerű irodalomkutatás elvégzése szükséges. Ezt időrendileg súlyozva kell bevezetni a projektbe. Ez azt jelenti, hogy minden szemeszter elején egy több hétig tartó az előre definiált témakörökből történő intenzív irodalom feldolgozás, kutatás majd a szemeszter hátralévő részében pedig heti rendszerességgel dedikált napokon keresve az újdonságokra.
- b) **Mérési módszertan kidolgozása:** A különböző módszertanok kidolgozása szorosan épül az irodalomkutatás eredményére. Ennek első lépése az ipar által ismert és használt módszerekkel történő mérések reprodukciója, amely empirikus információt ad a módszerek előnyeiről, hátrányairól felhasználhatóságáról. Ebből leszűrt konklúzióval lehetséges a további munka egy új típusú mérési módszertan majd mérőrendszer kifejlesztése.
- c) **Mérési módszertan szimulációs környezetbe implementálása:** A választott JMAG szoftver szimulációs és külső programozási lehetőségeinek megismerése után a már ismert mérési módszertanokból kiindulva kerül felépítésre a szimuláció lépésről lépésre az új típusú módszertanig. Itt is elengedhetetlen az irodalomkutatás során kinyert szimulációs praktikák első körös alkalmazása különösképpen a magneto-mechanikus csatolt szimulációkra.

¹Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Prof. Dr. Kuczmann Miklós, egyetemi tanár, Dr. Németh Zoltán, adjunktus, Vállalati szakértő: Bajtek András, Munkáltató: Robert Bosch Kft.

- d) **Matematikai felírás analitikus megoldásra:** Ahhoz, hogy egy kevésbé erőforrás igényes predikciót, számítást lehessen szolgáltatni ismert hibahatáron belül elengedhetetlen az analitikus megoldás implementálása hiszen létezik olyan topológia, amely jól közelíthető ezzel a módszerrel.
- e) **Matematikai megoldás végeselemes módszer alkalmazására:** A mérésekből nyert adatok utólagos feldolgozásának módszertanával és a JMAG szoftver által kívánt bementei paraméterek figyelembevételével kerül kifejlesztésre egy Matlab alapú szoftver a további elektromágneses térszámításhoz.
- f) **Validáció mérések és szimuláció útján:** Az állórész szintű lágymágneses szimulációkat motor szintű mérésekkel szükséges validálni. Ezek a mérések nem csak a motor üzemi méréseit fedik le, hanem a rezgésspektrumot és a lesugárzott zaj méréseit is.
- g) **Eredmények kiértékelése:** Minden szimulációs és mérési eredmény dokumentálásra kerül. A kiértékelésekhez Matlab és Minitab szoftver használata célszerű mivel statisztikai mennyiségű adatok állnak majd rendelkezésre.
- h) **Konklúzió:** Úgynevezett Mindmap elkészítése a kutatás elejétől szükséges, hogy az összefüggéseket vizualizálni lehessen hiszen a 4 évet felölelő kutatás során számos eredmény áll elő mind szimulációból mind a mérésekből. Ez a gráf támogatja a konklúzió alkotást.
- i) **A disszertációhoz szükséges tézisek megalkotása:** A kezdeti időszakban megfogalmazott tézisek folyamatosan felülvizsgálatra kerülnek az új kutatási eredmények tükrében és amennyiben szükséges azok kissé vagy teljes egészében módosításra kerülnek.



1. ábra: Kutatás teoretikus folyamatábrája

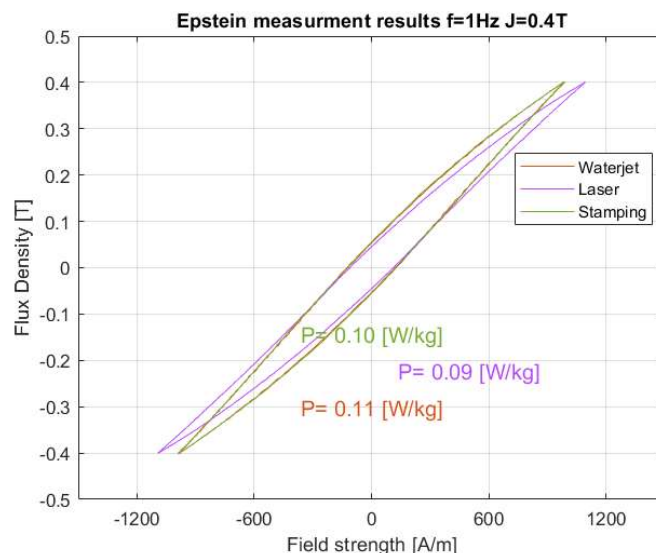
Az éves kutatási tervben meghatározott Epstein mérések kerültek elvégzésre és definiálásra. Az irodalomkutatás és az ipari áttekintés során az M400-50A villamos acélra esett a választás. Ez az egyik legelterjedtebb és legattraktívabb ár-érték arányú lágymágneses anyag. Ebből hengerelt lemez anyagból 280mm x 30mm csíkok kerültek kialakításra 3 fajta megmunkálással az alábbiak szerint:

- Abrázív vizes vágás
- Klasszikus stancolás
- Folytonos lézervágás

A fent kiválasztott módszerek szintén azért kerültek kiválasztásra mert ezek a legelterjedtebbek a fejlesztések során. Ezek közül is a stancolás kiemelkedő, ha a sorozatgyártási költségeket vesszük figyelembe (pl: ciklus idő, szerszám élettartam). Minden megmunkálással két-két mérési szett került kialakításra. A méréseket 0.1T-től 1.6T szinuszos indukció, illetve 1Hz-től 20Hz tartományig kerültek kivitelezésre annak érdekében, hogy a megmunkálás hatását

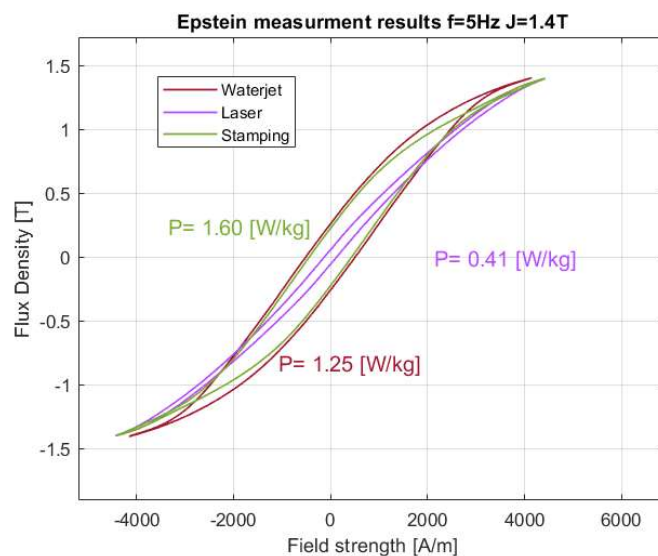
¹Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Prof. Dr. Kuczmann Miklós, egyetemi tanár, Dr. Németh Zoltán, adjunktus, Vállalati szakértő: Bajtek András, Munkáltató: Robert Bosch Kft.

azonosítani lehessen a gép karakterisztikájának kezdeti szakaszától részterheléses tartományon át.



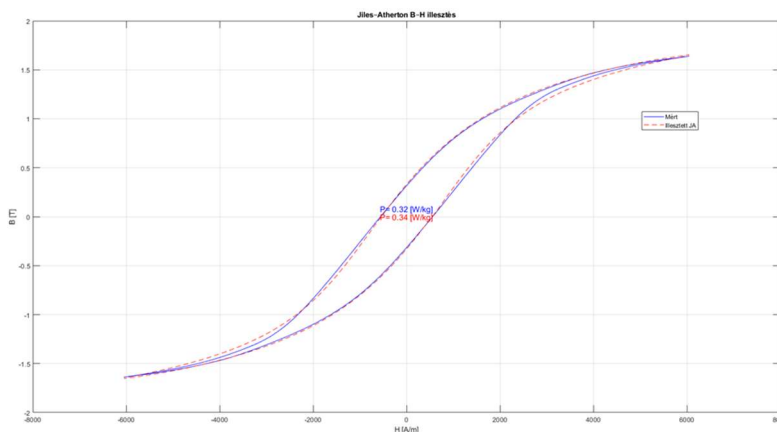
2. ábra: Epstein mérési eredmények $f=1\text{Hz}$ $J=0.4\text{T}$

A mérések kiértékelése során a két-két mintacsomagok, melyek ugyan azzal a megmunkálási típussal készültek el ugyan olyan eredményeket produkáltak 1%-os hibahatáron belül. Ez jó indikáció a mérés ismételhetőségére. A mérések feldolgozásához Matlab alapú scriptek készültek el, amelyek automatizálják a kiértékelést. Az első script a görbék feldolgozására készül, illetve utólagos kondicionálásra. A második a vasvesztés számítására az úgynevezett Steinmetz, illetve Bertotti hiszterézis veszteségi modell alapján. A megmunkálás okozta különbség az egész mérési tartományon látványosan kimutatható. 0.4T-ra szabályozott szinuszos indukció mellett az látható, hogy a vizes vágás és a lézervágás együttesen halad míg a lézer vágás csak nagyobb mágneses térerősség hatására éri el a kívánt indukciót. Vasvesztés tekintetében ebben a tartományban nincs számottevő különbség a megmunkálások között. A következő munkapontokban a három megmunkálással készített mintacsomag eltérő viselkedést mutat. A vizes vágás és a stancolás hiszterézisének területe elkezd növekedni az indukcióval míg a lézer vasvesztése nagyjából harmada marad az előbbi kettőjének. A vizesvágás szaturációs polarizációja a legjobb adott gerjesztésre. Ezt követi a stancolás majd lemaradva a lézer, amely nagyobb gerjesztés mellett éri el az előbbi polarizációját.



3. ábra: Epstein mérési eredmények $f=5\text{Hz}$ $J=1.4\text{T}$

A mérésekhez Matlab alapon elkészített statikus Jiles-Atherton hiszterézis modell és annak illeszkedése látható. A statikus modell 30Hz frekvenciáig jól és pontosan használható. Az e fölötti tartományokban a dinamikus változat került implementálásra és tesztelésre, amely szintén jó egyezést mutatott a mérésekkel.



4. ábra: SJA hiszterézis modell illesztése mért görbére

A tesztek futtatása során minden indukció érték mellett az elvárt hibagörbét produkálta a modell. Az automatizált SJA és DJA modellnek köszönhetően az összes mérésre elkészült illesztések konstansait egy mátrixba majd onnan szintén automatizálva excelbe kerültek kiírtatásra az utófeldolgozás érdekében.

¹Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Prof. Dr. Kuczmann Miklós, egyetemi tanár, Dr. Németh Zoltán, adjunktus, Vállalati szakértő: Bajtek András, Munkáltató: Robert Bosch Kft.

3. Eredmények hasznosulása

A jelen kutatás a villamos gépek lengéstani mágneses szempontból befolyásoló tényezőit, valamint az állórészben különböző üzemállapotokban kialakuló veszteségeit hivatott körüljárni. Ennek során egy komplett mérőrendszer kerül kifejlesztésre, amely képes a lágymágneses inhomogenitások karakterizációja és lokalizációjára. Továbbá matematikai leírást, szimulációs módszertant nyújt a pontosabb végeselemes elektromágneses analízisek kivitelezésére. Az új elméletek és módszertanok, valamint az empirikus tudás bővítése segítheti a lágymágneses, végeselemes térszámítás tudományterületeinek előre mozdítását. Továbbá az egyetem hallgatóit, kutatóit gyakorlati tapasztalatokkal láthatja el, ami táptalajt adhat újabb innovációs tevékenységek, további kutatási irányok kiaknázására. A villamos gép tervezés korai szakaszában visszacsatolást érkezhethet a fejlesztők számára az adott koncepcióról, amelyet felhasználva a különböző mintafázisokat érintő tesztidőket, mintaköltséget nagyban redukálhatják. A kutatás eredményeit felhasználva az ipari szereplőket hozzásegítheti a piacra kerülési idő csökkentéséhez, illetve olcsóbb, gazdaságosabb és jobb minőségű villamos hajtások kifejlesztéséhez.

4. Publikáció

A következőkben részletezésre az éves publikációs ütemterv a kutatás 2 félévét felölelve negyedéves bontásban, valamint bemutatásra kerül a publikációk típusai és azok tervezett helyei.

Publikáció címe	Publikáció helye	Státusz
Investigation of Magnetic Material Characteristic Changes Caused by Machining	Sustainable Mobility and Transportation Symposium 2026	Befogadott abstract (publikálás - 2026 Q2)
Investigation of magnetic material degradation caused by stator manufacturing on NVH and loss characteristics of electric drives	Future of Vehicles: Innovation, Engineering and Economic Conference 2026	Befogadott abstract (publikálás - 2026 Q2)
E-machine stator test system for NVH critical application	Szabadalom	Beadott
Review of the soft magnetic measurement methodology through manufacturing impacts	MDPI	Munkafázis (publikálás - 2026 Q3)
Characterization of the soft magnetic laminations manufactured by different processes using Jiles-Atherton hysteresis model	Physica B	Munkafázis (publikálás - 2026 Q3)
Simulation and experimental measurement of local and global magnetic properties for different manufacturing methods of the lamination	IEEE Transaction on Magnetics	Munkafázis (publikálás - 2026 Q2)

1. táblázat: Publikációs táblázat

¹Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Prof. Dr. Kuczmann Miklós, egyetemi tanár, Dr. Németh Zoltán, adjunktus, Vállalati szakértő: Bajtek András, Munkáltató: Robert Bosch Kft.

5. Felhasznált irodalomjegyzék

- [1] Y. Li, S. Mu, C. Zhang, M. Yang, Core loss measurement and comparative analysis for (Placeholder1)soft magnetic materials under complex non-sinusoidal excitations, AIP Advances, (2023),13, 025048, <https://doi.org/10.1063/9.0000463>
- [2] G. Peng, Y. Li, P. Su, Z. Li, Y. Li, Measurement and analysis of magnetic properties under SVPWM excitation for soft magnetic composites (SMCs) and silicon steel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (2023) 587(6058):171259, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171259>
- [3] S. II Lee, J. Park, S. Kim, Examination of magnetic properties of nonoriented electrical steels using ring-type specimens, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (2022) 557(20):169471, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169471>
- [4] N. Leuning, M. Heller, M. Jaeger, S. Korte-Kerzel, K. Hameyer, A new approach to measure fundamental microstructural influences on the magnetic properties of electrical steel using a miniaturized single sheet tester, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (2023) 583(6):171000, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171000>
- [5] Q. Xiang, L. Cheng, K. Wu, Study on the Single Sheet Measurement Method for AC Magnetic Measurement on Grain-Oriented Electrical Steel, MDPI Materials, (2023), 16(4), 1648, <https://doi.org/10.3390/ma16041648>
- [6] C. Chuan, S. Wentao, Z. Xinhua, Study and Analysis of Yoke Loss of Single Sheet Tester for Magnetic Properties Measurement of Electrical Steel, Metrology Science and Technology, (2022), 66(5): 49-54., <https://dx.doi.org/10.12338/j.issn.2096-9015.2021.0575>
- [7] G. Shilyashki, H. Pfützner, C. Bengtsson, T. Okubo, Physically consistent testing of large-frequency-band magnetic losses of non-oriented electric steel considering dynamic anisotropy, (2023), AIP Advances 13, 055007, <https://doi.org/10.1063/5.0141673>
- [8] G. Shilyashki, H. Pfützner, Repeatability and reproducibility of physically consistent testing of electrical steels by single sheet testers, AIP Advances 14, (2024), 055208, <https://doi.org/10.1063/5.0206343>
- [9] H. Pfützner, G. Shilyashki, C. Bengtsson, E. Huber, Practical Aspects of Instantaneous Magnetization Power Loss Measurement, Journal of Electrical Engineering & Technology, (2023), 18:1273–1282, <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01265-2>
- [10] Y. Dou, Y. Li, S. Yue, Y. Li, J. Zhu, Measurement of alternating and rotational magnetostrictions of non-oriented silicon steel sheets, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (2023), 170566, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170566>