



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Ruff Benedek

**LÁGYMÁGNESES ANYAGOK
HISZTERÉZISGÖRBÉJÉNEK
VIZSGÁLATA**

KONZULENS

Sujbert László

BUDAPEST, 2019

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	5
Abstract	6
1 A dolgozat tartalma	7
2 Elméleti háttér	8
2.1 Mágneses alapjelenségek	8
2.2 Makroszkopikus megközelítés	8
2.2.1 Dia-, és paramágneses anyagok	9
2.2.2 Ferromágneses anyagok	10
2.3 Mikroszkopikus megközelítés	11
2.3.1 Diamágnesség értelmezése	11
2.3.2 A paramágnesség értelmezése	11
2.3.3 A ferromágnesség értelmezése	12
2.4 A mágneses domének	12
2.5 A mágneses hiszterézis	14
2.6 A relatív permeabilitás fajtái	17
2.7 Mágneses Ohm-törvény	17
3 Létező mágneses mérések.....	20
3.1 Gyűrű-minta mérése	20
3.2 Járommal végezhető mérés	24
3.3 Epstein-keret mérés	26
4 Az Epstein-keret ismertetése	28
4.1 A szabványos keret	28
4.2 A saját és a szabványos keret kapcsolata	30
4.2.1 Visszacsatolt erősítés	30
4.2.2 Középvonalhossz pontatlanság	31
4.2.3 Alacsony frekvencia.....	31
4.2.4 Kompenzáló tekercselés	32
5 Mérési elrendezés specifikációja	34
5.1 Az Epstein-keret	34
5.2 A függvénygenerátor	36
5.3 A teljesítményerősítő	36

5.4 Az oszcilloszkóp.....	37
5.4.1 Feszültség mérőfej	38
5.4.2 Árammérő lakatfogó	38
5.5 A demagnetizáló készülék.....	39
5.6 A mérés hibaterjedése	39
6 A mérések eredménye.....	41
6.1 Ismert tulajdonságú anyag mérése (DC01).....	41
6.2 A mérések utómunkálatai.....	43
6.2.1 Hiszterézis görbe.....	43
6.2.2 Első mágnesezési görbe	45
6.3 Az eredmények összegzése	50
6.4 A relatív permeabilitás	53
7 Kalibrációs eljárás.....	54
7.1 A mérőrendszer kalibrálása.....	54
7.2 Egyéb hibaösszetevők vizsgálata	55
8 Összefoglalás.....	56
9 Továbbfejlesztési lehetőségek.....	57
Irodalomjegyzék.....	58
Függelék.....	60

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Ruff Benedek**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2019. 12. 11.

.....
Ruff Benedek

Összefoglaló

A thyssenkrupp Components Technology Hungary Kft.-nél, Budapesten jelenleg elektromos kormányrendszereket fejlesztenek. A kormánykerék pozícióját legtöbbször egy mágneses elven működő rotor pozíciószennzorral és egy kormányoszlopon elhelyezett nyomatékszenzor segítségével érzékelik. Azonban a szenzor egység környezetében előforduló mágneses terek zavarhatják a szenzor által érzékelt, hasznos mágneses teret. Ezen jelenség ellen nyújthat hatékony védelmet a mágneses árnyékolás. Kézenfekvő megoldások egyike az árnyékoló fémlemez beiktatása.

A különböző beszállítóktól megrendelt lemezek mágnesezési tulajdonságai sokszor nincsenek kielégítően feltüntetve, vagy néhány esetben nem megbízhatóak. Ezért a szakdolgozat során olyan mérési elrendezéseket fogok kutatni, melyek ezen anyagok B-H hiszterézis görbét tudják vizsgálni. Amennyiben sikerül pontosan lemérni a valós görbét, úgy a mért adatokat fel lehet használni a szimulációs környezetekben is.

Szakdolgozatom első részében ismertetem a mágneses anyagokat, tulajdonságaikat. Ezek közül a legfontosabbak a mágneses hiszterézis, az első mágnesezési görbe és a relatív permeabilitás. Ismertetem a már létező mágneses anyagok tulajdonságait mérni képes rendszereket. A számunkra legmegfelelőbb módszer kiválasztása után azt részletesen bemutatom. Specifikálom a mérési elrendezésünket, melyet a félév során megvalósítottam. Méréseket végeztem ismert tulajdonságú anyagon, és összehasonlítottam a mért eredményeket az anyag adatlapjában szereplő értékekkel. A mérési eredmények összefoglalása után kalibrációs eljárást mutatok be. Több hibajelenséget is leírok, amiket különböző környezetben elvégzett mérésekkel lehet megvizsgálni.

Abstract

Steering systems with electrical assistance are being developed at thyssenkrupp Components Technology Hungary Kft, Budapest. Most of the time the position of the steering wheel is detected by a rotor position sensor which is operating on magnetic principals and a torque sensor which is on the steering column. However the ambient magnetic field around the sensor unit might disturb the useful magnetic field, detected by the sensor. Magnetic shielding might provide an effective protection against this phenomenon. An obvious solution for this problem is to insert a shielding metal plate.

The magnetization properties of these plates that were ordered from different suppliers are often not sufficiently stated or in some cases unreliable. Therefore in this thesis I am going to investigate the measurement arrangements that can examine the B-H hysteresis curve of these materials. If the magnetization curve is accurately measured then the measured data can be used in simulation environments too.

In the first part of my thesis I introduce the magnetic materials and their properties. The most important of these are the magnetic hysteresis, the first magnetization curve and the relative permeability. I introduce already existing systems capable of measuring these properties. After selecting the most suitable method for this project, I am going to present it in detail. I specify our measurement system, which I carried into execution in this semester. I made measurements on a material with known properties and compared the measured results with the values in the material's datasheet. After summarizing the measurement results, I present a calibration procedure. I describe several error phenomena that can be investigated by measurements in different environments.

1 A dolgozat tartalma

A szakdolgozatomban mágneses anyagokkal, valamint azok tulajdonságainak mérésére használható rendszerekkel foglalkozom.

Az első fejezetben bemutatom a mágneses jelenségeket, amiket a műszaki tudományok már régóta ismernek és felhasználnak. Majd a mágneses anyagokat ismertetem, és csoportosítom őket többféle megközelítésből. Értelmezem azok mágneses tulajdonságait, valamint ismertetem a mágneses hiszterézist, aminek a mérési módjaival fogok foglalkozni. Bemutatom a vizsgálandó relatív permeabilitás fajtáit, valamint a mágneses Ohm-törvényt, amely a mérésekhez alkalmazható egyenleteket összegezi.

Ezután bemutatom a már létező és gyakran használt mérési összeállításokat, ismertetve azok előnyeit és hátrányait. Kiválasztom a számunkra legalkalmasabb mérési eljárást, és bővebben ismertetem annak szabványos megvalósítását. Ezután a megtervezett rendszer szabványtól való eltéréseit és ezek hatását mutatom be.

Bemutatom a saját mérési elrendezést, specifikálom az összeállítást és az abban szereplő eszközöket. Megvizsgálom a mérőrendszer hibaterjedését.

Elvégzem a méréseket egy ismert tulajdonságú anyagon, különböző gerjesztéssel. Különböző kiértékelési lehetőséget ismertetek, amelyek közül kettőt el is végzek a mért adatokon. Kalibrációs eljárást mutatok be, amivel a mérőrendszer hibája meghatározható és akár kiküszöbölhető.

Végül összegzem az eredményeket, és fejlesztési ajánlatot adok a további mérések elvégzéséhez.

2 Elméleti háttér

2.1 Mágneses alapjelenségek

Az emberiség már régen felfedezte, hogy bizonyos anyagok erővel hatnak a vasra, amely vonzó jellegű. Amennyiben vastárgyat viszünk egy mágnes közelébe, az is mágnesként viselkedik. Ezt a jelenséget mágneses megosztásnak nevezik. Ennek magyarázata, hogy a vasban rendezetlen mágneses tartományok mágnes közelítésének hatására rendeződnek. Azért vonzza a mágnes a vasat, mert a mágneshez közeli részekben a mágnessel ellentétes pólus alakul ki. [1] [2]

Egy másik korai észrevétel, hogy a felmágnesezett anyagok, ha hagyják őket szabadon mozogni, mindig egy bizonyos irányba állnak be. Egy ilyen tű az Észak-Dél irányba fog beállni. Ebből következik, hogy a Föld saját mágneses térrel rendelkezik. A tű két végét elnevezték északi és déli pólusnak, aszerint, hogy a vége észak vagy dél felé mutat.

Tapasztalat szerint egy testben nem léphet túlsúlyba egyik mágneses pólus sem, így nem jöhet létre mágneses monopólus. Amennyiben két mágnesrúd segítségével hasonló pólusokat közelítünk egymás felé, taszító erőt tapasztalunk, ellenkező esetben pedig vonzó erőt. A legerősebb hatást a mágnesrúd végeinél, pólusainál tapasztalhatjuk. [2]

A 19. században azt figyelték meg, hogy ha egy mágnestű közelébe áramjárta vezetőt közelítünk, a mágnestű elfordul. Eszerint a mozgó töltések is mágneses teret gerjesztenek maguk körül. [3]

2.2 Makroszkopikus megközelítés

Mágneses térbe helyezve egyes anyagokat, azoknak makroszkopikus mágneses dipólusmomentumuk lesz. Ha egy anyag térfogategységre vett dipólusmomentumát vesszük, akkor azt mágnesezettségnek hívjuk, jelölése pedig M . [4]

A mágnesezettség mértékegysége $[M] = 1 \frac{A}{m}$, azaz amper/méter. Ha vesszük a mágnesezettség (M) és az anyagban keletkező mágneses indukció (B) kombinációját,

megkapjuk a mágneses térerősséget (H). Az anyag belsejében létrejövő mágneses indukció nagysága, a külső tér és a mágnesezettség függvénye:

$$B = \mu_0(M + H)$$

amit anyagegyenletnek hívunk, és ahol μ_0 a vákuum permeabilitását jelöli, mértékegysége B és H mértékegységének hányadosa, (mivel M mértékegysége megegyezik a mágneses térerősség mértékegységével)

$$[\mu_0] = \frac{[B]}{[H]} = \frac{1 \frac{Vs}{m^2}}{1 \frac{A}{m}} = 1 \frac{Vs}{Am}$$

Mivel M és H egyenesen arányosak ($M = \chi H$), az arányossági tényező a mágneses szuszceptibilitás, ezért az anyagegyenlet így írható fel:

$$B = \mu_0(1 + \chi)H$$

Bevezethetjük a relatív permeabilitást, melynek értéke $\mu_r = 1 + \chi$, ami egy dimenzió nélküli szám. Ez az érték azt adja meg, hogy mennyivel lesz nagyobb a mágneses indukció, abban az esetben, ha a teret nem vákuumban, hanem valamilyen más anyagban vizsgáljuk. Az abszolút permeabilitással ($\mu = \mu_0 \mu_r$) kifejezve az anyagegyenlet a következőképpen alakul:

$$B = \mu H \quad [1]$$

Mivel χ anyagfüggő, ezért a segítségével csoportosíthatjuk a mágneses anyagokat: az első a diamágneses anyagok, ezeknél a szuszceptibilitás nagysága 10^{-5} - 10^{-4} , előjelük pedig negatív. A második a paramágneses anyagok, itt is kicsi a szuszceptibilitás (10^{-5} - 10^{-3} nagyságrendű), azonban pozitív. [5] A harmadik a ferromágneses anyagok csoportja, ezek esetében 10^3 nagyságrendűek, de léteznek olyan anyagok, amiknek ennél is nagyobb a permeabilitása (akár több százezer). Azonban az előző csoportokkal ellentétben χ nem állandó, az függ a mágneses tér nagyságától. [4] Azaz az anyagegyenlet nem lineáris, így B és H kapcsolata bonyolultabb.

2.2.1 Dia-, és paramágneses anyagok

Mivel a diamágneses anyagok szuszceptibilitása negatív, ezért ezek a külső mágneses tér irányával ellentétesen mágneseződnek fel. Valamint a szuszceptibilitás a

diamágneses anyagokban nem függ sem a hőmérséklettől, sem a mágneses tértől. [4] Ilyen anyagok például a réz, az ezüst, a higany és a bizmut. [32]

A paramágneses anyagok már a külső térrel azonos irányban mágneseződnek fel, mivel χ pozitív. [4] A paramágneses anyagok csoportjába soroljuk az alumíniumot, az uránt, a platinát és a vas-oxidot. [32] Ezeknél az anyagoknál, normál körülmények között χ független a mágneses tértől, azonban alacsony hőmérsékleten, nagy mágneses tér jelenlétében a mágnesezettség aszimptotikusan közelít a telítési mágnesezettséghez (M_t). Ez a jelenség a paramágneses telítődés. Adott mágneses térnél a Curie-törvény szerint alakul a szuszceptibilitás (χ), a hőmérséklet függvényében:

$$\chi = \frac{C}{T}$$

Ahol

- C az anyagi tulajdonságokból adódó Curie-állandó,
- T a hőmérséklet [K]. [4]

2.2.2 Ferromágneses anyagok

Ezeknél az anyagoknál a külső mágneses teret növelve, B és M gyorsan nő eleinte. Utána azonban B és M telítődik. A növekedés után, miután χ elérte a maximumát, zérushoz tart, B és M telítődésének megfelelően. Ebből a jelenségből ered a később ismertetett mágneses hiszterézis. [4] Ilyen anyag a permalloy, a öntöttacél, a vas-nikkel és a kobalt. [32]

A hőmérséklet az úgynevezett ferromágneses Curie-pont (T_c) fölé emelve, χ , B és M is csökken. T_c felett a ferromágnesesség megszűnik, és az anyagok paramágnesként viselkednek. Ha a hőmérséklet meghaladja a Curie-pontot, akkor a Curie-törvényt az alábbi módosítással írhatjuk le, ez a Curie-Weiss-törvény:

$$\chi = \frac{C}{T - \Theta}$$

Ahol

- Θ a paramágneses Curie-hőmérséklet [K], ami valamivel magasabb T_c -nél,
- C az anyagi tulajdonságoktól függő Curie-állandó,
- T a hőmérséklet [K].

Megemlítendő továbbá, hogy a ferromágneses kristályok különböző irányokban másképpen mágnesezhetőek, azaz anizotróp tulajdonsággal rendelkeznek. [4]

2.3 Mikroszkopikus megközelítés

Az előző részben láthattunk olyan jelenséget, melynél egy mozgó töltéseket tartalmazó vezető környezetében mágneses tér alakul ki. A mágneses anyagok esetében is hasonló jelenség figyelhető meg. Ehhez beszélni kell a mágneses anyagok atomi szintű fizikájáról.

A mágneses anyag atomjai és a mágneses tér közötti összefüggés középpontjában az atomok mágneses dipólmomentuma áll. Az atomok mágneses dipólmomentuma három részből tevődik össze. Az első az elektronok (melyek felfoghatók kicsiny köráramként) pályamágneses momentuma. A második az elektronok saját mágneses momentuma, ami a spinből adódik. A harmadik pedig az atommagban levő részecskék (protonok és neutronok, együttesen nukleonok) saját mágneses momentuma. A magok mágneses momentuma elhanyagolható mértékű az elektronokéhoz képest, így az atom mágneses momentuma lényegében megegyezik az első két járulék összességével. [4]

2.3.1 Diamágnesség értelmezése

Amennyiben egy anyag tisztán diamágneses, akkor abban az elektronok ellentétes spinű párokat alkotnak, így a diamágnesesség az elektronok pályamomentumából fakad. Ezek jellegzetessége, hogy mágneses tér hatására bennük indukált mágneses momentum jön létre. Ez az indukált dipólusmomentum minden anyagban létrejön külső tér hatására, azonban az ebből származó diamágneses hatás gyenge. A para-, és ferromágneses anyagok esetében a fellépő és jóval erősebb hatások ezt elnyomják. [4]

2.3.2 A paramágnesség értelmezése

A paramágneses anyagok atomjai már rendelkeznek állandó mágneses momentummal. Ha nincs a környezetében mágneses tér, akkor ezek az atomi dipólusmomentumok rendezetlenül állnak be, ezért a mágnesezettség zérus. Azonban külső tér hatására ezek az atomi mágnesek rendeződnek és olyan irányba állnak be, ami a külső térrel párhuzamos irányú. Ezt a rendeződést nehezíti a molekulák termikus

mozgása, emiatt egy adott pillanatban az elemi mágneseknek csupán egy része rendeződik. [4]

2.3.3 A ferromágnesség értelmezése

Láthattuk, hogy bizonyos anyagokban, az egyes elektrongyűrűkben általában párosszámú elektronok keringenek. Ezen elektronok egyik fele negatív, a másik fele pozitív értelmű forgást végez, így összességüket tekintve nincs mágneses hatásuk. Azonban a ferromágneses anyagok harmadik elektrongyűrűje nincs telítve (amihez 18 elektrorra lenne szükség), így valamelyik forgás-értelmű elektronjaiból hiány lép fel. Ebből az következik, hogy az atomban nem semlegesítik egymást a mágneses hatások. Alapállapotban az atomok csoportokba rendeződnek, melyeket doméneknek neveznek, és telítésig mágnesezett részecskék csoportjának tekinthetők. [6]

2.4 A mágneses domének

„A Weiss-féle elmélet által megjósolt spontán mágnesezettség ellentmondásban van azzal a ténnyel, hogy a vas és más ferromágneses anyagok általában még a Curie-hőmérséklet alatt sem mágnesezettek, noha vannak állandó mágnesek, van remanens mágnesesség stb.” Ezt az ellentmondást később Weiss oldotta fel azzal a magyarázattal, hogy a ferromágneses anyagok, a Curie-hőmérséklet alatt, mágneses szempontból rengeteg, makroszkopikus tartományra tagolódnak. Ezeket a tartományokat mágneses doméneknek hívjuk. [7]

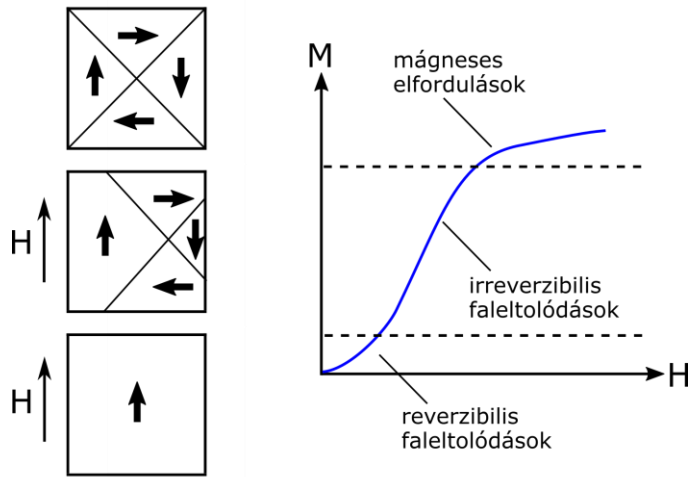
Az egy doméntartományba eső elemi mágneses momentumok tehát párhuzamosak egymással, ennek oka az elektronok kicserélődési kölcsönhatási energiája. Energetikai szempontból az a legkedvezőbb eset, ha az elemi mágneses momentumok párhuzamosak egymással. Azonban ha az anyag csak egy irányban lenne mágnesezett, akkor az általa keltett mágneses térnek nagy energia felelne meg. [7] Ezt úgy lehet magyarázni, hogy a szomszédos domének kicsiny mágnesrúd-ként funkcionálnak, melyek minimális energiája úgy érhető el, ha ezen mágnesrudak ellentétes pólusai találkoznak. [4]

A doméntartományon belül minden elektrorra ugyanakkora kicserélődési kölcsönhatási energia jut, a kicserélődési erők rövid hatótávolsága miatt. A domének határán levőkre ez nem teljesül, mivel a szomszédos atomok különböző spinje miatt a kicserélődési energia megnő. Minél nagyobb a domént határoló felület, annál nagyobb

az energia. Tagozódás során tehát a felületi energia nő, míg a mágneses tér energiája csökken. Ez a folyamat akkor szűnik meg, a két energia összege el nem éri a minimumát. A domének méretét ezért ez a minimális energia határozza meg. [7]

Alapállapotban a domének úgy rendeződnek, hogy az anyag egészét tekintve makroszkopikusan nem mágnesezett (2-1. ábra). Ha mágneses térbe helyezzük az anyagot, akkor lesznek olyan domének, amelyek ugyanolyan irányban állnak, mint a külső tér. Ezek a domének, egyensúlyi helyzetüket tekintve stabilak, mivel minimális energiájú állapotban vannak. A szomszédos domének a térrel nem megegyező irányban álltak be, ezért azok nagyobb energiájú állapotban vannak, ezért egyensúlyuk labilis. A legkisebb energiájú állapot elérése érdekében a labilis domének bizonyos mágneses momentumai átfordulnak. Ekkor a doménfal másik helyre kerül, és a stabilis domén elkezd növekedni, a másik rovására. A mágneses tér bekapcsolása után, eleinte még gyorsan „mozognak” a doménfalak, emiatt itt a mágnesezettség még gyorsan nő. A mágneses teret tovább növelve egyre több doménfal ütközik valamilyen kristályhibába, a mágnesezettség növekedése lassul. Ha tovább növeljük a teret, akkor ezeknél a hibahelyeknél megmaradó, kedvezőtlen helyzetű atomi mágnesek energiája elér egy kritikus értéket, a doménfal keresztülszakad a hibán. Ettől a hirtelen szakadástól lépcsőzetes a mágnesezési görbe, ezt a jelenséget pedig Barkhausen-effektusnak hívják.

A mágnesezettség akkor kezd el telítődésbe érni, amikor már az összes domén beállt olyan irányba, ami a külső térrel a lehető legkisebb szöget zárja be. Ezután már csak a domének tér irányába való forgatásával növelhető a mágnesezettség. Ha csökkentjük a teret, akkor a doménfalak nem tudnak eredeti helyükre visszatérni, hiszen a kristályhibák ezt megakadályozzák. [4]

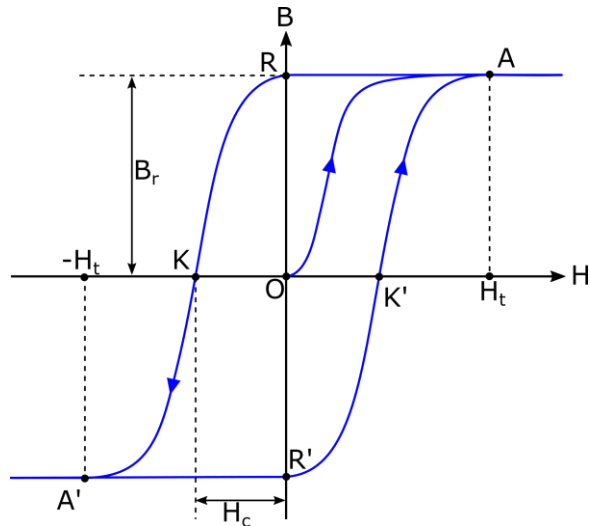


2-1. ábra: Domének és az első mágnesezési görbe (Forrás: [7])

A fenti ábrán (2-1. ábra) látható, hogy gyenge tér esetén a doménhatárok mozdulnak el, kis mértékben, ami visszafordítható, azaz reverzibilis folyamat. Nagyobb tér esetén a folyamat irreverzibilissé alakul, mivel a mágneses momentumok átrendeződése az egész tartományra kihat. Még erősebb térben már nem csak a határok tolódnak el, hanem a domének is elfordulnak a tér irányába. [7]

2.5 A mágneses hiszterézis

Egy eleinte nem mágneses vasmintát mágnesezünk fel telítésig, azaz H_f -ig (telítődési térerősség), majd a külső teret csökkentjük egészen nulláig. Ezután megint növeljük a teret, de most ellenkező irányba, $-H_f$ -ig, végül ismét növeljük a teret H_f -ig. Ha a mágneses térerősség változtatása közben megmérjük a B mágneses indukció értékeit, akkor az alábbi görbét kapjuk. Ezt a jelenséget mágneses hiszterézisnek, a görbét hiszterézishuroknak, a még fel nem mágnesezett anyagra jellemző, nem ismétlődő görbét pedig első mágnesezési görbének nevezzük, ez az ábrán az O és az A pont közt figyelhető meg (2-2. ábra).



2-2. ábra: Mágneses hiszterézis (Forrás: [7])

Látható az ábrán (2-2. ábra), hogy a ferromágneses anyag mágnesezettsége nem egyértelmű függvénye a mágneses térnek, mivel az függ a mágneses előélettől. A mágneses indukció egy bizonyos térerősség mellett felvehet bármilyen értéket, a maximális hurok határain belül.

Látható továbbá, hogy ha felmágnesezés után nullára csökkentjük a térerősséget, az anyagban maradni fog remanens indukció (B_r). Ahhoz, hogy ezt megszüntessük, ellentétes irányba kell növelni a teret, és ahol az indukció értéke zérus lesz, a mágneses térerősséget koercitív erőnek nevezzük (H_c). A remanencia tulajdonsága teszi lehetővé, hogy permanens mágneset lehessen készíteni. Annál tovább őrzi meg a permanens mágnes a tulajdonságát, minél nagyobb az ezt elrontó koercitív erő.

Egy anyagra jellemző lehető legnagyobb hiszterézishurkot úgy kaphatjuk meg, ha H -t addig növeljük, míg az anyag mágnesezettsége (M) el nem éri a telítési mágnesezettség értékét (M_t). Ha a térerősség amplitúdóját alternálva egyre csökkentjük, akkor egyre kisebb hiszterézisgörbét kapunk, emiatt a maximális méretű hurokban végtelen sok kisebb hurok létezik. Ebből következően egy vastárgyat úgy tudunk lemágnesezni, ha azt egy egyre csökkenő amplitúdójú, váltakozó árammal táplált tekercs belsejébe helyezzük.

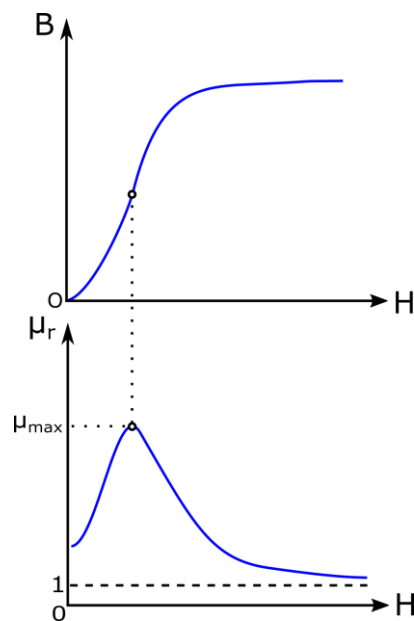
Mivel a mágnesezési ciklus során az anyag elemi mágneses dipólusai átállnak, ezért munkát kell végezni. „Ez a munka az anyag belső energiáját növeli, ami az anyag hőmérsékletének emelkedésével jár együtt.” Ez a hiszterézisvesztés a vasvesztés

egyik jelentős része. Kimutatható, hogy a hiszterézisveszteség arányos a hiszterézishurok területével.

Más feladatok ellátására más tulajdonságú anyagokat érdemes használni. Elektromos gépek vas alkatrészei esetében, például a transzformátor vasmagja, a hiszterézisveszteség csökkentése érdekében kisebb hurokkal rendelkező anyagokat használnak. Ezzel ellentétben, a permanens mágneseknél jóval nagyobb H_c és B_r értékeket láthatunk.

A koercitív erő szempontjából két csoportot különböztethetünk meg a ferromágneses anyagokon belül. Az egyik a lágymágneses anyagok csoportja, kis H_c -vel rendelkeznek, ezért a hiszterézishurok keskeny. A másik csoport a keménymágneses anyagoké, ahol H_c értéke nagy, így széles hurokkal rendelkeznek.

Mivel a mágneses indukció és a térerősség között nincs egyértékű függvény kapcsolat, ezért a ferromágneses anyagok relatív permeabilitását az első mágnesezési görbéből származtatjuk (2-3. ábra).



2-3. ábra: Az első mágnesezési görbe és a permeabilitás (Forrás: [7])

A relatív permeabilitást úgy kapjuk meg az első mágnesezési görbéből, hogy azt deriváljuk. Látható a fenti ábrán (2-3. ábra), hogy az indukció egyre meredekebb, majd a meredeksége csökken. A permeabilitás ennél a váltásnál éri el a legnagyobb értékét, valamivel ezután az anyag telítésbe kerül. Amennyiben H -t tovább növeljük, μ_r

aszimptotikusan kezd közeledni 1-hez. Ennek magyarázata a fentebb említett képletek segítségével könnyen szemléltethető:

$$\mu_r = 1 + \chi = 1 + \frac{M}{H}$$

Mivel M nem lehet nagyobb M_t telítési mágnesezettség értékénél, ami egy véges szám, H -t növelve a végtelenségig, az M_t/H hányados 0-hoz fog tartani, az összeg pedig 1-hez. [7]

2.6 A relatív permeabilitás fajtái

A definíció alapján a mágneses permeabilitás (μ), az indukció (B) és térerősség (H) függvénye szerint alakul:

$$\mu(H) = \frac{B(H)}{H}$$

A kezdeti permeabilitás (μ_i) elvileg azt adja meg, hogy nulla gerjesztés esetén mekkora a permeabilitás. Ezt a gyakorlatban nem tudjuk lemérni, így bevezették a 4 mA/cm nagyságú mágneses térerősséghez tartozó μ_4 permeabilitást.

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

$$\mu_4 = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \Big|_{H=4 \frac{\text{mA}}{\text{cm}}}$$

Nekünk azonban a differenciális permeabilitásra (μ_d) van szükségünk, amit úgy kapunk meg, ha az első mágnesezési görbét deriváljuk a mágneses térerősség szerint:

$$\mu_d(H) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB(H)}{dH} \quad [32]$$

2.7 Mágneses Ohm-törvény

A mágneses indukcióvonalak zárt görbét képeznek. Noha ezen vonalak mentén nem beszélhetünk áramlásról, azért célszerű analógiát állítani az áramkörök és a fluxusvonalak zárt görbéi közt. A legegyszerűbb mágneses kör egy ferromágneses anyagból készült gyűrű, amire tekercselést helyezünk. Ekkor a fluxusvonalak a gyűrű belsejében alakítanak ki egy kört. Mivel a gyűrű permeabilitása nem végtelen, ezért a

levegőn keresztül is fog valamekkora fluxus záródni, ezt szórt fluxusnak hívják. Egy légréssel ellátott gyűrű esetében a fluxusvonalak kiterjednek a légrében, szóródnak, de a legnagyobb része gyűrűn belüli útvonalon marad. Egy légrézes gyűrűt úgy vizsgálhatunk, mint egy sorba kapcsolt vasgyűrűből és légrésből álló mágneses kört.

Tekintsük most a sima vasgyűrűs esetet, amelyet megtekercselünk, ekkor az anyagban a mágneses indukció (B) nagysága:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l}$$

Ahol

H a mágneses térerősség [A/m],

N a tekercs menetszáma [-],

I a tekercs árama [A],

l a gyűrű középvonalának hossza [m].

A mágneses fluxust (Φ) az alábbi módon kaphatjuk meg a mágneses indukció (B) segítségével, amely A felületen halad át: [7]

$$\Phi = \int_A B dA \quad [8]$$

Ez a képlet azonban tovább egyszerűsödik, mivel B és A vektorok merőlegesek egymásra a gyűrű kialakítása miatt:

$$\Phi = BA = \frac{NI}{l/(\mu_0 \mu_r A)} = \frac{M}{R}$$

A zárt áramkörre vett Ohm-törvény pedig a következő:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon}{l/(\sigma A)}$$

ahol ε az elektromotoros erő, R az ellenállás, amin belül: l a vezető hossza, σ a fajlagos vezetőképesség, A pedig a keresztmetszet. Formailag az I áramnak a Φ mágneses fluxus, az ε elektromotoros erőnek az NI szorzat, az $l/(\sigma A)$ elektromotoros ellenállásnak az $l/(\mu_0 \mu_r A)$ mennyiség feleltethető meg. Az NI szorzatot M magnetomotoros erőnek, a nevezőt ($l/ \mu_0 \mu_r A$) pedig R mágneses ellenállásnak, reluktanciának nevezik. A $\Phi = M/R$ egyenletet mágneses körre vonatkozó Ohm-

törvénynek hívják. Ezzel könnyedén számolhatjuk egy több szakaszból álló mágneses kör fluxusát, felírva rá a soros vagy párhuzamos törvényeket. [7]

3 Létező mágneses mérések

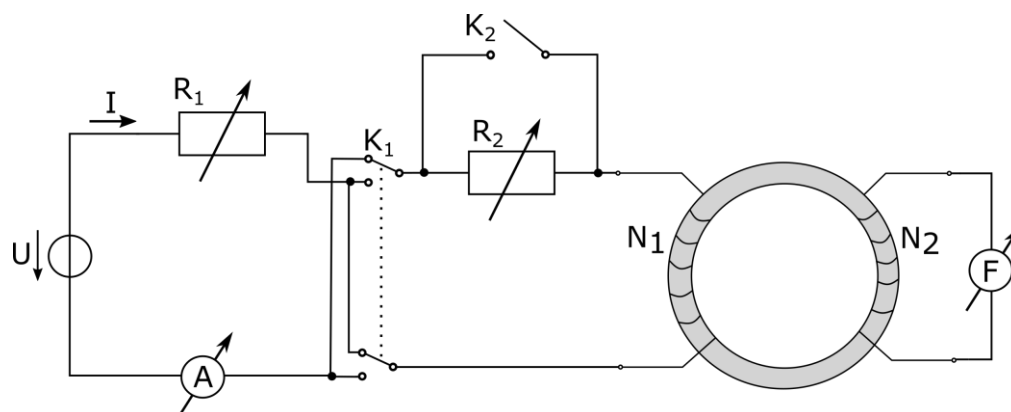
Fejlesztési területeken igen fontos ismerni a használt anyagok mágneses jellemzőit, valamint azok hőmérséklettől, gerjesztéstől, felhasználás módjától és gyártástechnológiától való függését. Durva becslés szerint minél több időt fordítunk a mérésre (bonyolult elrendezés, mérési módszer), annál pontosabb a mérés. Például a később ismertetett, oszcilloszkóp képernyőjén végzett mérések gyorsak, de nem biztos, hogy megfelelnek a precíziós mérésektől elvárható 1%-os hibának. [9]

Mágneses tulajdonságok méréséhez, a szükséges mágnesezés történhet egyen-, illetve váltóárammal is. Sztatikus módszereknek nevezzük az egyenáramot használó méréseket. [6]

3.1 Gyűrű-minta mérése

Méréseket teljesen légrésmentes vagy kicsiny légréssel rendelkező zárt mágneses körben végeznek. Ennek az egyik legjobb módja, ha a vizsgálandó anyagból gyűrűt készítünk, amelyre a gerjesztő-, és a mérőtekerceszt egyenletesen helyezzük fel. [6] Mivel a tekercselésre merőleges a mágneses indukció, ezért ennél a modellnél a szórt tér minimális.

Először az egyenáramú, azon belül is a fluxusmérővel rendelkező módszerrel ismerkedünk meg. Az első mágnesezési görbét, a gyűrű átmágnesezése közben keletkező indukcióváltozás segítségével mérhetjük le. A mérési elrendezés az alábbi ábrán (3-1. ábra) látható.



3-1. ábra: Mérési elrendezés (Forrás: [8])

K_2 kapcsoló zárt állapotban van, amíg az első mágnesezési görbét szeretnénk kimérni. Az R_1 ellenállás változtatásával tudjuk szabályozni az N_1 menetszámú tekercs áramát, ami a mágneses indukciót fogja gerjeszteni a mintában. A gerjesztett térerősség nagysága az alábbi módon számolható:

$$H = \frac{N_1 I}{l}$$

Ahol

N_1 a gerjesztőtekercs menetszáma [-],

I a tekercs árama [A],

l a gyűrű középvonalának hossza [m].

A K_1 kapcsoló segítségével tudjuk hirtelen megváltoztatni a gerjesztő áram irányát, ezt kommutálásnak hívják. A változó áram hatása miatt keletkező fluxusváltozást fluxusmérővel mérjük. A mágneses indukció kiszámolható a következőképpen: [8]

$$B = \frac{\Delta\Psi}{2N_2 A} \quad [10]$$

Ahol

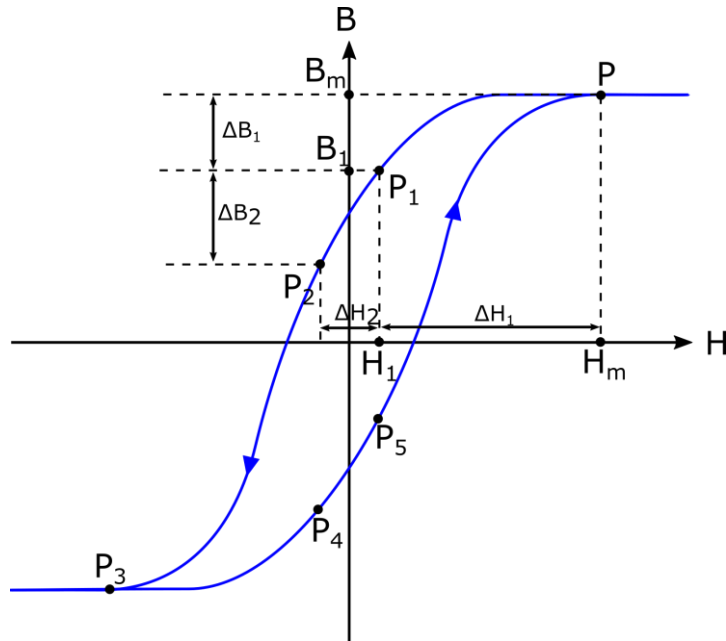
$\Delta\Psi$ a mért fluxusváltozás [Wb]=[Tm²],

N_2 a szekunder tekercs menetszáma [-],

A a gyűrű keresztmetszete [m²].

Ha ezt a mérést megismételjük többször, egyre nagyobb gerjesztőáramot beállítva, akkor a kapott H és B értékek feltüntetésével megkapjuk az első mágnesezési görbét. [8] Ennek a mérésnek a pontossága 0,5...1%. [10]

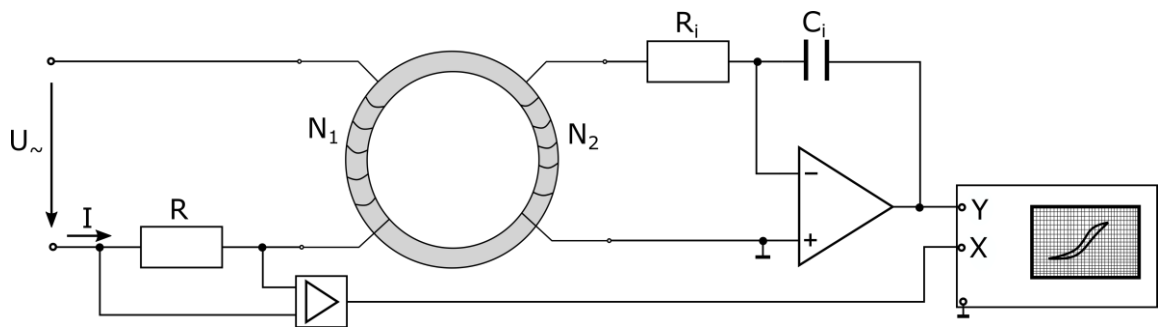
A teljes mágnesezési görbe méréséhez szükség van a K_2 -es kapcsolóra. Az R_1 ellenállást nem változtatjuk, R_2 -t kicsi értékre változtatjuk, a K_2 kapcsoló azonban eleinte zárt állapotban van. Ha gerjesztés közben nyitjuk K_2 kapcsolót, akkor az R_2 ellenállás miatt kisebb lesz az áram, és a H térerősség ΔH_1 -gyel csökken, emiatt pedig a mért indukció is le fog csökkenni ΔB_1 -gyel. A lecsökkent H_1 értéket a K_2 kapcsoló váltása után mérhetjük az áram nagyságából, míg az indukciót a fluxusmérő segítségével, így jutunk el P_1 pontba, amit a lenti ábrán láthatunk (3-2. ábra).



3-2. ábra: Hiszteréizhurok felvétele (Forrás: [8])

Ha K_2 nyitva hagyjuk és K_1 kapcsolóval az áramirányt megváltoztatjuk, P_2 pontot kapjuk meg. Ezután zárva K_2 kapcsolót, megkapjuk a P_3 pontot. Ismét kinyitjuk K_2 -t, eljutunk P_4 -be, ha változtatunk az áramirányon, megkapjuk P_5 -t. Végül zárva K_2 -t, visszatérünk P -be. Ahhoz, hogy a hurok többi pontját is megkapjuk, növelni kell fokozatosan R_2 értékét, és a mérést meg kell ismételni. Amennyiben a remanens indukcióra (B_r) vagyunk kíváncsiak, akkor a P pontból indulva, K_1 -gyel meg kell szakítani a gerjesztőáramot, a fluxusmérővel pedig megkapjuk B_r -t. [8]

A második lehetőség a váltóáramú mérés, ahol a teljes mágnesezési görbét oszcilloszkóppal vizsgáljuk (3-3. ábra).



3-3. ábra: Oszcilloszkópos mérési elrendezés (Forrás: [8])

A szinuszos gerjesztéssel áramot hajtunk át a primer tekercsen. A sorosan közbeiktatott ellenállás árama arányos a gerjesztett mágneses térrel, ezért a sarkaira

kapcsolt erősítő kimeneti feszültsége (ami az oszcilloszkóp XY módjában a vízszintes tengely kitérése lesz) is arányos lesz a mágneses térrel:

$$u_x = iR = \frac{lH}{N_1} R$$

Ahol

- u_x az erősítő kimeneti feszültsége [V],
- i a primer tekercs árama [A],
- R a soros ellenállás [Ω],
- l a gyűrű középvonalhossza [m],
- H a mágneses tér [A/m],
- N_1 a primer tekercs menetszáma [-].

Amely egyenlet átrendezése után megkapjuk a gerjesztő mágneses tér nagyságát:

$$H = \frac{N_1}{lR} u_x$$

A gyűrűben létrejött, váltakozó mágneses fluxus feszültséget (u_i) indukál az N_2 menetszámú tekercsben (R_i) ellenállás bal lábánál):

$$u_i = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Az integrátor segítségével (melynek RC tagja R_i ellenállásból és C_i kapacitásból áll) ebből a feszültségből megkapjuk u_y feszültséget (ez pedig az XY mód függőleges kitérése), ami már arányos a mágneses indukcióval.

$$u_y = \frac{1}{R_i C_i} \int_0^t u_i dt = \frac{1}{R_i C_i} N_2 \int_0^t \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{N_2}{R_i C_i} (\Phi - \Phi_0) = \frac{N_2}{R_i C_i} A(B - B_0)$$

Amennyiben a kezdeti állapotban ($t = 0$) az indukció értéke nulla ($B_0 = 0$) volt, akkor a mágneses indukció az alábbi módon számolható: [10]

$$B = \frac{R_i C_i}{N_2 A} u_y \quad [10]$$

Ez lesz a függőleges kitérés. „Ha a feszültségforrás feszültségét nulláról növeljük, akkor a növekvő hiszterézishurok végpontjai az első mágnesezési görbét adják.” [8]

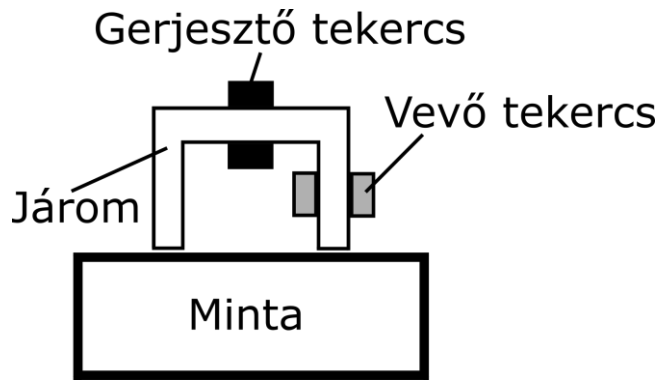
Az integráló tag időállandójának sokkal nagyobbak kell lennie a gerjesztő áram körfrekvenciájának reciprokánál ($R_i C_i \gg \omega^{-1}$). [3]

Azonban a mérésnek több hátránya is ismeretes. A legkézenfekvőbb kellemetlenség az, hogy az anyagból gyűrűt kell készíteni, ami a körülményességen kívül még azzal a veszéllyel is jár, hogy az anyag mechanika és mágneses tulajdonságai is megváltoznak. [6] Ugyanis a mágneses tulajdonságok is feloszthatók szerkezetérzékeny (extrinsic) és szerkezet-érzéketlen (intinsic) csoportokba. A mi esetünkben az előbbi a jelentősebb, hiszen szerkezetérzékeny jellemzőnek tekintjük a remanens indukciót, a koercitív erőt, a permeabilitás értékeket, valamint összességében a mágnesezési görbe alakját. Ezzel szemben szerkezet-érzéketlennek mondhatjuk a Curie-hőmérsékletet és a telítési indukciót, ami kémiai összetételfüggő. [11]

Minden mérés előtt a gyűrűt feltekercselni nehézkes és időigényes feladat. Valamint az anyagot, ebben a mérési elrendezésben csak egy irányú, keresztmetszetre merőleges mágneses térrel tudjuk gerjeszteni, ezért a minta anizotrópiával kapcsolatos tulajdonságát sem tudjuk vizsgálni. Azaz azt a tulajdonságot, miszerint bizonyos anyagok, különböző irányokban más mágneses tulajdonsággal rendelkeznek. [6]

3.2 Járommal végezhető mérés

Van lehetőség egyenes próbatesteket is mérni, ahol a mágneses kört egy mágnesező járom, másnéven iga segítségével valósítjuk meg (3-4. ábra). A járomnak, anyagát tekintve kis mágneses ellenállásúnak, méretét nézve pedig nagy keresztmetszetűnek kell lennie. Ha ezek megvalósulnak, akkor a próbadarabra fog jutni a teljes mágneses feszültségesés, mivel ilyenkor az iga rövidzárként értelmezhető. Mivel a tekercselést a járomra helyezik fel, ezért a minták könnyedén cserélhetők. Maga a mérési módszer megegyezik a gyűrűs méréssel, azzal a különbséggel tehát, hogy itt nem a próbatestet gerjesztjük közvetlenül. [6]



3-4. ábra: Járommal végzett mérés (Forrás: [11])

Mivel a próbadarabot többféle irányban is elhelyezhetjük a mérésben, ezért alkalmas az anyagok anizotróp tulajdonságainak vizsgálatára. A minták mérete sem kritikus ennél a módszernél, hiszen szinte akármekkora próbatesteket vizsgálhatunk. Például nagy tartályok roncsolásmentes öregedésvizsgálatához használják a mágnesező igát.

Nem ideális esetben, a mágnesező járom nem tekinthető rövidzárnak, ezért mágnesezéskor a magnetomotoros erő egy része a járom átmágnesezéséhez szükséges, a minta méretétől és mágnesezési görbétől függően. Főként akkor jelent ez problémát, amikor a próbatest is nagy permeabilitással rendelkezik. Ekkor a gerjesztési törvény bővül az iga szorzatával. Tehát a gerjesztéssel előállított magnetomotoros erő megegyezik a körben található erők összegével:

$$NI = H_v l_v + H_i l_i$$

Ahol

NI a magnetomotoros erő nagysága, ami a menetszám (N) és az áram (I) szorzata,

$H_v l_v$ a próbatesthez tartozó mágneses térerősség (H_v) és a középvonalhossz (l_v) szorzata,

$H_i l_i$ az iga-hoz tartozó mágneses térerősség (H_i) és a középvonalhossz (l_i) szorzata. [6]

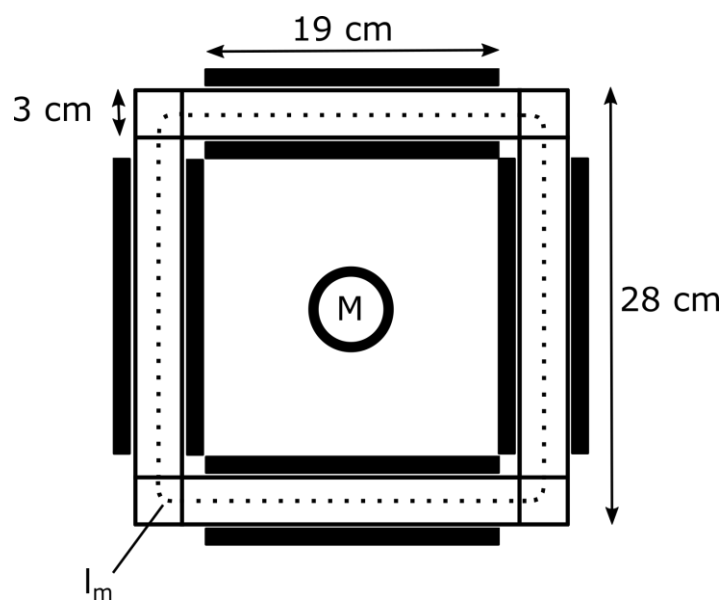
Ehhez még hozzáadódik az esetleges tökéletlen felfekvés, ami miatt a próbatest és a járom között légrés jelenik meg. Ekkor a számítás bonyolódik, ugyanis a vákuum relatív permeabilitása 1, azaz az indukcióvonalak szóródni fognak. Valamint azt tapasztaljuk, hogy a mért remanencia kisebb lesz a vártnál. Ez főként nagy permeabilitású anyagoknál okoz gondot, ahol a mágneses indukció tengelyét kis

szögben metszi a mágnesezési görbe. A kis meredekség arra utal, hogy az anyagra jellemző koercitív erő is kicsi. Ha ebből a kicsiny erőből valamennyi a légrés átmágnesezésére fordul, az nagyban változtatja a mért remanencia értékét. [6]

A fenti paraméterek szétválasztása azonban nem egyszerű feladat, nem tudhatjuk, hogy az eredő görbét mennyire befolyásolta a járom és a próbatest anyaga, a légrés és a testek geometriája. Egy, már létező megoldás, a többfázisú hiperbolikus (MH) modellre épülő mérés kísérleti eljárás, melyet Prof. Mészáros István fejlesztett ki. Ezzel a módszerrel képes szeparálni a mágneses kör elemeinek görbéit, legyen szó a próbatestről, valamint a légrésről. [11]

3.3 Epstein-keret mérés

Létezik egy olyan módszer, amiben a gyűrű-méréshez hasonlóan, közvetlenül a próbatestet gerjesztjük, és azon is végezzük el a mérést. Azaz nem kell számolnunk az előző módszernél ismertetett mérés hibájával, miszerint a járom befolyásolja a minta valós értékeit. Valamint ennél a mérésnél lehetőség van mintalemezből kivágott lapkák mérésére. A próbatestet nem kell kitenni mechanikai torzításnak (gyűrű készítése), csupán megadott méretű lapkákat kell levágni belőle. A lemezek tökéletlen fekvése miatt előfordulhat légrés, a próbatestek között. Ezért az átlapolt részeket, a sarkoknál, megközelítőleg 1 N erővel kell leszorítani. Mivel a lapkákat olyan irányítottsággal vágjuk ki a mintából, ahogy szeretnénk, ezért a mérések során képesek vagyunk megvizsgálni az anyag anizotrop tulajdonságát is.



3-5. ábra: Az Epstein-keret méretei [12]

A fenti ábrán (3-5. ábra) látható a szabványos keret méretezése. A fehér téglalapok a mérni kívánt lemezek, a mellettük elhelyezkedő, fekete kitöltéssel rendelkezők pedig a (primer és szekunder) tekercselést jelölik. A pontozott vonal a mintában levő középvonalhossz. Középen a kompenzáló tekercs található, amiről a későbbiekben lesz szó.

4 Az Epstein-keret ismertetése

4.1 A szabványos keret

A mérés szabványosítására azért volt szükség, mivel az eredmények nagymértékben függenek olyan tulajdonságoktól, mint az anyag geometriája, a mágnesezés iránya és nagysága, a gerjesztés frekvenciája. Ahhoz, hogy össze lehessen hasonlítani különböző anyagok tulajdonságait, bárhol a világon, szükség volt egy részletes mérési leírást készíteni. Ezeket a leírásokat az IEC 60404-2 szabvány tartalmazza. Ha összehasonlítunk a világon két különböző szabványos mérést, akkor a különbség akár 1 % alá is kerülhet. [13]

Epstein-kerettel való mérés esetében, akár 400 Hz frekvenciájú gerjesztést is lehet alkalmazni. A keret az ismert mérési módszereket alkalmazza, vagyis tartalmaz primer és szekunder tekercselést, megfeleltetve a gerjesztő és a gerjesztett tekercseléseknek. A rendszer hasonlítható egy terheletlen transzformátorhoz, aminek tehát magja a próbatest. Belülre érdemes helyezni a szekunder tekercset, kívülre pedig a primer tekercset, a menetek közé el lehet helyezni elektrosztatikus fóliát. Oldalanként a tekercselés hossza 19 cm, ami a teljes menetszám negyedét tartalmazza. Az oldalakat sorbakötjük, a megfelelő tekercsekkel (primert a primerhez, szekundert a szekunderhez). A teljes menetszám tervezésénél, figyelembe kell venni a teljesítményerősítő és a mérési eszközök tulajdonságait, és a gerjesztő frekvencia nagyságát. Az általában használt menetszám 700, vagy 1000 szokott lenni. A menetszám azonban túlságosan megnövelheti a tekercs impedanciáját, ezért lehetőség van, bizonyos szabályoknak eleget téve, csökkentenünk azt:

$$\frac{R_1}{N_1^2} \leq 1,25 \cdot 10^{-6} [\Omega]$$

$$\frac{R_2}{N_2^2} \leq 5 \cdot 10^{-6} [\Omega]$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} = \frac{L_2}{N_2^2} \leq 2,5 \cdot 10^{-9} [H]$$

Ahol

R_1 és R_2 a primer és szekunder tekercs ellenállása $[\Omega]$,

L_1 és L_2 a primer és szekunder tekercs induktivitásai [H],

N_1 és N_2 a primer és szekunder tekercs menetszáma [-].

A középvonalhossz meghatározása nem olyan egyértelmű, mint azt a gyűrű esetében láthattuk, ugyanis a keret sarkainál nem tudhatjuk biztosan, hogy mekkora elhajlást tesznek meg az erővonalak. Az általánosan elfogadott és használt érték 0,94 méter.

A keretbe helyezett minták szélessége 30 mm ($\pm 0,2$ mm), hosszúsága 280 és 320 mm közötti érték ($\pm 0,5$ mm). A minták száma 4 többszöröse kell, hogy legyen, amiket minden mérés előtt le kell mágnesezni. Ahhoz, hogy a minták megfelelően feküdjenek fel egymásra, és a légrést csökkentsük, a lemezeket felváltva helyezzük el, valamint a sarkokat 1 N nagyságú erővel nyomjuk le. A 280 mm-es próbatestek esetében az aktív tömeg (m_a) legalább 240 gramm, amit az alábbi módon kell kiszámolni:

$$m_a = \frac{l_m}{4 \cdot l} m$$

Ahol

l_m a középvonalhossz [m],

l egy lemez hossza [m],

m a lemezek össztömege [kg].

A méréshez továbbá szükséges tudnunk a minta keresztmetszetét (A):

$$A = \frac{m}{4 \cdot l \cdot \rho}$$

Ahol

m a lemezek össztömege [kg],

l egy lemez hossza [m],

ρ a minta sűrűsége [kg/m^3].

Érdemes elhelyezni a keret közepére még egy szolenoid tekercset, melynek az a feladata, hogy a keretben keletkező levegő fluxust kompenzálja. Úgy kell elhelyezni, hogy a keretre merőleges irányú legyen (normál irányítású), azaz a benne levő mágneses erővonalak merőlegesek legyenek a keretre. Úgy kell hozzákötöni a meglévő rendszerhez, hogy a keret primer tekercséhez sorosan kötjük a kompenzáló tekercs primer oldalát, a szekunder tekercset szintén sorosan, de ellenkező irányban kell bekötöni. Az elrendezést úgy kell megvalósítani, hogy amikor AC áram folyik a primer

oldalon, miközben nincs behelyezve minta a keretbe, a szekunder oldalon indukált feszültség 0,1 %-a legyen annak a feszültségnek, amely rendes mérésnél indukálódik.

A tápnak, előírás szerint, kicsi impedanciával és nagy stabilitással kell rendelkeznie feszültség-értékben és frekvenciában. Mérés közben a várttól való eltérés lehetőleg $\pm 0,2$ % legyen. A szekunder oldalon indukált feszültség formatényezője (form factor) $1,111 \pm 1$ %. Ami a feszültség effektív értékének és abszolút középértékének hányadosa. [31] A tisztán szinuszos jel formatényezője $\pi/(2 \cdot \sqrt{2}) = 1,1107$, tehát úgy kell ellátni árammal a primer kört, hogy a szekunder oldali indukált feszültség szinuszos legyen. Ehhez visszacsatolt erősítőre van szükség, ami a kimeneti feszültség (szekunder oldal) alapján irányítja a bemenő áramot (primer oldal). [13]

Ha a mérőeszközök pontossága $\pm 0,5$ %, akkor a mérés megismételhetősége, szabványos mérés esetében 2 %. [31]

4.2 A saját és a szabványos keret kapcsolata

Az előző pontokban ismertetett mérési eljárások előnyeinek és hátrányainak összevetése után arra jutottam, hogy a számunkra leghatékonyabb mérési módnak az Epstein-keret bizonyul. Azonban bizonyos szabványos feltételeket nem lehet biztosítani.

4.2.1 Visszacsatolt erősítés

Ezek közül az egyik a visszacsatolt erősítés, amellyel a mágneses teret gerjesztjük a próbatestben. A nemzetközi követelményeknek eleget tevő, mágneses anyagokban előforduló, veszteségvizsgálat során az anyagban keletkező mágneses indukció jelalakja szinuszos. Ahhoz, hogy az anyagban létre tudjon jönni a szinuszos indukció, a szinusztól eltérő jelalakú, mágneses térrel való gerjesztésre van szükség. Ennélfogva, a szabványos mérőrendszerekben egy visszacsatolást kell beiktatni, ami ismétlődve változtatja a gerjesztő tér nagyságát, a mintavételezett indukció függvényében. [12]

Mivel ennek a visszacsatoló erősítőnek a megtervezése nem könnyű feladat, nem fér bele az időkeretbe, noha a gerjesztő jel alakja jelentősen befolyásolhatja a mérés eredményét.

Ennek oka, hogy a hiszterézis nagyon meredek lehet, főként a koercitív erő körül, ahol a mágneses indukció változása igen nagy. Ha a mágneses tér a kontrollált (visszacsatolás nélküli a gerjesztés), akkor kevés $B-H$ pontpárt tudunk kivenni a meredek részből. A cél tehát az lenne, hogy az indukció változását a hiszterézis meredek részén is sok pontban tudjuk mérni. [14]

4.2.2 Középvonalhossz pontatlanság

Az Epstein-keret egyik hátránya, ami a pontosság rovására mehet, az a középvonalhossz meghatározása. A gyűrű esetében igen egyszerű volt kiszámolni, hiszen a minta kialakítása lehetővé tette, hogy az indukcióvonalak az egész testben homogén módon terüljenek el. A keret esetében, a négy oldalt gerjesztjük, ezért az oldalak mentén egységes az indukció. Azonban a sarkoknál ezek a vonalak elhajolnak, eltérnek.

A középvonalhossz nagyságát több tényező is befolyásolja; ezek az anyagban létrejövő mágneses indukció nagysága, a gerjesztő frekvencia, az anyag permeabilitása, és az anizotropia. Általánosságban az figyelhető meg, hogy nagy gerjesztési frekvencián a középvonalhossz csökken, míg a nagyobb permeabilitású anyagokra nagyobb középvonalhossz a jellemző. [15]

A szabványban említett, 0,94 m középvonalhossz, a legtöbb esetben azonban jó közelítésnek számít, amit számos mérés és szimuláció támaszt alá.

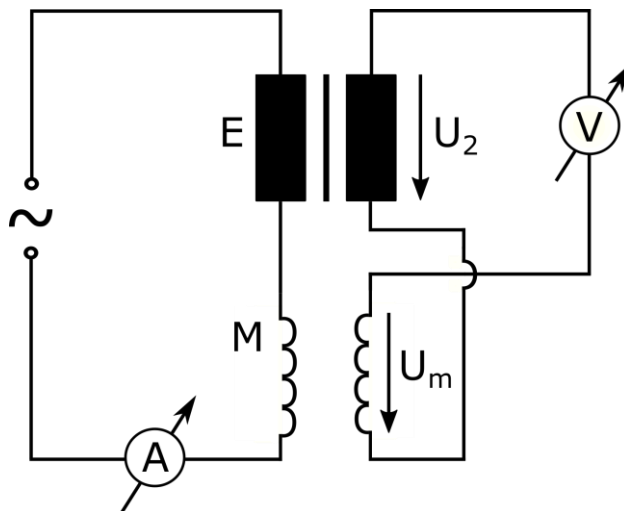
4.2.3 Alacsony frekvencia

Ahogy növeljük a frekvenciát, a mért hiszterézis görbe szélessége nőni kezd, ahogyan a görbe területe, vagyis a veszteség is. [12] Így eltérhet a mérési eredményünk, a mérendő anyag adatlapjában szereplő görbétől. A méréseinkben azonban 10 Hz frekvenciájú gerjesztéssel fogunk dolgozni, ami a szabványban szereplő maximális érték alatt van. Nincs is szükségünk nagyobb frekvenciára, ugyanis olyan anyagokat szeretnénk tesztelni, amik állandó, vagy kis frekvenciás mágneses terek árnyékolására lesznek felhasználva. Ezek feladata a zavaró, nem hasznos mágneses terek elvezetése, eltérítése a védendő tárgytól.

4.2.4 Kompenzáló tekercselés

Az Epstein-keret hátránya, a toroid-méréssel ellentétben, hogy a gerjesztő és gerjesztett tekercsek nem fekszenek fel a mintára. Ha mágnesezzük az anyagot, akkor akaratlanul a levegővel is azt tesszük, ami a tekercsen belül van. Ezáltal a mért eredményben látható indukció a próbatest és a levegő fluxusának kombinációjából adódna. Ez az eset akkor is fennáll, ha a túl kevés lemezt használunk a mérésben, így a keret nem lesz kitöltve a mérendő anyaggal, megfelelő mértékben. A legkevesebb lemezsám, amivel a mérést érdemes elvégezni 12, és a lemezek össztömege nem lehet kevesebb 240 grammnál. [13] [12] A szabványos keretben, emiatt egy további, szolenoid tekercset iktatnak be, ami eliminálja a levegőből származó hibakomponenst. [31]

A kompenzáló tekercs menetszámát, geometriáját úgy kell beállítani, hogy gerjesztés közben, a kimeneti feszültség (a keret szekunder tekercsében indukálódó feszültség) a lehető legközelebb legyen a zérushoz, miközben nincs behelyezett minta. Azaz az általa előállított feszültség egyenlő, de ellentétes a keret által előállított feszültséggel. [16] Az alábbi ábrán (4-1. ábra) látható is, hogy a feszültség-mérőn olvasható érték akkor lesz zérus, ha U_2 és U_m egyenlő:



4-1. ábra: A kompenzáló tekercs bekötése [31]

Mivel a gerjesztő és a kompenzáló tekercs primer köreikben ugyanaz az áram folyik, így a szekunder oldalakon indukált feszültség akkor lesz egyenlő, ha a kölcsönös indukciók megegyeznek. A kölcsönös indukció (M) egyenlete pedig a következő:

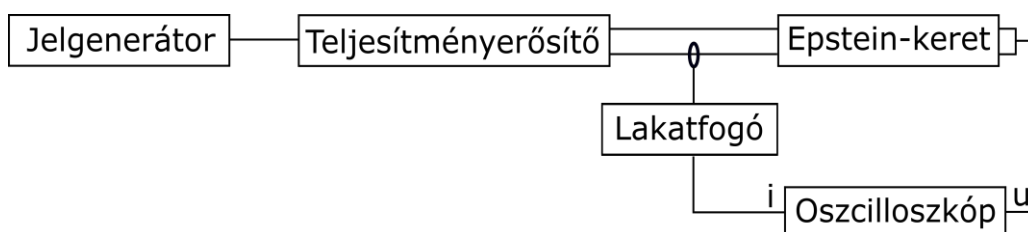
$$M = \frac{\mu_0 \mu_r N_1 N_2 A}{l}$$

Ez az egyenlet az indukció egyenletére hasonlít, azzal a különbséggel, hogy itt a primer és szekunder oldali menetszámokkal számol (N_1 és N_2). [17]

Legyen az Epstein-keret kölcsönös indukciója E , a kompenzáló tekercs pedig M . Ha ezek egyenleteit egyenlőkké tesszük, akkor a permeabilitások kiesnek, mivel behelyezett minta nélküli csatolásra tervezzük a kompenzáló tekercset. Amik pedig az ismeretlenek, azok a megtervezendő kompenzáló tekercs menetszámai és méretei. Ezzel kaphatunk egy jó közelítést, hogy hogyan építsük meg a középső szolenoidot. Persze valóban helyes megoldást úgy kaphatunk, ha teszteljük, majd kalibrálunk a kompenzátoron. További támaszt nyújthat még a rendszer végeelem szimulációja is. Ha az elkészített rendszert a kellő pontossággal lemodellezzük, akkor a paraméterek változtatásával, könnyebben rátalálhatunk az optimális megvalósításra.

5 Mérési elrendezés specifikációja

A lenti ábra (5-1. ábra) alapján a mérőrendszerünk négy fő részre osztható. Az első fokozat a jelgenerátor, aminek a segítségével szinuszos gerjesztő jelet tudunk előállítani. Ennek a teljesítménye azonban nem elegendő, a megfelelő nagyságú áram előállításához szükségünk van egy teljesítményerősítőre. Ez a műszer a függvénygenerátor kimeneti feszültségével arányos árammal táplálja a primer tekercsünket. Erre kapcsolódik közvetlenül az Epstein-keretre feltekert tekercsrendszer. A negyedik rész pedig az oszcilloszkóp, amely méri a primer tekercs áramát, valamint a szekunder tekercsben indukált feszültséget. Nincs szükségünk integráló tagra, mivel az oszcilloszkóp tartalmazza ezt a funkciót.



5-1. ábra: A mérési elrendezés blokkdiagramja

5.1 Az Epstein-keret

Azért ezzel kezdem, mert ehhez a blokkhoz kell méretezni a rendszer többi részét. A keretben a két fontos jel, amivel dolgozok, a bemeneti áram és a kimeneti feszültség. Mivel a szabványos mérőrendszerhez próbálok alkalmazkodni, ezért meg tudok adni általános be-, és kimeneti értéktartományokat.

Az erősítőfokozat kimeneti teljesítménye megengedi, hogy a szabványos geometriával számoljunk. Ugyanebből a megfontolásból, annak sincs akadálya, hogy a szabványos mérőrendszerekben leggyakrabban használt 700-700 menetszámot válasszam. A transzformátor egyenletét tekintve a feszültségátvitel így közel egységnyi lesz. (Ideális esetben azonos amplitúdójú feszültségértékeket kapnánk.) [18] A tekercseléshez rendszerint rézvezetékot használnak. A gerjesztő tekercs keresztmetszete $1,8 \text{ mm}^2$ átmérője 1,514 mm. Ezt több rétegben kell felhelyezni a keretre, minden oldalon. A szekunder tekercsben nem kell akkora áramokra számítani, mint a primer tekercs esetében, így elegendő $0,8 \text{ mm}^2$ keresztmetszetű, 1,009 mm átmérőjű vezetékot

használni. A gerjesztett tekercset, a gerjesztő alá helyezzük, így a lehető legkevesebb fluxust fogjuk összegyűjteni, ami a minta környezetében lép fel. Gyakran a szolenoidok közé elektrosztatikus védőfóliát helyeznek.

A szabványos geometria értelmében a mérésben használt lemezek 28 cm hosszúsággal és 3 cm szélességgel rendelkezzenek. A lemezek számát, össztömegét és azok behelyezését a szabvány szerint értelmezzük. A szabványos geometria keretre is vonatkozik, amire a tekercseket felhelyezzük. [13]

A keretbe helyezett lemezeket két csoportba sorolhatjuk. Léteznek GO (Grain Oriented Electrical Steel), azaz szemcseorientált elektromos acél és NO (Non Oriented Electrical Steel), azaz nem szemcseorientált lemezek. Az előbbi szerkezete, szemcsézettsége egyenletes, így nagyobb mágneses telítettségre képes. Az anizotróp jellege miatt transzformátorokban használják ezeket a lemezeket, ahol a veszteségek csökkentése fontos szempont. A másik esetben a mágneses tulajdonságok gyakorlatilag megegyeznek a sík bármely irányában, tehát ezek izotróp jellegűek. Ezeket pedig főként generátorokhoz, nagy hatásfokú motorokhoz használják. [19]

A nem orientált lemezek esetében, nagyobb mágnesező áramra van szükségünk. Általánosságban véve, 1,7 T indukcióhoz szükséges áramerősség akár 6 A nagyságú is lehet. Az általános gerjesztésekhez tartozó, tipikus kimeneti feszültség, a szekunder tekercsben 7 és 11 V közé esik, amennyiben GO lemezeket vizsgálunk. Ez a feszültség érték 13 és 22 V közé tehető, ha NO lemezeket helyezünk a keretbe. Ezek 1 és 1,7 T közti indukcióra értelmezettek. [13]

A primer tekercsen folyó áram miatt fokozottan ügyelni kell a tekercsnek használt vezető vastagságára, valamint elektromos tulajdonságaira. Ugyanis a tekercsből, az anyagba áramló hő befolyásolja a mérési eredményeket, és hibás anyagi tulajdonságokkal fogunk a későbbiekben dolgozni.

Ahhoz, hogy a szekunder tekercs túl nagy áramerőssége ne befolyásolja a mágneses tér nagyságát a mintában, a gerjesztett oldali áramnak kicsinek kell lennie. Mivel a szekunder oldalt az oszcilloszkóphoz kapcsoljuk, így annak nagy impedanciája miatt az áram elhanyagolható lesz.

5.2 A függvénygenerátor

A használni kívánt függvénygenerátor: Keysight 33500B Series, 1 csatornás tagja. Ezzel adjuk ki a gerjesztő jelalakot. Azonban ez az eszköz nem tudja meghajtani a keretet. Emiatt a jelgenerátor kimeneti jelét egy teljesítményerősítő bemenetére szükséges kötnünk. Mivel a mágnesezési görbe felvételéhez időben váltakozó áramok és feszültségek periódusát kell mérnünk, a választott beállítás a folytonos jelalak. Mivel nincs visszacsatolás a rendszerünkben, ezért a gerjesztés egyszerű szinuszos feszültség lesz.

Az eszköz szinuszos frekvenciatartománya 1 μHz – 20 MHz. A harmonikus torzítása, kevesebb mint 20 kHz esetében, -70 dBc. Ez az érték a vivő jelhez képest értendő. Mintavételezése akár 250 MSa/s (megasample/sec) is lehet. 16 bites felbontással rendelkezik, a beállási ideje pedig kevesebb, mint 200 ns. Utóbbi értéket addig a pontig értelmezik, amíg a jel el nem éri a végső értéktől való 0,5 %-os eltérést. A kimeneti impedanciája 50 Ω , és a legnagyobb kimeneti feszültsége 10 Vpp. [20]

A jelgenerátort és a teljesítményerősítőt BNC-BNC kábellel kötöttem össze.

5.3 A teljesítményerősítő

A teljesítményerősítő: Schwarzbeck LFPA 9733. Az eszköz képes DC, valamint váltakozó feszültségű jelet is erősíteni, egészen 250 kHz-ig. A legnagyobb erősítést 8 Ω impedancia esetén képes előállítani, amely 26 ± 3 dB. Folytonos, maximális kimeneti árama 14 A_{rms} . Jellemző bemeneti ellenállása 10 k Ω , emiatt a jelgenerátor kimenetét high Z, azaz nagyimpedanciás állapotúra kell módosítani. A torzítási tényező (THD: Total Harmonic Distortion), 8 Ω impedancia esetén kisebb, mint 1 %. A kimeneti szint állítható egy enkóder segítségével, 256 lépésben, amit a kijelzőn százalékos értékben láthatunk. A megengedett legkisebb terhelés, 15 Hz-en, 1 Ω . Ezt az értéket a primer kör impedanciája meghaladja. [21]

Ahhoz, hogy tudjuk, milyen teljesítményre van szükségünk, hogy a kívánt árammal tudjuk meghajtani a tekercset, ismernünk kell a tekercs impedanciáját ($|Z|$). Ezt a következő egyenletekkel lehet meghatározni:

$$|Z| = 2\pi \cdot f \cdot L, \text{ valamint } L = \frac{\mu_0 \mu_r \cdot A \cdot N^2}{l}$$

Ahol

- f a gerjesztés frekvenciája [Hz],
 L a tekercs inductivitása [H],
 μ_0 a vákuum permeabilitása [Vs/Am],
 μ_r a tekercsbe helyezett anyag relatív permeabilitása [-],
 A a tekercs keresztmetszete [m²],
 N a tekercs menetszáma [-],
 l a tekercs középvonalának hossza [m]. [22]

Ez az érték a következőképp adódik, ha az alábbi példaértékekkel számolunk, hasonló sorrendben, mint ahogy a fenti egyenletben is szerepeltek:

$$|Z| = 2\pi \cdot (10\text{Hz}) \cdot \frac{(4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}) \cdot (10^4) \cdot (320 \cdot 10^{-6} \text{m}^2) \cdot (700^2)}{(0,94\text{m})} = 131,7\Omega$$

A mérések alatt ennél kisebb impedanciát tapasztaltunk, az anyag kisebb permeabilitása miatt. A teljesítményerősítő kimenetét banándugós kábelekkel köthetjük a primer körhöz.

5.4 Az oszcilloszkóp

A mérések alatt használt oszcilloszkóp Keysight MSO-X 3054A típusú. Választható bemeneti impedanciája lehet 1 M Ω (± 1 %), párhuzamosan egy 14 pF-os kapacitással, vagy 50 Ω ($\pm 1,5$ %). A legnagyobb bemeneti feszültség nem lehet nagyobb 135 V_{rms}, vagy 190 V_p értékeknél. A maximális mintavétel 4 GSa/s, ami gigasample/sec-ben értendő. Vertikális felbontása 8 bit-es, sáv szélessége 500 MHz. A vertikális pontosság: $\pm 0,1$ div (beosztás) ± 2 mV ± 1 % az ofszet-beállításnak. A méréseknél High Resolution módot használtunk, ami mozgóablakos átlagolást használ a zaj csökkentésére, valamint a vertikális felbontást 12 bit-re emeli. [23]

Az transzformátorok effektív, indukált feszültségére ($U_{2,rms}$) felírható egyenlet a következő:

$$U_{2,rms} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_2 \cdot A \cdot B_{\max}$$

Ahol

- f a frekvencia [Hz],

- N_2 a szekunder tekercs menetszáma [-],
A a minta keresztmetszete [m^2],
 B_{max} pedig a mágneses indukció csúcserőssége [T]. [12]

A képletbe behelyettesítve próbaértékeket, valóban a fent említett nagyságrendet kapjuk, az eredmény 10 V értékre adódik.

A cégnél található Data Acquisition System (DAQ) mintavételi frekvenciája 100 kHz, a legnagyobb bemeneti feszültség pedig 5 V. Láttuk, hogy a mérendő szekunder feszültség ezt meghaladja. Ezt persze egy egyszerű feszültségosztóval lehetne mintavételezni, de a jobb mintavétel miatt, valamint a matematikai átalakítások egyszerűsége miatt, az oszcilloszkópot részesítettem előnyben. Lehetőség van a mért jel integrálására is, ezért nincs szükség az integráló tagra. A primer áramból könnyen mágneses térerősséget, az indukált feszültség integrál értékéből pedig mágneses indukciót számolhatunk.

A mérés során, az oszcilloszkóp egyik csatornájára a primer tekercs árama kerül, amit egy árammérő lakatfogóval tudunk a legegyszerűbben megmérni. A másik csatornára pedig a szekunder tekercsben indukált feszültség kerül.

5.4.1 Feszültség mérőfej

A feszültség mintavételezéséhez olyan mérőfejet használtam, amely egyik végén az oszcilloszkóphoz csatlakoztatható BNC csatlakozó, a mérő végén pedig két banándugó található. A mérőfej és a vezeték ellenállása kicsi. Az oszcilloszkóp előnye, hogy a csatornákon magunk állíthatjuk be a bemeneti impedanciát. Ahhoz, hogy kicsiny áram folyjon a szekunder oldalon és az oszcilloszkópon, az 1 M Ω -os impedanciát választottam.

5.4.2 Árammérő lakatfogó

A választott lakatfogó a R&S RT-ZC20 típusú mérőeszköz. Amelynek BNC csatlakozója közvetlenül az oszcilloszkóp bemenetére köthető, áramellátását pedig egy csatlakoztatott táppal oldható meg. Az oszcilloszkópra kötve, azon 50 Ω -os impedanciát választottam, a mért jel mértékegységét amperre, míg a mérőfej csatolását 10:1-re változtattam, a lakatfogó 0,1 V/A érzékenysége miatt. A lakatfogót minden mérés előtt le kell mágnesezni, és a rajta levő ofszetet ki kell nullázni.

A válaszidő 3,5 ns, sáv szélessége 100 MHz. Érzékenysége 0,1 V/A, ami jobb mint a többi, thyssenkrupp-nál használt lakatfogó érzékenysége. DC érzékenységi hibája $\pm 1\%$, nullhibája (zero error) pedig ± 10 mA. AC érzékenysége, szinuszos jel esetében $\pm 3\% \pm 10$ mA_{rms}. A maximális folytonos áram 30 A_{rms}, ami számunkra elegendő. [24]

A kiválasztott lakatfogó adatlapjában fel van tüntetve, hogy a lakatfogó tápja, hálózati földre van kötve. Ez veszélyt jelenthet, mivel az oszcilloszkópok BNC csatlakozóinak külső részei rövidre vannak zárva. Az oszcilloszkóp mérőfejen két banán csatlakozó van. Ha olyan pontra helyeznénk a földhöz kötött csatlakozót, ami nincs földelve, miközben egy nem izolált áramkörre csatlakozunk, akkor egy kicsi ellenállású rövidzárat hoznánk létre a mérőfej és a hálózati föld között. A mi esetünkben, a szekunder kör mérésénél ez a veszély nem lép fel, mivel a gerjesztett kör izolálva van a primer körtől, ezért az lebeg. Arra viszont ügyelni kell, hogy ne a primer körre csatlakoztassuk a banándugós mérőfejet. [25]

5.5 A demagnetizáló készülék

Ahhoz, hogy az első mágnesezési görbét minél pontosabban tudjuk felvenni, szükség van egy demagnetizáló eszközre. Az ilyen készülék váltakozó polaritású mezőt gerjeszt, amely erősségét fokozatosan csökkenti zérus értékig. A mágnesezettség csökkentése az anyagban kétféleképpen történhet. Az egyik, ha a gerjesztő áram nagyságát csökkentjük fokozatosan. A másik lehetőség, ha a mágneses mezőt mozgatjuk a munkadarabhoz képest. Tehát az állandó amplitudójú, váltakozó mágneses tértől távolítjuk.

A cégnél egy Magnaflux ETT-250 típusú demagnetizáló készülék található. A demagnetizáló alagútban, a munkadarabot mozgatjuk, a gerjesztő tekercs tengelye mentén. A mező frekvenciája 50 Hz, erőssége 9 kA/m. A tápláláshoz 230 V hálózati feszültségre van szükség. [26]

5.6 A mérés hibaterjedése

A jelek mérésénél hiba adódhat a mintavevő eszközöknél, ezek az eszközök a lakatfogó és az oszcilloszkóp. Az áram mérésének esetében mindkettő szerepet játszik, az indukált feszültség mérésénél viszont csak az oszcilloszkóp pontatlansága számít.

Az alábbi táblázatban összegzem a lakatfogó és az oszcilloszkóp hibáit, melyek az adatlapjaikban szerepelnek (1. táblázat). Ezeket a százalékos értékeket felszorozom a mért jelek nagyságával. Körülbelül 3,5 A nagyságú áramot használtam, melynek effektív értékét az oszcilloszkóp 2,1 A_{rms}-nek számolta. Az ehhez tartozó legnagyobb feszültség érték körülbelül 15 V volt, 50 Hz-en.

	Az áram hibája		A feszültség hibája	
	%	Érték	%	Érték
Lakatfogó	±1 % ±29 mA	±64 mA	-	-
Oszcilloszkóp	±0,1 div ±20 mA	±220 mA	±0,1 div ±2 mV	±502 mV
Összesen	±284 mA		±502 mV	

1. táblázat: A jelek mérésének hibái

A demagnetizált lakatfogón még elvileg maradhat ±10 mA ofszet hiba. Azonban az oszcilloszkópon 10 mA-es beosztás is beállítható, így szinte tökéletesen le tudtam mágnesezni a lakatfogót. Szobahőmérsékleten, amelyen a méréseket végeztük, ±1 % ±10 mA_{rms} érzékenységi hiba jelenik meg. Ehhez még hozzáadódik a külső zavaró tér okozta hiba, ami kevesebb, mint 5 mA_{rms}. A mért jel zajossága 2,5 mA_{rms} is lehet. Ezeket összegezve legrosszabb esetben (worst case) ±1 % ±17,5 mA_{rms} hiba adódik. Visszaszámolva amplitudóra, az oszcilloszkóp mérése alapján: ±1 % ±29 mA. [24]

A vertikális pontosság az oszcilloszkópnál: ±0,1 div (beosztás) ±2 mV ±1 % az ofszet beállításnak. A legutóbbi nálunk kiesik, mivel nincs beállított ofszet a jeleken, így marad a ±0,1 div (beosztás) ±2 mV. Árammérés esetben a 0,1 V/A beállított osztás miatt, ±20 mA-re adódik. A beosztás 2 A és 5 V nagyságú volt, ezek 10 %-a 200 mA és 500 mV. [23]

A mágneses térerősséget az áramból a fenti egyenletek alapján kaphatjuk meg. A 284 mA hiba akár 211,5 A/m eltérést is okozhat, ami a mi mérési tartományunk közel 10 %-a. Az indukált feszültséget integrálva, annak amplitudója nem változik, így szintén egyszerű szorzással megkaphatjuk az indukció hibáját, ami 54,5 mT-ra adódik, ami körülbelül 3 %. Ez utóbbi abban az esetben, ha 240 gramm össztömegű lemezt helyezünk a keretbe, melynek sűrűsége 7850 kg/m³. Összességében a jelek mérésénél akár 10 % hibát is véthetünk, ami jelentős pontatlanság.

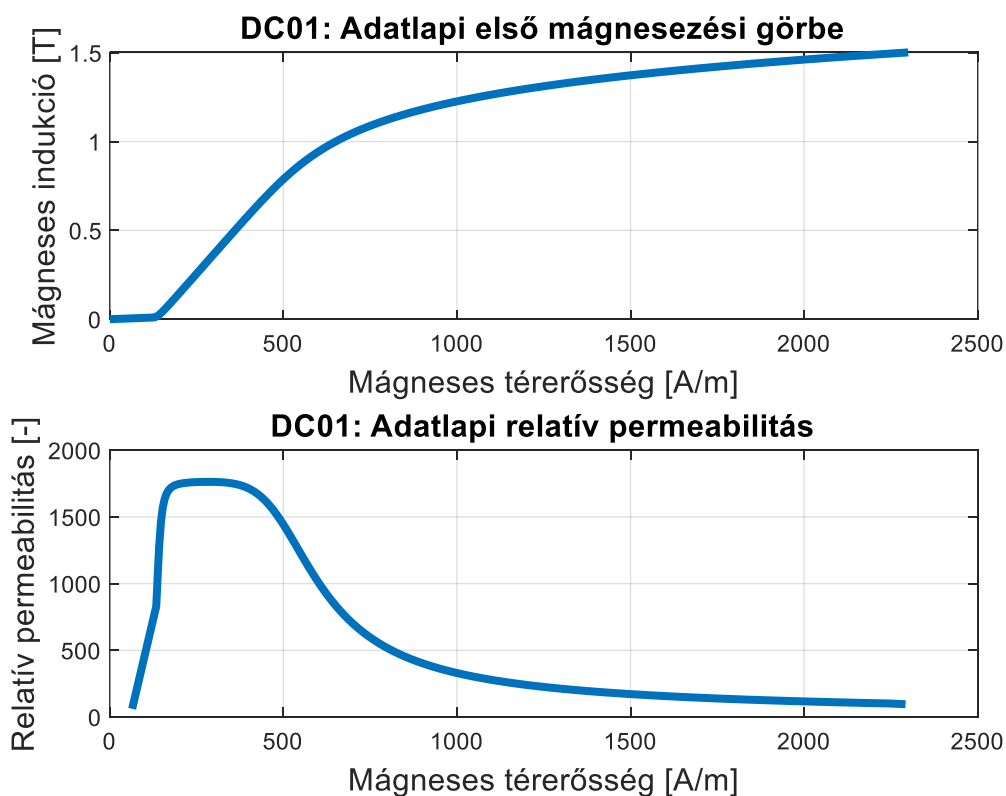
6 A mérések eredménye

A méréseket a Méréstechnika és Információs Tanszék-től kölcsönkapott Epstein-kereten végeztem. Primer és szekunder tekercseinek a menetszáma egyaránt 700. Méretét tekintve, a szabvány szerinti 25 cm-es keret. Eszerint a benne elhelyezhető lemezek hossza 28 cm, szélessége 3 cm. A keret közepén megtalálható a kompenzáló tekercs is. A primer kört megmértük impedanciamérővel, a soros RL modell értékei pedig a következőnek adódtak: az ellenállás 48Ω , az induktivitás pedig 400 mH. Kiszámolva a modell impedanciáját, 10 Hz-en, $73,13 \Omega$ -ot kapunk.

6.1 Ismert tulajdonságú anyag mérése (DC01)

A méréshez egy ismert tulajdonsággal rendelkező anyagot választottam. Ebből az anyagból 20 darab lemezt vágtam, vastagságuk 0,3 mm. Ez az anyag az úgynevezett DC01, angol gyűjtőneve electrical steel, a szilícium és a vas ötvözet, neve ferroszilícium. Kicsi hiszterézis területtel és nagy permeabilitással rendelkezik. Tudnunk kell az anyag sűrűségét, ami 7850 kg/m^3 . A 20 lemez össztömege 415 gramm, egy lemez tömege körülbelül 20 gramm. A méréseket 12, 16 és 20 lemezzel végeztem el.

A forrás alapján, az alábbi ábrán (6-1. ábra) látható első mágnesezési görbét és relatív permeabilitást kaptuk:



6-1. ábra: A DC01-es anyag adatlapi görbéi

Látható, hogy 0 A/m-hez tartozó adat után az első érvényes adat körülbelül 130 A/m-nél jelenik meg. A diszkrét eredményeket és adatsorokat azonban összekötöttem, a jobb átláthatóság kedvéért.

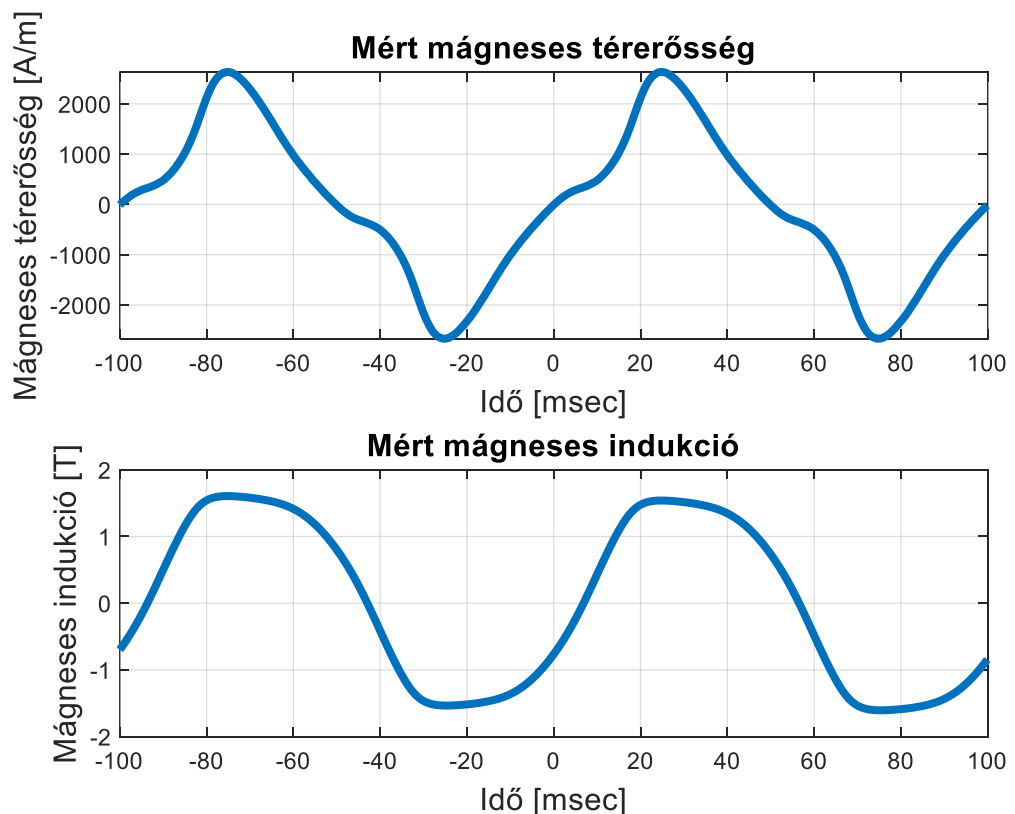
Négy féle mérést végeztem, ebből kettőnél szinuszos gerjesztést, kettőnél pedig sebességugrás gerjesztést használtam. A szinuszos gerjesztések 10 és 50 Hz frekvenciájú jelek voltak. A sebességugrás előállításához egy periódusnyi fűrészjelet használtam, melynek első fele sebességugrásnak tekinthető. Ezutóbbi mérésnél az egyik esetben a thyssenkrupp-nál található demagnetizáló készüléket használtam, másik esetben a mintákat az Epstein-keretben mágneseztem le. Ennek módja az volt, hogy a szinuszosan gerjesztettem telítésig az lemezeket, majd fokozatosan letekertem a teljesítményerősítő erősítését, amikor elértem a minimum erősítéshez, a jelgenerátor jelét is elkezdtem csökkenteni 0-ra.

6.2 A mérések utómunkálatai

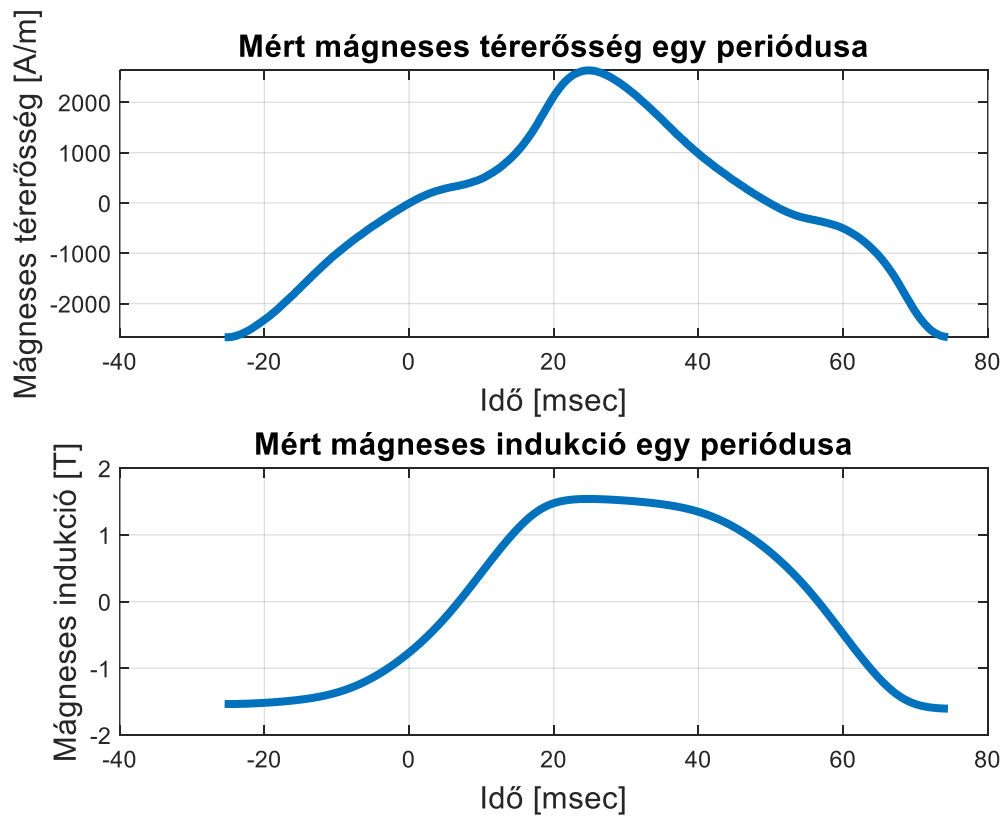
6.2.1 Hiszterézis görbe

A 6-2. ábra, a 6-3. ábra, a 6-4. ábra és a 6-5. ábra azt a mérést mutatja be, amikor 16 lemezt helyeztem el a keretben, össztömegük 335 gramm volt. A gerjesztő jel 10 Hz-es váltakozó feszültség volt.

A mérési eljárásból adódóan, lehetőségünk van exportálni a mért gerjesztő áram nagyságát és az indukált feszültség integrálját. Az utómunkálatokat Matlab programban végeztem el. Első lépésben a mért értékeket kell átalakítani úgy, hogy mágneses térerősséget és indukciót kapjak (6-2. ábra). Ezeket a gyűrű minta mérésében szereplő egyenletek alapján, egyszerű szorzás segítségével valósítottam meg. Ahhoz, hogy megkapjam a hiszterézis görbét, először ki kell vágnom egy periódust a mérésből (6-3. ábra). Ezután XY módban ábrázolva, a valós értékű mágnesezési görbét kaptam meg.

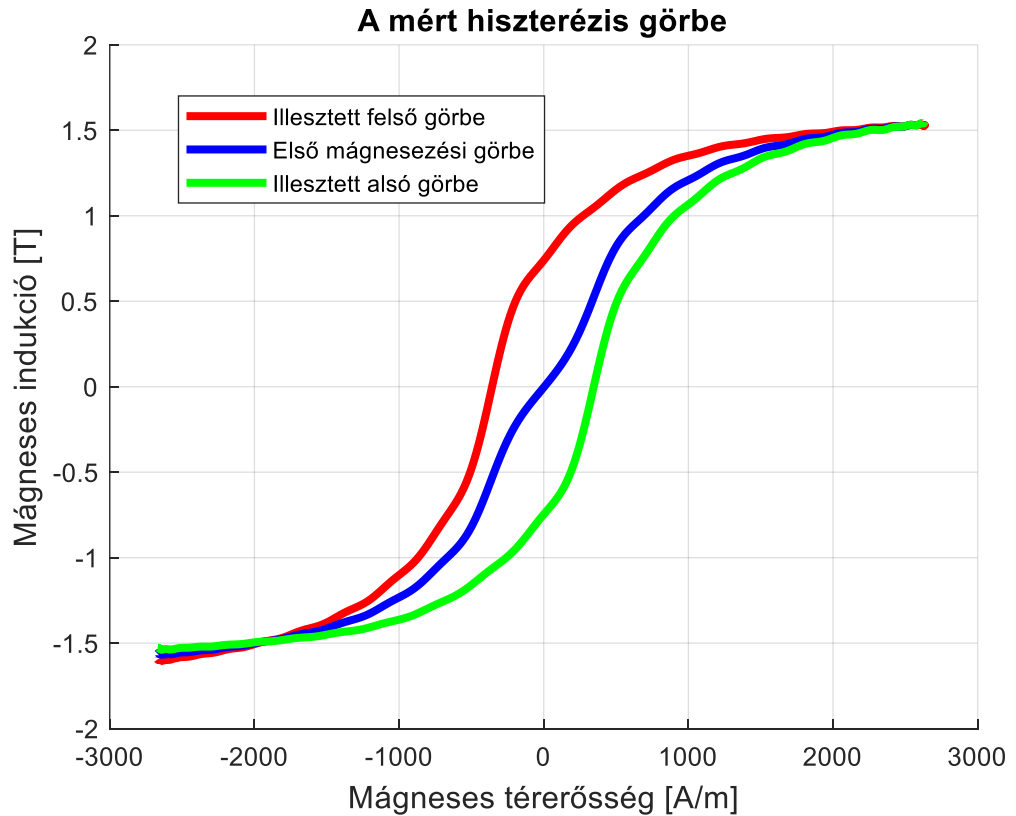


6-2. ábra: Mérési eredmények az átalakítás után



6-3. ábra: Egy periódus kiválasztása a mérésből

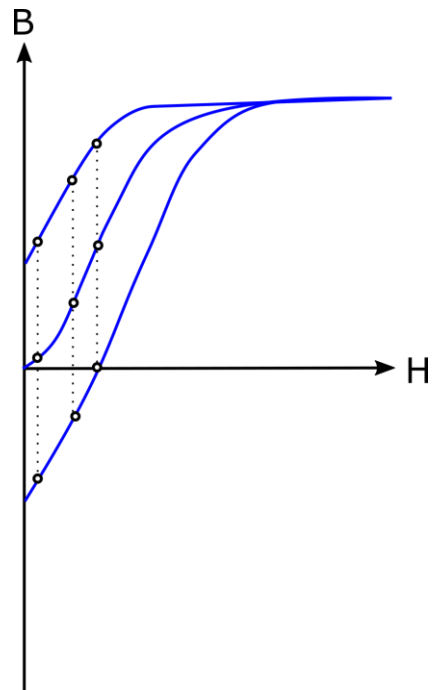
A következő fejezetben látható, hogy a hiszterézis hurkot fel kell bontani alsó és felső görbékre. Hogy ezekkel számolni is tudjak, görbét kellett illeszteni rájuk. Több hiszterézis modell létezik, melyek segítségével görbét tudtam illeszteni a mérési eredményre. Az egyszerűség kedvéért azonban polinom illesztést használtam. A kis fokszámú polinomok közel sem illeszkedtek megfelelően, ezért nagyon nagy, ötvened fokú polinomot használtam, ami már jól illeszkedett (6-4. ábra).



6-4. ábra: Az illesztett hiszterézis görbe és az első mágnesezési görbe

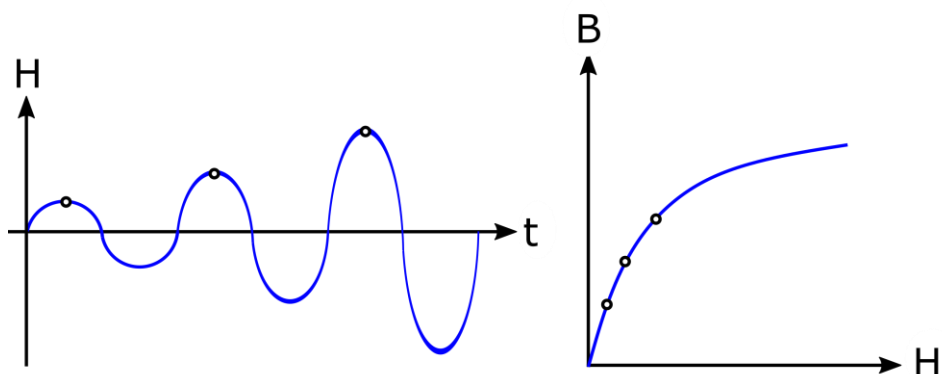
6.2.2 Első mágnesezési görbe

Az első mágnesezési görbét többféle módon kapható meg a teljes hiszterézis görbe segítségével. A legegyszerűbb megoldás az, ha a mágnesezési görbe felső és alsó részeinek átlagát veszem. Azaz a mágneses térerősség (H) tengelyén haladva, minden pontban veszem a hozzá tartozó, két mágneses indukció (B) középértékét. Ezek a görbék a lenti ábrán láthatók.



6-5. ábra: Átlagolással megkapott első mágnesezési görbe

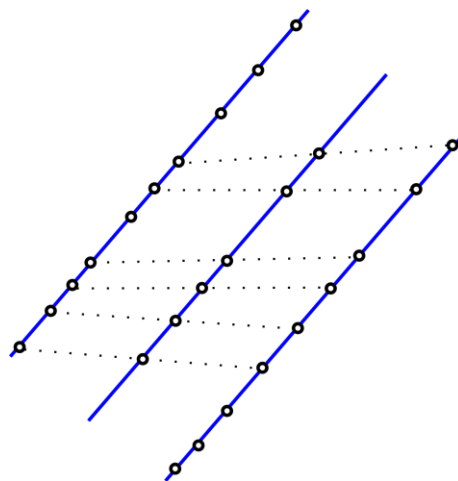
A második megoldás, ha lemezek lemágnesezése és a keretbe behelyezés után elindítjuk a mérést, majd egyre nagyobb, szinuszos árammal látjuk el a primer oldali tekercset. Ebben az esetben az egyre növekvő hiszterézishurkok maximumai az első mágnesezési görbe vonalán haladnak végig. A kiértékelés úgy történik, hogy a mágneses tér nagyságát veszem az idő függvényében, és a maximumhelyeket feljegyzem. Ugyanezeket a maximumhelyeken vizsgálom a mágneses indukció nagyságát, és ezeket páronként rendszerezve megkapom az első mágnesezési görbét (6-6. ábra). Ennek az a hátránya, hogy a gerjesztést kell irányítani, ami időigényes folyamat. Az utólagos kiértékelés viszont egy egyszerű Matlab függvénnyel megvalósítható, és igen pontos eredményt is kaptam. Másik hátránya, hogy a mért adatokat nem lehet valós időben elmenteni az oszcilloszkóppal, mivel ez a mérés akár percekig is eltarthat. A mérést mindenképpen DAQ-val kellene megvalósítani.



6-6. ábra: A növekvő gerjesztéssel való megoldás

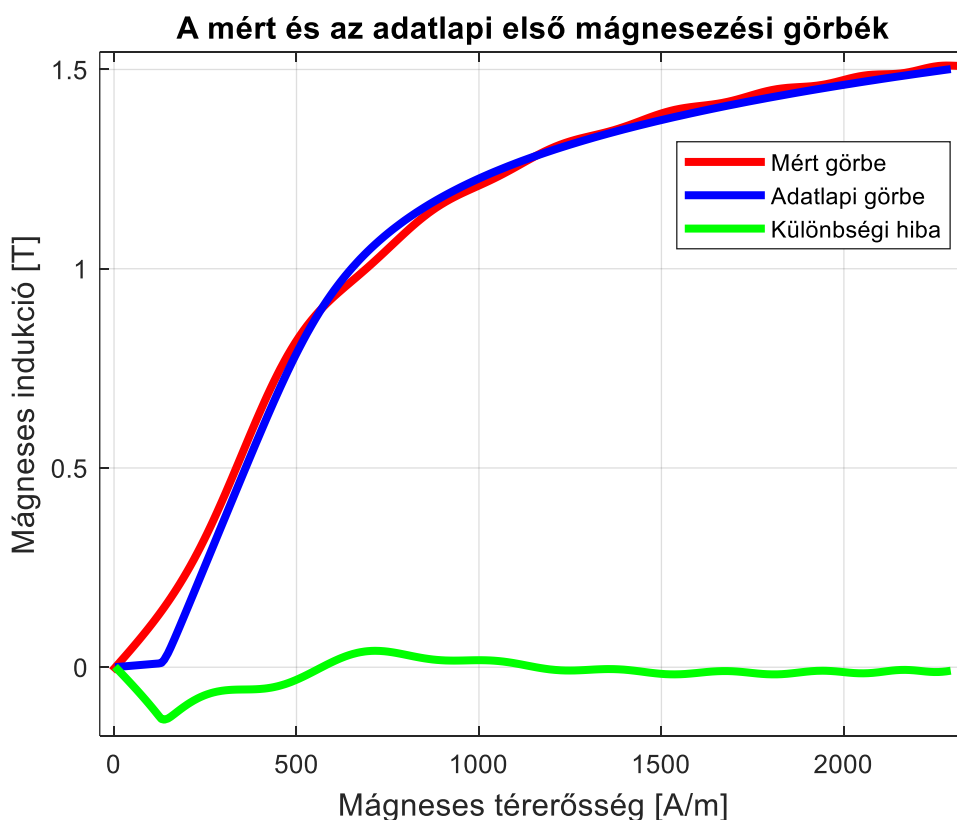
Egy másik megoldás, ha a telítésig viszem a mintákat, növelve az áramot. A jel nulláról indul, majd egyenletesen növekszik, neve sebességugrás vagy ramp. Amint a mágneses térerősség eléri az előre meghatározott maximumát, a mérést megállítom. Ebben a pontban a mágneses indukció nagysága is maximális. Mivel a mérésben csupán egy teljes mágnesezési periódus negyedéig értem el, így a mért adatokat XY módban ábrázolva, az első mágnesezési görbét kaptam meg. Ezen mérés előtt szintén le kell mágnesezni a lemezeket, hogy az origóból induló görbét kapjunk.

A negyedik lehetőség, olyan algoritmus használata, ami az első mágnesezési görbét, a teljes histerézis hurokból vezeti le. Az első lépés, a felső és az alsó hurkokban levő adatpontok szétválasztása. Ezután minden egyes alsó görbén található ponthoz hozzárendel egy felső görbén levő pontot. Hasonlóan az átlagoláshoz, azonban az összekötés bonyolultabb (6-7. ábra). A kapcsolatot az alapján hozza létre, hogy vesz az alsó görbén egy indukcióval rendelkező mérési pontot, és megkeresi azt a pontot a felső görbén, amelynek indukciója a legközelebb esik hozzá. Ezután veszi a két pont átlagát, ami az első mágnesezési görbe egy pontja lesz. Ezt a folyamatot minden egyes „alsó” pontra meg kell ismételni. A kiértékelést horizontális átlagolásnak is nevezik. Az első megoldásomban ennek az ellenkezőjét, a vertikális átlagolást végeztem el. Ez utóbbi is hasonló eredményt ad, mégis a horizontális átlagolást használják többször. [27]



6-7. ábra: A horizontális átlagolás [27]

Az átlagolást végeztem el a saját méréseimben, a fent említett illesztett polinomok átlagát vettem. Így megkaptam a mérési eredmény első mágnesezési görbáját, amit összehasonlítottam a DC01-es anyag adatlapi görbéjével (6-8. ábra).

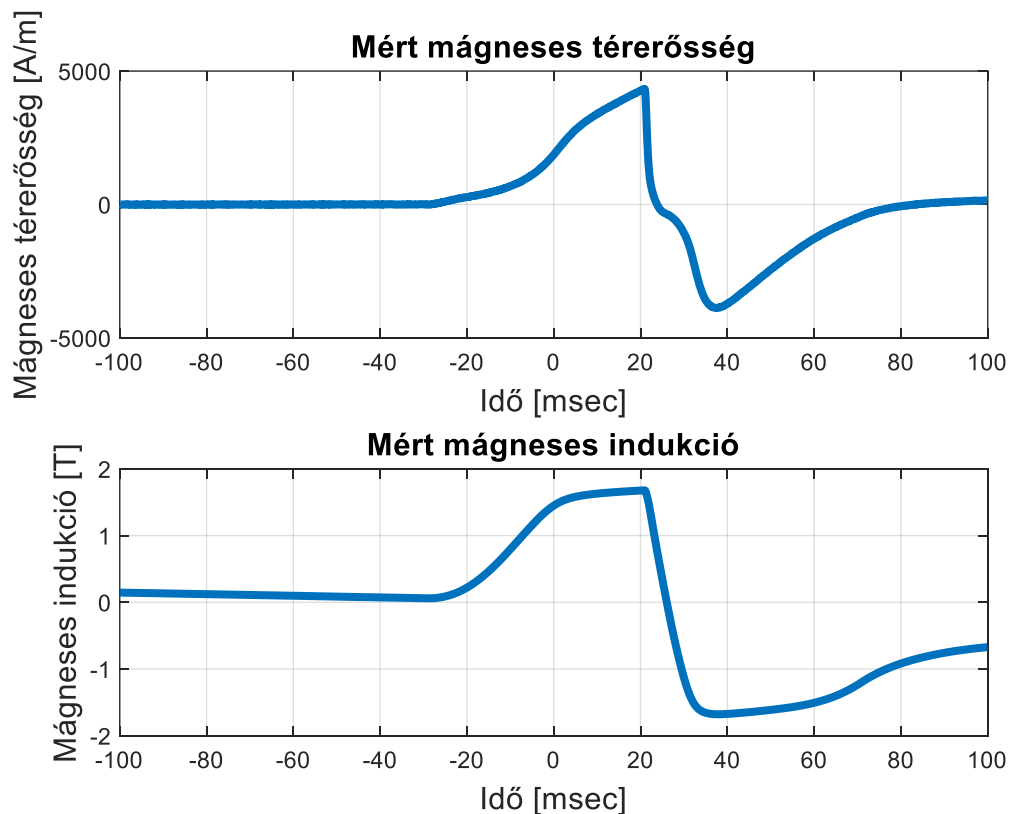


6-8. ábra: A mért és az adatlapi értékek összehasonlítása

Látható, hogy a legnagyobb hiba az értelmezési tartomány elején jelenik meg. Később a két görbe jól illeszkedik egymásra. A mért eredményvektorra szintén szépen illeszkedik a polinom, a hiba tehát nem a görbeillesztésben van. A mért görbe meredek

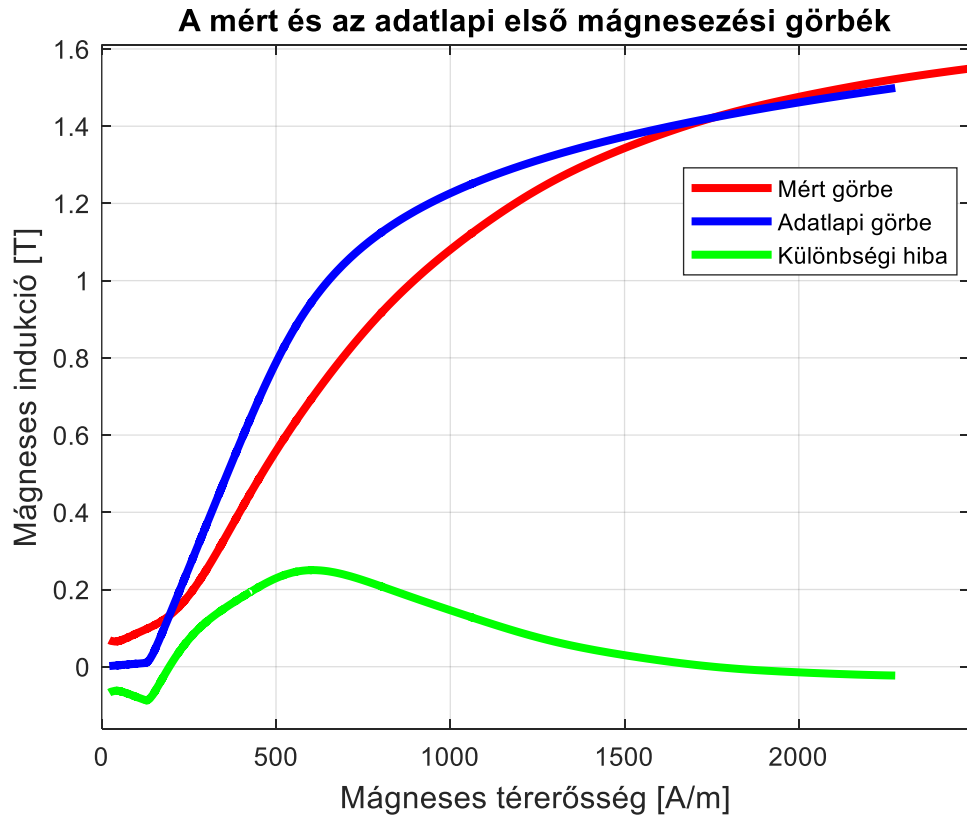
emelkedése abból adódhat, hogy az átlagolással kapott görbék nem adnak tökéletes megoldást kicsi térerősségnél.

Ezért kipróbáltam a thyssenkrupp-nál található demagnetizáló készülékkel lemágnesezett minták, sebességugrással való gerjesztését is. Először be kellett állítani a gerjesztés nagyságát, majd az oszcilloszkópot a megfelelő beosztásra kellett igazítani. Fontos, hogy a gerjesztés csak egy ugrásból álljon, ezért a függvénygenerátoron a Burst módot alkalmaztam. Ha az oszcilloszkópon Single üzemmódra váltok, akkor a trigger az első eseményre fog reagálni. A mérés előtt minél jobban megpróbáltam lemágnesezni a lemezeket, az előzőekben ismertetett demagnetizáló készülék segítségével. A sebességugrást a gerjesztés maximumáig kell venni, az ezt követő adatokra nincs szükségünk (6-9. ábra). A 6-9. ábra és a 6-10. ábra is a 16 lemezes mérés eredményét mutatja be.



6-9. ábra: Sebességugrás gerjesztés eredményei

Ezután szintén polinomot illesztettem és megvizsgáltam az eltérést (6-10. ábra).

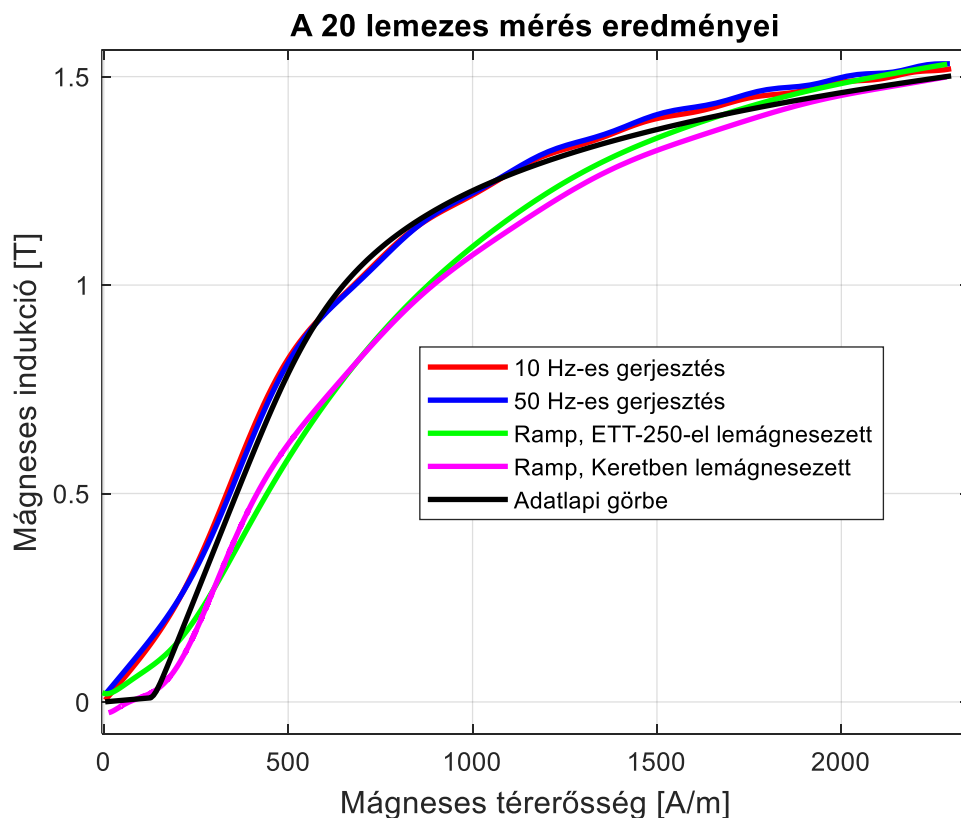


6-10. ábra: Az eredmények és az adatlapi értékek összehasonlítása

Azt láthatjuk, hogy a görbe nem az origóból indul, tehát a demagnetizáló készülékkel nem sikerült tökéletesen lemágnesezni a próbatesteket. Ezen kívül az 500 A/m térerősség közelében a hiba nagyobb, mint az átlagolással vett eredmények esetében. Az eltérések miatt elvégeztem az 50 Hz gerjesztésű mérést, és a kerettel való lemágnesezést is, majd ezeket is kiértékeltem. Az eredmények a következő fejezetben találhatóak.

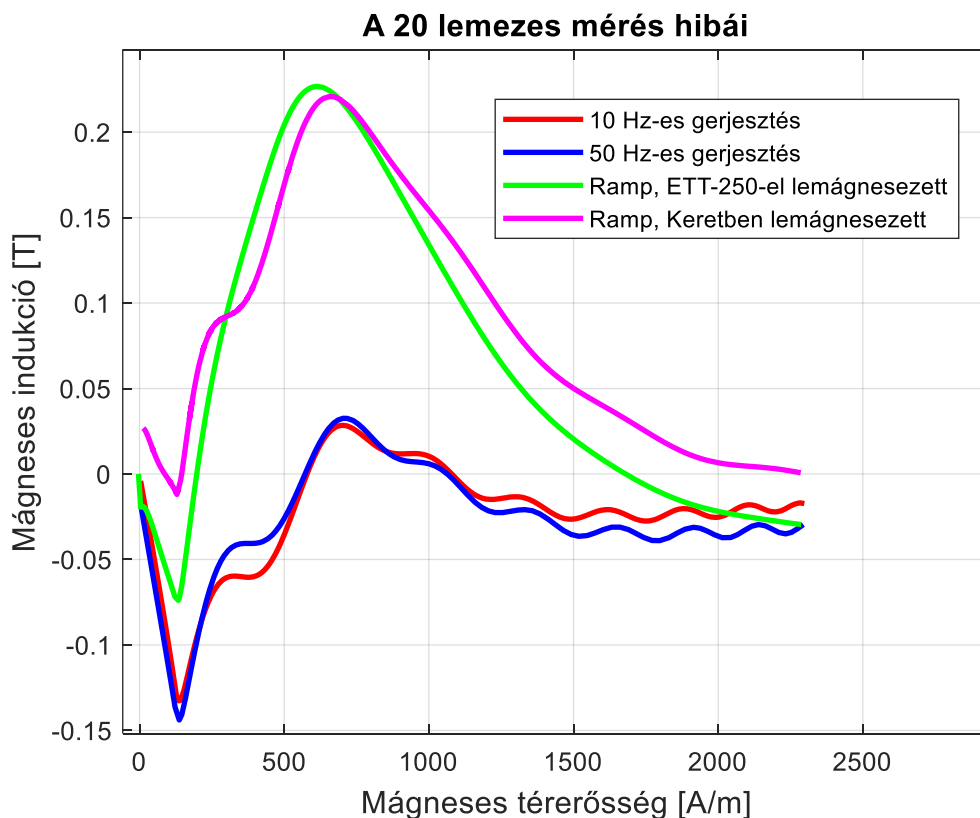
6.3 Az eredmények összegzése

Az alábbi ábrán a 20 lemezes mérés eredményeit mutatom be, tartalmazva a négyféle mérést (6-11. ábra).



6-11. ábra: A 20 lemezes mérések eredményei

Mind a négy első mágnesezési görbére elmondható, hogy a szaturációs tartományban szépen illeszkedtek az adatlapi görbére. Kisebb térerősségnél azonban, mindkettőnél más jellegű, nem elhanyagolható hibák mutatkoztak. Az alábbi ábrán az összes mérési eredmény hibáját hasonlítom össze (6-12. ábra).



6-12. ábra: A 20 lemezes mérések hibái

Láthatóan a lemágnesezés pontatlansága miatt marad valamekkora remanens mágnesezettség az anyagban, így zérus térerősségnél is adódik valamekkora hiba. Érdekes, hogy a 12 és 16 lemezes mérések esetében, a kézzel irányított lemágnesezéssel jobb eredményt értem el, mint a demagnetizáló készülékkel. Ezután 200 A/m-ig az összes mérés eredményében láthatunk egy ugrást a hibában. Erre két magyarázat fordulhat elő. Az egyik, hogy a minta gyártója nem tudta tökéletesen lemágnesezni az anyagot, és az ő méréseiknél is zavart okozott a remanencia. A másik, hogy a mérést pontosan végezték el, és a nem dokumentált szakaszon nagyon kicsi meredekségű a görbe. 1500 A/m-ig a ramp jelek esetén sokkal nagyobb hiba adódik, mint az átlagolás esetében.

A lemezek száma nem javított, vagy rontott egyértelműen az eredményeken. Ez annak tudható be, hogy az összes mérésnél a szabványban megadott minimális ösztömeg felett maradtunk.

A 10 Hz-es gerjesztés esetén a remanens mágnesezettség egyaránt 0,72 T lett, a koercitív erő 346 A/m-nek adódott, a szaturáció pedig 1,5 T-nál figyelhető meg. Az 50

Hz-es mérésnél a remanes indukció 0,82 T-nak, a koercitív erő 370 A/m-nek adódott, míg a szaturáció nem változott a 10 Hz-es méréshez képest.

A függelékben megtalálható 12, illetve a 16 lemezes mérések eredményei is. A mellékletben pedig az összes mért adat és a feldolgozó, Matlab scriptek érhetők el.

6.4 A relatív permeabilitás

A diszkrét eredmények és a polinomos görbeillesztés miatt a mért első mágnesezési görbe deriválásával nem kapjuk meg a pontos permeabilitást.

Az Altair: Flux nevű, végeelem szimulációs környezetben azonban lehetőség van az első mágnesezési görbe reprezentálására analitikusan. Bizonyos paramétereket változtatva, megkapjuk a keresett görbét. Ezt a görbét hasonlíthatjuk a saját mérési eredményünk görbéihez, és változtathatunk a megadható értékeken, hogy jobb illesztést kapjunk.

Ez az eljárás egy lineáris és egy görbe kombinációjával közelíti az első mágnesezési görbét. Az egyik paraméter a kezdeti relatív permeabilitás, amellyel az első mágnesezési görbe, lineáris részének meredekségét változtathatjuk. A második a szaturációs mágnesezettség nagysága. A harmadik egy olyan tényező, amellyel a görbe szaturációs szakasz előtti elhajlást változtathatjuk. Ez az érték 0 és 1 között értelmezendő. Ez a három paraméter elegendő ahhoz, hogy megkaphassuk az első mágnesezési görbét. A megkapott görbéből pedig már könnyebben meghatározható a relatív permeabilitás.

7 Kalibrációs eljárás

Kalibrációról akkor beszélünk, amikor összehasonlítjuk a saját eszközünket, és azok ismeretlen eredményeit, egy referencia eszközzel, aminek ismert, pontos eredményei vannak. Általában azért végzünk kalibrációt, hogy meghatározhassuk a eszközünk hibáját és annak összetevőit, vagy hogy megállapítsuk az eredményeink pontosságát. A kalibráció végén olyan paraméterekhez jutunk hozzá, amelyekkel a jövőbeli mérések eredménye átalakítható, így a hibákat kiküszöbölhetjük.

Kétféle lehetőséggel élhetünk, az első egy ismert érték mérése a kalibrálandó eszközünkkel, a másik pedig egy ismeretlen érték mérése, szintén az eszközünkkel, valamint egy referencia eszközzel. [28]

7.1 A mérőrendszer kalibrálása

A mi eszközünk az Epstein-keret, referencia eszközünk nincs, amihez hasonlíthatnánk az eredményeinket, ezért az előbb említett lehetőségek közül az elsőt kell használnunk. Az egyetlen anyag, amelyről biztosan tudjuk, hogy milyen tulajdonsággal rendelkezik, és a rendelkezésünkre áll a méréshez, a levegő. A kalibrációt nehezíti az a tény, hogy a szabványos Epstein-keretben van egy kompenzáló tekercs, ami a levegő fluxusát hivatott kinullázni a mérésből. Ezt az effektust úgy tudjuk ideiglenesen kiküszöbölni, ha ezt a kompenzáló tekercset kivesszük a mérőeszközből. Ezt vagy fizikailag, vagy a tekercs köreinek rövidre zárásával tudjuk megtenni, azonban ez nem jelent tökéletes megoldást, a vezeték ellenállásából adódóan. Ugyanis nem tudjuk biztosítani, hogy a kompenzáló tekercsen egyáltalán ne folyjon áram. Új mérőeszköz tervezése esetén, a legkönnyebb megoldás az lenne, ha egy kapcsolóval tudnánk befolyásolni az áram útját, annak érdekében, hogy a kompenzáló tekercsen keresztül, vagy azt kikerülve folyjon.

A kalibrációhoz meg kell mérni a levegő indukcióját, nagy tartományon, szinuszos gerjesztést használva. Ha a mért indukciót ábrázoljuk a térerősség függvényében, akkor az origón átmenő egyenest kell kapnunk. Ez annak tudható be, hogy a levegő relatív permeabilitása 1, ami független a mágneses térerősség nagyságától. Így egy kis meredekségű, origón átmenő egyenest kell kapnunk. Amennyiben az egyenes nem lineáris, akkor következtethetünk az eszköz

nemlinearitására, és annak nagyságára azokon a tartományokon, ahol az előfordult. Mivel ezt nehéz lenne fizikailag javítani, így az utólagos adatfeldolgozáskor lehetne a mért eredményeket lineáris értékekké alakítani. Ha ferromágneses anyagot mérünk, azok feldolgozásánál is hasonlóképpen kell eljárni. Másik hiba lehet az indukció tengelyén való eltolás. Azaz a rendszernek ofszet hibája is előfordulhat, ami az egyenesünk origótól való eltérése, az indukció tengelyén. A mért eredményeket annyival kell később eltolni, hogy valós, origót érintő első mágnesezési görbét kaphassunk.

7.2 Egyéb hibaösszetevők vizsgálata

Az előző alfejezetben olyan kalibrációs eljárást mutattam be, aminek a végén olyan paraméterekhez jutunk, melyekkel a későbbi méréseink eredményeit átszámolva, a helyes, hibától mentes megoldást kapjuk. Ebben a fejezetben további hibajelenségekről lesz szó, amelyeket ki lehet mutatni mérésekkel, de a kalibrációs paraméterekhez nem jutunk hozzá. Ebben a részben főként az eszköz érzékenységét vizsgáljuk, hasonló vagy különböző környezeti hatásokra.

Ilyen jelenség a mérés ismételhetsége. Ha egymás után többször lemérjük ugyanazt az anyagot, lesz-e eltérés a mérések közt, vagy tökéletesen illeszkednek egymáshoz? Fontos, hogy a mérési körülmények ugyanazok legyenek. Ezt a mérést bármilyen anyaggal, akár ismeretlen tulajdonsággal rendelkezővel is megtehetjük, ugyanis az eredményeket egymáshoz hasonlítjuk, nem egy referenciához.

További hibát okozhat az eszköz melegedése. Ha megfelelően, a használt áram nagyságokhoz lettek tervezve a vezetékek, akkor a melegedés elhanyagolható. Azonban ennél rosszabb is lehet a helyzet, ha egy hosszabb mérés során, a hő átáramolhat a próbatestekbe, amikben így a várttól eltérő eredményeket kaphatunk. Ezt hőkamerával látványosan tudjuk vizsgálni, miközben hosszabb ideig végezzük a mérést. Azon mérés eredményeit, melyek rövid ideig tartottak, összehasonlítjuk azokkal, amelyek előtt hosszabb ideig hagytuk a mérést futni. A különbség a két mérés közt megmutatja, hogy van-e a melegedésből adódó hiba.

Láthattuk, hogy az anyag tökéletes lemágnesezése nem egyszerű feladat. Ahhoz, hogy mérés előtt megbizonyosodhassunk a lemágnesezés pontosságáról, használhatunk tesla-métert. Ezzel lemérhetjük az anyag felületén maradó mágnesezettséget, és vizsgálhatjuk, hogy a remanencia milyen mértékben rontja el a mérést.

8 Összefoglalás

Szakedolgozatomban bemutattam a leggyakrabban használt mérési módszereket, melyekkel lágymágneses anyagok mágneses tulajdonságait lehet vizsgálni. Ezek közül bővebben ismertettem az Epstein-keret szabványos leírását, valamint a megtervezésének fontosabb lépéseit. Ezután egy ilyen mérőeszközön méréseket végeztem, egy ismert tulajdonságú anyag segítségével és a thyssenkrupp-nál található eszközökkel.

A mért eredményeink bizonyos tartományokon jól közelítették az adatlapi görbét. A hibaterjedésben számolt százalékos eltérések jó felsőkorlátnak bizonyultak ezeken a tartományokon, ugyanis messze ez alatt teljesítettek a mérések. A kisebb térerősségnél mutatott nagyobb eltérések nem magyarázhatók a mintavevő készülékek hibájával. Olyan magyarázat is előfordulhat ezekre, hogy a lemezek nem feküdtek fel tökéletesen egymásra, és túl nagy légrések jelentek meg a lapok közt. A sebességugrás mérésnél például a középsávon látható kisebb indukciós értékek ezt támasztják alá.

Nagy gerjesztés esetén, valamint az átlagolással kapott görbék jól illeszkednek tehát. A mérést pontosítani lehet a kalibrációs eljárással, ha a lehetséges hibakomponenseket meg tudjuk határozni és ki tudjuk szűrni. Ha ezutóbbi nem lehetséges, akkor olyan eljárást kell készíteni, melyben ezeket a hatásokat ellensúlyozni tudjuk, például utólagos átalakításokkal.

A mérést a jövőben érdemes visszacsatolt erősítővel elvégezni, ami szabályozni tudja a gerjesztő áram nagyságát olyan módon, hogy az anyagban a mágneses indukció nagysága szinuszosan változzon az időben. Az adatfeldolgozásban a polinomillesztést érdemes felváltani más görbe illesztésével, amivel pontosabban tudjuk közelíteni a valós mágnesezési görbét, és aminek segítségével egyszerű deriválással megkaphatjuk a relatív permeabilitást is.

9 Továbbfejlesztési lehetőségek

Mivel az oszcilloszkóp hibája nagy is lehet, ezért érdemes kipróbálni a mérést egy digitális adatgyűjtő rendszer (DAQ, azaz Data Acquisition Box) segítségével is. Mivel a DAQ bemeneti feszültsége nem lehet akkora, mint az oszcilloszkóp esetében, ezért a mérendő jeleket le kell osztani. A DAQ-val csak feszültséget tudunk mérni, ezért a primer oldalra egy sorba kapcsolt, nagy teljesítményű ellenállás lábain mérve a feszültséget, megkaphatjuk a rajta átfolyó áramot. A feszültséget differenciálerősítő kapcsolással tudjuk mérni, valamint a feszültségerősítést könnyen tudjuk változtatni a kapcsolat ellenállásainak változtatásával. A szekunder körnél egy bonyolultabb műveleti erősítő kapcsolásra van szükségünk, ez az integráló erősítő. Az integrátor ellenállását érdemes nagyra választani, hogy ne folyjanak nagy áramok a szekunder körben. Az erősítést a kondenzátor kapacitásával változtathatjuk. [29]

A mért adatokra én polinomot illesztettem, ami nem a legmegfelelőbb mód. Létezik több kidolgozott modell, aminek a segítségével, bizonyos paramétereket megadva egy nagyon jó illesztett görbét kaphatunk a mért eredményeinkre. Ilyen modell például, melyet sokan használnak pontossága miatt, a Jiles-Atherton modell. A paraméterek, amelyeket meg kell adni, az anyag tulajdonságai, bizonyos mért paraméterek, nevezetesen pontjai a hiszterézisnek és egyéb állandók, melyek a modellben használt egyenletekkel számolhatók ki. [30]

Amennyiben a mérést visszacsatolt erősítővel végezzük, érdemes a rendszer bemenő és kimenő jeleit is megvizsgálni a frekvenciatartományban. A szabványban láthattuk, hogy milyen formatényezőjű jel nevezhető szinuszosnak.

Érdemes olyan scriptet írni, amivel a gerjesztést tudjuk irányítani. Ez a gerjesztés egy folyton csökkenő amplitúdóval rendelkező szinuszos jel legyen. Ha a mintákat a keretbe helyezzük, és közben ezzel a scripttel vezéreljük a gerjesztést, akkor jobb lemágnesezést érhetünk el.

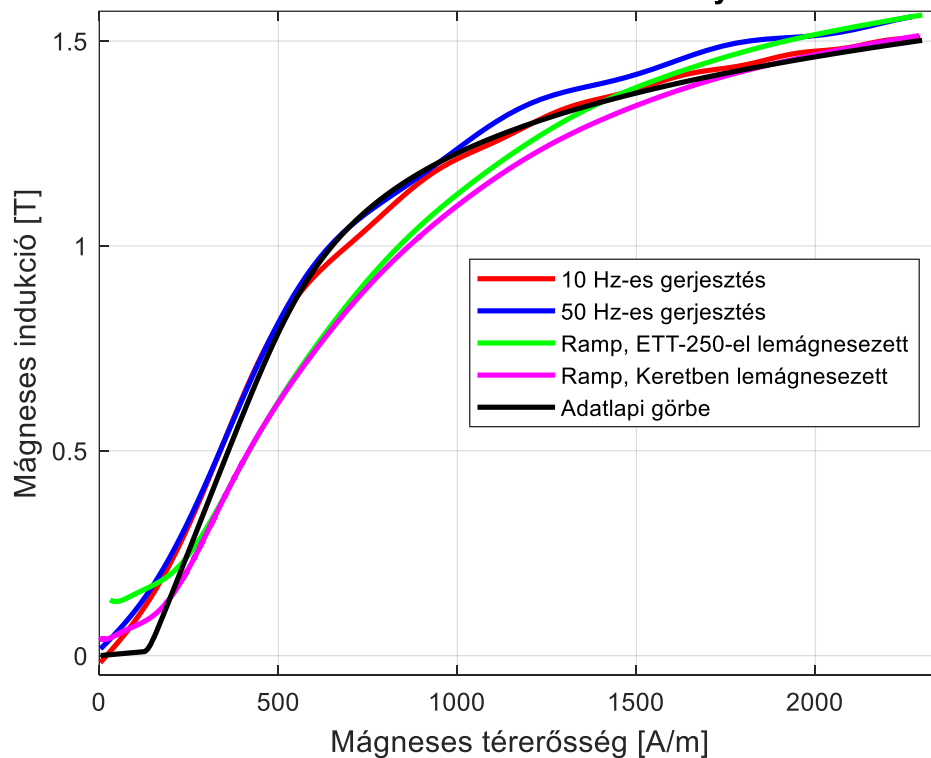
Irodalomjegyzék

- [1] E. Dr. Kovács, 'Mágnesesség, elektrodinamika', Miskolci Egyetem, Miskolc, 2019. [Online]. Elérhető: http://www.uni-miskolc.hu/~www_fiz/KovacsE/EAeldin.pdf. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [2] T. dr. Halász, J. dr. Jurisits, and J. dr. Szűcs, *Fizika 11-12*. Szeged: Mozaik Kiadó, 2014.
- [3] M. Gergely, 'Mágneses hiszterézis mérése virtuális mérés technikával', Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 2010. [Online]. Elérhető: <http://www.noise.inf.u-szeged.hu/Education/dip/Diplomamunka/MakanGergely.pdf>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [4] L. Holics, *Fizika, 2 vols.* Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1986.
- [5] J. Dr. Majár, 'Fizika 2 - Mágnesesség', Miskolci Egyetem, Fizika Intézet, Miskolc, 2019. [Online]. Elérhető: http://www.uni-miskolc.hu/~www_fiz/majar/Oktatas/anyagmernok_levelezo/Fizika2_Magnesesség.pdf. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [6] E. Istvánffy, *Mágneses anyagok és alkalmazásuk*. Budapest: Nehézipari Könyv- és Folyóiratkiadó Vállalat, 1950.
- [7] I. Dr. Hevesi, *Elektromosságtan*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1998.
- [8] E. Dr. Horváth, *Méréstechnika*. Budapest: Óbudai Egyetem, 2010.
- [9] E. Dr. Schaffer, *Mágnes technika*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1972.
- [10] L. Dr. Schnell, *Jelek és rendszerek mérés technikája*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1985.
- [11] I. Mészáros, 'Egyes anyagszerkezeti és mágneses tulajdonságok kapcsolatának értelmezése', Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Budapest, 2014. [Online]. Elérhető: http://real-d.mtak.hu/702/7/MeszárosIstván_doktori_mu.pdf. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [12] M. S. Muhit, 'Magnetic and Electric Characterization of Materials for Electrical Machines', Master Thesis, Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2011. [Online]. Elérhető: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:470656/fulltext01>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [13] S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*. Poland: CRC Press, 2011.
- [14] Z. Pólik and M. Kuczmann, 'Measuring and control the hysteresis loop by using analog and digital integrators', *J. Optoelectron. Advanced Mater.*, vol. 10, no. 7, pp. 1861–1865, 2008. [Online]. Elérhető: <https://pdfs.semanticscholar.org/e62f/dcb0172b142cb316569d0ce59479d1b5f0cd.pdf>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [15] F. Marketos, S. Zurek, and A. Moses, 'A Method for Defining the Mean Path Length of the Epstein Frame', *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2755–2757, 2007. [Online]. Elérhető: https://www.researchgate.net/publication/224704255_A_Method_for_Defining_the_Mean_Path_Length_of_the_Epstein_Frame. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [16] 'Air flux compensation in magnetic measurements with Epstein frame tester', *Electrical Machine Design Notes*, 29-Jul-2017. [Online]. Elérhető: <https://rsundaria.wordpress.com/2017/07/29/air-flux-compensation-in-magnetic-measurements-with-epstein-frame-tester/>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].

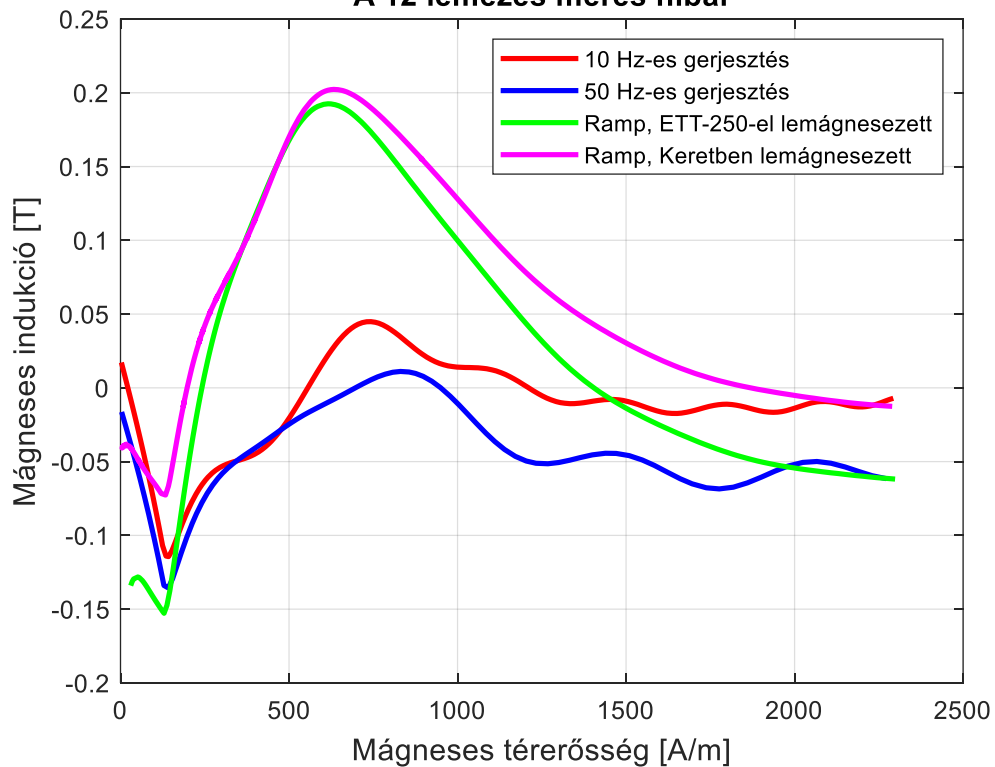
- [17] ‘Mutual Inductance of Two Adjacent Inductive Coils’, *Basic Electronics Tutorials*, 14-Aug-2013. [Online]. Elérhető: <https://www.electronicstutorials.ws/inductor/mutual-inductance.html>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [18] ‘Transformer Basics and Transformer Principles of Operation’, *Basic Electronics Tutorials*, 31-Aug-2013. [Online]. Elérhető: <https://www.electronicstutorials.ws/transformer/transformer-basics.html>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [19] ‘Szilikonacél lemezek’, *TS Industrial Corporation*. [Online]. Elérhető: <http://hu.domtubes.com/stainless-steel/silicon-steel-sheets.html>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [20] ‘33500B Series, Waveform Generators’, *Keysight Technologies*, 2017. [Online]. Elérhető: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-03536/data-sheets/5991-0692.pdf>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [21] ‘LFPA 9733, Power amplifier’, *Schwarzbeck Mess-Elektronik*, 2017. [Online]. Elérhető: <https://www.volta.it/wp-content/uploads/2017/10/k9733.pdf>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [22] ‘Inductors – Inductance, Impedance and Losses – The Passives Times’. [Online]. Elérhető: <https://passive-components.eu/inductors-inductance-impedance-and-losses/>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [23] ‘InfiniiVision 3000 X-Series Oscilloscopes’, *Keysight Technologies*, 2018. [Online]. Elérhető: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02734/data-sheets/5990-6619.pdf>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [24] ‘R&S@RT-Zxx, High-Voltage and Current Probes’, *Rohde & Schwarz*, 2016. [Online]. Elérhető: <http://www.farnell.com/datasheets/2111204.pdf>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [25] ‘R&S@RT-ZC20 Current Probe’, *Rohde & Schwarz*, 2014. [Online]. Elérhető: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/rt_zcxx/RT-ZC20_User_Manual_en_02.pdf. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [26] ‘ETT Series’, *Magnaflux*, 2018. [Online]. Elérhető: <https://grimas.hu/wp-content/uploads/2019/08/ETT-demag-units-Oct18.pdf>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [27] G. M. Shane and S. D. Sudhoff, ‘Refinements in An hysteretic Characterization and Permeability Modeling’, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 11, pp. 3834–3843, Nov-2010.
- [28] ‘About Calibration’, *Fluke Corporation*. [Online]. Elérhető: <https://us.flukecal.com/literature/about-calibration>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [29] ‘Plotting Magnetization Curves’, *Richard Clarke*. [Online]. Elérhető: <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/BHCKt/index.html>. [Utoljára elérve: 2019. 12. 10.].
- [30] N. C. Pop and O. F. Caltun, ‘Jiles–Atherton Magnetic Hysteresis Parameters Identification’, *Acta Phys. Pol. A*, vol. 120, no. 3, pp. 491–496, 2011. [Online]. Elérhető: https://www.researchgate.net/publication/234037268_Jiles-Atherton_Magnetic_Hysteresis_Parameters_Identification. [Utoljára elérve: 2019. 12. 07.].
- [31] International standard, ‘IEC 60404-2:1996, Magnetic materials - Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame’, 1996.
- [32] Gy. Orosz, ‘Laboratórium 1 mérési útmutató, 7. mérés: Négy pólusok vizsgálata’, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Budapest, 2017.

Függelék

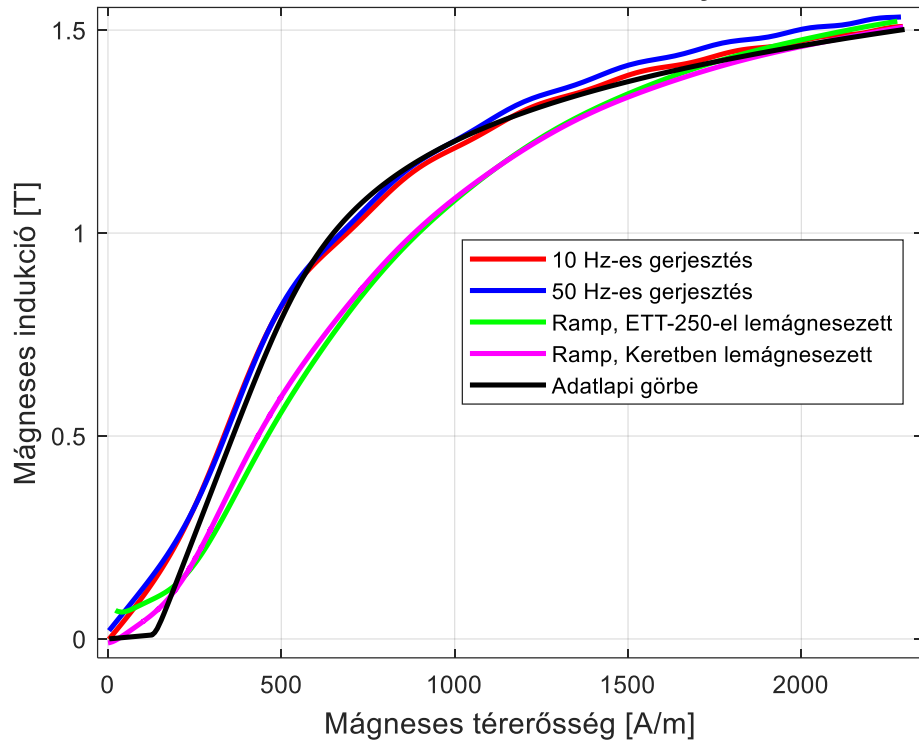
A 12 lemezes mérés eredményei



A 12 lemezes mérés hibái



A 16 lemezes mérés eredményei



A 16 lemezes mérés hibái

