

TMDK DOLGOZAT

3D nyomtatott toroid tekercs vasveszteségének analízise

Horváth Tamás
Villamosmérnöki MSc

Konzulens:
Dr.Orosz Tamás

2023

Kivonat

A villamos gépek vesztesége és teljesítménye jelentősen függ az alkalmazott vasmagtól. A vasmag tulajdonságait az anyagösszetétel, valamint a gyártási folyamat határozza meg. A vasmag minőségét az anyag összetétel fejlesztésével csak bizonyos mértékig lehet növelni, ezért jelentős fejlődést a gyártási folyamat javítása hozhat. Az utóbbi évtizedekben az additív gyártási folyamatok (3D nyomtatás) rengeteget fejlődtek és bár jelenleg lassabbak és kevésbé megbízhatók a hagyományos gyártási folyamatokhoz képest, számos pozitívummal rendelkeznek. Többek között segítségükkel a lemezeléses módszerrel megvalósíthatatlan topológiák, valamint különféle topológia optimalizálási szoftverekkel tervezett vasmagok hozhatók létre.

A dolgozatban irodalomkutatást végzünk a villamos gépek hagyományos, lemezelt vasmagjának modern gyártási módszereiről, a vasmag hiszterézis karakterisztikájának és veszteségeinek méréséről, valamint megvizsgáljuk, hogy az additív gyártási módszerekkel készített vasmagok képesek-e elérni a hagyományos lemezelt vasmagok minőségét és hogy a módszer milyen előnyökkel rendelkezik a hagyományos gyártási folyamatokhoz képest.

A vasveszteségek modellezése a jelenleg alkalmazott végeselemes megoldókban egy utófeldolgozási folyamatot jelent. Azaz, ezek a numerikus megoldók nem modellezik direktben az anyag hiszterézis tulajdonságait, hanem a Maxwell - egyenletek megoldásával számított mágneses indukcióeloszlás pontbeli értékeire illesztnek egy polinomot, az alkalmazott Steinmetz, Jordan vagy Bertotti féle veszteségmodell szerint. Ezek a modellek jó eredményeket adnak lemezelt vasmagok esetén, a teljes gépre, de lokálisan nézve alul, vagy felül becslik a vasveszteség értékét. Kérdéses, hogy milyen eredményekkel alkalmazhatóak 3D nyomtatott anyagok esetén, ahol a technológia egyik fő előnye lehet inhomogenitások létrehozása.

A dolgozatban a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi kara által gyártott különféle anyag összetételű toroid mintákat vizsgáltunk. Megmértük azok hiszterézis karakterisztikáját és veszteségeit.

Tartalomjegyzék

Kivonat	i
1. Bevezetés	2
2. Vasveszteség hagyományos, laminált vasmagokban	4
2.1. Ferromágneses anyagok	4
2.2. Hiszterézis veszteség	4
2.2.1. Örvényáramú veszteségek	5
2.3. Gyártási módszerek	6
2.3.1. Melegen hengerelt lemez	7
2.3.2. Hidegen hengerelt lemez	7
2.3.3. Szemcse orientált lemez	7
2.3.4. Megmunkálás hatása	8
3. Mérési eljárások	9
3.1. Epstein-keret	10
3.2. Egylemezes mérés	11
3.3. Toroid mintás mérés	12
3.4. Két dimenziós mérési módszerek	13
4. 3D nyomtatott villamos gépek	15
4.1. Additív gyártási módszerek	16
4.1.1. Powder Bed Fusion	16
4.1.2. Binder Jetting	17
4.1.3. Directed Energy Deposition	18
4.1.4. Joule nyomtatási módszer	18
4.1.5. Fuse Deposition Modeling	19
4.2. 3D nyomtatott vasmagok paraméterei	19
4.3. Veszteségek csökkentése	22
4.4. Új topológiák	24
5. A 3D nyomtatott vasmag modellezése	28
5.1. Végeselem módszer	28
5.2. Hogyan számol a végeselem vasveszteséget	30
5.2.1. A Preisach modell	31
6. Mérési eredmények	34
6.1. Minta felépítése	34
6.2. Mérési elrendezés	36
6.3. Mérési eredmények	37
7. Konklúzió	42

Köszönetnyilvánítás	43
Ábrák jegyzéke	45

1. fejezet

Bevezetés

A villamos gépek a modern társadalom egyik fő mozgatórugói, ipari felhasználásuk mellett jelen vannak a társadalom minden szegmensében, gondoljunk például a lakossági áramellátásra, a háztartási gépekre, szórakoztató eszközökre vagy a közlekedésre. Az előállított villamos energia jelentős részét villamos gépek segítségével hozzák létre, aminek a nagy részét szintén villamos gépek hasznosítják. Így energiahatékonyságuk és teljesítményük javítása fontos gazdasági és mérnöki probléma. Az elmúlt száz évben az alkalmazott anyagok rendkívül nagy fejlődésen mentek keresztül. A fajlagos veszteségek a 19. század végén alkalmazott lágymegneses anyagoktól, egészen a 2000-es években megjelent amorf vasmagokig drasztikus mértékben csökkentek. Azonban a villamos gépekben történő gazdaságos alkalmazásukhoz nem csak a veszteségük lényeges szempont a gyakorlat számára, hanem termodinamikai, mechanikai és egyéb akusztikai szempontokat is figyelembe kell venni [1]. Az előbb említett amorf vasmagok például ridegségük miatt nem alkalmazhatóak nagytranszformátorok készítésére, mert nem viselnék el a zárlati igénybevételeket. Ahogy a transzformátorlemezek sem alkalmazhatóak forgógépek esetén, hiszen a hidegen hengerelt lemezek mágnesezettsége csak egy irányban alacsony. Érdekes szempont, hogy a transzformátorok lemezeztetett vasmagjában alkalmazott, 1.5 - 1.7 T névleges indukció eléréséhez, a lemezek szigetelőanyagának a fejlődése tette lehetővé [2]. Az 1950-es években alkalmazott csillámpala alapú szigetelések nem bírták volna ebben a tartományban létrejövő mechanikai igénybevételt, ezért az akkoriban kiadott kézikönyvek 1T -ra méretezték a transzformátorok vasmagjait. Ezzel a néhány példával azt szerettem volna illusztrálni, hogy mennyire sok, szerteágazó szempontot kell figyelembe venni egy villamos gép vasmaganyagának kiválasztásakor. Nagyon nehéz meghatározni, hogy az adott alkalmazáshoz melyik anyag a legmegfelelőbb. A dolgozatomban bemutatott irodalomkutatásom célja, hogy áttekintsem a lemezeztetett vasmagos technológiák fejlődését, illetve elhelyezzem az új 3D nyomtatott vasmagos technológiák alkalmazhatóságát. Ennek a technológiának az egyik fő előnye lehet a rugalmassága, azaz viszonylagosan olcsón lehet kis példányszámú, vagy prototípus gépeket létrehozni.

A modern villamosgéptervezés egyik kulcsa az optimális design kiválasztása. Ehhez nélkülözhetetlen a vasmag anyagának minél pontosabb modellezése. Ennek a feladatnak a megoldására számos módszert fejlesztettek az irodalomban, egészen a Steinmetz-féle egyszerű kvantitív modelltől, amely jól közelíti a villamos gép maximális modelljét, de nem képes a mágneses hiszterézis figyelembevételére, egészen a hiszterézhurok pillanatértékét modellezni képes Preisach-modellelig. A Preisach modell alkalmazásának hátránya, hogy pontos mérési eredmény szükséges az alkalmazásához. A dolgozatom második felében röviden áttekintem a végeselem modellezéshez használt, vasvesztesség számítására alkalmazható numerikus modelleket. Majd bemutatom a vasmag jellemzésére használt mérési eljárásokat.

A dolgozat végén két, egyforma anyagból nyomtatott vasmag tulajdonságait vizsgáltam meg. A vizsgálat célja, hogy megnézzük, mennyire pontosak a paraméterei két, ugyanolyan technológiával, irányítatlan doménszerkezet kialakítással készített vasmag anyagnak. Hiszen, 3D nyomtatott anyagok esetén az alkalmazott eljárás sokkal nagyobb hatással van az anyag végleges veszteségére, továbbá a módszer alkalmazásának az egyik fő előnye lehet a közeljövőben, a lokális anizotrópiák létrehozása, a kedvezőbb üzem közbeni mágneses tér kialakítására.

2. fejezet

Vasveszteség hagyományos, laminált vasmagokban

2.1. Ferromágneses anyagok

A villamos gépek hatékony működéséhez a gépek tekercse által keltett mágneses teret koncentrálni és irányítani kell. Ezt a célt szolgálja a vasmag. A vasmag a villamos energiaátalakítók alapvető alkotóeleme, amely segít a mágneses mező koncentráálásában, biztosítva, hogy a lehető legnagyobb mértékű energiaátvitel jöjjön létre az alkatrészek között.

A villamos gépek vasmagja nagy permeabilitású, ferromágneses anyagokból, például vasból, nikkeltől vagy a modern villamos gépek esetében különféle fémek ötvözetéből készül (pl. FeSi, FeNi, FeCo). Az alkalmazott anyagok nagy permeabilitása, nagy energiasűrűség elérését tesz lehetővé. A tekercs által létrehozott mágneses térerősség (H) és a gépben létrejövő mágneses indukció (B) között az anyag permeabilitása tesz kapcsolatot. Ideálisan viselkedő para-, vagy diamágneses anyagok esetében ez a kapcsolat általában lineáris [3], a következő formulával jellemezhető,

$$B = \mu_0 \mu_r H, \quad (2.1)$$

ahol μ_0 a vákuum permeabilitása ($4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$), μ_r pedig az anyagra jellemző relatív permeabilitás. Izotróp anyagok esetében az anyag relatív permeabilitása a tér minden irányába konstans, értéke nem függ a térerősség irányától.

A vasmagokban használt ferromágneses anyagok viselkedése azonban nemlineáris, a mágneses térerősség és az indukció kapcsolata egy bonyolultabb függvénnyel írható le,

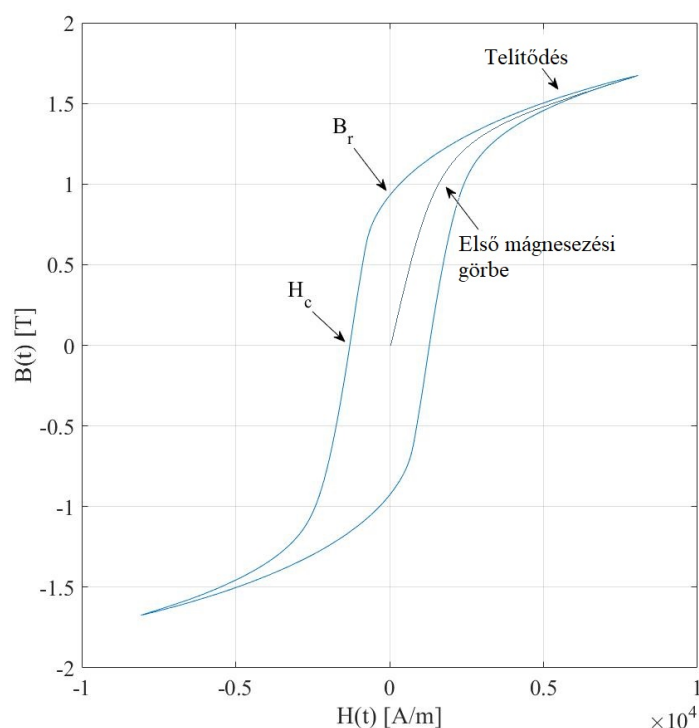
$$B = \mathcal{B}(H), \quad (2.2)$$

ha a függvény a tér különböző irányokban más és más értékeket vesz fel, akkor az anyag anizotróp. Az anyag ezen tulajdonságát számos villamos gép esetében kihasználják. Ekkor a gép vasmagjához használt lemezeket szándékosan úgy gyártják le, hogy anizotróp, szemcse orientált anyagok legyenek, melyeket a gyártás során húzási irányban egy gyenge, erre merőlegesen pedig egy kemény mágnesezési iránnyal lehet jellemezni [4].

2.2. Hiszterézis veszteség

A mágneses indukció és térerősség kapcsolatát az anyag hiszterézis karakterisztikájával lehet jellemezni, lásd 2.1. ábra. A ferromágneses anyagok apró azonos irányban mágnesezett térfogategységekből, doménkből állnak. A domének az anyag mágnesezetlen állapotában úgy állnak, hogy egymás hatását kioltásák és az anyag kívülről mágnesezetlennek látszik. Amennyiben az anyagot mágneses térerősségbe helyezzük a domének a térerősség irányába kezdenek rendeződni és az anyag az első mágnesezési görbe szerint felmágneseződik.

Minél nagyobb a mágneses térerősség a domének annál rendezettebben állnak a mágneses térerősség irányára párhuzamosan, egészen az anyag telítődéséig, amit szaturációnak is neveznek. Ekkor a doménfalak gyakorlatilag megszűnnek és az anyag relatív permeabilitása egységnyire csökken. Ebben a tartományban a mágneses térerősség további növelésével az indukció a vákuum permeabilitásával (μ_0) arányosan nő tovább. Amennyiben a mágneses térerősség csökkenni kezd az anyag lemágneseződik, azonban az indukció nem az első mágnesezési görbe szerint csökken. A térerősség megszűnésekor az indukció értéke nem nullára esik vissza, hanem marad egy visszamaradó, remanens mágnesezettségi (B_r) érték. Az anyag teljes lemágnesezéséhez a mágneses térerősséget ellenkező irányba kell növelni. Azt a térerősséget, ahol a mágneses indukció megszűnik koercitív térerősségnek (H_c) nevezik.



2.1. ábra. Példa egy 3d nyomtatott FeCo toroid histerézis karakterisztikájára.

A vasmaganyag histerézise a villamos gépek üresjárási veszteségnek jelentős részéért felelős. A domének elmozdításához és az anyag fel-, lemágnesezéséhez energiabefektetésre van szükség, ami a histerézis görbe integráljaként határozható meg a következő egyenlet megoldásával,

$$W_h = \int_{B_{min}}^{B_{max}} H dB. \quad (2.3)$$

2.2.1. Örvényáramú veszteségek

A histerézis veszteség mellett, mivel a villamos gépek változó mágneses térben üzemelnek, a vasmagban örvényáramú veszteség is létrejön. A Faraday-féle indukciós törvény értelmében,

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2.4)$$

a vasmagban létrejövő változó fluxus körül örvényes elektromos térerősség (E) jelenik meg, ami a vasmagban örvényáramot indít,

$$J = \sigma E, \quad (2.5)$$

ahol σ jelöli az anyag fajlagos vezetőképességét.

J és E kapcsolata szintén lehet nemlineáris függvény, amennyiben figyelembe vesszük az anyag ellenállásának hőfokfüggését és a skin hatást is. Az örvényáram a vasmagot melegíti és hőveszteségként jelentkezik. Az örvényáramú veszteség értéke a következő egyenlettel fejezhető ki [5]

$$W_{ed} = \frac{\sigma d^2}{12\rho} \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2, \quad (2.6)$$

ahol ρ a vasmag fajsúlya, d a mágneslemez vastagsága. Látható, hogy az örvényáramú veszteség értéke négyzetesen arányos a mágneslemez vastagságával és egyenesen arányos annak fajlagos vezetőképességével. Ezért az örvényáramú veszteség csökkentését ezen két érték csökkentésével lehet elérni. A fajlagos vezetés csökkentéséhez különféle ötvözetek kísérleteztek ki, a térfogat csökkentése érdekében pedig lemezelést alkalmaznak. A lemez vastagságának csökkentésével csökken az örvényáramú veszteség, azonban egy adott érték alatt ezek a lemezek rosszabbul töltik ki a rendelkezésre álló teret. A villamos gépek sarkaiban, pl. a transzformátor vasmagnál, az átlapolások miatt jelentősebb veszteségek keletkeznek [2].

A hiszterézis és az örvényáramú veszteség együttesen adja a villamos gép vasveszteségét. A fenti gondolatmenetet összegezve kimondhatjuk, hogy a kis veszteségű vasmag anyagot a következő értékek jellemzik:

- Nagy relatív permeabilitás érték, tehát a hiszterézis karakterisztika meredeken növekszik.
- Kis hiszterézis veszteség, tehát a koercitív térerősség alacsony, és a hiszterézis karakterisztika területe minél kisebb.
- Magas telítési fluxussűrűség, tehát a hiszterézis karakterisztika minél magasabb indukció érték mellett kezd telítődni.
- Alacsony fajlagos vezetés, az örvényáramú veszteségek csökkentéséért.

Emellett az örvényáramú veszteség csökkentése érdekében a villamos gépekben alkalmazott vasmag nagyon vékony ($<1\text{mm}$) lemezekből épül fel.

2.3. Gyártási módszerek

A lágymágneses anyagok gyártása akár hagyományos szubsztraktív, akár additív módszerrel történik, nehéz feladat. A felhasznált anyagok (Fe, Co, Ni, Si) olvadáspontja magas, emellett az anyagok nagy keménységűek, ezért öntésük, megmunkálásuk és nyomtatásuk is nehéz. Emellett mágneses tulajdonságuk nagyban függ a gyártási folyamat során kialakuló anyagszerkezettől, a kristálytani szerkezetüktől, a megmaradó belső feszültségtől és a különböző szennyeződésektől.

A napjainkban gyártott villamos gépek jelentős része lemezelt vasmaggal, elektromos acéllemezekből készül. A felépítéséhez használt lemezeket egy nagyobb tekercsből szabják le különböző megmunkálási módszerekkel: lézervágással, stancolással, vagy préseléses módszerrel. Az alkalmazott lemezek készülhetnek hideg, vagy meleg hengerelési eljárással.

2.3.1. Melegen hengerelt lemez

A melegen hengerelt elektromos acél gyártási folyamata [6] a nyersanyagok, például vasérc, szilícium, kobalt, nikkel stb. kohóban történő megolvasztásával kezdődik. Az olvadt acélt ezután brammákká öntik. A brammákat ezt követően tolókemence vagy léptetőgerendás kemence segítségével hengerelési hőmérsékletre melegítik, ami több mint 1000 °C, majd a brammákról hengerek és magasnyomású víz segítségével eltávolítják az öntés után képződött oxid réteget (revét). A megtisztított táblákat több egymást követő henger rendszer segítségével fokozatosan a kívánt vastagságúra hengerelik, a hengerelés több lépésben (előnyújtás és készsor) történik, az előnyújtó és a készsor között a lemez deformált elejét és hátulját dobrendszerű repülőollóval levágják. A folyamat precíz irányításban folyamatosan méri a szalag vastagságát, szélességét, alakját, hőmérsékletét, feszességét, az elektromos töltöttségét, a nyomatékot, a hengerek fordulatszámát, stb. A hengerelés után a lemezt fokozatosan lehűtik víz segítségével, végül feltekerceselik. A teljes folyamat során ügyelni kell a lemez hőmérsékletének pontos szabályozására, mert ez nagyban befolyásolja a végeredmény anyagszerkezeti és mágneses tulajdonságait.

2.3.2. Hidegen hengerelt lemez

A hidegen hengerelt lemezeket melegen hengerelt lemezekből készítik. A melegen hengerelt lemezeket először megtisztítják a lerakódott reverétegtől, többnyire forró sósav vagy kénsav segítségével. A megtisztított lemezeket beolajozzák és hidegredukciós hengerelésnek vetik alá, mivel a hengereléstől a lemez hőmérséklete megemelkedik gondoskodni kell a megfelelő hűtésről. A hidegen hengerelt lemezt ezt követően hőkezelní kell a belső feszültségek megszüntetése érdekében.

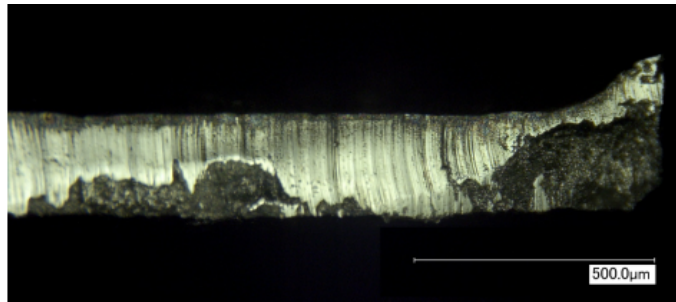
A melegen hengerelt lemezek általában durva szemcse szerkezettel rendelkeznek, míg a hidegen hengerelt lemezek szerkezete lényegesen finomabb, ennek következtében a hidegen hengerelt lemezek magasabb mágneses permeabilitással és alacsonyabb vasvesztéssel rendelkeznek. A hidegen hengerelt lemezek vasvesztésének csökkentésében az is közrejátszik, hogy ezen lemezek vékonyabbak, így csökkentve az örvényáramú veszteséget. Fontos kiemelni, hogy a hidegen hengerelt lemezek mágneses tulajdonságai erősen anizotrópok, a hengerelés irányában lényegesen jobb paraméterekkel rendelkeznek, ezért a hidegen hengerelt lemezeket nem alkalmazzák forgógépekben. Ennek másik fő oka, hogy a hidegen hengerelt lemezek kevésbé bírják a mechanikai igénybevételt, mint a melegen hengerelt lemezek.

2.3.3. Szemcse orientált lemez

Egyes villamos gépek esetében előnyös, ha a vasmagot alkotó lemezek anizotróp mágneses jelleggel rendelkeznek. Az ilyen lemezek a szemcse orientált (grain oriented) lemezek. A szemcse orientálás a hengerelt lemez kétszeres hőkezelésével történik. Az első hőkezelés esetében felhevítik a lemezt, majd lassan hűtik azt, ekkor kristályszemcsék alakulnak ki az anyagban, azonban ezek a szemcsék kicsik és rendezetlenek. A második hőkezelés során a lemezt ismét felhevítik, de ezúttal gyorsabb hűtésnek vetik alá, ekkor az eredetinel nagyobb kristályszemcsék alakulnak ki, valamint ezen szemcsék rendezetten egy irányba állnak be, ezt hívják másodlagos újrakristályosodásnak (secondary recrystallization). Ennek köszönhetően a lemez a megfelelő irányban kisebb veszteségekkel és nagyobb permeabilitással rendelkezik, mint a szemcseorientálás nélküli lemezek. A technológia további fejlődése során ezeket a lemezeket lézerrel kezelik és a szemcséket szétvágják (domain refinement), hogy tovább csökkentsék a hiszterézis veszteségeket [7]. Ezeket a lemezeket leginkább transzformátoroknál alkalmazzák.

2.3.4. Megmunkálás hatása

A vasmag felépítéséhez használt formára vágott lemezek gyártása során használt különböző vágási folyamatok nagyban befolyásolják a lemezek mágneses tulajdonságait, a formára vágott lemez akár 20 %-al nagyobb veszteségekkel rendelkezhet [8], a gyártó által megadott nyers lemezre vonatkozó értékekhez képest. A vágások peremén az anyag rugalmas deformáción megy keresztül, az anyagszerkezet roncsolódik, és feszültség alakul ki, ezáltal rontva a lemez minőségét [9]. Egy stancolt lemez peremenének mikroszkópikus felvétele látható a 2.2. ábrán.



2.2. ábra. Egy stancolt lemez peremenének mikroszkópikus felvétele. (forrás: [9])

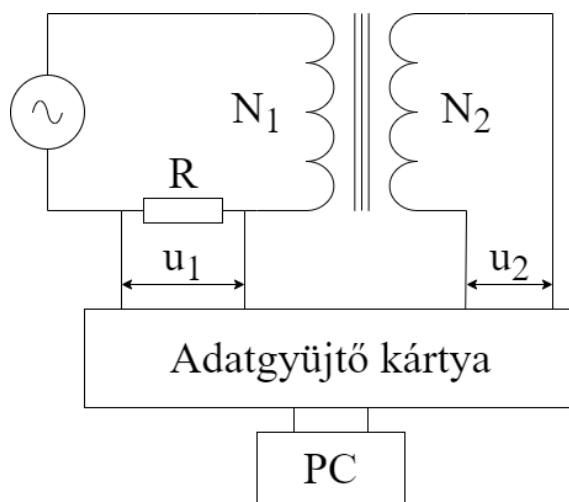
A vágás mellett a lemezeket egymáshoz is szokták rögzíteni, ez történhet hegesztéssel, préseléssel és szegecsléssel, amely folyamatok szintén befolyásolják az anyag mágneses tulajdonságait. Ezért a villamos gépek tervezése során ezeket a tényezőket is figyelembe kell venni.

3. fejezet

Mérési eljárások

A vasveszteség számítása napjainkban leggyakrabban a véges elem módszer (FEM-Finite Element Method) segítségével történik [3]. A ferromágneses veszteségek legpontosabb meghatározására azok a véges elem szoftverek alkalmasak, amelyek valamilyen beépített matematikai hiszterézis számítási módszerrel rendelkeznek (például Preisach model, vagy Jiles-Atherton model). Ezen modellek megvalósításához szükség van az alkalmazott anyag pontos hiszterézis karakteristikájának ismeretére. Ehhez mérésre van szükség, amely a gyártás során alkalmazott technológiák, vasmaganyagra gyakorolt hatását is képes figyelembe venni. Ezek a mérési módszerek különböznek az ipari gyakorlatban általánosan elterjedt módszerektől.

A laminált vasmagok mérésére számos szabványos módszer létezik. Ezen szabványok pontosan meghatározzák a mérési körülményeket, a minta formáját és méreteit, valamint a méréshez szükséges műszerek jellemzőit. Az IEC szabványok három különböző mérési módszert különítenek el a mért minta formáját figyelembe véve [1]. Ezek az úgy nevezett: Epstein-keretes, egylapos és toroid magos mérési módszerek. Ebben a fejezetben ezen három, és további pár mérési eljárást mutatunk be a vasmag hiszterézisének és örvényáramú veszteségének meghatározására.



3.1. ábra. A számítógéppel vezérelt mérési folyamat elvi rajza.

A bemutatásra kerülő mérési módszerek mindegyike számítógéppel vezérelt és általános elvi felépítésük a 3.1. ábrán látható [1]. A méréshez a mintára egy primer (N_1) és egy szekunder (N_2) tekercset kell elhelyezni. A primer tekercset egy inuktívitás nélküli R ellenállással sorba kötve szinuszos feszültséggel kell táplálni, a szekunder kört bedig terheletlen állapotban kell hagyni. Ezzel gyakorlatilag egy üresjárásban üzemelő transzformátort létrehozva. Az ellenállás u_1 feszültségét, és a nyitott szekunder tekercs u_2 feszültségét az adatgyűjtő kártya segítségével mérjük. A számítógép az adatgyűjtő kártya által mért feszültségeket feldolgozza és elvégzi a szükséges számításokat. A szabványok szerint a

szekunder körben indukált feszültségnek a mérés során $1.111 \pm 1\%$ -os pontossággal szinuszosnak kell lenni, emellett a vizsgált mintákat a mérés előtt lemágnesezett állapotba kell hozni. Ezt a koercitív térerősség több mint tízszeresének megfelelő gerjesztést rákapcsolva, majd ennek az értékét fokozatosan nullára csökkentve kell elvégezni.

A mért u_1 és u_2 feszültségek felhasználásával kiszámítható a mágneses térerősség (H), a mágneses indukció (B), és a veszteségi teljesítmény (p_s) a következő egyenletek segítségével [1],

$$H = \frac{N_1}{Rl_{eff}} u_1(t), \quad (3.1)$$

$$B = \frac{1}{N_2 A} \int_0^t u_2(\tau) d\tau, \quad (3.2)$$

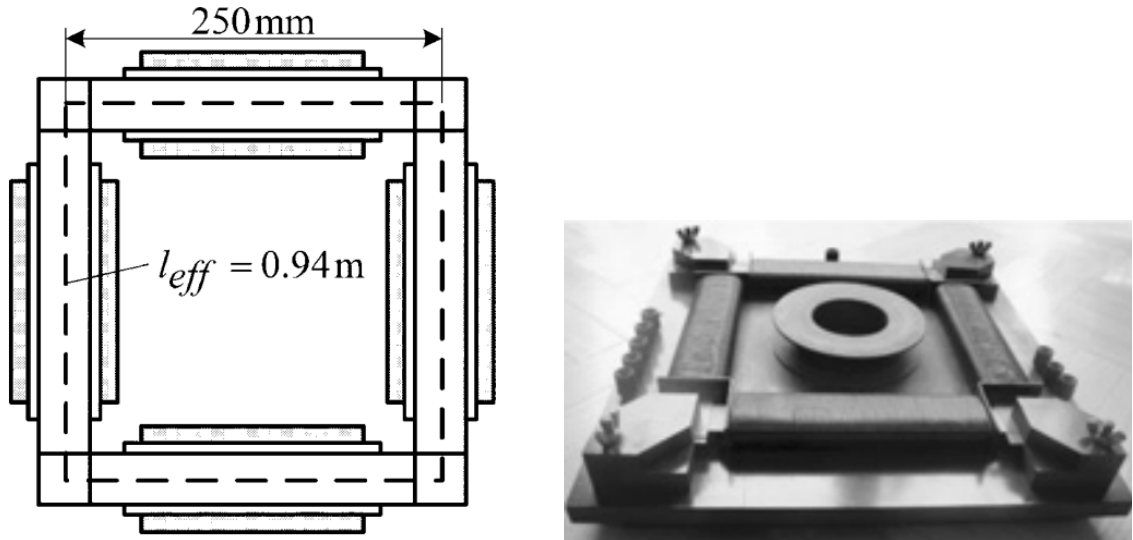
$$p_s = \frac{f N_1}{N_2 m R} \int_0^T u_1(t) u_2(t) dt, \quad (3.3)$$

ahol N_1 a primer tekercselés menetszáma, N_2 a szekunder tekercselés menetszáma, m a minta tömege, l_{eff} a mágneses térerősség effektív hossza, A a minta keresztmetszete, R az induktivitás mentes ellenállás ellenállása, f a gerjesztés frekvenciája, $T = \frac{1}{f}$ pedig a periódus idő.

Bár ezen mérés elegendő információt nyújt a vasmagról néhány esetben magnetooptikai érzékelőket is alkalmaznak a mágneses tér lokális értékeinek vizsgálatára.

3.1. Epstein-keret

Az Epstein-keretes mérés során a vizsgálni kívánt vasmag lemezeket a 3.2. ábrán látható módon négyzet alakban rendezik el. A négyzet élei több vasmag lemezből állnak össze, (amelyek számát négy többszörösének választják meg), a sarkokon pedig kettős átfedést alkalmaznak, így a keret oldalainak hossza és keresztmetszete a keret teljes hosszán megegyezik.



3.2. ábra. Az Epstein-keret elvi felépítése a bal oldali ábrán látható, a jobb oldali ábrán, pedig egy kép a megvalósított eszközről. (forrás: [1])

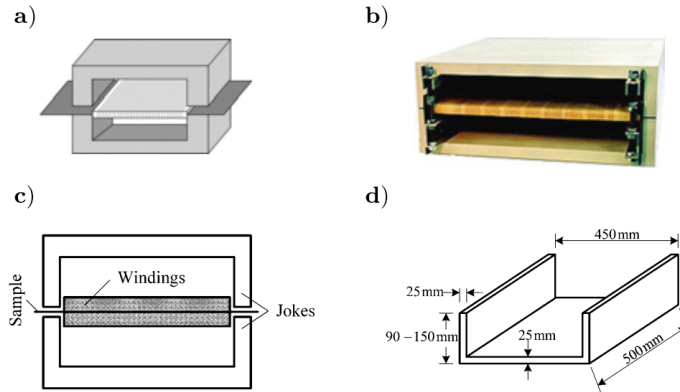
A keret száraihoz használt lemezeket a vasmag gyártásához felhasznált hengerelt lemez tekercsből vágják ki. A vágási irány a keret minden száránál megegyezhet a hengerlési iránnyal, de akár eltérő vágási irányú lemezeket is választhatnak az anizotrópia mérése céljából. A keret minden szárán primer és szekunder tekercselést helyeznek el. A négy primer és négy szekunder tekercset sorba kötik egymással, így ezek egy közös primer és egy közös szekunder tekercset alkotnak. A szabvány meghatározza a keret méreteit, minimum súlyát és a tekercsek menetszámát is. A felhasznált lemezek minimum 30 mm szélesek és 280 mm hosszúak kell legyenek, így az átlapolást figyelembe véve a keret hatásos hossza egy 250 mm oldalhosszúságú négyzet. A keret tömege meg kell hogy haladja a 0.24kg-ot. A tekercsek ajánlott menetszáma pedig 700 vagy 1000 menet a primer, illetve a szekunder tekercsek esetében is. Ezen méretek mellett $l_{eff} = 0.94m$, és a keresztmetszet a következő képlet segítségével határozható meg,

$$A = \frac{m}{4l\rho} \quad (3.4)$$

ahol l egy lemez hossza és ρ az anyag sűrűsége. A mágneses térerősség, a mágneses indukció és a veszteség a (3.1)-(3.3)-es egyenletek segítségével határozhatók meg.

3.2. Egylemezes mérés

Az egylemezes mérési módszer esetében a vizsgált minta csak egyetlen lemezből áll, és a mágneses kört két acélpátkó zárja, amelyek a mérési eredmények befolyásolásának elkerülése érdekében jó minőségű, rendszerint szemcse orientált elektromos acélból, vagy nikkelt vas ötvözetből készültek, és veszteségük kevesebb, mint $1 \frac{W}{kg}$ 50 Hz-es gerjesztés mellett, induktivitásuk pedig 1,5 T. A lemezen elhelyezett primer tekercselés szabvány szerint legalább 400 menettel rendelkezik, a szekunder tekercs menetszámát pedig a mérőeszköz paraméterei határozzák meg. A szabvány meghatározza a minta lemez és az acélpátkók méreteit is. A lemez 500 mm x 300 mm-es az acélpátkók méretei pedig a 3.3 d. ábrán láthatók.



3.3. ábra. Az egylemezes teszter elvi felépítése (a,c), megvalósítása (b) és az acélpátkók méretei (d). (forrás: [1])

A szabványos méretekkel elkészített egylemezes tesztelő effektív hossza (l_{eff}) 0.45 m, a vizsgált keresztmetszet pedig,

$$A = \frac{m}{l_{eff}\rho}. \quad (3.5)$$

Az egylemezes módszer elvi felépítése és megvalósítása a 3.3. ábrán látható. A mágneses térerősség, a mágneses indukció és a veszteség a (3.1)-(3.3)-es egyenletek segítségével határozhatók meg.

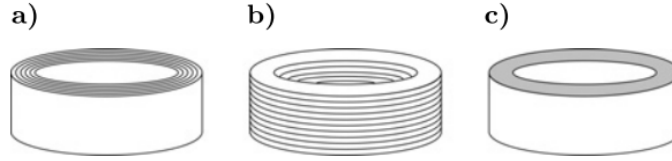
Az Epstein-keret és az egylemezes módszer segítségével 1.0 T és 1.8 T között mért eredmények közötti összefüggés a nemzetközi szabványok szerint,

$$p_{s,SST} = p_{s,EPS} \left(1 + \frac{\delta p}{100}\right), \quad (3.6)$$

ahol $p_{s,SST}$ az egylemezes módszerrel mért eredmények, $p_{s,EPS}$ az Epstein-kerettel mért eredmények, és $\delta p = 1,46 + 0,242J^5$, ahol J a mágneses polarizáció.

3.3. Toroid mintás mérés

A mágneses anyagok tulajdonságai mérhetők toroid minták segítségével is, a nemzetközi szabványok szerint ezzel a módszerrel speciális ötvözetek, amorf és nanokristályos anyagok, préselt és szinterelt anyagok, fröccsöntött és öntött anyagok, valamint lágymágneses kompozit anyagok vizsgálhatók, mágneses lemezek nem. A mérés során vizsgált toroid minták különböző módokon alakíthatók ki (lásd 3.4.ábra), feltekert szalagként, a vizsgálni kívánt nagyobb lemezből kivágott gyűrűk segítségével, préselt porból, vagy nagyobb anyagból kivágott magként, ide sorolható a 3D nyomtatott toroid minta is.



3.4. ábra. A toroid mintás mérési módszer során használható toroid magok. a) tekercsel szalag b) lemezből kivágott gyűrűk d) préselt por, kivágott toroid minta, 3D nyomtatott minta. (forrás: [1])

A toroid minták esetén a szabvány nem szabja meg a pontos geometriai méreteket, és a tekercselések menetszámát, csak bizonyos ajánlásokat tesz, például a 20 Hz és 200 kHz közötti vizsgálatok esetén a toroid mag belső és külső átmérőjének aránya ne haladja meg az 1,4-et. A primer és szekunder tekercselést úgy kell elkészíteni, hogy az egyenletesen oszoljon szét a toroid minta körül. A toroid hatásos hosszát a következő képlet segítségével lehet számolni,

$$l_{eff} = \frac{\pi(D + d)}{2}, \quad (3.7)$$

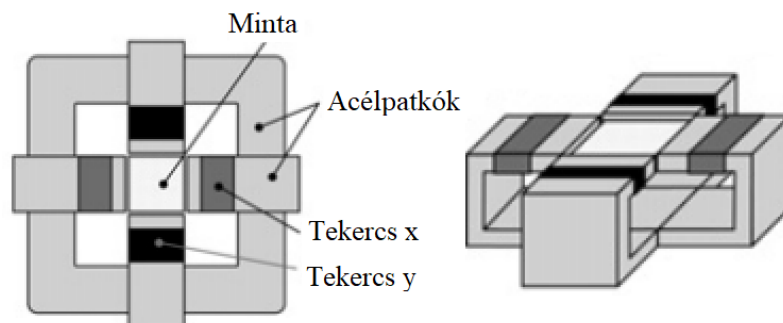
ahol D a minta külső átmérője, és d a belső átmérője. A keresztmetszet felülete pedig a következő módon határozható meg,

$$A = \frac{2m}{\pi\rho(D + d)}. \quad (3.8)$$

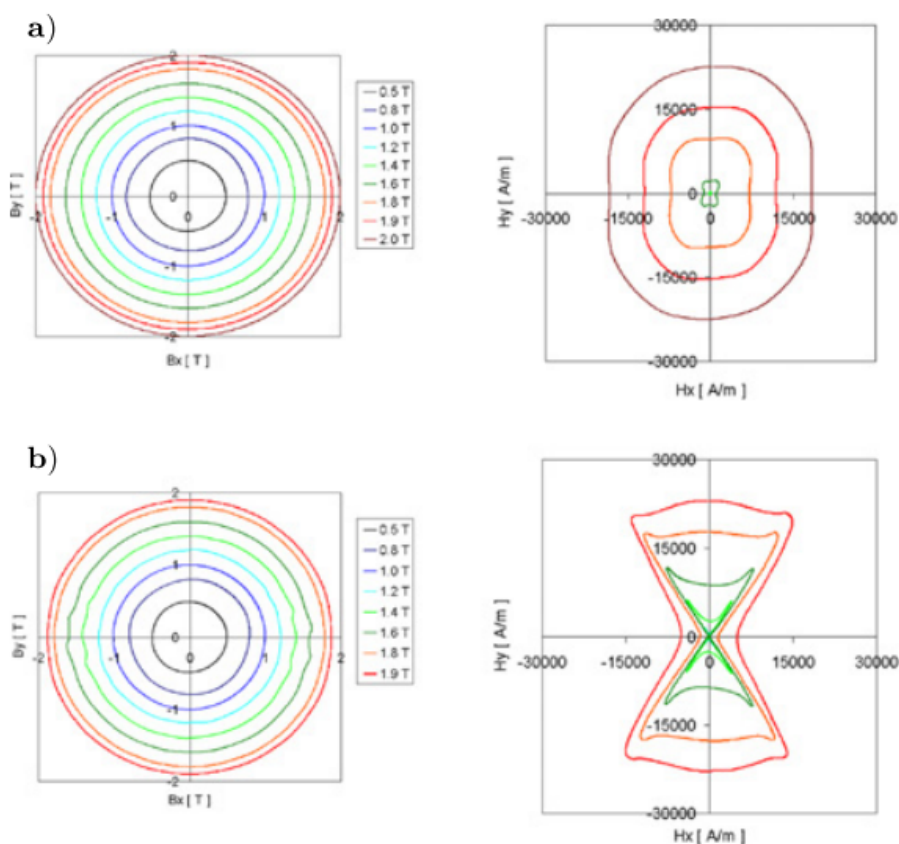
A mágneses térerősség, a mágneses indukció és a veszteség a (3.1) - (3.3)-as egyenletek segítségével határozhatók meg.

3.4. Két dimenziós mérési módszerek

Az előzőekben bemutatott módszerek esetén a vizsgált lemez egy irányban van gerjesztve. Forgó mágneses gépek esetében azonban a vasmag egyszerre több irányú mágnesezésnek van kitéve, valamint a váltakozó áramú gerjesztés mellett forgó mágnesezés is megjelenik. A vasmag vesztesége különböző mértékű forgó és váltakozó gerjesztés mellett, közepes amplitúdó esetén a forgó mágnesezésből fakadó veszteség lényegesen nagyobb lehet. A vasmag anyagának vizsgálatánál ezért fontos lehet a minta több dimenziós vizsgálata is, amely során a mintát többirányú gerjesztésének is kiteszik. A többdimenziós vizsgálat fontos még a nagy anizotrópiával rendelkező szemcseorientált anyagok esetében is.



3.5. ábra. Két lehetséges elrendezés vasmagminták két dimenziós vizsgálatához. (forrás: [1])



3.6. ábra. Egy szemcse orientálás mentes (a) és egy szemcseorientált (b) minta H és B forgóvektorai két dimenziós vizsgálat esetén. (forrás: [1])

A többdimenziós vizsgálatok esetében az egylemezes vizsgálati módszernél is használt acélparkók alkalmaznak a mágneses tér irányítása céljából. Az acélparkók forgatásával forgó gerjesztés hozható létre, ekkor a veszteség a mintán létrejövő nyomaték segítségével mérhető.

A 3.5. ábrán látható álló acélparkók és két (x és y irányú) tekercselés segítségével a tekercsek gerjesztésének megfelelő szabályozásával több irányú és forgó mágnesezés hozható létre a mintán. Ennek segítségével felvehető a minta x és y irányú hiszterézis karakteristikája is. A 3.6. ábrán egy szemcse orientálás nélküli és egy szemcseorientált minta H és B forgó vektor ábrája látható. Az ábrán látható, hogy a szemcseorientált minta lényegesen kisebb térerősség mellett ér el azonos mágneses indukciót y irányban, mint x irányban, míg a szemcseorientálás mentes minta esetében a két irány közötti különbség csak a hengerelés irányából fakad.

Az x és y irányban felvett hiszterézis karakterisztikák segítségével a minta hiszterézis vesztesége a következő egyenlet segítségével számítható,

$$p = \frac{f}{\rho} \int_0^T \left(B_x(t) \frac{dH_x(t)}{dt} + B_y(t) \frac{dH_y(t)}{dt} \right) dt. \quad (3.9)$$

Az itt bemutatott acél parkós módszer mintájára akár három dimenziós mérések is elvégezhetők, ekkor a 3.9 egyenlet a harmadik, y tengely irányú komponensekkel is kiegészül.

4. fejezet

3D nyomtatott villamos gépek

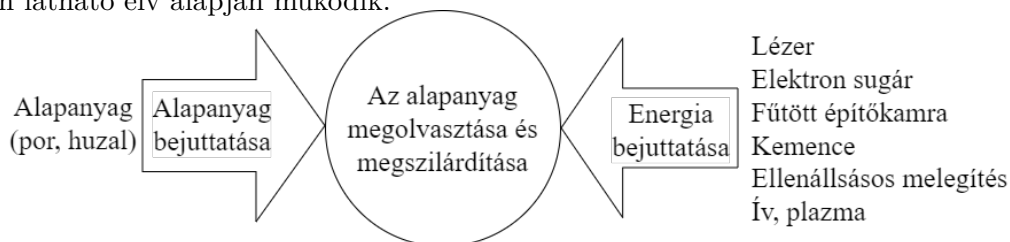
A villamos gépek fejlődésében az egyik legjelentősebb hatást a gyártásuk során alkalmazott alapanyagok fejlesztése jelenti. A villamos gépek teljesítő képességének határát legnagyobb mértékben a felhasznált alapanyagok, a vasmag anyagának paraméterei határozzák meg. Az additív gyártási folyamatok fejlődése új irányokat hozhat a villamos gépek további fejlődésében. Az additív gyártási technológiák, más néven 3D nyomtatás számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos gyártási folyamatokkal szemben, segítségükkel a villamos gépek tervezését új szemszögből közelíthetjük meg. Az additív gyártási folyamatok fő előnyei [10]:

- Kis darabszámú gyártás, prototípus gyártás. Additív gyártási technológiákat használva nem szükséges komplex, az adott termék gyártására speciálisan kialakított szerszámok és gyártósor kialakítása.
- Konstrukció optimalizáció és tömeg csökkentés. Az additív gyártási technológiák alkalmasak a különféle topológia optimalizálási szoftverek segítségével tervezett alkatrészek gyártására, így azok tömege a tervezés során nagy mértékben csökkenthető, a mechanikai és villamos tulajdonságok megtartása mellett. Ez különösen előnyös a repülőgép ipar, az űrkutatás és a járműgyártás szempontjából is. Emellett az additív gyártási technológia segítségével különféle új, a hagyományos gyártási folyamatok segítségével nem megvalósítható topológiák is kialakíthatók (lásd 4.4. fejezet).
- Zöld technológiának tekinthető. A szubsztraktív gyártási folyamatokkal ellentétben az additív gyártási folyamatok szinte nulla hulladékkal járnak, a felhasznált nyers alapanyag a legtöbb esetben szinte teljes egészében újra hasznosítható. Ennek köszönhetően az additív gyártási folyamatok megvásárolt nyersanyag és késztermék aránya (buy-to-fly ratio) lényegesen meghaladja a hagyományos gyártási folyamatokét, míg a szubsztaktív gyártástechnológiák esetében ez az arány elérheti a 10 az 1-hez nagyságrendet, az additív folyamatoknál ez jó közelítéssel 1:1-nek tekinthető. Ez különösen fontos azon iparágaknál, ahol az alapanyag rendkívül értékes, például a repülőipar esetében szubsztraktív gyártási módszerrel 11:1 nyersanyag, késztermék arány mellett 5,4 t késztermékhez 60 t nyers titánt használnak fel. Emellett az additív gyártástechnológiák energia hatékonysága is lényegesen meghaladja a hagyományos módszerekét, míg hagyományos módszerekkel 1 kg titánium megmunkálásához több mint 40 kWh energia szükséges, additív megmunkálással ugyanehhez a mennyiséghez csak 1 kWh kell.
- Az egyes alkatrészek integráltsági foka. Additív gyártási módszerek segítségével a legyártott alkatrészek integráltsági fokát lényeges mértékben növelni lehet. Például egy villamos forgógép állórészének vasmagja és tekercselése legyártható egy lépésben

és akár a hűtés is integrálható, ezzel gyorsítva a gyártási folyamatot és egyszerűsítve az összeszerelést.

4.1. Additív gyártási módszerek

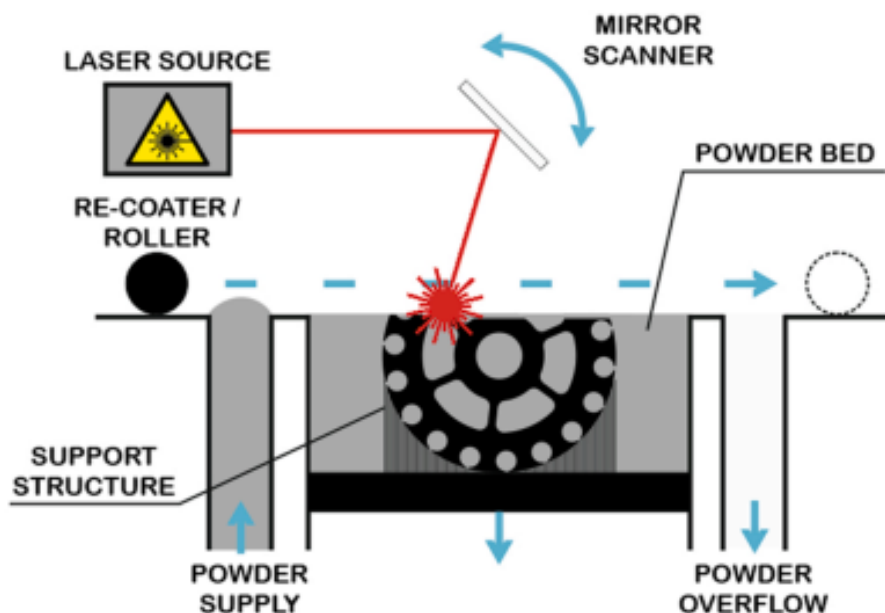
Az additív gyártási módszer, a 3D nyomtatás az elkészíteni kívánt termék anyagának hozzáadásával, például vékony rétegekből építi fel a munkadarabot. A hagyományos szubsztaktív gyártási folyamatokkal szemben, amelyeknél a kész termék egy nagyobb nyersanyagból készül és a felesleges anyagot valamilyen roncsolási eljárással választják le. A 3D nyomtatás többféle módon is megvalósítható, azonban ezen megoldások mindegyike a 4.1. ábrán látható elv alapján működik.



4.1. ábra. A 3D nyomtatási módszerek működési alapelve.

A 3D nyomtatási folyamat során a felhasznált alapanyagot a megfelelő helyre mozgatják az építési térben, és valamilyen energiaforrás segítségével megolvasztják, majd lehűtik azt, így rétegenként kialakítva a kész terméket. A különféle 3D nyomtatási módszerek csoportosíthatók a felhasznált alapanyag formája szerint, ami lehet por, szál, vezeték, lap, rúd, granulátum vagy diszperzió is. A villamos gépek 3D nyomtatásához felhasznált fém alapanyagok leggyakrabban por vagy huzal formájában érhetők el. A villamos gépek lágymágneses alkatrészeinek nyomtatásához leggyakrabban az alábbiakban felsorolt 3D nyomtatási módszereket alkalmazzák.

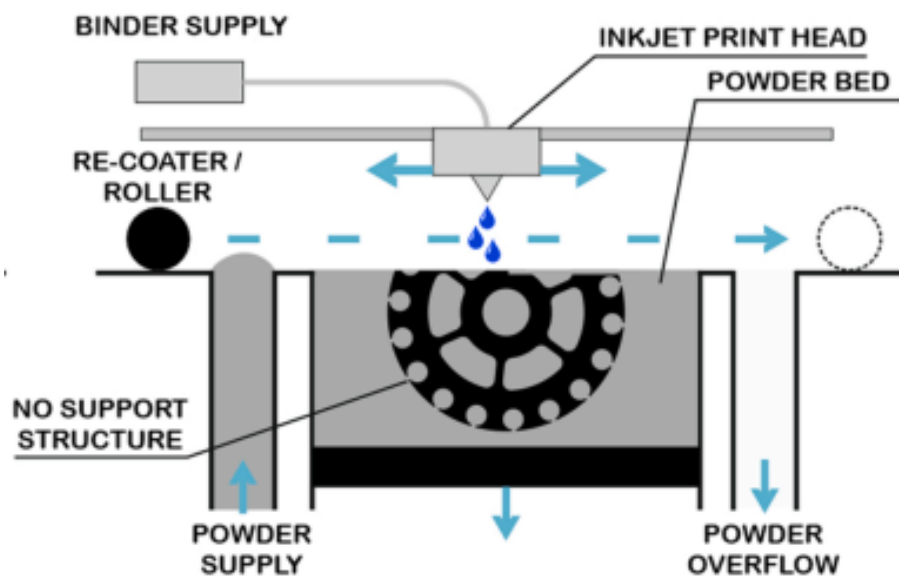
4.1.1. Powder Bed Fusion



4.2. ábra. Az L-PBF (Laser-Powder Bed Fusion) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [11])

A **PBF** (Powder Bed Fusion - Porágy Fúzió) módszer működési elve a 4.2. ábrán látható. A PBF módszer során először egy görgő (roller) elteríti egy réteg port az építési ágyon, majd egy lézer- vagy elektronsugár végigpásztázza azt az elkészíteni kívánt termék 2D-s metszete alapján, ennek hatására az alapanyag a sugár mentén összeforr és létrejön a kész termék egy rétege. Ezt követően az építési ágy egy rétegnyit süllyed és az adagoló görgő még egy réteg port terít az előzőleg elkészült rétegre. Ez a folyamat egészen addig ismétlődik, amíg a termék elkészül. Emellett, ahogy a termék készül, a nyomtató különféle tartószerkezeteket is készít az előző hasznos rétegen túlnyúló rétegek számára. A folyamat végén a kész terméket további munkálatoknak kell alávetni, például el kell távolítani a tartószerkezeteket, le kell csiszolni a termék felületét stb.

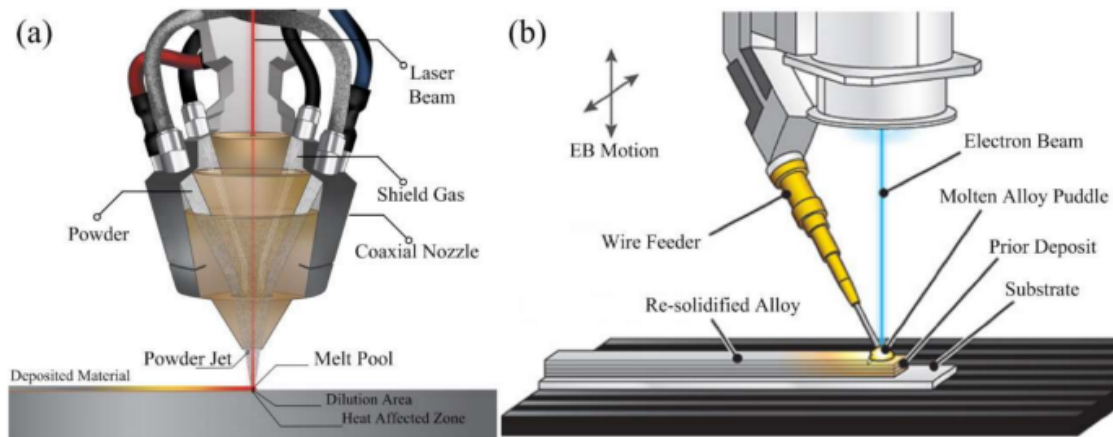
4.1.2. Binder Jetting



4.3. ábra. A BJT (Binder Jetting - Kötőanyag sugaras) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [11])

A **BJT** (Binder Jetting - Kötőanyag Sugaras) 3D nyomtatás működési elve a 4.3. ábrán látható. A BJT nyomtatási módszer a tintasugaras nyomtatókhoz hasonló elven működik. Először a PBF módszerhez hasonlóan egy por réteget terítenek az építési felületre, amelyre a nyomtatni kívánt termék 2D-s metszete szerint kötő anyagot juttatnak. A következő réteg elkészítése előtt a kötőanyagban lévő oldószert egy izzólámpa segítségével elpárologtatják. Ezt követően az építési asztal egy réteggel lejjebb süllyed és a folyamatot megismétlik. Amikor a termék összes rétegével elkészültek a terméket egy kemencébe helyezik, hogy a kötőanyag megfelelő módon megkössön. Végül a nem megkötött porszemeket eltávolítják. A módszert nem csak fémek, hanem kerámiák és homok öntőformák nyomtatására is használják, valamint alkalmazza az orvostudomány és a fogászat is [12, 13]. Hátránya, hogy az elkészített darab előre nehezen meghatározható, akár 15 – 20%-os zsugorodáson is keresztül mehet, ezzel nem kívánt geometriát eredményezve.

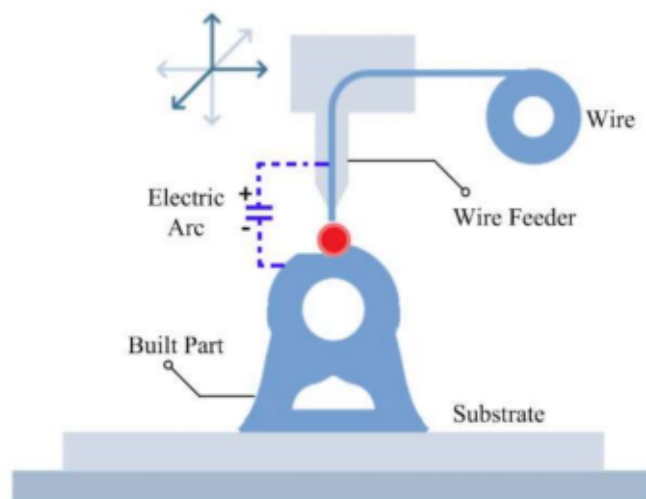
4.1.3. Directed Energy Deposition



4.4. ábra. A DED (Direct Energy Deposition) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [10])

A **DED** (Directed Energy Deposition) módszer működési elve a 4.4. ábrán látható. A módszer nevét arról kapta, hogy az alapanyag közvetlenül a lerakási ponton találkozik az energia forrással [14]. A felhasznált energiaforrás lehet lézer-, vagy elektronsugár, ív vagy plazma, az alapanyag pedig lehet por vagy huzal. A gyártási folyamat során a megfelelő pontra juttatják az alapanyagot, amit az energia forrás megolvaszt a réteg elkészítéséhez, és ezt addig ismétlik, amíg a termék elkészül. Ezen módszer segítségével komplex formák hozhatók létre az eddigiekben ismertetett módszereknél lényegesen gyorsabban, valamint a módszer már elkészült fém alkatrészek javítására, bővítésére is alkalmas.

4.1.4. Joule nyomtatási módszer

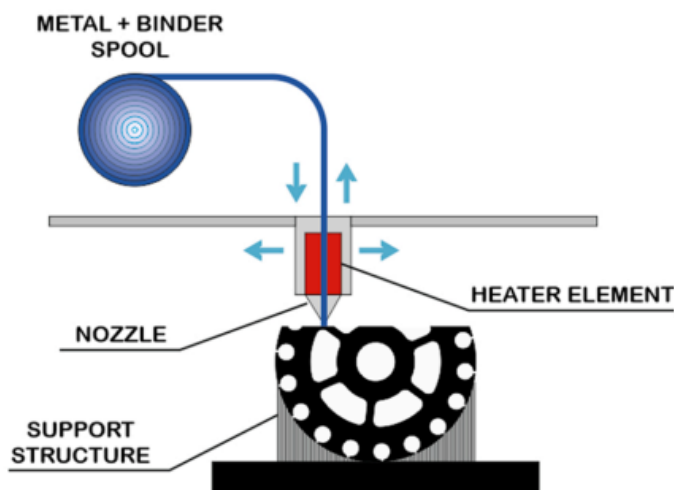


4.5. ábra. A Joule (Joule printing) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [10])

A **Joule nyomtatási módszer** (Joule Printing) működési elve a 4.5. ábrán látható. A módszer az alapanyagot vezeték formájában használja, és annak megolvasztására elektromos áramot vezet az anyagba, ami annak ellenállása miatt hővé alakul és a vezeték

megolvad. Mivel az ellenállás a vezeték és az épített termék érintkezési pontjában a legnagyobb a keletkező hő ezen a ponton a legnagyobb, így mindig csak a kellő mennyiségű vezeték olvad meg és a módszer rendkívül energiahatékony.

4.1.5. Fuse Deposition Modeling

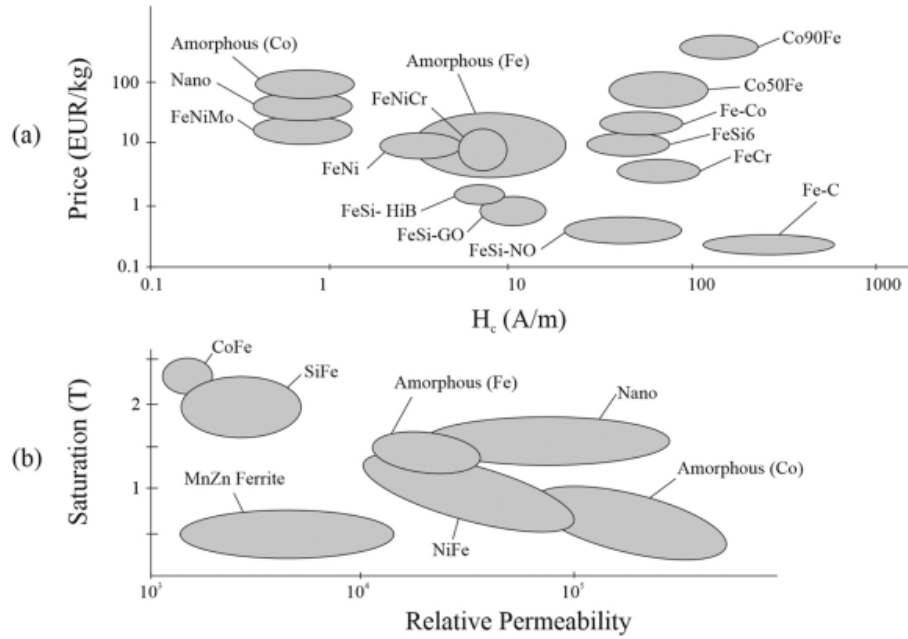


4.6. ábra. A FDM (Fuse Deposition Modeling) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [11])

A **FDM** (Fuse Deposition Modeling) módszer működési elve a 4.6. ábrán látható. A módszer az alapanyagot huzal formájában kapja, a huzal a nyomtatni kívánt fém ötvözetet és kötő anyagot tartalmaz. A folyamat során a huzalt megolvasztják és egy fúvóka segítségével juttatják a megfelelő pontba. Az elkészült darabot a BJ módszernél megismert utókezelési eljárásoknak kell alávetni. Ez a módszer a legegyszerűbb, legolcsóbb és leggyorsabb megoldás azonban kevésbé pontos mint például a PBF módszerek. Hátránya, hogy a BJ módszerhez hasonlóan az elkészített termék akár 15 – 20%-os zsugorodáson is keresztül mehet.

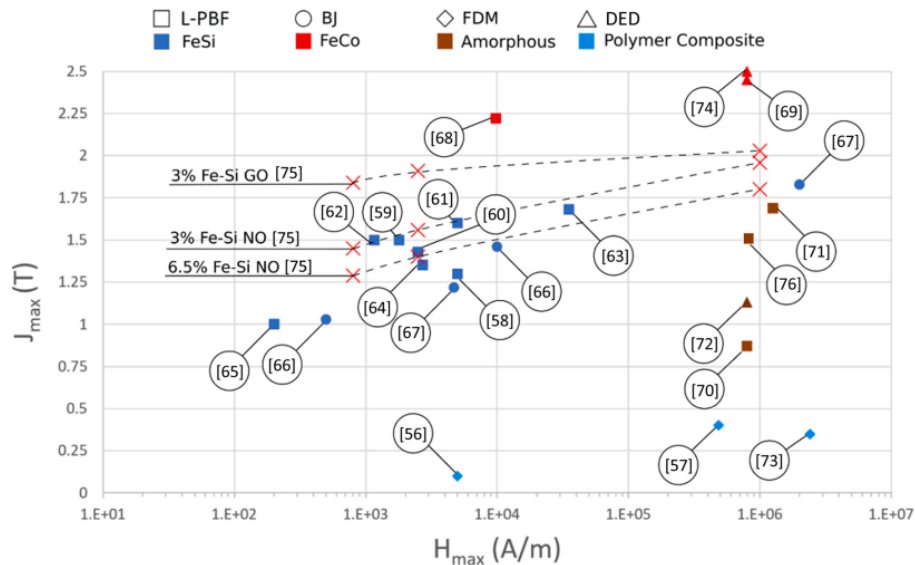
4.2. 3D nyomtatott vasmagok paraméterei

A villamos gépek vasmagja lágymágneses anyagokból készül, melynek célja a mágneses tér vezetése. Ennek érdekében az anyag nagy relatív permeabilitással ($> 10^3$) és keskeny hiszterézis karakterisztikával (tehát alacsony koercitív térrel) rendelkezik a minél kisebb vasvesztés elérése érdekében. Tehát a 3D nyomtatott vasmag paramétereinek vizsgálatakor a legfontosabb szempontok a szaturációs indukció, a hiszterézis veszteség és az ár. A [11] cikkben ezen paraméterek szempontjából vizsgálták a 3D nyomtatással elkészített vasmagok minőségét és hasonlították össze a hagyományos gyártási módszerekkel gyártott vasmagok tulajdonságaival.



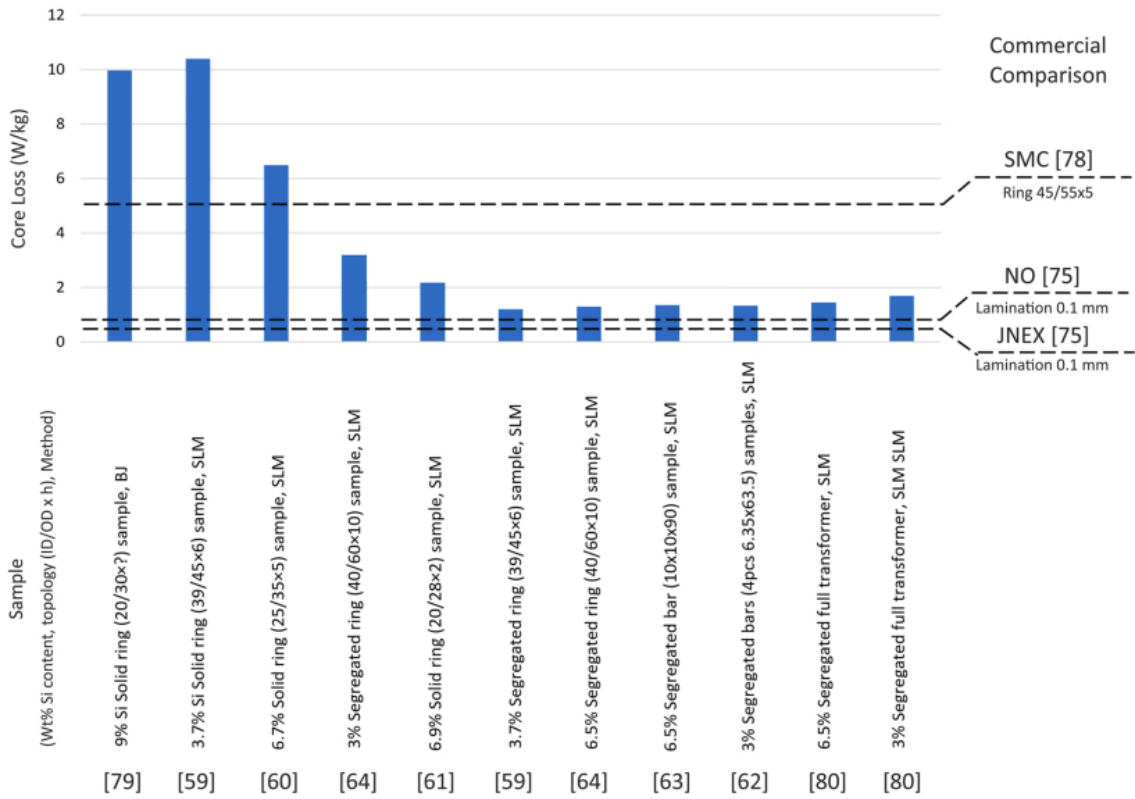
4.7. ábra. A vasmagok készítéséhez felhasznált anyagokat összehasonlítása ár és koercitív térerősség (a), valamint szaturációs térerősség és relatív permeabilitás (b) szempontjából. (forrás: [11])

A 4.7. ábrán a vasmagok készítéséhez használt anyagokat hasonlítják össze ár és koercitív térerősség, valamint szaturációs térerősség és relatív permeabilitás szempontjából. Látható, hogy alacsony frekvencián (50-60 Hz) a legjobb ár-érték arányt a különböző FeSi ötvözetek képviselik, míg magas frekvencián az amorf és nanokristályos anyagok lényegesen jobbak veszteség szempontjából, ezzel kompenzálva a magas árukat.



4.8. ábra. A 3D nyomtatott és hagyományos laminált vasmagok szaturációs indukciójának összehasonlítása. (forrás: [11])

A 4.8. ábrán a különféle anyagból és nyomtatási módszerrel készült vasmag mintákat hasonlítják össze a hagyományos gyártástechnológiával készült szilícium-vas ötvözetekkel szaturációs indukció tekintetében. Megfigyelhető, hogy a 3D nyomtatott kobalt (FeCo) ötvözetek képesek meghaladni akár a szemcseorientált hagyományos FeSi anyagok szaturációs indukcióját is, a nyomtatott szilícium ötvözetekkel pedig hozható a szemcse orientálás nélküli minőség. Fontos kiemelni, hogy mivel az anyagok mágneses tulajdonsága nagyban függ a gyártási folyamat során kialakuló anyagszerkezettől, a kristálytani szerkezetüktől, és a fennmaradó belső feszültségtől és szennyeződésektől, a nyomtatott mintákat magas hőmérsékleten (1100-1200 °C) kell hőkezelní kell a belső feszültségek és szemcse növekedés céljából. A hőkezelés nagyban javítja a minták mágneses tulajdonságait [15].



4.9. ábra. A 3D nyomtatott és a hagyományos laminált vasmagok veszteségeinek összehasonlítása 50-60 Hz-en 1 T maximális indukció mellett. (forrás: [11])

A 4.9. ábrán a nyomtatott anyagok vasveszteségét hasonlítják a hagyományos laminált ötvözetekéhez. A vasveszteséget $\frac{W}{kg}$ -ban adják meg. A laminált minták esetében a veszteséget 50-60 Hz-en mérik 1,5 T maximális indukció mellett, a nyomtatott anyagoknál azonban ezt 1 T mellett adják meg, ami a kisebb elérhető szaturációs indukció miatt van így. A nyomtatott anyagokat toroid minták segítségével vizsgálták. A szilárd toroidok esetében jelentős $10 \frac{W}{kg}$ nagyságrendű veszteségeket tapasztalhatunk, ez a nagy örvényáramú veszteségek miatt van. Az örvényáramú veszteség csökkentése érdekében a lamináláshoz hasonló megoldásként különféle topológiában kialakított légréseket helyeznek el a nyomtatott mintákban, (lásd később a 4.4. fejezetben) ezzel lényegesen csökkentve a vasveszteséget, ami ezen minták esetében a $1,2 - 1,7 \frac{W}{kg}$ tartományba esik. Hagyományos laminált vasmagok esetében az elérhető veszteség lényegesen alacsonyabb, a $0,5 - 0,8 \frac{W}{kg}$ tartományban található. Elmondható, hogy az örvényáram csökkentése érdekében légrés-

sel ellátott nyomtatott vasmagok vesztesége nagyjából kétszerese a laminált anyagokéhoz képest, ez az állítás azonban a veszteséget térfogat arányosan vizsgálva nem állja meg a helyét, mivel a nyomtatott mintákba elhelyezett légrés jelentősen csökkenti a vasmag kitöltési tényezőjét, így ugyanakkora mágneses fluxus eléréséhez lényegesen nagyobb vasmagra van szükség, ezzel növelve a veszteséget. A légréssel ellátott vasmagok által átlagosan elérhető kitöltési tényező kb. 60%.

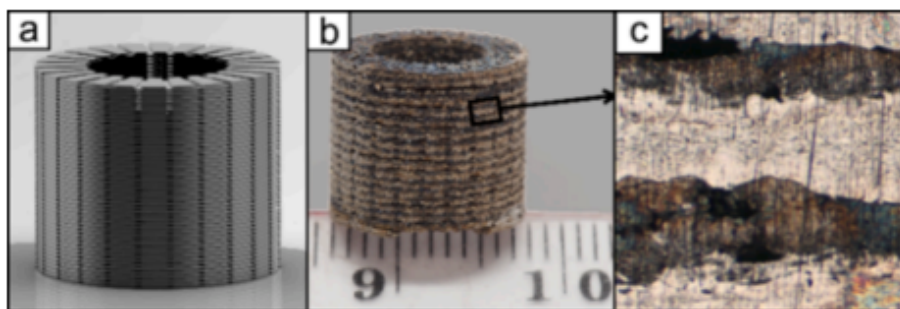
Az örvényáramú veszteség mellett a vasveszteség fontos részét képezi a hiszterézis veszteség. Elmondható, hogy a nyomtatott vasmagok hiszterézis vesztesége a hagyományos laminált vasmagok hiszterézis veszteségének nagyságrendébe esik, $0,61 - 0,7 \frac{W}{kg}$. Összehasonlításként a laminált szemcseorientálás nélküli 6,5%-os szilícium tartalmú FeSi ötvözetek hiszterézis vesztesége a $0,5 - 0,7 \frac{W}{kg}$ -os tartományba esik.

A nyomtatott vasmagok mechanikai tulajdonságai képesek elérni a hagyományos laminált vasmagoknál elvárt minimális 400 MPa-os szakítószilárdságot, ez azonban csak tömör mintákra igaz, a légréssel ellátott vagy egyéb módosított topológiával rendelkező anyagoknál ennél lényegesen kisebb szakítószilárdság tapasztalható.

Összességében elmondható, hogy a nyomtatással készített vasmagok képesek elérni a laminált vasmagoknál általános telítési indukciót, azonban az örvényáramú veszteség csökkentése a kitöltési tényező és a mechanikai tulajdonságok megtartása mellett komoly kihívás, amely megoldása nagyban befolyásolja, a nyomtatott vasmagok gyakorlati használhatóságát.

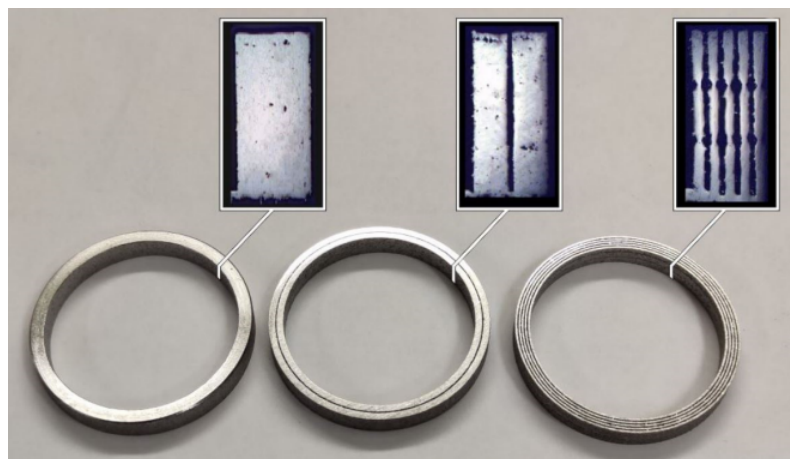
4.3. Veszteségek csökkentése

Az előző fejezetben kiemeltük, hogy a 3D nyomtatott vasmagos veszteségének jelentős részét az örvényáramú veszteség képezi, ezért a nyomtatott vasmagok gyakorlati hasznosíthatósága érdekében csökkenteni szükséges azt. A vasveszteség meghatározása a 2.6 egyenlet segítségével lehetséges. Látható, hogy az örvényáramú veszteség értéke egyenesen arányos a vasmag térfogatával és annak fajlagos vezetésével, ezért annak csökkentését ezen két érték csökkentésével lehet elérni. A hagyományos vasmagok esetében a térfogat csökkentésére lemezelést alkalmaznak. A vasmagot vékony (<1 mm) lemezekből állítják össze, és az egyes lemezeket szigetelő réteggel látják el. A 3D nyomtatott vasmagok örvényáramú veszteségének csökkentése szintén a térfogat csökkentésével érhető el leghatékonyabban. A térfogat csökkentése érdekében kétféle megoldást alkalmaznak, az egyik a vezető és szigetelő rétegek nyomtatása felváltva, a másik pedig légrés elhelyezése a vasmagban. A [16] cikkben vas (Fe) és titánium (Ti) rétegeket nyomtattak felváltva egy toroid magban az örvényáram csökkentése céljából. A rétegzett sruktúrát nitrogén védőgázban nyomtatták ki, ami reakcióba lépett a titániummal és titánium-nitridet (TiN) hozott létre, ami vezető, ezért a nyomtatás után a magot egy óráig levegőben hőkezelték 500 °C-on, így a TiN réteg titánium-oxiddá alakult, ami már betölti a szigetelő szerepét. Az elkészített rétegzett toroid minta a 4.10. ábrán látható. Megfigyelhető, hogy a titánium-oxid réteg valóban elválasztja a vas rétegeket, így csökkentve a vasveszteséget.



4.10. ábra. 3D nyomtatott Fe-Ti rétegelt toroid a vasveszteségek csökkentése érdekében. (forrás: [16])

A vezető és szigetelő rétegek váltakozó nyomtatása mellett az örvényáramú veszteség csökkenthető különböző légrést alkalmazó topológiák segítségével is. A [17] cikkben FeSi-ből készült toroidokat készítettek egy és négy érintő irányú légréssel (lásd 4.11. ábra).



4.11. ábra. 3D nyomtatott FeSi toroidok légréssel ellátva a vasveszteségek csökkentése érdekében. (forrás: [17])

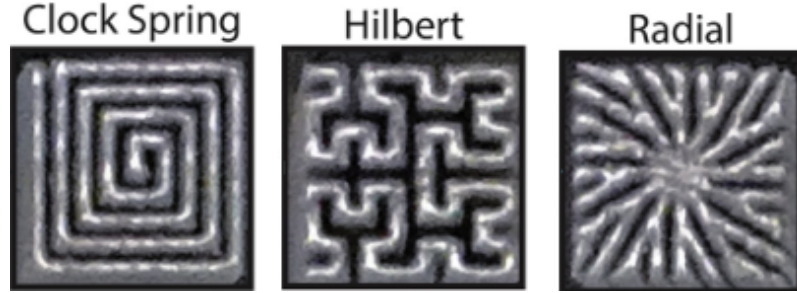
Az elkészített mintákat hőkezelték és megvizsgálták a légrések hatását a vasveszteségre. Az $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on hőkezelt toroidok vasvesztesége $10,4\frac{\text{W}}{\text{kg}}$ -ról egy légrés esetén $3,6\frac{\text{W}}{\text{kg}}$ -ra négy légrés esetén pedig $1,2\frac{\text{W}}{\text{kg}}$ -ra csökkent 1 T indukció mellett 50 Hz -en. Látható, hogy a veszteségek lényegesen csökkenthetők légrés alkalmazásával, azonban a kitöltési tényező jelentősen romlik, míg egy légrés esetében $0,92$ négy légrésnél már csak $0,59$.



4.12. ábra. 3D nyomtatott FeSi toroidok légréssel ellátva a vasveszteségek csökkentése érdekében. (forrás: [18])

A [18] cikkben a 4.12.ábrán látható légrésekkel ellátott topológiát alkalmazzák a veszteségek csökkentésére. A toroid minták 3 és $6,5\%$ -os szilícium tartalmú vasból épülnek fel.

A 6,5%-os mintánál a veszteség kb 10%-al tudták csökkenteni az egyes és a kettes számú optimalizált topológiánál is.

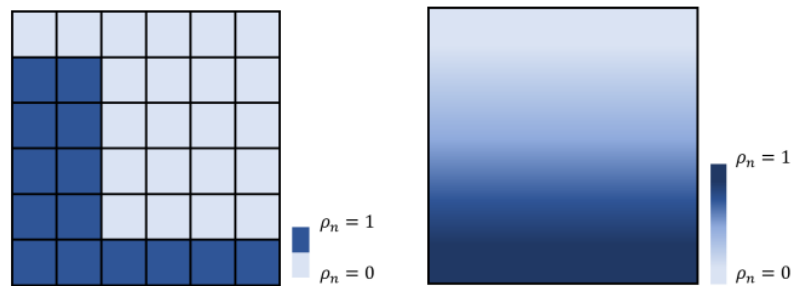


4.13. ábra. 3D nyomtatott FeSi transzformátor vasmagok óraru-
gó, Hilbert görbe és radiális görbe keresztmetszettel a
vasveszteségek csökkentése érdekében. (forrás: [19])

A [19] cikkben a 4.13. ábrán látható topológiákat alkalmazzák FeSi-ből készült vas-
mag veszteségének csökkentésére. Az elkészített vasmagokból transzformátort készítenek
és összehasonlítják az így kapott gép veszteségeit a hagyományos lemezelte vasmaggal készí-
tett transzformátoréval. A Hilbert görbés módszerrel megközelíthető a lemezelte vasmaggal
elérhető veszteség értéke.

4.4. Új topológiák

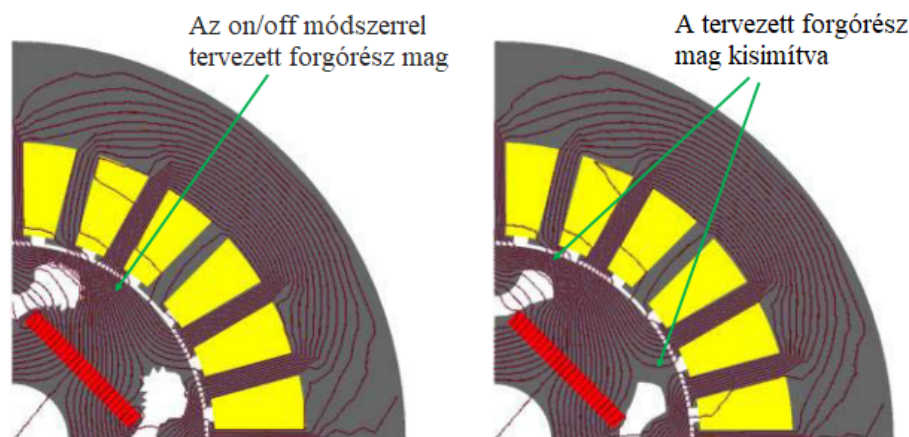
A 3D nyomtatással megvalósítható topológiák nem csak az örvényáramú veszteségek csök-
kentésére alkalmasak. A 3D nyomtatás kifejezetten alkalmas a topológia optimalizálási
(TO) algoritmusok felhasználásával tervezett vasmagok gyártására. A vasmagok formáját
hagyományos esetben matematikai modellek és érzékenység vizsgálat segítségével tervezik
valamilyen előre kiválasztott sablon alapján. A villamos gép teljesítőképességének további
javítása céljából evolúciós optimalizálási algoritmusokat alkalmaznak. Az ehhez szükséges
számítási teljesítmény rendkívül magas, főleg a légrés fluxus, a nyomaték, és a mágneses
fluxus sűrűség meghatározása szempontjából. Ennek következtében az egyedi vasmagok
megtervezése meglehetősen időigényes. Ehhez képest a TO algoritmusok képesek gyorsí-
tani a tervezés folyamatát, mivel lényegesen kevesebb analitikus modellezést igényelnek.
A TO algoritmusok a tervezési teret kisebb cellákra, vagy háló szerkezetű szegmensek-
re bontják és a használt anyag (akár több) valamilyen szempontból optimális sűrűségét
határozzák meg minden cellában. Az optimalizálás szempontja lehet az tervezett vasmag
lokális pontjain létrejövő fluxus sűrűség, a vasmag mechanikai teherbírása, tömege, stb, a
tervezés során ezen szempontok mindegyikét figyelembe kell venni.



4.14. ábra. A cellákra bontott tervezési tér on/off és sűrűség alapú
TO módszer esetén. (forrás: [20])

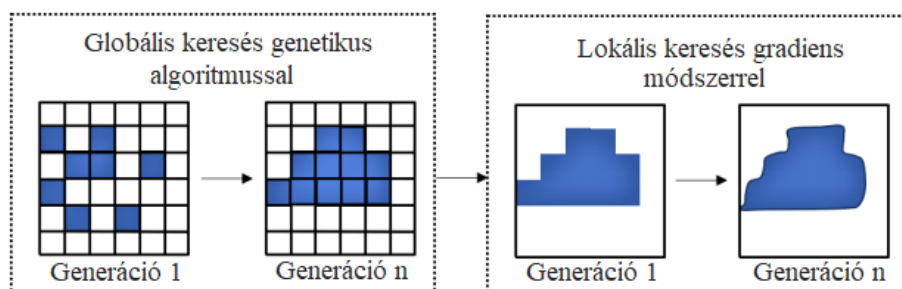
A tervezés során a TO algoritmus az összes cellához hozzárendel egy változót (ρ_n). Ez a változó az on/off (be/ki) módszer esetben kétállapotú (pl. 0 és 1), ekkor a 0 érték az anyag hiányát, az 1 pedig az anyag jelenlétét jelenti az adott cellában, a sűrűség alapú módszer esetében a változó a $[0;1]$ skálán terjedő értékeket vehet fel (lásd 4.14). A végső anyageloszlás és a megtervezett alkatrész célfüggvények kiválasztásával és evolúciós több-célú vagy gradiens alapú algoritmus használatával határozható meg. Ennek köszönhetően a megtervezett modell általában szokatlan geometriával rendelkezik.

A 4.15. ábrán egy TO algoritmus segítségével tervezett állandó mágneses gép forgórésze látható.



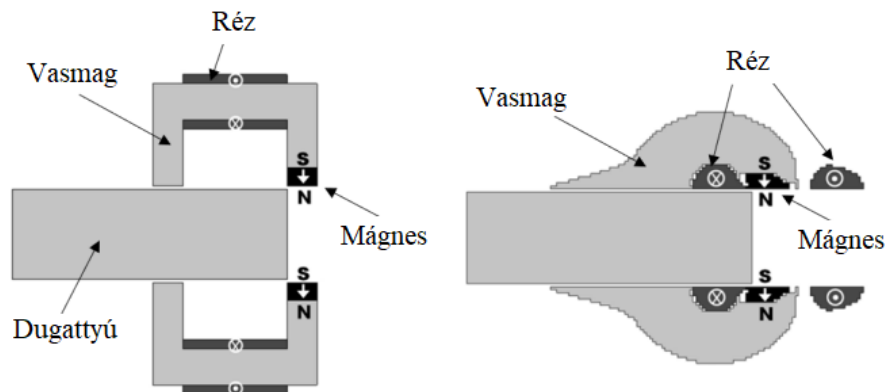
4.15. ábra. On/off TO algoritmus segítségével tervezett állandó mágneses gép forgórésze. (forrás: [20])

A TO algoritmus először on/off módszer segítségével megkereste az optimális geometriát a globális síkon, majd a keletkezett meglehetősen komplex geometriát egy lokális gradiens módszer segítségével simította, a módszert a 4.16. ábra szemlélteti.



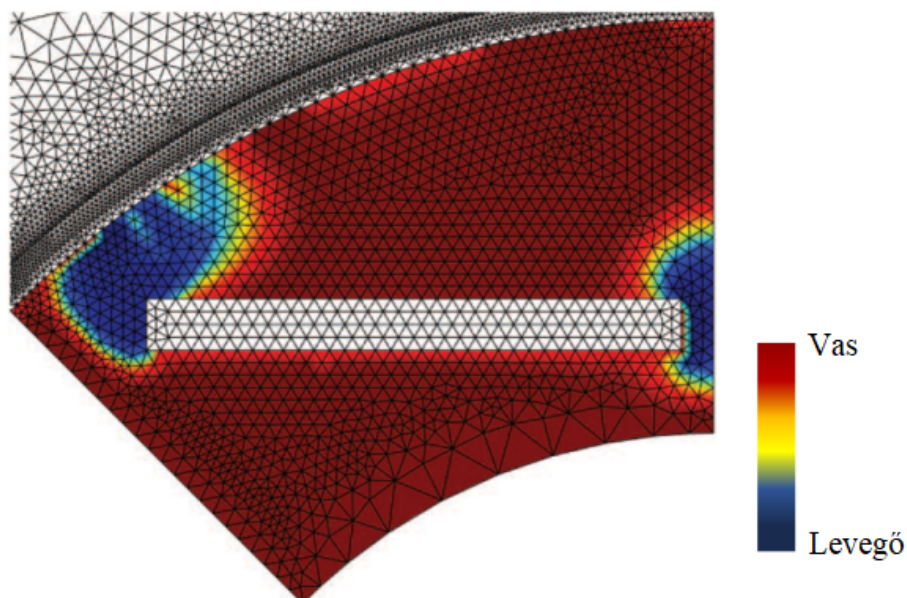
4.16. ábra. On/off TO algoritmus kiegészítve egy lokális gradiens alapú simítással. (forrás: [20])

Az on/off TO algoritmus nem csak egy anyag esetén alkalmazható, hanem segítségével megtalálható az optimális eloszlás több anyag (pl. vas, réz, állandó mágnes) esetében is. A 4.17. ábrán látható állandó mágneses lineáris aktuátor TO algoritmus segítségével lett megtervezve, úgy hogy a lehető legnagyobb erőt legyen képes kifejteni a dugattyúján. A módszer segítségével a kifejtett erő 40 %-al nőtt.



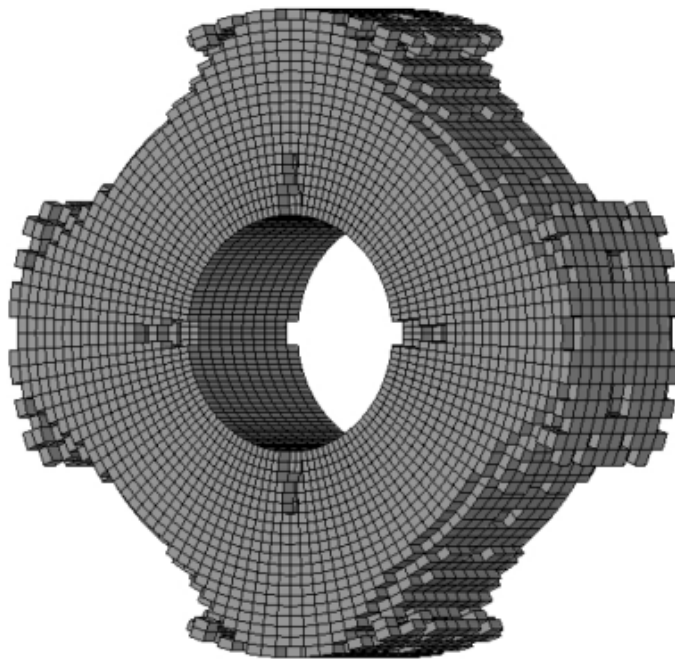
4.17. ábra. On/off TO algoritmussal tervezett állandó mágneses lineáris aktuátor. (forrás: [20])

A 4.18. ábrán egy sűrűség alapú TO algoritmus segítségével tervezett állandó mágneses szinkron motor forgórészének vasmagja látható. A sűrűség alapú TO algoritmus a bináris on/off módszerrel ellentétben a $[0;1]$ intervallumban folytonos értéket rendel minden cellához, így látható, hogy a vasmag anyaga és a levegő közötti átmenet is folytonos, a vasat a sötét vörös, a levegőt pedig a sötétkék szín jelzi, a kettő közötti átmenet pedig az ábrán látható skála szerint változik. A tervezés során a TO módszer célja az átlagos nyomaték növelése, és a nyomaték lüktetés csökkentése volt. A kizárólag mágneses alapú TO algoritmus azonban a tervezett forgórész mechanikai paramétereit nem veszi figyelembe, ezért a TO algoritmus által tervezett alkatrész mechanikai teherbírása kérdéses lehet. Ezen probléma elkerülése érdekében a gyakorlatban strukturális és elektromágneses analízist egyaránt alkalmazó TO algoritmusokat szoktak alkalmazni, amelyek segítségével kompromisszumos megoldás érhető el.

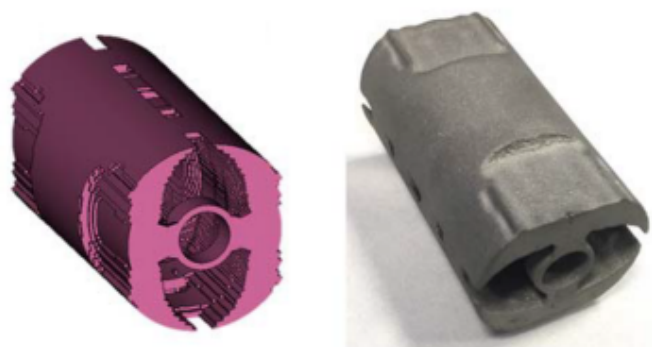


4.18. ábra. Egy sűrűség alapú TO algoritmussal tervezett állandó mágneses motor forgórésze. (forrás: [20])

A TO algoritmusok segítségével tervezett vasmagok lemezelt módszerrel történő megvalósítása meglehetősen költséges lehet (amennyiben lehetséges), valamint a különböző szubsztraktív megmunkálási módszerek például stancolás, lézervágás, préselés megváltoztatják a nyersanyag villamos tulajdonságait, így a TO algoritmus által tervezett mágneses paraméterek nem megvalósíthatók. Emellett a sűrűség alapú TO algoritmusok esetében a megtervezett alkatrész lokálisan különböző anyag sűrűséggel rendelkezhet, amit lemezeléssel nem lehet kivitelezni, additív gyártási módszerrel azonban megoldható feladat. A topológia optimalizálási módszer további szemléltetéseként a 4.19. ábrán egy TO algoritmus segítségével tervezett segítségével tervezett reluktancia motor forgórésze látható, a 4.20. ábrán pedig egy állandó mágneses motor forgórésze.



4.19. ábra. Egy TO algoritmussal tervezett reluktancia motor forgórésze. (forrás: [20])



4.20. ábra. Egy TO algoritmussal tervezett állandómágneses motor forgórésze, és megvalósítása 3D nyomtatás segítségével. (forrás: [20])

5. fejezet

A 3D nyomtatott vasmag modellezése

5.1. Végeselem módszer

A végeselem módszer a Maxwell-egyenletek differenciális alakjából indul ki, ezen egyenletek a következők [3],

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{J}(\vec{r}, t), \quad (5.1)$$

az Ampère-törvény, amely szerint a $\vec{J}(\vec{r}, t)$ áramsűrűség körül, örvényes $\vec{H}(\vec{r}, t)$ mágneses térerősség jön létre. Ez az áramsűrűség lehet vezetőben folyó áram $\vec{J}_0(\vec{r}, t)$ áramsűrűsége, vagy a vezetőben kialakuló $\sigma \vec{E}(\vec{r}, t)$ örvényáram, ahol σ a vezetőanyag fajlagos vezetése. Az 5.1 egyenlet általános esetben kiegészül az eltolási árammal, ez azonban villamos gépek szimulálása esetén általában elhanyagolható. A következő egyenlet,

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}, \quad (5.2)$$

a Faraday féle indukció törvény (a negatív előjel által kiegészítve a Lenz-törvénnyel), amely szerint változó mágneses tér örvényes elektromos teret hoz létre, amely elektromos tér hozza létre a vezetőkben az örvényáramot. A mágneses tér forrásmentes,

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0, \quad (5.3)$$

tehát a mágneses erővonalak önmagukban záródnak.

A mágneses térerősség és indukció közötti kapcsolatot a konstitúciós relációk határozzák meg,

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}\{\vec{H}(\vec{r}, t)\} \quad \text{és} \quad \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}\{\vec{B}(\vec{r}, t)\}, \quad (5.4)$$

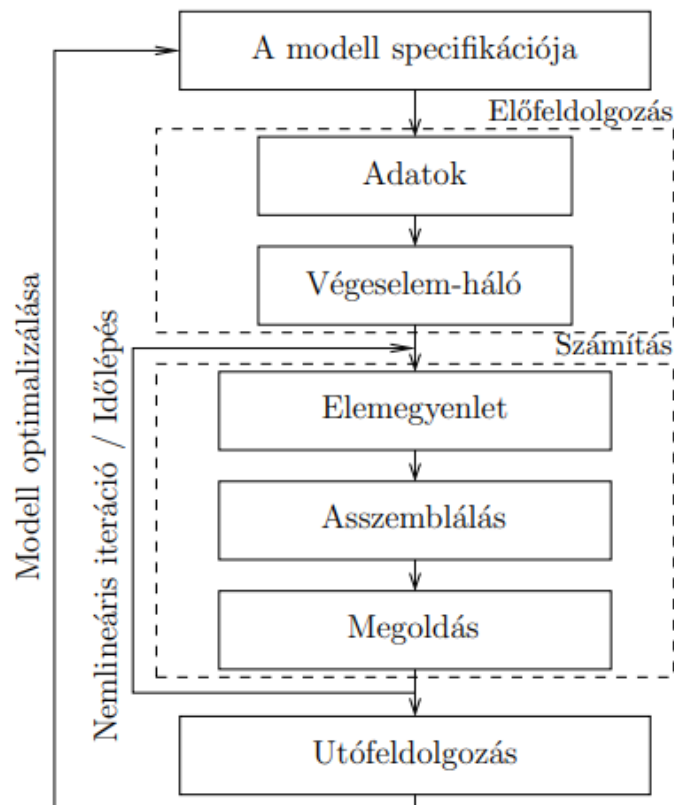
ahol a $\vec{B}\{\cdot\}$ és $\vec{H}\{\cdot\}$ az anyag karakterisztikáját írják le. Lineáris és izotróp esetben $\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \mu_r \vec{H}(\vec{r}, t)$ és $\vec{H}(\vec{r}, t) = \nu_0 \nu_r \vec{B}(\vec{r}, t)$, ahol μ_0 a levegő permeabilitása, μ_r az anyag relatív permeabilitása, valamint $\nu_0 = \frac{1}{\mu_0}$ és $\nu_r = \frac{1}{\mu_r}$. Általános esetben azonban ez a karakterisztika valamilyen hiszterézismoddal segítségével határozható meg.

A Maxwell-egyenletek csak a térjellemzők közötti kapcsolatot adják meg, azonban a probléma egyértelmű leírhatóságához és megoldhatóságához szükség van különféle perem- és határfeltételekre is. Két különböző anyaggal kitöltött közeg határán az elektromos és a mágneses térerősség tangenciális (határfelülettel párhuzamos) komponense, valamint a mágneses indukció és áramsűrűség normális (határfelületre merőleges) komponense folytonos, ugrás nélküli. A mágneses térerősség tangenciális komponense akkor nem folytonos, ha

a határfelületen $\vec{K}(\vec{r}, t)$ felületi áram folyik. A peremfeltételek a probléma tartományának határain érvényesülnek.

A Maxwell-egyenletek, valamint a perem- és határfeltételek segítségével tetszőleges probléma leírható, azonban analitikusan csak nagyon egyszerű elrendezések számíthatók. A Maxwell-egyenletek megoldásához a megoldandó problémától függően különböző skalár vagy vektor potenciálokat vezethetünk be, például a mágneses skalárpotenciált, a mágneses vektor potenciált, az áram-vektorpotenciált stb. A bevezetett potenciálok segítségével a kiszámítandó ismeretlenek száma csökkenthető és végül egy parciális differenciálegyenlethez juthatunk, amely megoldása a bevezetett potenciál. A potenciálok ismeretében a térjellemzők és egyéb kérdéses adatok számíthatók. A levezetett parciális differenciálegyenletek pontos analitikus megoldása helyett numerikus közelítő módszerek alkalmazhatók, ilyen a súlyozott maradék elv. A súlyozott maradék elv lényege, hogy nem célja sem a parciális differenciálegyenlet, sem a peremfeltételek tökéletes kielégítése, hanem azok maradékának egy kiválasztott súlyfüggvénnyel vett belső szorzatát teszi nullával egyenlővé, és ezen súlyozott maradék megoldása a feladat közelítő megoldása. A használt súlyfüggvény tetszőlegesen megválasztható, a választott súlyfüggvény alapján a súlyozott maradék elvén működő módszerek elkülönülnek, a végelelem módszer a súlyfüggvény megfelelő megválasztásával kapható.

A végelelem módszer tehát egy numerikus módszer parciális differenciálegyenletek megoldására. Lényege, hogy a megoldandó probléma komplex geometriáját kisebb, egyszerű elemi geometriák segítségével diszkrétizálja és a parciális differenciálegyenleteket lokálisan ezeken oldja meg. A végelelem módszer folyamata a 5.1. ábrán látható.



5.1. ábra. A végelelem módszer blokkvázlata. (forrás: [3])

Az első lépés a modell megalkotása, ami a vizsgált geometria megadásából (pl. CAD - Computer Aided Design = számítógépes tervezés), valamint a megoldandó parciális differenciálegyenletek és peremfeltételek megadásából.

Az előfeldolgozási szakaszban meg kell adni a különféle anyagi jellemzőket és a gerjesztést, valamint ebben a szakaszban történik a geometria végelem-rácscsal történő diszkrétizálása. A végelem egyszerű geometriai alakzat, két dimenzióban például háromszög vagy négyszög, három dimenzióban pedig tetraéder vagy hexaéder. Az így előálló háló definiálja a megoldandó egyenletrendszert, az ismeretlen potenciál közelítésére szolgáló polinomok a háló élein vagy csomópontjain helyezkednek el.

Ezt követően a súlyozott maradék elve alapján az egyetlen végelemre felírható lokális egyenletek segítségével fel kell építeni a megoldandó globális egyenletrendszert, ez a folyamat az asszemblálás. A felállított egyenletrendszert valamilyen numerikus módszer alapján meg kell oldani.

Az egyenletrendszer megoldásaként a közelítő potenciálfüggvény kapható, amely segítségével gyakorlatilag az összes kérdéses térváltozó meghatározható, ez az utófeldolgozási fázis.

5.2. Hogyan számol a végelem vasveszteséget

A végelem szoftverek leggyakrabban az utófeldolgozási folyamatban végzik a vasveszteség számítását. Ezen módszerek a végelem analízis által meghatározott mágneses indukciót használják a veszteségek meghatározására mérési eredmények alapján megállapított polinom függvények segítségével. Gyakran használt módszer a veszteség szétválasztási modell, amely a Steinmetz egyenleten alapszik [5],

$$P = C f^\alpha B^\beta, \quad (5.5)$$

ahol P a számított veszteség, f a gerjesztés frekvenciája, B pedig a mágneses indukció amplitúdója, a C , α és β konstansokat pedig a mérési eredmények alapján kell megválasztani. A konstansokat minden figyelembevett frekvencia harmonikus esetén meg kell határozni, emellett modellhez tisztán szinuszos indukció szükséges. A végelem analízis során a veszteséget minden végelemben ki kell számolni a modell segítségével.

Jordan kiterjesztette a Steinmetz módszert a veszteség ketté választásával, az így kapott modell szerint a számított teljes veszteség a hiszterézis veszteség és az örvényáramú veszteség összegeként határozható meg [21],

$$P = P_h + P_{\text{öv}} = C_h f B^2 + C_{\text{öv}} f^2 B^2, \quad (5.6)$$

ahol a hiszterézis veszteség P_h a frekvenciával és mágneses indukció négyzetével arányos, az örvényáramú veszteség $P_{\text{öv}}$ pedig a frekvencia és a mágneses indukció négyzetével. A C_h és $C_{\text{öv}}$ konstansok segítségével a modell a mérési eredményekhez illeszthető. A modell hátránya, hogy a hiszterézis veszteséget a mágneses indukcióval arányosnak kezeli, ami nem igaz mivel a hiszterézis veszteség nem nulla egy mágnesezési folyamat után nulla indukció mellett, ezért az ilyen esetekben a módszer alul vagy felül becsüli a veszteséget ezen tagjának pillanatnyi értékét. Az örvényáramú veszteség komponens a Maxwell egyenletek alapján a 2.6 egyenlet segítségével határozható meg. Bertotti tovább fejlesztette a veszteség szétválasztási modellt egy harmadik tag hozzáadásával,

$$P = P_h + P_{\text{öv}} + P_{\text{jár}} = C_h f B^2 + C_{\text{öv}} f^2 B^2 + C_{\text{jár}} f^{1,5} B^{1,5}, \quad (5.7)$$

ahol $P_{\text{jár}}$ a járulákos veszteség, amely a doménfalak mozgása által indukált mikro-örvényáramok miatt keletkezik. A [5] cikkben a következő továbbfejlesztett Bertotti modell

található,

$$P = P_h + P_{\text{öv}} + P_{\text{jár}} = k_h(B)fB^{\alpha(B)} + k_{\text{öv}}(B)f^2B^2 + k_{\text{jár}}(B)f^{1,5}B^{1,5}, \quad (5.8)$$

amiben az egyenlet együtthatói nem konstansok, hanem a mágneses indukció függvényei, valamint az örvényáramú veszteség számítás során 2.6 az anyag hőmérséklet függő fajlagos vezetését is figyelembe veszik a következő egyenlettel,

$$\rho(T) = \rho(20) [1 + \theta(T - 20)], \quad (5.9)$$

ahol $\rho(T)$ az anyag hőmérséklet függő fajlagos ellenállása ($\sigma = \frac{1}{\rho}$), T a hőmérséklet °C-ban, $\rho(20)$ a fajlagos ellenállás 20 °C-on, θ pedig az anyag hőmérsékleti állandója.

Az eddigiekben bemutatott veszteség modellek szinuszos mágneses indukció mellett adnak pontos közelítést, ami azonban a vasmag telítődése és a szinusztól eltérő gerjesztés miatt sok esetben nem szinuszos. A mágneses indukció Fourier kiterjesztése és a Steinmetz 5.5 egyenlet alkalmazásával az összes harmónikuson a modell kiterjeszthető nem szinuszos mágneses indukció esetére is. Ezt követően a teljes vasveszteség a következő egyenlet segítségével határozható meg [22],

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} C(f_n) f_n^{\alpha} B_n^{\beta}, \quad (5.10)$$

ahol az egyenletben szereplő C , α és β paraméterek megegyeznek a tisztán szinuszos mágneses indukciót modellező Steinmetz egyenlet paramétereivel. Ez azért is előnyös, mert így ezek identifikálása a mérési eredmények alapján lényegesen egyszerűbb. Ez az egyenlet azonban csak lineáris rendszerek esetében igaz, így a vasmagok nemlineáris viselkedésének modellezésére nem alkalmas. Ennek megoldására vezették be a módosított Steinmetz egyenletet (MSE), amelyben az eredeti egyenlet frekvencia tagját a következő tagra cserélték [23],

$$f_{eq} = \frac{1}{2\pi \hat{B}^2} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt, \quad (5.11)$$

mivel a pillanatnyi vasveszteség egyenesen arányos az indukció időszerinti deriváltjával, ami nem függ az alapfrekvenciától. Így a módosított Steinmetz egyenlet,

$$P = C f f_{eq}^{\alpha-1} \hat{B}^{\beta}. \quad (5.12)$$

5.2.1. A Preisach modell

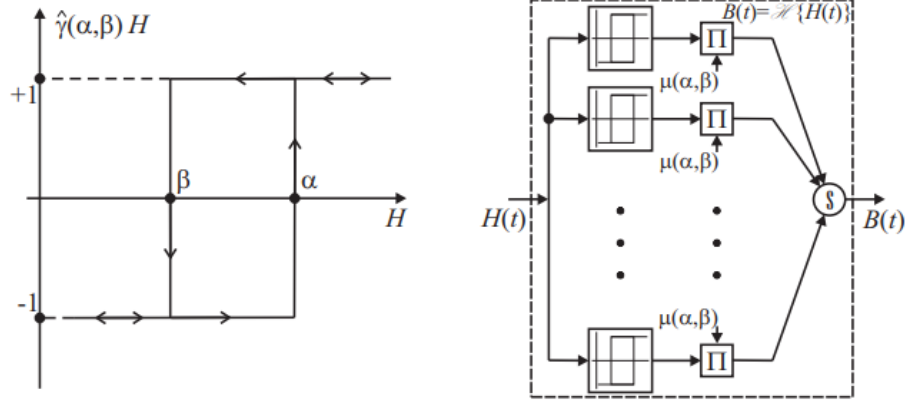
A vasmag anyagának leírására és a veszteségek modellezésére a hiszterézis karakterisztika modellezése is alkalmas. A hiszterézis karakterisztika segítségével a veszteség a következő egyenlettel határozható meg,

$$P = \int_0^T \left(B(t) \frac{dH(t)}{dt} \right) dt. \quad (5.13)$$

A hiszterézis karakterisztika közelítésére az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer a Preisach-modell [3]. A modell szerint az eredő hiszterézis karakterisztikát végtelen számú elemi hiszteron kimenetének súlyozott összege adja, amelyek a következő formulával definiálhatók [3]:

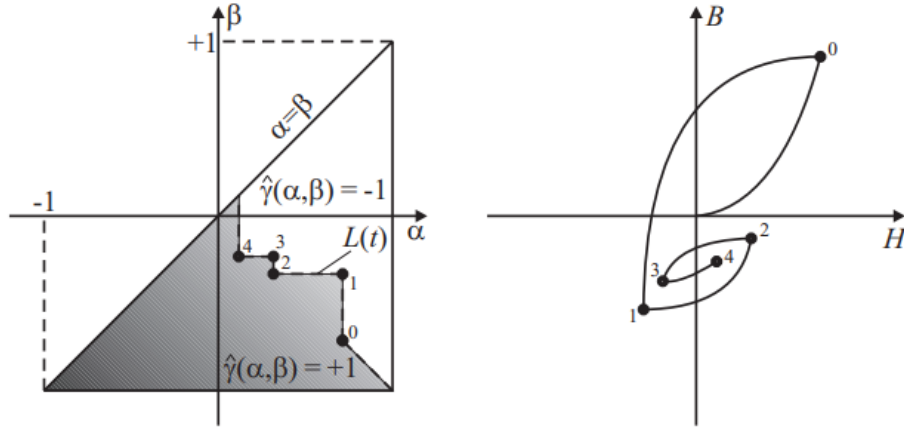
$$B(t) = \mathcal{H}\{B\} = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}(\alpha, \beta) H(t) d\alpha d\beta. \quad (5.14)$$

Egy hiszteron karakterisztikája az 5.2. ábrán látható, aminek felkapcsolási értéke α , lekapcsolási értéke β és $\alpha \geq \beta$, kimenete csak két értéket vehet fel, így $\hat{\gamma}(\alpha, \beta) = \pm 1$. A $\mu(\alpha, \beta)$ a Preisach-eloszlásfüggvény, ami az egyes hiszteronok kimenetét súlyozza. Az 5.14 egyenlet blokkvázlat szerű reprezentációja az 5.2. ábrán látható, ahol az egyes hiszteronok α és β paraméterei különböző értéket vesznek fel az összes párhuzamos ágban.



5.2. ábra. Egy hiszteron karakterisztikája (bal) és a belőle felépített hiszterézis modell (jobb). (forrás: [3])

Ennek leírására dolgozták ki a Preisach-háromszöget, amely az 5.3. ábrán látható. A Preisach-háromszög az $\alpha - \beta$ síknak azon része amelyre igaz, hogy $\alpha \geq \beta$. A rendszer előéletét az $L(t)$ lépcsőgörbe határozza meg, amely a bemeneti jel növekedésekor balról jobbra, csökkenésekor pedig fentről lefelé mozog, és mozgásával kapcsolgatja az egyes α és β értékekkel jelzett hiszteronokat. Alaphelyzetben a lépcsős görbe a $(0; 0)$ és $(+1; -1)$ pontokat köti össze, ezzel kettéválasztva a háromszöget. A lépcsőgörbe sarkai a bemeneti jel minimum és maximum értékei alapján alakulnak, ezzel a rendszer memóriájaként viselkedve.



5.3. ábra. A Preisach háromszög (bal) és a hozzá tartozó hiszterézis karakterisztika (jobb). (forrás: [3])

Az 5.14 egyenlet számítása a kettős integrál miatt igencsak időigényes, ennek egyszerűsítése céljából használhatjuk az $E(\alpha, \beta)$ Everett-függvényt, ami az eloszlás függvény ismeretében,

$$E(\alpha, \beta) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (5.15)$$

ami fordítva,

$$\mu(\xi, \eta) = \frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial \beta} E(\alpha, \beta). \quad (5.16)$$

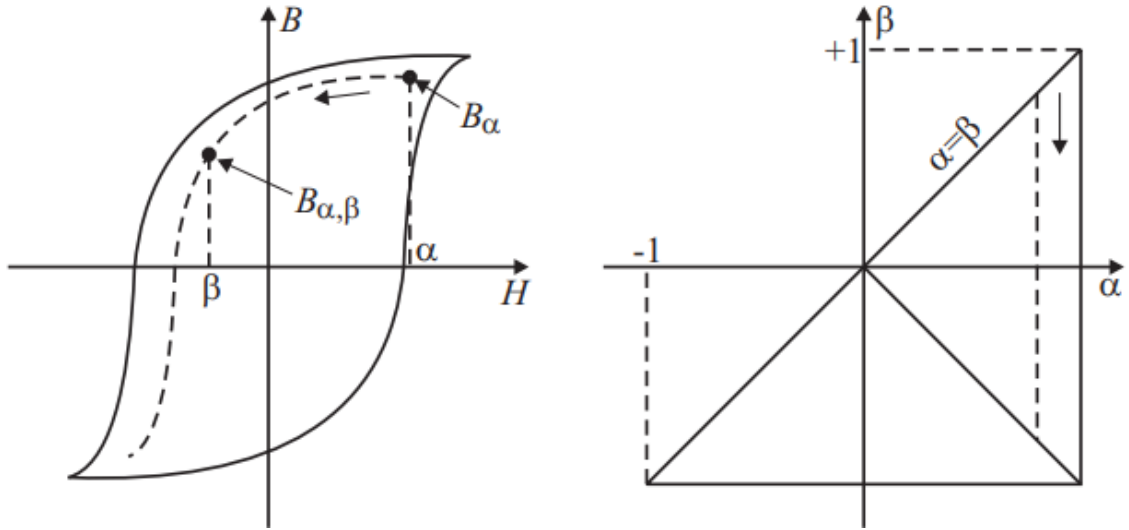
Az Everett függvény ismeretében az 5.14 a következő alakra egyszerűsödik,

$$B(t) = -E(\alpha_0, \beta_0) + 2 \sum_{k=1}^K [E(\alpha_k, \beta_{k-1}) - E(\alpha_k, \beta_k)], \quad (5.17)$$

ahol K a lépcsőgörbe által tárolt sarkok számát jelöli. Az Everett függvény másik előnye, hogy kapcsolatban áll a mérési eredményekkel. Az Everett függvény meghatározható az,

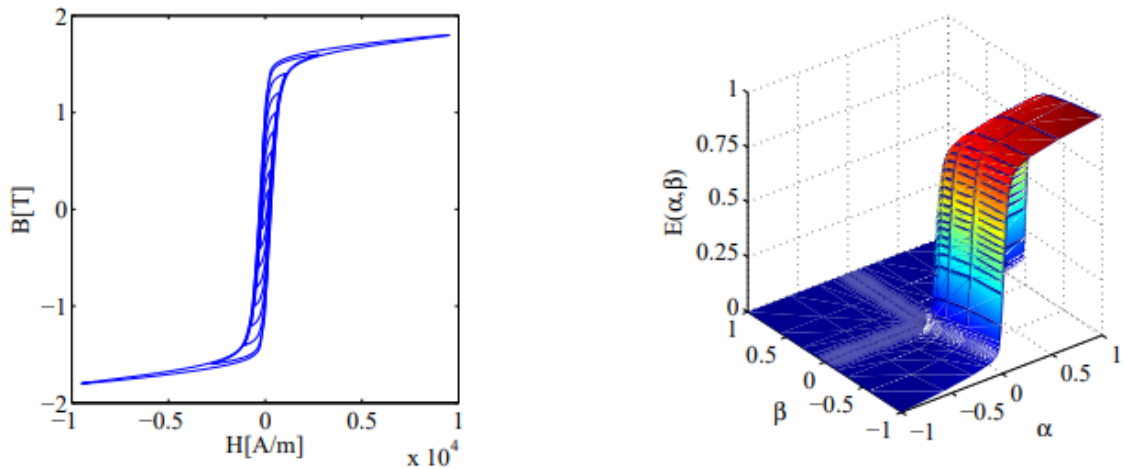
$$E(\alpha, \beta) = \frac{B_\alpha - B_{\alpha, \beta}}{2} \quad (5.18)$$

egyenlet segítségével, ahol B_α és $B_{\alpha, \beta}$ értéke az 5.4. ábrán látható koncentrikus minor görbék segítségével meghatározható.



5.4. ábra. A Everett függvény identifikációja a mért koncentrikus minor görbék alapján. (forrás: [3])

Az 5.5. ábrán a mért koncentrikus minor görbék és a hozzájuk illesztett Everett függvény látható.



5.5. ábra. A mért koncentrikus minor görbék (bal) és a hozzájuk illesztett Everett függvény (jobb). (forrás: [3])

6. fejezet

Mérési eredmények

A mérések során kétfajta eljárással nyomtatott vas kobalt ötvözetből készült mintákat hőkezelés nélküli állapotukban vizsgáltunk. A mintákat Kocsis Bencétől, a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszékétől kaptuk a méréseinkhez. Ebben a fejezetben a vizsgált minták felépítését, a mérési módszert és a mérési eredményeket mutatjuk be.

6.1. Minta felépítése

A nyomtatás L-PBF (lásd 4.1. fejezet) módszerrel történt, egy EOSINT M270 típusú SLM (Selective Laser Melting - Szelektív lézeres olvasztás) gép segítségével, amely a 6.1. ábrán látható. [16].



6.1. ábra. A nyomtatáshoz használt EOSINT M270 típusú SLM gép [24].

Az eszköz egy itterbium szálas lézerrel (ytterbium fiber laser) van felszerelve, amely lézersugarának hullámhossza 1060-1100 nm, átmérője 100 és 500 μm között változhat és névleges teljesítménye 200 W. A gép maximális építési térfogata 250 x 250 x 215 mm, és maximális expozíciós sebessége (építési sebessége) 7000 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$. A minimális létrehozható rétegvastagság 20 μm . A létrehozott réteg struktúrájának irányításához az építési ág hőmérséklete 4 és 350 °C között változtatható. A nyomtatás során használt védőgáz nitrogén volt.

A vizsgált minták két különböző 0° és 90° -os nyomtatási szöggel készültek, és a nyomtatás során nem volt mágnesesen irányítva a domén. Mindkét mintából két-két példány állt rendelkezésre, ezeket a mintákat azonos módon megtekercselve, különböző frekvenciákon vettük fel a mérési görbéket. A mérések során azt vizsgáltuk, hogy az azonos eljárással készült toroidok között milyen eltérések tapasztalhatóak a mért hiszterézis görbe karakterisztikáinak értékei között.

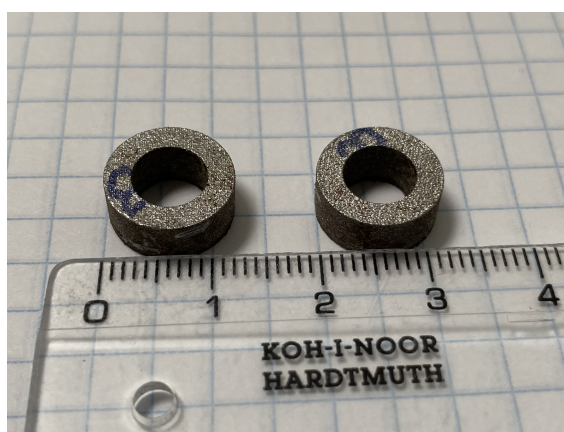
A méréshez használt toroidok geometriai méreteit külön-külön lemértük, a mérések eredményeit a 6.1. táblázatban foglaltuk össze.

6.1. táblázat. A vizsgált FeCo toroid minták geometriai paraméterei.

		a	b	h	l_{eff}	S	N1	N2
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	#	#
FeCo #3 0°	1-es	6,8	11,96	5,2	29,4681	13,4160	31	12
	2-es	6,8	11,96	5,18	29,4681	13,3644	31	12
FeCo #3 90°	1-es	6,82	12,03	2,47	29,6095	6,4344	46	12
	2-es	6,62	12,1	2,47	29,4053	6,7678	45	15

A táblázatban az a paraméter jelöli a minta belső átmérőjét, a b paraméter a külső átmérőjét, h a toroid magassága, l_{eff} az effektív hossz, S a toroid keresztmetszetének felülete, N_1 a primer, N_2 pedig a szekunder tekercselés menetszáma. Az értékekből látható, hogy a 0° -os eljárással készült két toroid mérete között a legnagyobb nyomtatásbeli eltérés a magasságok között mutatható ki, azonban ennek értéke kisebb, mint 0,5 %, ami elhanyagolható. A 90° -os nyomtatási szöggel készített minták között nagyobb a geometriai különbség, mint az előző esetben, a legnagyobb különbség a belső átmérő értékében van, ami 3 %. A 90° -os nyomtatási iránnyal készített minták magassága, és ezáltal keresztmetszete feleakkora mint a 0° -os eljárással készített toroidoké, azonban a mérési eljárás során a mért értékeket a geometriai paraméterekkel normáljuk, ezzel kiküszöbölve a méretbeli különbségek hatását a mért hiszterézis paraméterekre.

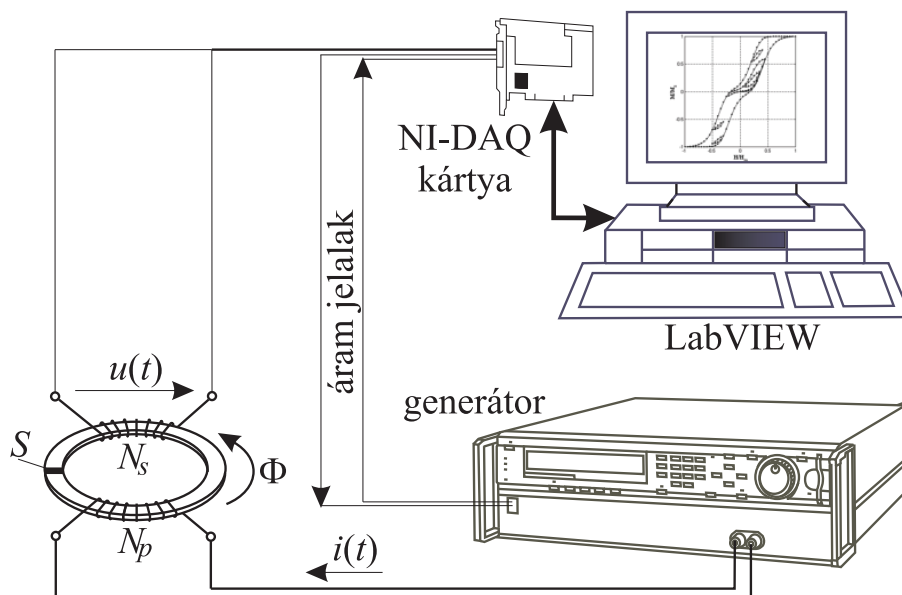
A 6.2. ábrán a két 0° -os nyomtatási szöggel elkészített vas-kobalt toroid minta látható.



6.2. ábra. A méréshez használt, két 0° -os nyomtatási iránnyal készült, FeCo toroid minta.

6.2. Mérési elrendezés

A toroid minták mérésére a 6.3. ábrán látható mérési elrendezést használtuk, amelyen látható, hogy a 3.1. ábrán bemutatott általános mérési elvet követi.



6.3. ábra. A mérési eljárás blokkvázlata. (forrás: [5])

A mintákon egy primer és egy szekunder tekercselést helyeztünk el, ezzel egy transzformátort létrehozva. A primer tekercselést egy áramgenerátor segítségével gerjesztettük, a szekunder oldalon létrejövő feszültséget és a primer áram jelalakot National Instruments adatgyűjtő kártyával (NI-DAQ) mértük. A kártya segítségével határoztuk meg a generátor által létrehozandó áram jelalakját is. A mérési folyamatot LABVIEW szoftver segítségével irányítottuk és a mért adatokat is annak segítségével dolgoztuk fel. A mért áram- és feszültségjelalak alapján a mágneses indukció, a télerősség és a veszteség a 3.1-3.3 egyenletek átalakításával a következő módon határozható meg,

$$H = \frac{N_1}{l_{eff}} i_1(t), \quad (6.1)$$

$$B = \frac{1}{N_2 A} \int_0^t u_2(\tau) d\tau, \quad (6.2)$$

$$p_s = \frac{f N_1}{N_2 m} \int_0^T i_1(t) u_2(t) dt, \quad (6.3)$$

mivel a mérés során a primer áramot nem egy ellenállás feszültsége segítségével, hanem közvetlenül mértük.

Mivel a mért áram és feszültség rendkívül zajos, ami kis gerjesztések mellett nagy hibát és offszetet is okoz, ezért digitális szűrést kell alkalmazni. A mért feszültség és áram jeleket Fourier transzformálni kell és az így kapott spektrum nem kívánatos harmonikusait nullával kell szorozni. Ezt követően a jelet inverz Fourier transzformálva a zajtól mentes áram- és feszültségjelalak visszanyerhető.

6.3. Mérési eredmények

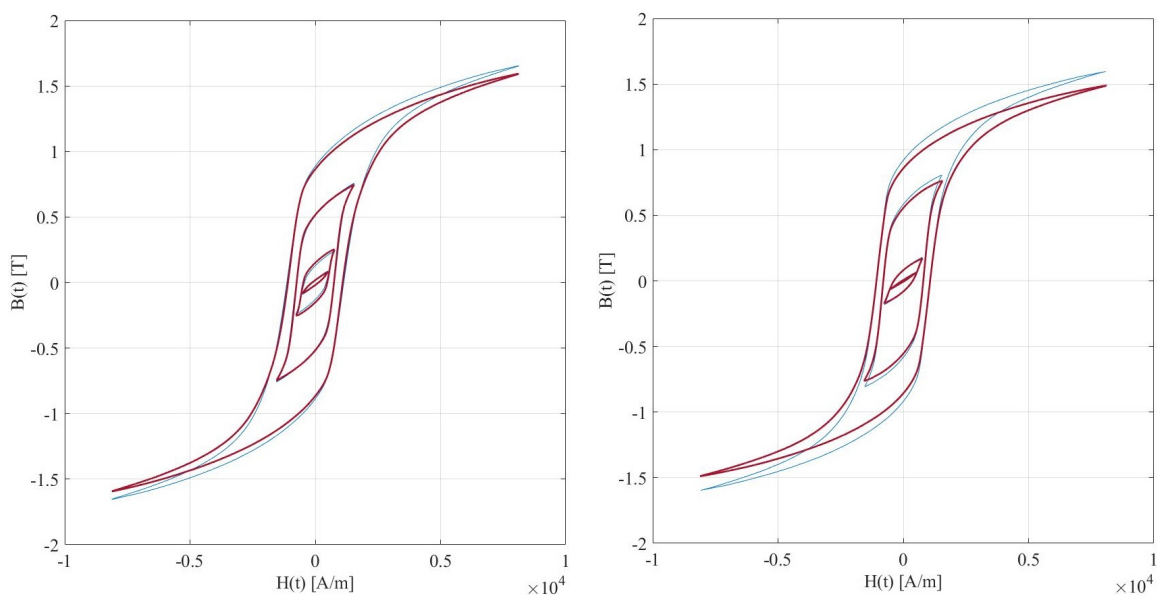
A mérést a szinuszos térerősség amplitúdójának $500 \frac{A}{m}$ -tól $8000 \frac{A}{m}$ -ig történő növelése mellett végeztük, 1,5,10 és 50 Hz-es gerjesztő áram mellett. A beállítani kívánt mágneses térerősség eléréséhez szükséges gerjesztő áram amplitúdója a primer menetszám ismeretében a 6.1 egyenlet átrendezésével meghatározható,

$$\hat{I} = \frac{l_{eff}}{N_1} \hat{H}, \quad (6.4)$$

ahol $\hat{I}$ a gerjesztő áram csúcsértéke, $\hat{H}$ pedig a mágneses térerősség csúcsértéke.

A mért hiszterézis görbék a 6.4 - 6.7-es ábrákon szemléltetjük. Az ábrákon négy hiszterézishurok látható: $500 \frac{A}{m}$, $750 \frac{A}{m}$, $1500 \frac{A}{m}$, $8000 \frac{A}{m}$ amplitúdójú mágneses térerősség mellett. Az egyes számú mintákhoz tartozó értékeket kék vonallal, a kettes számú mintához tartozókat pedig vastag vörös vonallal jelöljük. Az egyes mágneses térerősséghez tartozó görbék maximális indukcióját, koercitív térerősségét, remanens indukcióját és a görbe területként meghatározott veszteséget a 6.2. - 6.9. táblázatokban foglaltuk össze.

A 6.4. ábrán a 0° -os és 90° -os nyomtatási szöggel készült minták hiszterézis karakteristikája hasonlítható össze 1 Hz-es gerjesztés mellett, a görbék paraméterei a 6.2. és 6.3. táblázatokban láthatók.



6.4. ábra. A 0° -os (bal) és a 90° -os (jobb) nyomtatási szöggel rendelkező FeCo minták hiszterézis karakteristikája 1 Hz-es gerjesztés mellett.

Megfigyelhető, hogy mintkét esetben az egyes és kettes számú minta hiszterézis karakteristikája kissé eltér, $8000 \frac{A}{m}$ -es gerjesztésnél 0° -os toroidok esetében az egyes minta maximális indukciója 1,65 T a kettes mintáé pedig 1,59 T, ami 3,6%-os eltérés. A 90° -os minták esetében ez az eltérés majdnem kétszeres 6,7%, emellett megfigyelhető az is, hogy a 90° -os minták maximális indukciója kisebb, mint a 0° -os toroidoké. Az egyes és kettes számú minták közötti eltést okozhatja, hogy az adott toroid minta a munkapult melyik pontján készült, mert a készítés során a lézer nem pontosan ugyanolyan energiával működött a munkapult minden pontjában, ez okozhat anyag- és domén-szerkezetbeli különbségeket, illetve a gyártás során a különböző domének irányítás nélkül, véletlenszerűen

alakulnak ki. Az 1 Hz-es gerjesztés mellett megfigyelt különbségek az egyes és kettes, valamint a 0°-os és 90°-os toroid minták között az 5,10 és 50 Hz-es mérések során is jelen vannak.

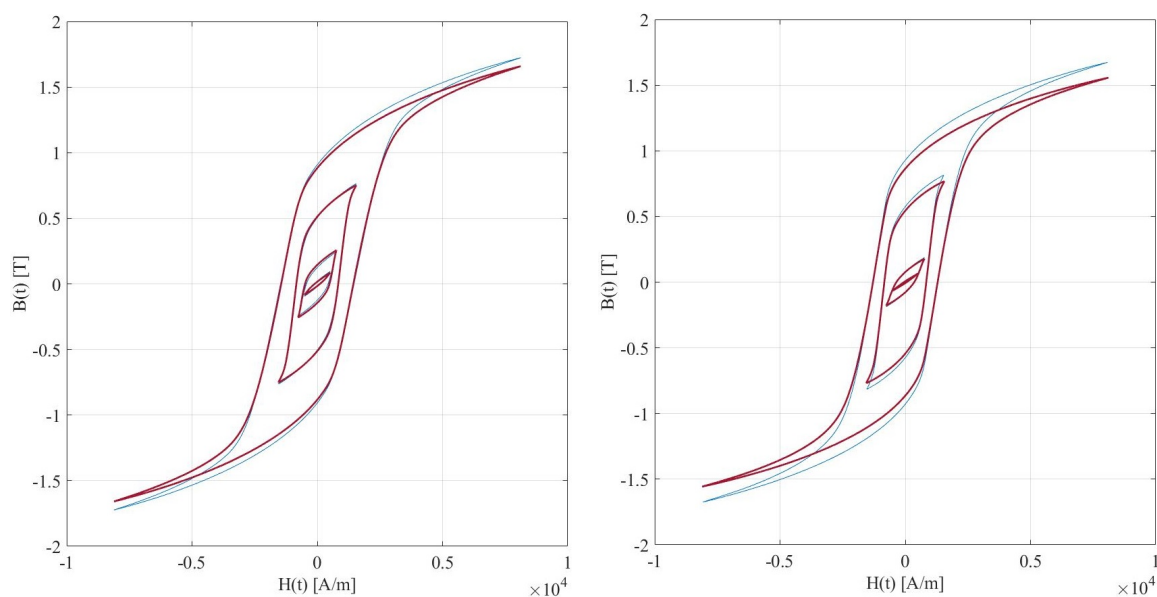
6.2. táblázat. A 0°-os minták hiszterézis görbéjének paraméterei 1 Hz-es gerjesztésnél.

	1-es minta				2-es minta			
H	B_{max}	H_c	B_r	W_h	B_{max}	H_c	B_r	W_h
$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$
500	0,091	128	0,021	30,2	0,081	127	0,019	27,6
750	0,241	431	0,128	273	0,256	479	0,151	328
1500	0,759	761	0,510	1764	0,748	746	0,516	1740
8000	1,654	1137	0,887	5900	1,593	1092	0,865	5682

6.3. táblázat. A 90°-os minták hiszterézis görbéjének paraméterei 1 Hz-es gerjesztésnél.

	1-es minta				2-es minta			
H	B_{max}	H_c	B_r	W_h	B_{max}	H_c	B_r	W_h
$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$
500	0,068	78,7	0,011	13,4	0,060	56,1	0,006	8,07
750	0,181	361	0,081	169	0,173	375	0,08	171
1500	0,805	796	0,583	2051	0,764	798	0,555	1963
8000	1,596	1073	0,919	5635	1,489	1070	0,858	5330

A 6.5. ábrán a 0°-os és 90°-os nyomtatási szöggel készült minták hiszterézis karakterisztikája látható 5 Hz-es gerjesztés mellett, a görbék paramétereit a 6.4. és 6.5. táblázatokban foglaltuk össze.



6.5. ábra. A 0°-os (bal) és a 90°-os (jobb) nyomtatási szöggel rendelkező FeCo minták hiszterézis karakterisztikája 5 Hz-es gerjesztés mellett.

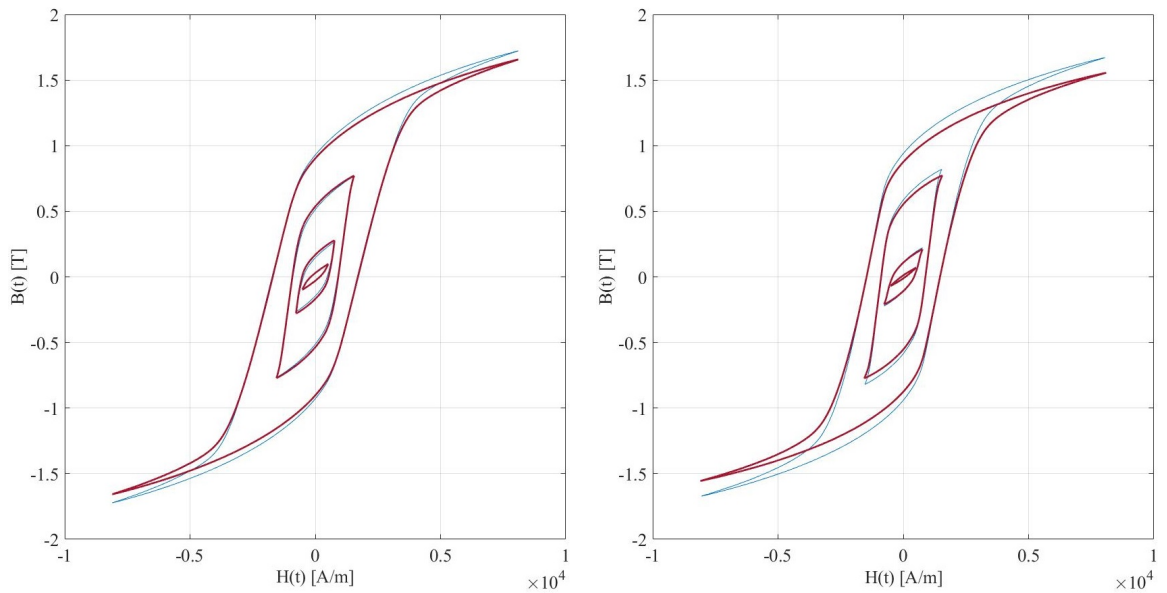
6.4. táblázat. A 0°-os minták hiszterézis görbéjének paraméterei 5 Hz-es gerjesztésnél.

	1-es minta				2-es minta			
H	B_{max}	H_c	B_r	W_h	B_{max}	H_c	B_r	W_h
$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$
500	0,095	125	0,021	29,9	0,084	106	0,016	23,2
750	0,246	431	0,124	270	0,257	488	0,145	328
1500	0,764	829	0,504	1905	0,751	836	0,512	1910
8000	1,723	1468	0,907	7202	1,657	1441	0,883	6909

6.5. táblázat. A 90°-os minták hiszterézis görbéjének paraméterei 5 Hz-es gerjesztésnél.

	1-es minta				2-es minta			
H	B_{max}	H_c	B_r	W_h	B_{max}	H_c	B_r	W_h
$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$
500	0,071	62,5	0,009	11,2	0,065	54,5	0,007	8,953
750	0,187	350	0,08	166	0,178	357	0,08	161
1500	0,815	834	0,575	2121	0,769	837	0,544	2018
8000	1,673	1293	0,928	6484	1,557	1290	0,864	6040

A 0°-os és 90°-os nyomtatási szöggel készült minták 10 Hz-es gerjesztés mellett mért hiszterézis karakterisztikája a 6.6. ábrán figyelhető, a görbék paraméterei a 6.6. és 6.7. táblázatokban láthatók.



6.6. ábra. A 0°-os (bal) és a 90°-os (jobb) nyomtatási szöggel rendelkező FeCo minták hiszterézis karakterisztikája 10 Hz-es gerjesztés mellett.

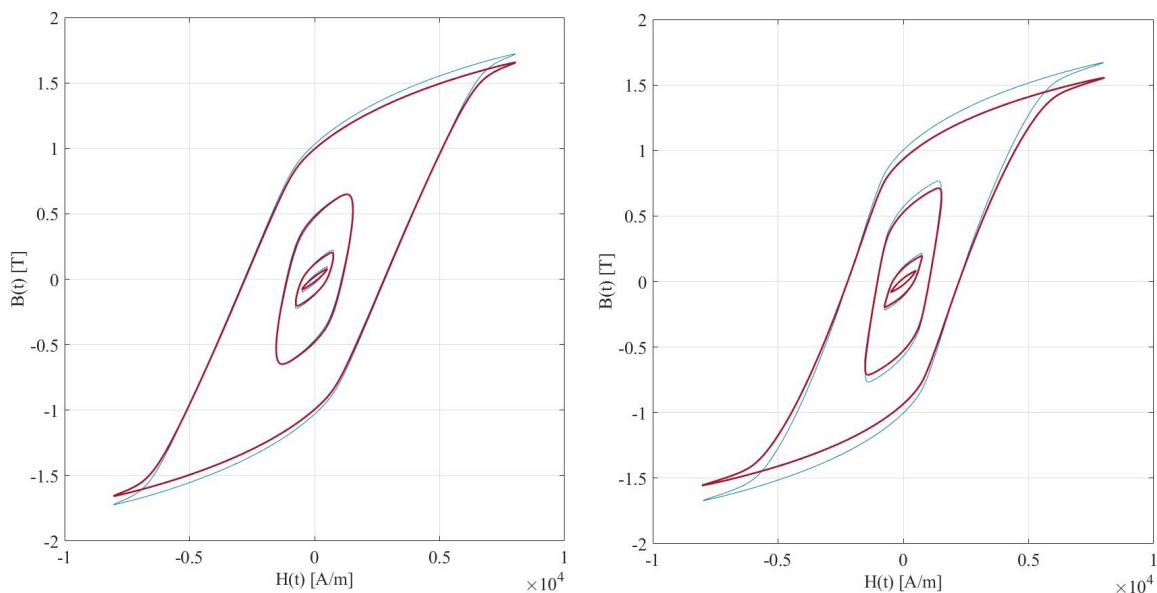
6.6. táblázat. A 0°-os minták hiszterézis görbéjének paraméterei 10 Hz-es gerjesztésnél.

	1-es minta				2-es minta			
H	B_{max}	H_c	B_r	W_h	B_{max}	H_c	B_r	W_h
$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$
500	0,103	164	0,029	44	0,097	181	0,03	45,6
750	0,266	471	0,146	335	0,279	530	0,168	403
1500	0,766	893	0,513	2089	0,771	915	0,536	2186
8000	1,723	1725	0,929	8592	1,657	1699	0,903	8226

6.7. táblázat. A 90°-os minták hiszterézis görbéjének paraméterei 10 Hz-es gerjesztésnél.

	1-es minta				2-es minta			
H	B_{max}	H_c	B_r	W_h	B_{max}	H_c	B_r	W_h
$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$	[T]	$\left[\frac{A}{m}\right]$	[T]	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$
500	0,076	82,9	0,013	16,9	0,068	83,5	0,012	15,6
750	0,222	427	0,113	245	0,210	430	0,109	237
1500	0,819	877	0,585	2277	0,773	882	0,553	2167
8000	1,671	1466	0,940	7390	1,555	1467	0,875	6905

A 6.7. ábrán a 0°-os és 90°-os nyomtatási szöggel készült minták hiszterézis karakterisztikája látható 50 Hz-es gerjesztés mellett, a görbék paraméterei a 6.8. és 6.9. táblázatokban figyelhetők meg.



6.7. ábra. A 0°-os (bal) és a 90°-os (jobb) nyomtatási szöggel rendelkező FeCo minták hiszterézis karakterisztikája 50 Hz-es gerjesztés mellett.

A 6.4. - 6.7. ábrák összehasonlításával megfigyelhető a gerjesztő áram frekvencia növelésének hatása a minták hiszterézis karakterisztikájára. Látható, hogy a hiszterézis görbék a frekvencia növelésével egyre szélesebb, ezáltal a vasvesztés is növekszik, mivel a

vasveszteség a hiszterézis karakterisztika területével egyezik meg, amely a 5.13 egyelet segítségével határozható meg. Például míg a 0° -os egyes számú minta vasvesztesége $8000 \frac{A}{m}$ télerősség mellett 1 Hz-en $5900 \frac{J}{m^3}$, 50 Hz-en már $15704 \frac{J}{m^3}$, ami 266%-os növekedés. Ez a különbség a 90° -os minták esetében valamivel kisebb, 1 Hz-en $5635 \frac{J}{m^3}$, és 50 Hz-en $12160 \frac{J}{m^3}$, ami 215%-os növekedés. A veszteségek frekvencia függésével a 5.2. fejezetben foglalkozunk részletesebben.

A frekvencia növelése a koercitív télerősség értékén is megfigyelhető, míg a 0° -os egyes számú minta koercitív télerőssége $8000 \frac{A}{m}$ télerősség mellett $1137 \frac{A}{m}$, 50 Hz-en $2823 \frac{A}{m}$. A remanens indukció a frekvencia növelésével valamelyest szintén növekszik, a 0° -os egyes számú minta remanens indukciója 1 Hz-es $8000 \frac{A}{m}$ télerősség mellett 0,89 T, 50 Hz-en pedig 1,03 T.

6.8. táblázat. A 0° -os minták hiszterézis görbéjének paraméterei 50 Hz-es gerjesztésnél.

	1-es minta				2-es minta			
H	B_{max}	H_c	B_r	W_h	B_{max}	H_c	B_r	W_h
$\left[\frac{A}{m}\right]$	$[T]$	$\left[\frac{A}{m}\right]$	$[T]$	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$	$[T]$	$\left[\frac{A}{m}\right]$	$[T]$	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$
500	0,098	185	0,032	50,1	0,079	130	0,020	29,5
750	0,224	484	0,123	301	0,204	493	0,115	282
1500	0,647	1071	0,465	2203	0,649	1110	0,480	2298
8000	1,722	2823	1,031	15704	1,657	2789	0,995	14880

6.9. táblázat. A 90° -os minták hiszterézis görbéjének paraméterei 50 Hz-es gerjesztésnél.

	1-es minta				2-es minta			
H	B_{max}	H_c	B_r	W_h	B_{max}	H_c	B_r	W_h
$\left[\frac{A}{m}\right]$	$[T]$	$\left[\frac{A}{m}\right]$	$[T]$	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$	$[T]$	$\left[\frac{A}{m}\right]$	$[T]$	$\left[\frac{J}{m^3}\right]$
500	0,088	143	0,024	33,6	0,082	148	0,024	33,6
750	0,217	437	0,114	259	0,198	425	0,102	228
1500	0,767	1033	0,569	2567	0,713	1032	0,528	2389
8000	1,672	2216	1,004	12160	1,556	2223	0,934	11380

7. fejezet

Konklúzió

A dolgozatban röviden áttekintettem a villamos gép gyártása során alkalmazott lemezelt vasmagos technológiákat, illetve az új, additív gyártástechnológiai folyamatokat. Az összefoglalás célja, a numerikus modellekben használt veszteségszámítási módszerek áttekintése volt, illetve az ehhez kapcsolódó mérési eljárások, módszerek ismertetése.

Az irodalom áttekintés segítségével belátható, hogy az új 3D nyomtatott technológiával létrehozott anyagok vesztesége nagyobb mértékben függ az alkalmazott technológiától, mint a lemezelt vasmagot alkalmazó technológiák esetén.

Az additív technológiákkal létrehozott anyagok esetén alkalmazott anizotrópiáknak nagy szerepe lehet a gazdaságosabb prototípusok létrehozására a jövőben. Ezeknek a technológiáknak a kiaknázására olyan veszteségszámítási módszerekre van szükség amely a pont-értékbeli hiszterézisveszteség értékeket is számolni tudja. Ehhez pontosabb anyagmodellekre, mérésekre van szükség. Ilyen megoldás lehet a Preisach modell alkalmazása, amelynek hátránya a pontosabb mérés. A dolgozatban egy ilyen mérési eljárást mutattam be, illetve a hozzá tartozó számítást két, azonos technológiával készített toroid esetére. A toroidokban a domének szerkezete nem irányítatlanul jött létre, a mágneses telítés értékében szignifikáns eltérést tapasztaltunk. Ennek az eltérésnek a pontosabb magyarázatára egy 20 mintán alapuló mérési eljárást készítünk, amivel a gyártási technológia túrését szeretnénk magyarázni. Ez a mérés, illetve a jelenség magyarázata jelenlegi ismeretünk szerint nem szerepel még a villamos gépes irodalomban. A kutatás távolabbi célkitűzése a Preisach-modell alapú számítások alkalmazhatóságának vizsgálata additív technológiák esetén.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni a mérésre kapott FeCo torrid mintákat Kocsis Bencének a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszék egyetemi tanársegédjének.

Ábrák jegyzéke

2.1.	Példa egy 3d nyomtatott FeCo toroid hiszterézis karakterisztikájára.	5
2.2.	Egy stancolt lemez peremenének mikroszkópikus felvétele. (forrás: [9]) . . .	8
3.1.	A számítógéppel vezérelt mérési folyamat elvi rajza.	9
3.2.	Az Epstein-keret elvi felépítése a bal oldali ábrán látható, a jobb oldali ábrán, pedig egy kép a megvalósított eszközről. (forrás: [1])	10
3.3.	Az egylemezes teszter elvi felépítése (a,c), megvalósítása (b) és az acélpátkók méretei (d). (forrás: [1])	11
3.4.	A toroid mintás mérési módszer során használható toroid magok. a) tekercsel szalag b) lemezből kivágott gyűrűk d) préselt por, kivágott toroid minta, 3D nyomtatott minta. (forrás: [1])	12
3.5.	Két lehetséges elrendezés vasmagminták két dimenziós vizsgálatához. (forrás: [1])	13
3.6.	Egy szemcse orientálás mentes (a) és egy szemcseorientált (b) minta H és B forgóvektorai két dimenziós vizsgálat esetén. (forrás: [1])	13
4.1.	A 3D nyomtatási módszerek működési alapelve.	16
4.2.	Az L-PBF (Laser-Powder Bed Fusion) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [11])	16
4.3.	A BJT (Binder Jetting - Köttöanyag sugaras) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [11])	17
4.4.	A DED (Direct Energy Deposition) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [10])	18
4.5.	A Joule (Joule printing) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [10])	18
4.6.	A FDM (Fuse Deposition Modeling) 3D nyomtatási módszer működési elve. (forrás: [11])	19
4.7.	A vasmagok készítéséhez felhasznált anyagokat összehasonlítása ár és koercitív térerősség (a), valamint szaturációs térerősség és relatív permeabilitás (b) szempontjából. (forrás: [11])	20
4.8.	A 3D nyomtatott és hagyományos laminált vasmagok szaturációs indukciójának összehasonlítása. (forrás: [11])	20
4.9.	A 3D nyomtatott és a hagyományos laminált vasmagok veszteségeinek összehasonlítása 50-60 Hz-en 1 T maximális indukció mellett. (forrás: [11])	21
4.10.	3D nyomtatott Fe-Ti rétegelt toroid a vasveszteségek csökkentése érdekében. (forrás: [16])	23
4.11.	3D nyomtatott FeSi toroidok légréssel ellátva a vasveszteségek csökkentése érdekében. (forrás: [17])	23
4.12.	3D nyomtatott FeSi toroidok légréssel ellátva a vasveszteségek csökkentése érdekében. (forrás: [18])	23
4.13.	3D nyomtatott FeSi transzformátor vasmagok órarugó, Hilbert görbe és radiális görbe keresztmetszettel a vasveszteségek csökkentése érdekében. (forrás: [19])	24

4.14.	A cellákra bontott tervezési tér on/off és sűrűség alapú TO módszer esetén. (forrás: [20])	24
4.15.	On/off TO algoritmus segítségével tervezett állandó mágneses gép forgórésze. (forrás: [20])	25
4.16.	On/off TO algoritmus kiegészítve egy lokális gradiens alapú simítással . (forrás: [20])	25
4.17.	On/off TO algoritmussal tervezett állandó mágneses lineáris aktuátor. (forrás: [20])	26
4.18.	Egy sűrűség alapú TO algoritmussal tervezett állandó mágneses motor forgórésze. (forrás: [20])	26
4.19.	Egy TO algoritmussal tervezett reluktancia motor forgórésze. (forrás: [20])	27
4.20.	Egy TO algoritmussal tervezett állandómágneses motor forgórésze, és megvalósítása 3D nyomtatás segítségével. (forrás: [20])	27
5.1.	A végeelem módszer blokkvázlata. (forrás: [3])	29
5.2.	Egy hiszteron karakterisztikája (bal) és a belőle felépített hiszterézis modell (jobb). (forrás: [3])	32
5.3.	A Preisach háromszög (bal) és a hozzá tartozó hiszterézis karakterisztika (jobb). (forrás: [3])	32
5.4.	A Everett függvény identifikációja a mért koncentrikus minor görbék alapján. (forrás: [3])	33
5.5.	A mért koncentrikus minor görbék (bal) és a hozzájuk illesztett Everett függvény (jobb). (forrás: [3])	33
6.1.	A nyomtatáshoz használt EOSINT M270 típusú SLM gép [24].	34
6.2.	A méréshez használt, két 0°-os nyomtatási iránnyal készült, FeCo toroid minta.	35
6.3.	A mérési eljárás blokkvázlata. (forrás: [5])	36
6.4.	A 0°-os (bal) és a 90°-os (jobb) nyomtatási szöggel rendelkező FeCo minták hiszterézis karakterisztikája 1 Hz-es gerjesztés mellett.	37
6.5.	A 0°-os (bal) és a 90°-os (jobb) nyomtatási szöggel rendelkező FeCo minták hiszterézis karakterisztikája 5 Hz-es gerjesztés mellett.	38
6.6.	A 0°-os (bal) és a 90°-os (jobb) nyomtatási szöggel rendelkező FeCo minták hiszterézis karakterisztikája 10 Hz-es gerjesztés mellett.	39
6.7.	A 0°-os (bal) és a 90°-os (jobb) nyomtatási szöggel rendelkező FeCo minták hiszterézis karakterisztikája 50 Hz-es gerjesztés mellett.	40

Irodalomjegyzék

- [1] G. Bramerdorfer, M. Kitzberger, D. Wöckinger, B. Koprivica, and S. Zurek, „State-of-the-art and future trends in soft magnetic materials characterization with focus on electric machine design – part 1,” *tm - Technisches Messen*, vol. 86, no. 10, pp. 540–552, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/teme-2019-0065>
- [2] T. Orosz, „Evolution and modern approaches of the power transformer cost optimization methods,” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 63, no. 1, p. 37–50, 2019. [Online]. Available: <https://pp.bme.hu/eecs/article/view/13000>
- [3] K. Miklós, „Ferromágneses hiszterézis az elektromágneses térszámításban,” *MTA Doktori értekezés*, 2014. [Online]. Available: http://real-d.mtak.hu/730/7/KuczmannMiklos_doktori_mu.pdf
- [4] T. Kubota, M. Fujikura, and Y. Ushigami, „Recent progress and future trend on grain-oriented silicon steel,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 215–216, pp. 69–73, 2000. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030488530000069X>
- [5] M. Kuczmann and T. Orosz, „Temperature-dependent ferromagnetic loss approximation of an induction machine stator core material based on laboratory test measurements,” *Energies*, vol. 16, no. 3, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1116>
- [6] G. József, H. Ákos, I. Péter, and F. Péter, *Acélok hengerezése*. Miskolci Egyetem, 2013. [Online]. Available: <http://metont.uni-miskolc.hu/wp-content/uploads/2014/03/11-Ac%C3%A9lok-hengerez%C3%A9se.pdf>
- [7] S. V. Ponnaluri, R. Cherukuri, and P. Molian, „Core loss reduction in grain-oriented silicon steels by excimer laser scribing: Part i: experimental work,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 112, no. 2, pp. 199–204, 2001. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013601005738>
- [8] W. M. Arshad, T. Ryckebush, F. Magnussen, H. Lendenmann, J. Soulard, B. Eriksson, and B. Malmros, „Incorporating lamination processing and component manufacturing in electrical machine design tools,” in *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*. IEEE, 2007, pp. 94–102.
- [9] A. Daem, P. Sergeant, L. Dupré, S. Chaudhuri, V. Bliznuk, and L. Kestens, „Magnetic properties of silicon steel after plastic deformation,” *Materials*, vol. 13, no. 19, p. 4361, 2020.
- [10] A. Selema, M. N. Ibrahim, and P. Sergeant, „Metal additive manufacturing for electrical machines: Technology review and latest advancements,” *Energies*, vol. 15, no. 3, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/1076>

- [11] H. Tiismus, A. Kallaste, T. Vaimann, and A. Rassõlkin, „State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines,” *Additive Manufacturing*, vol. 55, p. 102778, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422001828>
- [12] B. I. Anna Aimar, Augusto Palermo, „The role of 3d printing in medical applications: A state of the art,” *Journal of Healthcare Engineering*, 2019. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/jhe/2019/5340616/>
- [13] L. Fiorenza, R. Yong, S. Ranjitkar, T. Hughes, M. Quayle, P. G. McMenamin, J. Kaidonis, G. C. Townsend, and J. W. Adams, „The use of 3d printing in dental anthropology collections,” *American journal of physical anthropology*, vol. 167, no. 2, pp. 400–406, 2018.
- [14] D.-G. Ahn, „Directed energy deposition (ded) process: state of the art,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 8, pp. 703–742, 2021.
- [15] S. Lammers, G. Adam, H. J. Schmid, R. Mrozek, R. Oberacker, M. J. Hoffmann, F. Quattrone, and B. Ponick, „Additive manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine,” *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, pp. 41–45, 2016.
- [16] B. Kocsis, I. Hatos, and L. K. Varga, „3d printed metal-insulator layered structure,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 563, p. 169994, 2022.
- [17] H. Tiismus, A. Kallaste, A. Belahcen, M. Tarraste, T. Vaimann, A. Rassõlkin, B. Asad, and P. Shams Ghahfarokhi, „Ac magnetic loss reduction of slm processed fe-si for additive manufacturing of electrical machines,” *Energies*, vol. 14, no. 5, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1241>
- [18] G. Stornelli, A. Faba, A. Di Schino, P. Folgarait, M. R. Ridolfi, E. Cardelli, and R. Montanari, „Properties of additively manufactured electric steel powder cores with increased si content,” *Materials*, vol. 14, no. 6, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/6/1489>
- [19] A. Plotkowski, K. Carver, F. List, J. Pries, Z. Li, A. M. Rossy, and D. Leonard, „Design and performance of an additively manufactured high-si transformer core,” *Materials & Design*, vol. 194, p. 108894, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520304287>
- [20] T. Pham, P. Kwon, and S. Foster, „Additive manufacturing and topology optimization of magnetic materials for electrical machines—a review,” *Energies*, vol. 14, no. 2, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/2/283>
- [21] H. Jordan, „Die ferromagnetischen konstanten für schwache wechselfelder,” *Elektr. Nach. Techn.*, vol. 1, no. 8, 1924.
- [22] R. Severns, „Hf-core losses for nonsinusoidal waveforms,” in *Proc. HFPC*, vol. 91, 1991, pp. 140–148.
- [23] J. Reinert, A. Brockmeyer, and R. W. De Doncker, „Calculation of losses in ferro-and ferrimagnetic materials based on the modified steinmetz equation,” *IEEE Transactions on Industry applications*, vol. 37, no. 4, pp. 1055–1061, 2001.
- [24] <https://www.3dprinterost.com/printers/eos-eosint-m-270-3d-printer-software> [Accessed: 2023.04.11].