

INDUKTÍV KÖZELÍTÉSKAPCSOLÓ ELSŐDLEGES ÉRZÉKELŐ ELEMÉNEK SZIMULÁCIÓJA ÉS MÉRÉSE, JAVÍTÁSI LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA

Készítette:

PRUKNER PÉTER

Villamosmérnöki (B.Sc.) szakos hallgató

Konzulensek:

DR. HABIL. KUCZMANN MIKLÓS, PH.D.

tanszékvezető, egyetemi tanár

PÓLIK ZOLTÁN

Ph.D. hallgató

Automatizálási Tanszék

Elektromágneses Terek Laboratórium

Széchenyi István Egyetem

Győr

2013

Tartalomjegyzék.

1. Bevezetés.....	3
2. Az induktív közelítéskapcsoló.....	5
3. A végeelem-módszer és a Maxwell-egyenletek.....	9
3.1 A végeelem-módszer.....	9
3.2 A Maxwell-egyenletek.....	11
3.3 A Maxwell-egyenletek osztályozása.....	12
3.2.1 A mértékkel ellátott $\mathbf{A}$ -formalizmus.....	14
3.2.1 A mértékkel ellátott $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus.....	15
4. FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS.....	17
4.1 Induktív közelítéskapcsoló szimulációja FEMM környezetben.....	17
4.2 Lua Szkript alkalmazása FEMM környezetben.....	20
5. A feladat ismertetése.....	22
6. A méréshez használt eszközök.....	25
6.1 Agilent 4285a LCR mérő.....	25
6.2 CTS klímakamra és mérőtárcsa.....	28
6.3 BMT.....	29
7. Validációs vizsgálat.....	31
8. A különböző geometriájú vasmagok mérése és szimulációja.....	34
8.1 A méréshez tartozó szimuláció.....	34
8.2 Mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása.....	36
8.3 A különböző minták összehasonlítása.....	40
9. A kimerítő kereséses szimuláció.....	45
10. Konklúzió, jövőbeli tervek.....	48
11. Irodalom jegyzék.....	49
12. Melléklet.....	51

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre fontosabb szerepet játszik egy termék vagy eszköz tervezésében a szimuláció. Az számítástechnika és a számítási módszerek rohamos fejlődésének köszönhetően egyre pontosabb szimulációk készíthetők a tervezési fázisban, ami idő és költséghatékonyság szempontjából elengedhetetlen, hiszen így a gyártás előtt meghatározható a termék optimális felépítése. A szimuláció alapú termékfejlesztés sokkal gyorsabb és költséghatékonyabb a prototípusépítés és tesztelés alapú fejlesztésnél, mivel nem szükséges drága alapanyagból költséges munkafolyamatok árán elkészített mintákat legyártani, majd azok mérését, kiértékelését elvégezni. Ennek eredményeként a fejlesztési fázis sokkal későbbi időszakában sokkal kevesebb számú prototípus készül, amelyeken a paraméterek finomhangolását, illetve a sorozatgyártás előtt szükséges méréseket elvégzik. Így, a szimuláció alapú fejlesztés segítségével sok időt és pénzt takarítanak meg a gyártók. Ezt a gyártási metódust az ipar minden területén használják, például az automatizált rendszerek alkatrészeinek tervezésénél is.

A mai automatizálás és gyártástechnológia egyik legfontosabb kellékei a szenzorok. Minden automatizált rendszerben található valamilyen érzékelő, ezért nagyon fontos jó minőségű szenzorok tervezése és gyártása. A fejlesztési fázisban sok fontos szempontot kell figyelembe venni, ami a különböző típusú szenzoroknál más és más lehet. Ezért a szimulációs módszerek alkalmazása a szenzorok elemeinek tervezésben nagy segítséget nyújt a gyártóknak. A Balluff a világ egyik vezető szenzorgyártója, több mint 40 éve foglalkozik szenzorok gyártásával, fejlesztésével és értékesítésével. Gyártásban és értékesítésben minden földrészben képviselteti magát, a fejlesztési munkák főként Európa országaiban folynak. A cég központja Stuttgart mellett Neuhausen auf den Fildernben található, ahol a cég a legnagyobb fejlesztőgárdájával rendelkezik. A legnagyobb gyártókapacitást azonban a magyarországi üzem képviseli, amely Veszprémben található. Itt induktív-, kapacitív-, illetve optikai szenzorok, valamint útmérő, azonosító és hálózati eszközök gyártása folyik. A fejlesztőbázis szintén említésre méltó, közel 60 fejlesztőmérnökkel rendelkezik a veszprémi üzem.

Jelenleg a Széchenyi István Egyetem Elektromágneses Terek Laboratóriumában dolgozom és a Balluff Elektronika Kft.-nél vagyok gyakornok, ahol különböző, elsősorban induktív elven működő szenzorok vizsgálatával foglalkozom. Ezen belül is távolságmérők és közelítéskapcsolók elsődleges érzékelő elemének optimalizálása illetve vizsgálata a fő feladatom szimulációval és méréssel.

Korábbi TDK és OTDK munkáim során egy induktív közelítéskapcsoló mágneses terét vizsgáltam végeelem-módszer használatával a fő érzékelőelem paramétereinek megváltoztatásával. Ez azt jelenti, hogy a szenzorban található nyitott vasmag geometriai méreteit változtattam és szimuláció segítségével meghatároztam a mágneses térerősséget az érzékelési irányban, majd a különböző változtatások után összehasonlítottam a számított eredményeket. A munkám célja az volt, hogy olyan következtetésekre jussak, amelyek segítségével növelhető a szenzorok kapcsolási távolsága és javítható a beépíthetősége. Ezen munkáim és a Balluff egyéb vizsgálatai alapján legyártásra került öt különböző vasmag. Ezekből öt minta szenzor került megépítésre, melynek vizsgálatát végeztem a kötelező szakmai gyakorlatom során méréssel és végeelemes szimulációval FEMM környezetben. Továbbá elvégeztem a szimulációs modell validációját, illetve elkészítettem egy vezérlő skriptet a szimulációhoz, ami beavatkozás nélkül elvégzi a méréshez tartozó szimulációs folyamatot.

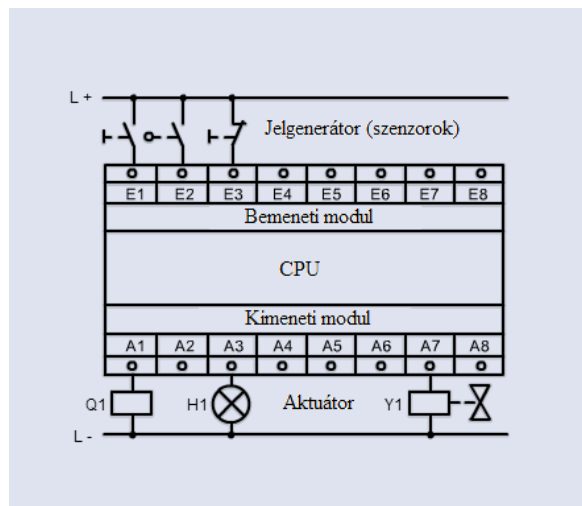
Dolgozatomban bemutatom az induktív közelítéskapcsoló fő tulajdonságait, felépítését, a végeelem szimuláció elméleti hátterét, a számításhoz szükséges potenciálformalizmusokat, és azok gyenge alakját a Maxwell-egyenletektől kiindulva. Ismertetem a FEMM legfontosabb tulajdonságait, demonstrálom a feladatomhoz szükséges szimulációs modell felépítését és legfontosabb beállításait, illetve a FEMM-be implementált Lua parancssor működését és szkriptelés lehetőségét. Bemutatom a szimulációs során használt szkripteket, a mérés során használt mérőrendszert és a mérés validációját. Ismertetem a mérés során meghatározott eredményeket és összehasonlítom a szimulációs eredményekkel. Összehasonlítom az öt különböző minta érzékenységet a jósági tényezőjük alapján. Végül pedig ismertetem egy a kapcsolási távolság szempontjából optimálisnak tartott geometria meghatározásához szükséges scriptet.

Dolgozatomban a ferrit magok geometriáját nem ismertetem a Balluff Elektronika Kft. kérésére, mert azok ipari titoknak minősülnek.

2. AZ INDUKTÍV KÖZELÍTÉSKAPCSOLÓ

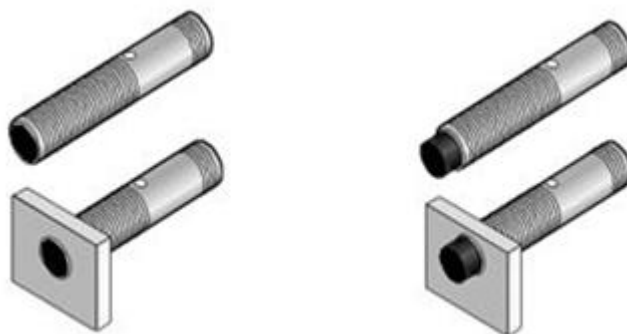
A szenzor olyan eszköz, amely egy mérendő fizikai jelenségnek megfelelő elektromos vagy digitális jelet állít elő. A mérendő tulajdonság és a jel lehet fizikai, kémiai, biológiai jellegű [1, 2]. A jel a fizikai mennyiség olyan értéke vagy értékváltozása, amely egy egyértelműen hozzárendelt információt hordoz, tehát információtartalommal bír [3]. Fontos, hogy a szenzor csak a mérendő tulajdonság változását érzékelje, minden más változásra érzéketlen legyen. Mindezek mellett az érzékelőnek nem szabad befolyásolni a mérendő jelenséget. Léteznek mechanikus szenzorok melyek működésük során mechanikai kapcsolatba kerülnek a mérendő tulajdonsággal, például mechanikus kapcsoló esetén az kapcsolatba kerül végállást jelző fizikai akadállyal, fallal, eszközzel. Ezekben az esetekben alkalmazástechnikailag meg kell oldani, hogy a kialakuló kölcsönhatás ne befolyásolja a mérendő jelenséget. Léteznek érintés nélküli érzékelők, melyeket például a működési elv szerint csoportosíthatunk. Ilyenek például az induktív-, kapacitív-, optikai-, mágneses-, ultrahangos- és pneumatikus szenzorok.

Az induktív közelítéskapcsoló nagyon fontos eszköz az ipari automatizálásban [1, 2, 4, 5, 6, 7]. Felhasználási területe széleskörű, általában automata gyártósorokban, összeszerelő gépekben, robotokban, a logisztika eszközeiben használják őket. Nagyon időtálló termék, mivel kontaktusmentesen képes érzékelni a fémtárgyakat, ezért nem kell tartani a mechanikai behatásoktól, szennyeződésektől. Léteznek a külső rádiófrekvenciás zavaroktól védett, minden fémre azonosan reagáló induktív közelítéskapcsolók, illetve analóg távolságmérők is. Az induktív szenzorok általában hőmérsékletkompenzáltak, azaz egy bizonyos hőmérséklettartományon belül (pl.: -40 és +85 Celsius között) invariánsak a hőmérséklet változására. Kialakításuk miatt könnyen beépíthetők bármilyen rendszerbe, csatlakoztathatók elektronikus áramkörökhöz, relékhez, mágnes kapcsolókhoz, vagy akár PLC bemenetére is. Ez a példa az 1. ábrán látható.



1.ábra: Induktív közelítéskapcsoló csatlakoztatása PLC bemenetére [5]

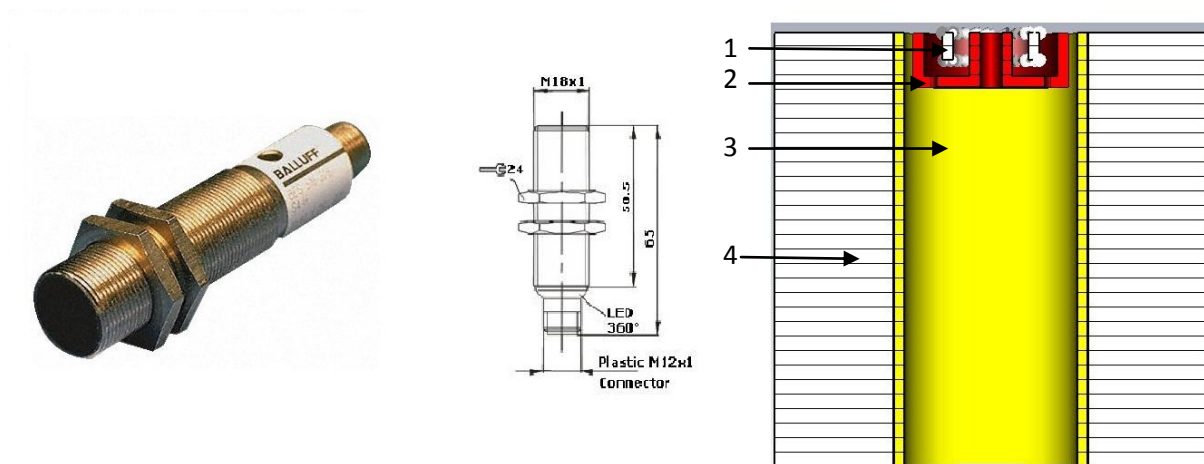
Az induktív közelítéskapcsolóknak számos kivitele létezik, például egyenárammal és váltakozóárammal táplált. Mindkét fajta kapható különböző méretekben illetve különböző vezetékvezéssel, továbbá vannak speciális szenzorok, amik extra védelemmel vannak ellátva. Az induktív közelítéskapcsolók legfontosabb paraméterei a kapcsolási távolság, kapcsolási frekvencia, kapcsolási hiszterézis [1, 2]. A kapcsolási távolság, az a távolság, melynél a szenzor aktív felületéhez közelítő fémtárgy változást idéz elő a gerjesztő jel paramétereiben. A kapcsolási frekvencia a maximális másodpercenkénti impulzusszámot jelenti. A kapcsolási hiszterézis alatt a bekapcsolási és kikapcsolási pont közötti távolság különbséget értjük, mely a mérőlapnak a közelítéskapcsolóhoz történő közelítése- és távolítása között jön létre. Beépíthetőség szempontjából megkülönböztetünk beépíthető és nem beépíthető szenzort, valamint ezek között átmenetet képez a részlegesen beépíthető szenzor, amely csak kissé emelkedik ki a környezetéből. A beépíthető és nem beépíthető szenzor felépítése a 2. ábrán látható.



2. ábra: Beépíthető és nem beépíthető induktív közelítéskapcsolók [5]

A kettő között a legfontosabb különbség, hogy a beépíthető szenzor aktív felületéig, ahogy a 2. ábrán látható, fém veheti körül anélkül, hogy az a megengedett $\pm 10\%$ -nál nagyobb mértékben befolyásolná az érzékelő működését. A nem beépíthető szenzor érzékelő elemét nem veheti körbe fém, de ezek a termékek általában nagyobb a kapcsolási távolsággal rendelkeznek.

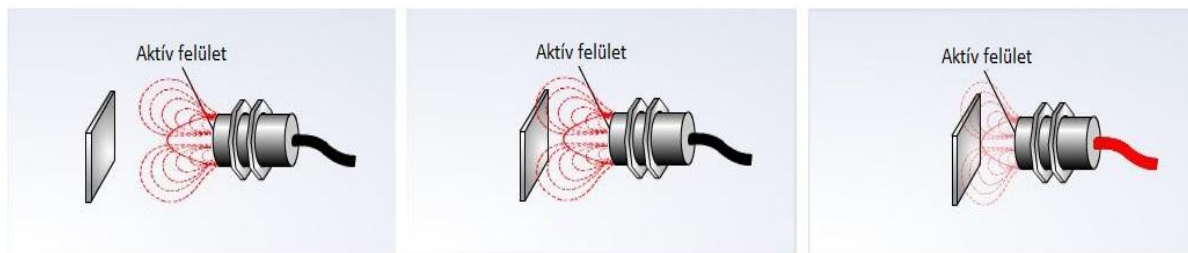
Az 3. ábrán látható a Balluff Elektronika Kft. által gyártott M18 típusú szenzor képe, a szenzor burkolatának paraméterei és egy CAD rajz a félbevágott szenzorról oldalnézetből, melyen jól látható a belső felépítés.



1: Tekercs, 2: Vasmag, 3: Sárgaréz ház, 4: Szerkezeti acélkörnyezet

3. ábra: Az induktív közelítéskapcsoló [5]

Az általam vizsgált kompakt szenzor elsődleges érzékelő eleme egy előre irányban nyitott vasmagos tekercs, mögötte helyezkedik el a gerjesztést, mérést, kiértékelést, a szenzor egyéb funkcióit ellátó és kapcsoló kimenetet előállító elektronikai áramkör, amely egy sárgaréz házban van elhelyezve. A működés során a nyitott vasmagos tekercset szinuszos jellegű árammal gerjesztjük, amely hatására változó mágneses tér jön létre, amely a vasmag nyitott felületén kilép a szenzor előtti térbe és azon keresztül záródik [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Ha ebbe a mágneses térbe bármilyen fémtestet, vagy vezető anyagból készült tárgyat helyezünk, akkor a céltárgyban örvényáram jön létre. Az örvényáram mágneses teret gerjeszt, amely a gerjesztő mágneses teret megváltoztatja és a tekercsen átfolyó gerjesztő szinuszos áram amplitúdójának és fázisának megváltozását eredményezi. Ezt a változást a szenzorban található elektronikai áramkör megméri, kiértékeli és a mért adatoknak megfelelően a kimenetet a kívánt állapotba állítja. A kapcsolás menete a 4. ábrán látható.



4. ábra: A kapcsolási folyamat [5]

A bal oldali ábrán a fém próbatest távoli zónában van. Ekkor nincs hatással a fém a szenzorra, ezért az nem változtat a kimenetén. A középső ábrán már hat a fém a szenzorra, de még nem lépte át a küszöbértéket, így még nem kapcsol. A jobb oldali képen a küszöb érték alatt az amplitúdó, kapcsolt állapotban van a szenzor.

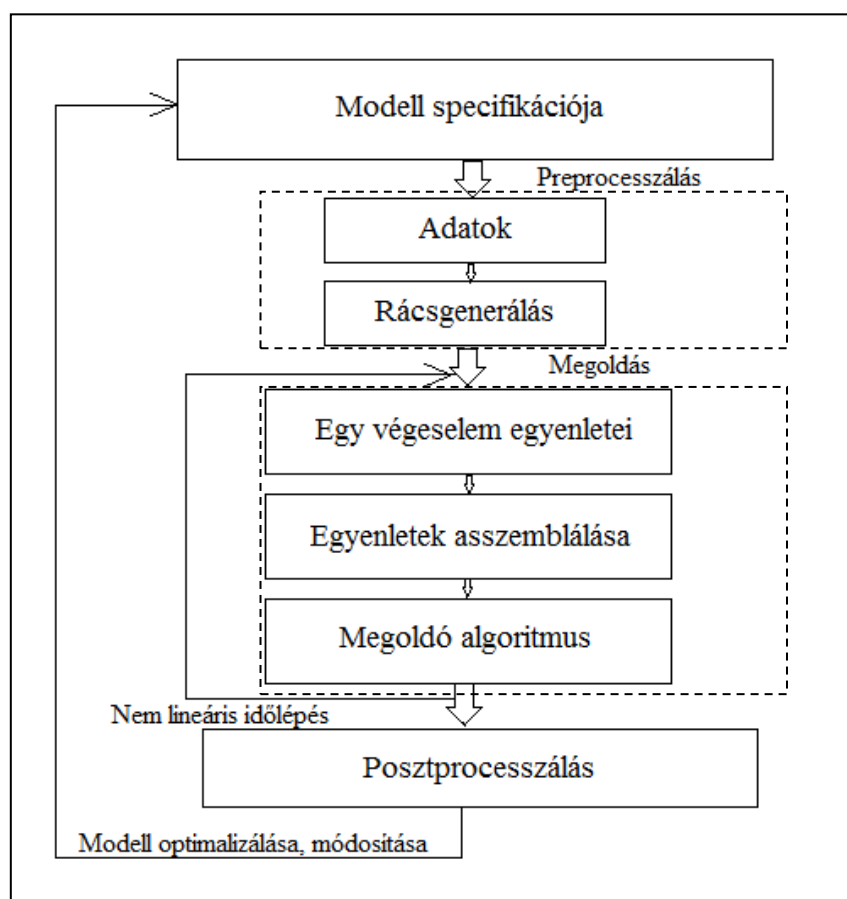
Munkám során egy induktív közelítéskapcsoló kapcsolási távolságának és beépíthetőségének javítási lehetőségeit vizsgáltam. Ahhoz, hogy a számítások elvégezhetőek legyenek, szükségünk van egy olyan módszerre, amellyel a Maxwell-egyenletek megoldhatók. A végeselem-módszer napjaink legelterjedtebb és leghatékonyabb módszere erre a feladatra.

3. A VÉGESELEM-MÓDSZER ÉS A MAXWELL-EGYENLETEK.

3.1 A végeelem-módszer

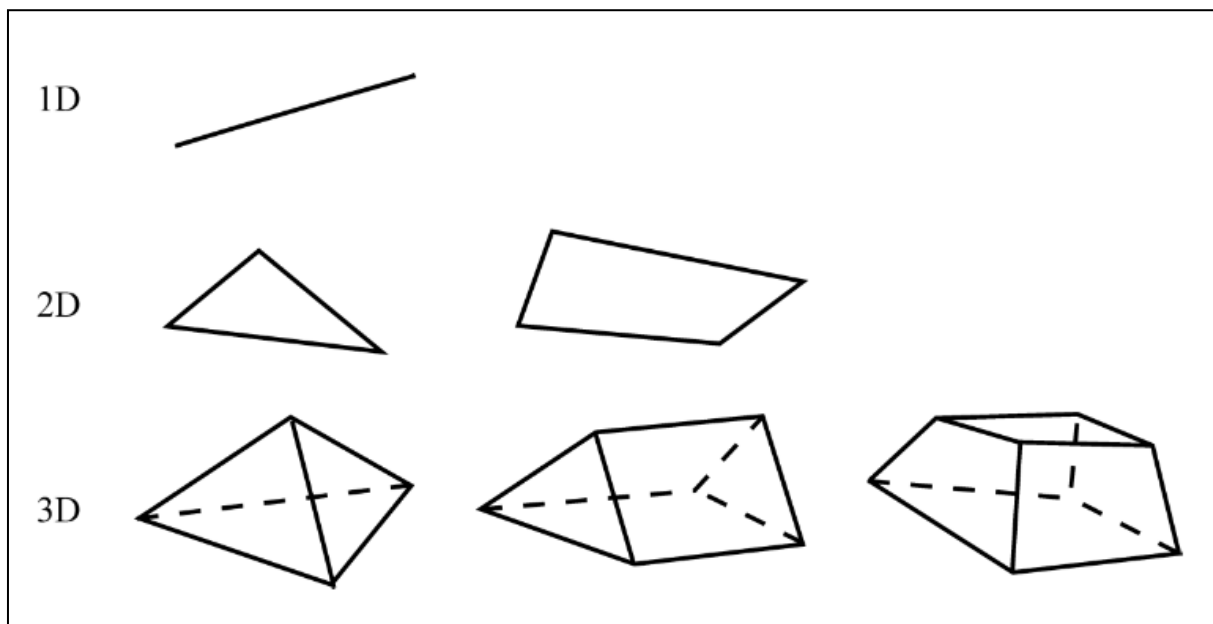
A végeelem-módszer (FEM - Finite Element Method) [10, 11, 12, 13] az egyik legelterjedtebb és legrugalmasabban kezelhető numerikus technika parciális differenciálegyenletek megoldására. A FEM egy olyan közelítő matematikai eljárás, mellyel nagyon jó hatékonysággal megoldhatunk olyan bonyolult feladatokat, amelyekre nem létezik analitikus megoldás. A módszer lényege, hogy egy tetszőleges geometriájú tartományt véges számú elemre bontunk fel, majd a vizsgált probléma fizikai viselkedését leíró parciális differenciálegyenletek kiszámításával határozzuk meg a probléma megoldását, amiből egyéb kérdéses adatok is kiszámíthatóak.

Egy végeelemes szimuláció az 5. ábrán látható lépésekből áll. A modell specifikációja során meg kell határoznunk az általunk vizsgált probléma geometriai paramétereit. Egy modern végeelemes szoftver használata során ez egy CAD (Computer Aided Design) környezetben történik.



5. ábra: A végeelemes szimuláció lépései [11]

Következő lépés a megoldó algoritmushoz differenciálegyenletek és peremfeltételek meghatározása. Az egyenletek a vizsgált jelenséget leíró fizikai törvényekből vezethetők le. Ezek után következik a preprocessálás, amikor különböző paramétereket adhatunk meg, például az anyagi jellemzőket, gerjesztést stb. Lehetőségünk van továbbá szimmetriatengelyek definiálására a geometria egyszerűsítése érdekében, aminek eredményeképpen csökkenthető a modell rácselemeinek száma, így növelhető a megoldás sebessége. Következő lépésben hozzuk létre a végeselemes rácsot, mely során a geometriát kis részekre, elemekre bontjuk fel, tehát diszkrétizáljuk. Ha a vizsgált probléma geometriája egydimenziós, akkor a rács szakaszokból álló vonalakat tartalmaz, ha kétdimenziós, akkor háromszög vagy négyszög lehet, háromdimenziós probléma esetén pedig tetraéder vagy hexaéder alakú elemekre bonthatjuk fel a geometriát. Egy háromszögelemnek három csomópontja és három éle, míg egy négyszögelemnek négy csomópontja és négy éle van, ahogy az 6. ábrán is látható.



6. ábra: Végeselemek lehetséges alakjai [14]

Háromdimenziós elemek esetében a tetraédernek négy csomópontja és hat éle, a hexaédernek pedig nyolc csomópontja és tizenkét éle van. A végeselem-módszer megvalósításától függően lehetőségünk van az ismeretlen potenciálokat az elemek csomópontjaiban illetve élein keresni. A végeselem háló készítésénél figyelembe kell venni, hogy a teljes tartományt le kell fedni, nem lehet lyuk a rácselemek között és nem lehet átfedés sem [1,3,7,8].

A következő lépés a probléma megoldása. Ennek alapjául a vizsgált fizikai jelenségeket jellemző potenciálformalizmusok gyenge alakja szükséges, amik a Maxwell-

egyenletekből vezethetők le matematikai átalakításokon keresztül. Ezt követi az asszemblálás, mely során az elemenkénti egyenleteket a végeselemes rácson keresztül összegezzük. Ennek eredményeként létrejön a teljes egyenletrendszer, aminek a megoldásával meghatározatók az ismeretlen potenciálok közelítő függvények együtthatói. Amennyiben a megoldandó egyenletrendszer nemlineáris, iterációt is kell alkalmazni a megoldás során. Az egyenletrendszer létrehozása után az egyenlet megoldása következik, amelyet több, az irodalomból ismert algoritmussal is elvégezhetünk [10, 11, 12, 13]. Az egyenletek megoldását az előre definiált megoldó algoritmus elemenként végzi el, majd ezek szuperpozíciójaként előállnak a keresett potenciálok közelítő értékei.

A számítás elvégzése után következik az utófeldolgozás vagy más néven posztprocesszálas, mely során vizualizálhatjuk a kapott eredményeket, kiszámíthatjuk a szükséges fizikai mennyiségeket, illetve az elektromágneses térjellemzőket. A posztprocesszálas során lehetőségünk van változtatni a geometrián, az anyagjellemzőkön vagy finomíthatunk a rácson a pontosabb eredmény elérése érdekében [10, 11, 12, 13].

3.2 A Maxwell-egyenletek

A Maxwell-egyenletek az elektrodinamika alapegyenletei [8, 9, 10]. Olyan parciális differenciálegyenlet-rendszert alkotnak, amelynek segítségével minden elektromágneses jelenség leírható. Kétféle formában adható meg, melyek közül az integrális alak az ismertebb:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_A \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{A}, \quad (1.1)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}, \quad (1.2)$$

$$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0, \quad (1.3)$$

$$\oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \rho dV. \quad (1.4)$$

A másik forma a differenciális alak:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho. \quad (1.8)$$

Az első Maxwell-egyenletet (1.1), (1.5) Ampere-törvénynek is szokás nevezni, mely szerint a $\mathbf{J}$ áramsűrűség és a $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ eltolási áram $\mathbf{H}$ mágneses térerősséget hoz létre. A törvény kimondja, hogy a mágneses térerősség vektorok zárt l görbén számított vonalmenti integrálja egyenlő az l görbe által határolt A felületet átdöfő áramsűrűségek felületi integráljával [9, 10, 11].

A második egyenletet Faraday-törvénynek nevezzük (1.2), (1.6), amely leírja, hogy az időben változó mágneses tér, elektromos teret hoz létre. Az integrális alak megmutatja, hogy az elektromos térerősség vektorok l zárt görbén számolt vonalmenti integrálja egyenlő az l görbe által határolt A felületen vett mágneses indukció időbeli változásának felületi integráljával.

A harmadik (1.3), (1.7) Maxwell-egyenletet mágneses Gauss-törvénynek is nevezik. Ez kimondja, hogy a mágneses fluxusvonalak önmagukban záródnak, tehát a mágneses tér forrásmentes.

A negyedik egyenlet más néven az elektrosztatika Gauss-törvénye kimondja, hogy az elektromos tér forrása a töltés. Az integrális alak azt fejezi ki, hogy az elektromos fluxussűrűség A zárt felületen vett integrálja egyenlő a töltéssűrűség V térben vett térfogati integráljával.

Ötödik Maxwell-egyenletnek szokták nevezni a konstitúciós relációkat. Ezek tulajdonképpen az anyagok jellemzőit határozzák meg például a következő formában.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (1.9)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}, \quad (1.10)$$

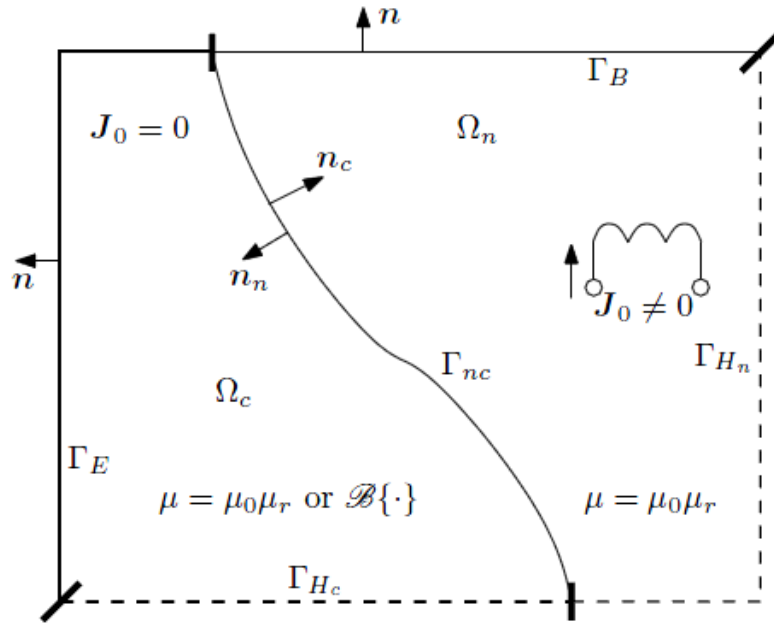
$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_k). \quad (1.11)$$

Az $\mathbf{E}_k$ külső elektromos mező, μ_0 a vákuum permeabilitása, ε_0 a vákuum permittivitása, ε_r az anyag relatív permittivitása és a σ az anyag elektromos vezetése.

3.3 Maxwell-egyenletek osztályozása

Az elektrodinamikát a Maxwell-egyenletek alapján több fejezetre oszthatjuk fel. Ezek az elektrosztatika és magnetosztatika, a stacionárius áramok tana, a majdnem stacionárius vagy kvázistacionárius áramok tana vagy más néven örvényáramú tér és a hullámterjedés [8, 9, 10]. Az induktív közelítéskapcsoló szimulációjához szükséges számításokhoz az örvény áramú tér és a stacionárius áramok tana témakörök csatolására van szükség, mivel az egyik

tartományban ahol közönséges vezető található létre jön örvényáram a másik pedig a levegővel kitöltött örvényáramtól mentes. A 7. ábrán egy örvényáramú feladat elrendezése látható. Az Ω_n az örvényáramtól mentes teret jelenti, vagyis a levegőt, az Ω_c pedig a vezető anyagot jelenti.



7. ábra: Örvényáramú feladat elrendezése [10]

Örvényáramú térnél figyelembe kell vennünk az időbeni változást, mert a mágneses és elektromos jelenségek kapcsolatban vannak, tehát $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$ [10, 11, 15, 16, 17, 18]. Az időben változó mágneses tér elektromos teret hoz létre, de az eltolási áramot figyelmen kívül hagyhatjuk $|J| \gg \left| \frac{\partial D}{\partial t} \right|$. A Maxwell-egyenleteket örvényáramú tér esetén a következőképpen írhatjuk fel:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.14)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \text{ lineáris mágneses anyagban, } \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.15)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \Omega_c \text{ tartományban.} \quad (1.16)$$

Örvényáramú tér esetén már időfüggő a forrás áramsűrűség $J_0 = J_0(r, t)$, ami időtől függő mágneses térerősséget és időtől függő mágneses indukciót hoz létre, ami (1.13)

egyenlet szerint elektromos teret hoz létre. Ez okozza az örvényáram áramlását. Ha az (1.12) egyenletnek vesszük a divergenciáját akkor a következő összefüggést kapjuk:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (1.17)$$

Ez azt jelenti, hogy a létrejövő áramsűrűség forrásmentes, tehát az örvényáramnak nincs forrása.

Örvényáramtól mentes elektromágneses tér időben állandó, tehát $\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$. Ekkor az időben állandó $\mathbf{J}_0$ áramsűrűség időben állandó $\mathbf{H}$ mágneses teret és $\mathbf{B}$ mágneses fluxust hoz létre. Ebben az esetben a Maxwell-egyenletek a következő formában írhatóak fel:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0, \quad \Omega_n \text{ tartományban}, \quad (1.18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \Omega_n \text{ tartományban}, \quad (1.19)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \text{ levegőben, } \Omega_n \text{ tartományban}, \quad (1.20)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \text{ vagy } \mathbf{H} = \nu_0 \mathbf{B}, \quad \Omega_n \text{ tartományban}. \quad (1.21)$$

Ezek után olyan potenciálformalizmust lehet használni amiben, párosítjuk az örvényáramú és a stacionárius tér potenciálformalizmusait. Munkám során erre a mértékkel ellátott $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmust használtam. Az $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus használatához szükségünk van az $\mathbf{A}$ mágneses vektorpotenciálra.

3.3.1 A mértékkel ellátott $\mathbf{A}$ -formalizmus

Mágneses vektorpotenciál definíciója [10, 11, 15, 16, 17, 18]:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (1.22)$$

Az (1.22) egyenlet az (1.23) és az (1.24) azonosságok miatt kielégíti az (1.19) egyenletet.

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{v} \equiv 0, \quad (1.23)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(r). \quad (1.24)$$

Ha az (1.22) egyenletet behelyettesítjük az (1.18) egyenletbe akkor a következőt kapjuk:

$$\nabla \times (v \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0, \quad (1.25)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0. \quad (1.26)$$

Ha a feladat kétdimenziós, akkor a Coulomb-mérték automatikusan teljesül, háromdimenziós esetben viszont elő kell írni az implicit alakját (1.26), ami a teljes tartományra vonatkozik. Ehhez még hozzá kell vennünk a peremfeltételeket, amik az 5. ábrán láthatóak. A Γ_H peremen a mágneses térerősség tangenciális komponensére, a Γ_B peremen pedig a mágneses indukció normális komponensére írunk elő peremfeltételt és a következő egyenletrendszert kapjuk:

$$\nabla \times (v \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \cdot (v \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0, \Omega \text{ tartományban} \quad (1.27)$$

$$(v \nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n} = \mathbf{K}, \Gamma_H \text{ permen}, \quad (1.28)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{n} = 0, \Gamma_H \text{ permen}, \quad (1.29)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \alpha, \Gamma_B \text{ permen}, \quad (1.30)$$

$$v \nabla \cdot \mathbf{A} = 0, \Gamma_B \text{ permen}, \quad (1.31)$$

Az $\mathbf{A}$ -formalizmus gyenge alakja az (1.27) az (1.28) és az (1.31) egyenleteket összegezve a Galjorkin-módszer és a súlyozott maradék elv alkalmazásával az (1.32) formában kapjuk meg. [5]:

$$(1.32)$$

$$\int_{\Omega} [(\nabla \times \mathbf{W}) \cdot (v_0 \nabla \times \mathbf{A}) + v_0 \nabla \cdot \mathbf{W} \nabla \cdot \mathbf{A}] d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{W} \cdot \mathbf{J}_0 d\Omega + \int_{\Gamma_H} \mathbf{W} \cdot \mathbf{K} d\Gamma.$$

3.3.2 A mértékkel ellátott $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus

Az $\mathbf{A}$ mágneses vektorpotenciált az örvényáramú és az örvényáram mentes részben is használjuk [10, 11, 15, 16, 17, 18]. Ezért a mágneses vektorpotenciálnak folytonosnak kell lennie a Γ_{nc} peremen, az örvényáramú és örvényárammentes rész között (5. ábra). Ha mágneses vektorpotenciál tangenciális komponense folytonos, akkor a mágneses indukció normális komponense is folytonos lesz. Ahhoz hogy a mágneses vektorpotenciál tangenciális komponense folytonos legyen, elő kell írni egy határfelületet Γ_{nc} -re. Szintén elő kell írni a Coulomb mértéket (1.26) ha a probléma háromdimenziós.

Ezek után a következő egyenletrendszer írható fel:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla(\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = 0, \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.33)$$

$$-\nabla \cdot \left(\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V \right) = 0, \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.34)$$

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla(\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0, \Omega_c \text{ tartományban.} \quad (1.35)$$

Szintén meg kell határoznunk a peremfeltételeket. A Γ_B peremfeltétel a feladatot körbefogó külső részt jelenti, a Γ_{nc} pedig a határ a stacionárius és az örvényáramú rész között. A peremfeltételek a következők:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \alpha, \Gamma_B \text{ peremen,} \quad (1.36)$$

$$\nu \nabla \cdot \mathbf{A} = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.37)$$

$$(\nu \nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n}_c + (\nu \nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n}_n = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.38)$$

$$\mathbf{n}_c \times \mathbf{A} + \mathbf{n}_n \times \mathbf{A} = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.39)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_c + \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_n = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.40)$$

$$\nu \nabla \cdot \mathbf{A} \mathbf{n}_c + \nu \nabla \cdot \mathbf{A} \mathbf{n}_n = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.42)$$

$$-\left(\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V \right) \cdot \mathbf{n} = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen.} \quad (1.43)$$

Végül a következő egyenletrendszert kapjuk, amely az $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus gyengealakja:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_c} [\nu (\nabla \times \mathbf{W}) \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) + \nu \nabla \cdot \mathbf{W} \nabla \cdot \mathbf{A}] \cdot d\Omega + \int_{\Omega_c} \mathbf{W} \cdot \left(\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \frac{\partial v}{\partial t} \right) d\Omega + \\ \int_{\Omega_n} [\nu (\nabla \times \mathbf{W}) \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) + \nu \nabla \cdot \mathbf{W} \nabla \cdot \mathbf{A}] \cdot d\Omega = \int_{\Omega_n} \mathbf{W} \cdot \mathbf{J}_0 + \int_{\Gamma_{H_n}} \mathbf{W} \cdot \mathbf{K} d\Gamma, \end{aligned} \quad (1.44)$$

$$\int_{\Omega_c} \nabla \mathbf{N} \cdot \left(\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \frac{\partial v}{\partial t} \right) d\Omega = 0. \quad (1.45)$$

4. FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS

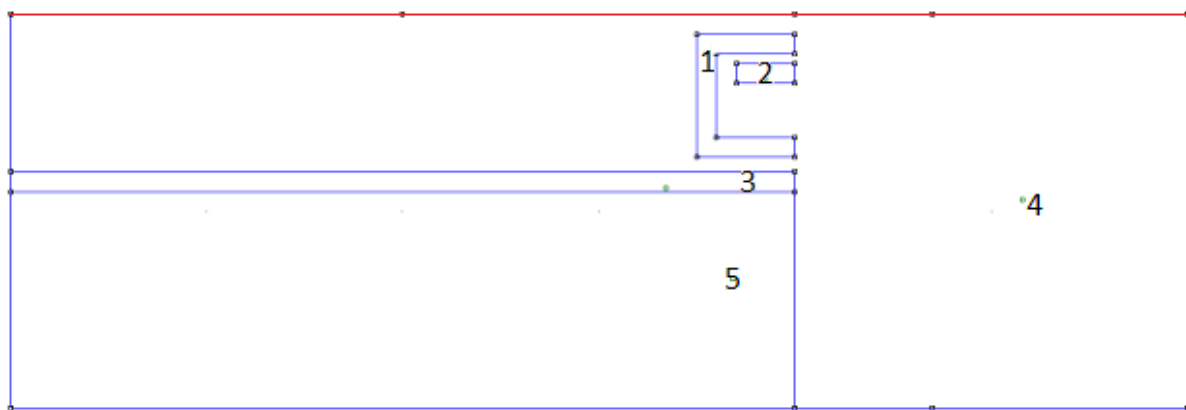
A FEMM egy ingyenesen elérhető, kétdimenziós végeselemes szimulációra képes szoftvercsomag, amelyet elektromágneses térszámítási feladatokra is használhatunk [20]. A szoftvercsomag felhasználhatósága nagyon széleskörű. Attól függően, hogy milyen témakörbe tartozik a probléma, négy választási lehetőség van. Ez első a *Magnetics Problem*, mely használata során magnetosztatikai számításokat végezhetünk, a második az *Electrostatic Problem* mikor elektrosztatika témakörbe tartozó feladatokat oldhatunk meg, a másik kettő pedig a *Heat Flow Problem*, mely során hőterjedési számítások végezhetőek illetve a *Current Flow Problem*, ami stacionárius áram problémakörével foglalkozik. Az összes modul egy közös CAD felülettel rendelkezik, és az alapbeállítási lehetőségek is nagyon hasonlóak, viszont az egyes modulok különböznek a problémát leíró háttéregyenletekben, illetve a szimulációhoz szükséges legfőbb beállítások is problémaszpecifikusak, mint például a rácsozási beállítások, a peremfeltételek, gerjesztések stb. Sok olyan beállítást alkalmazhatunk, ami kényelmesebbé teheti a szoftver alkalmazását. Szimmetrikus probléma esetén egyszerűsíthetjük a modellt így könnyebben kezelhető és a számítás is egyszerűbbé válik. Lehetőségünk van a számítási eredményeinket többféleképpen ábrázolni, több számítási eredmény összehasonlítani, illetve a végeredményeinket kép vagy text file formába importálni. Megfelelő ismeretek mellett a FEMM szoftvercsomag egy jól használható környezetet biztosít a szimulációink elvégzésére.

A munkám során a *Magnetics Problem* modult használtam, mivel ez alkalmas örvényáramú tér és stacionárius mágneses tér számítása. A következő fejezetben ismertetem az elvégzett számításaimhoz szükséges modellt és beállításokat.

4.1 Induktív közelítéskapcsoló szimulációja FEMM környezetben

Ahogy már a második fejezetben kifejtettem, egy végeselemes szimuláció első lépése mindig a modell specifikációja, ami egy CAD környezetben történik. FEMM környezetben ezt többféle módon is megtehetjük [20]. Lehetőségünk van a geometriát másféle CAD szoftverből importálni .dxf formátum használatával, berajzolhatjuk egér segítségével a geometriai elemeket, de a pontosabb modell elkészítésének érdekében érdemes az erre alkalmas konzol felületet használni, vagy a modellt a forrásfájlban meghatározni. Következő lépés az anyagjellemzők meghatározása előre definiált adatokból, vagy saját magunk is megszabhatjuk az anyagjellemzőket. Ehhez meg kell adnunk az anyag tulajdonságait, mint

például az elektromos permittivitást, a mágneses permeabilitást, vagy az elektromos vezetést. Meghatározhatunk továbbá tekercset, állandó mágnezt, potenciálértéket, vagy gerjesztést. Fontos megjegyezni, hogy nem csak a vizsgálandó eszközt kell realizálni, hanem az eszközt körülvevő illetve kitöltő levegőt is definiálni kell. Mivel a probléma kétdimenziós és forgásszimmetrikus, ezért egyszerűsíthető a modell, úgy hogy a háromdimenziós modell keresztmetszetének a felét határozzuk meg és egy szimmetriatengelyt definiálunk megfelelő peremfeltétel beállításokkal, illetve a megfelelő ablakban be kell állítanunk, hogy szimmetrikus típusú a probléma. Az 8. ábrán látható az induktív közelítéskapcsoló egyszerűsített CAD modellje FEMM környezetben.

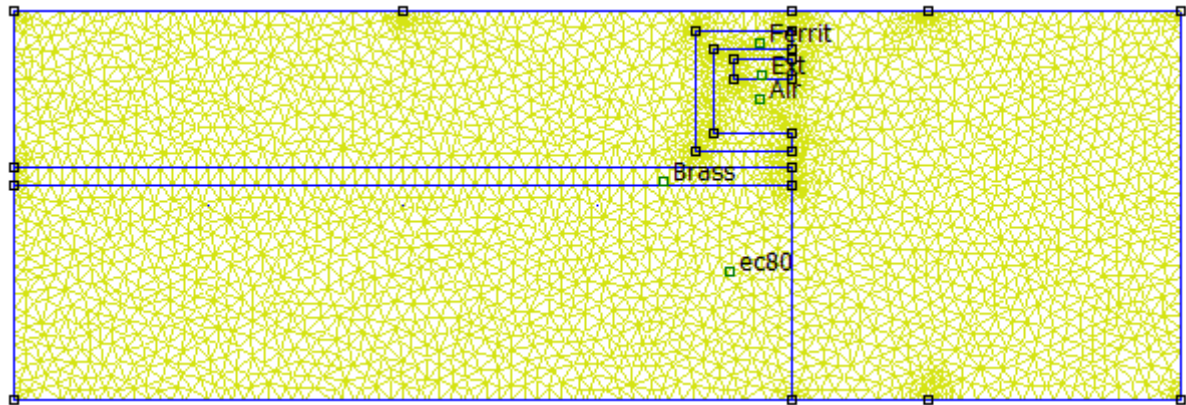


1: Vasmag, 2: Tekercs, 3: Sárgaréz ház, 4: Levegő, 5: Szerkezeti acél környezet

8. ábra: Induktív közelítéskapcsoló CAD modellje

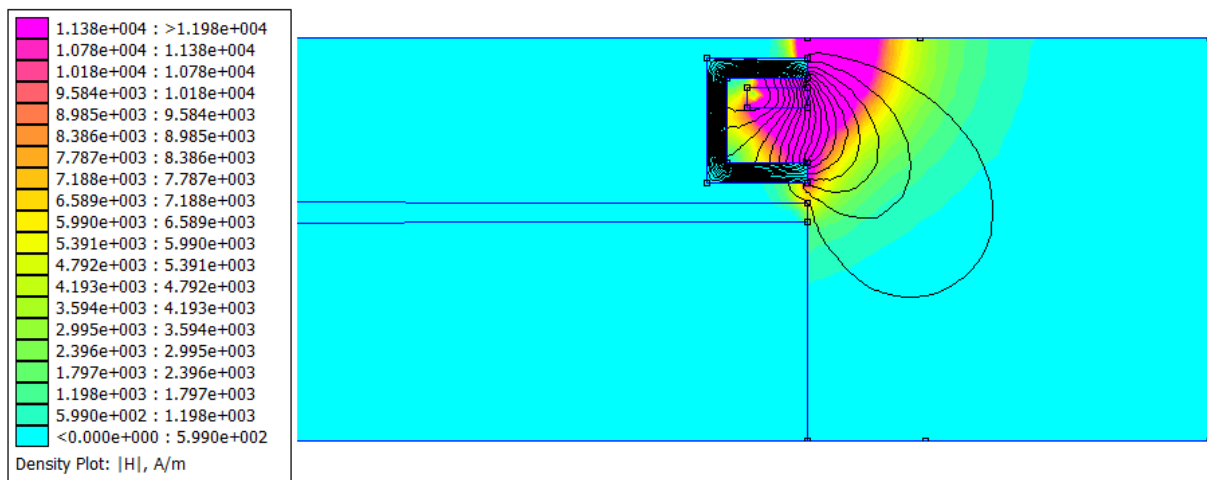
A geometria elkészítése után meg kell határozni a peremfeltételeket a *boundaries* menüben, majd hozzá kell rendelni a megfelelő peremhez. Az általam vizsgált probléma esetében az 5. ábrán pirossal jelölt peremen kívül minden peremre az úgy nevezett elektromos peremfeltételt kell beállítani. Ez azt jelenti, hogy a perem egy tökéletes elektromos vezető, vagyis az elektromos tér tangenciális komponense, illetve, a mágneses fluxus normál komponense nullával egyenlő. Az összes magnetosztatikus és örvényáramú probléma esetében az elektromos peremfeltétel az ajánlott beállítás. A felső perem jelöli a szimmetriatengelyt, ami a szoftverben az R tengelyt jelenti. Erre peremre nem kell peremfeltételt definiálni.

Meg kell még határoznunk az vizsgált frekvenciatartományt, ami a bemutatott probléma esetében 100 kHz. Ezek után következik a rácsgenerálás. Szimulációim során háromszög rácselemeket használtam és 3652 elemmel dolgoztam. A 9. ábrán a szenzor végelelem rácsa látható.



9. ábra: Induktív közelítéskapcsoló végeslem ráccsal

Következő lépés a feladat megoldása. A számításhoz a 3.3.2-es fejezetben ismertetett mértékkel ellátott $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus gyenge alakját használja a szoftver [20], majd elvégzi az asszemblálást és megoldja a teljes egyenletrendszert. Az egyenletrendszer kiszámítása után következik a posztprocesszálas, mely során az előre meghatározott mennyiségeket jeleníti meg. Lehetőség van úgy nevezett monitorokat kijelölni pontokban, görbék mentén, egy síkon vagy a térben és ezek mentén a szoftver vizualizálja azt az értéket, ami számunkra szükséges. A 10. ábrán például a szenzor által gerjesztett mágneses tér, illetve a mágneses vektorpotenciál látható.



10. ábra: Induktív közelítéskapcsoló által létrehozott mágneses tér, illetve vektorpotenciál

4.2 Lua Szkript alkalmazása FEMM környezetben

A Lua egy beágyazott programozási nyelv, amit 1993-ban fejlesztettek ki a Pontifical Catholic Universityn [21, 22, 23]. Bár önálló programként is működik, leginkább más programokba ágyazva használják. A Lua függvénykönyvtárként lett létrehozva és C nyelven íródott. Így jól használható más C nyelvű programokkal együtt, hívhat C függvényeket és a C is hívhat Lua függvényeket. Ezen tulajdonságok miatt lett implementálva a FEMM-be, melynek köszönhetően a program teljes működése vezérelhető parancsokkal és szkriptekkel, így egy jól megírt szkript segítségével sok időt spórolhatunk meg egy bonyolult geometria berajzolásán, vagy például automatizálhatjuk a több lépésből álló szimulációnkat. A továbbiakban egy, az induktív közelítéskapcsoló geometriáját berajzoló és szimulációját elvégző szkripten keresztül mutatom be a működését. Természetesen sok parancs segítheti munkánkat, de a dolgozatomban csak a legfontosabbakat mutatom be.

A modell megépítése előtt ki kell választanunk, hogy melyik programrészt szeretnénk használni. Mivel a szenzor működése örvényáramú probléma, ezért a `magnetics problem` modult kell választanunk a `newdocument(0)` parancs segítségével. Következő lépés a probléma definiálása. A `mi_probdef(100000, "millimeters", "axi", 1e-008)` paranccsal meghatározzuk a frekvenciát, ami jelen esetben 100 kHz, ezután a megfelelő hosszúság mértékegységet kell beállítani, majd probléma típusát, ami itt hengerszimmetrikus, végül a megoldó algoritmus pontosságát határozzuk meg. Következő lépés a geometria megadása. Ehhez két parancsra van szükség a `mi_addnode()` és a `mi_addsegment()`. Az előbbi a pontok meghatározására használható az utóbbi pedig a pontokat összekötő vonalak definiálására. A `mi_addmaterial()` paranccsal anyagparaméterek definiálhatunk, amit később a blokkokhoz rendelünk, illetve az `addboundprop()` paranccsal peremfeltétel határozunk meg, amit a peremen lévő szegmensekhez fogunk rendelni. A következő három paranccsal meghatározzuk a blokkcímét, kijelöljük, majd hozzárendeljük a megfelelő anyagparamétert: `mi_blocklabel()`, `mi_selecklabel()`, `mi_setblockprop(,,)`. Hasonló módunk járunk el a peremfeltétel definiálásánál, csak a következő parancsokkal: `mi_selectsegment()`, `mi_setsegmentprop(,,)`. Az `mi_clearselected()` paranccsal az objektumok kijelölését törölhetjük. Szimuláció előtt el kell mentenünk az aktuális projektet az `mi_saveas()` paranccsal. Ezek után generálhatjuk a végeelem rácsot `mi_createmesh()` segítségével, majd az `mi_analyze()` paranccsal elindíthatjuk a

szimulációt. A szimuláció végeztével `ami_loadsolution()` paranccsal vizualizálhatjuk az eredményt. A teljes programkód a 11. ábrán látható.

```
-- Új magnetosztatika feladat megnyitása
newdocument(0)

-- Probléma
mi_probdef(100000,"millimeters","axi",1e-008)

--Geometria meghatározása (pontok)
mi_addnode(0,20)
mi_addnode(20,20)
mi_addnode(20,0)
mi_addnode(20,-40)
mi_addnode(9,-40)
mi_addnode(8,-40)
mi_addnode(0,-40)
mi_addnode(0,0)
mi_addnode(8,0)
mi_addnode(9,0)
mi_addnode(1,0)
mi_addnode(2,0)
mi_addnode(2,-4)
mi_addnode(6.25,-4)
mi_addnode(6.25,0)
mi_addnode(7.25,0)
mi_addnode(7.25,-5)
mi_addnode(1,-5)
mi_addnode(3.3,-0.5)
mi_addnode(4.3,-0.5)
mi_addnode(4.3,-2.95)
mi_addnode(3.3,-2.95)

-- Geometria meghatározása (Szakaszok)
mi_addsegment(0,20,20,20)
mi_addsegment(20,20,20,-40)
mi_addsegment(20,-40,0,-40)
mi_addsegment(0,20,0,-40)
mi_addsegment(8,0,20,0)
mi_addsegment(8,0,8,-40)
mi_addsegment(9,0,9,-40)
mi_addsegment(1,0,2,0)
mi_addsegment(2,0,2,-4)
mi_addsegment(2,-4,6.25,-4)
mi_addsegment(6.25,-4,6.25,0)
mi_addsegment(6.25,0,7.25,0)
mi_addsegment(7.25,0,7.25,-5)
mi_addsegment(7.25,-5,1,-5)
mi_addsegment(1,-5,1,0)
mi_addsegment(3.3,-0.5,4.3,-0.5)
mi_addsegment(4.3,-0.5,4.3,-2.95)
mi_addsegment(4.3,-2.95,3.3,-2.95)
mi_addsegment(3.3,-2.95,3.3,-0.5)

-- Anyagtulajdonságok definiálása
mi_addmaterial("Brass",1,1,0,0,15)
mi_addmaterial("Ferrit",2200,2200)
mi_addmaterial("EC80",1000,1000,0,0,2)
mi_addmaterial("Air",1,1)
mi_addmaterial("Ext",1,1,0,1)
-- Peremfeltétel meghatározása
mi_addboundprop('Boundary',0,0)

-- Anyagtulajdonságok hozzárendelése a geometriához
mi_addblocklabel(4,14)
mi_selectlabel(4,14)
mi_setblockprop("Air")
mi_clearselected()

mi_addblocklabel(1.3,-3)
mi_selectlabel(1.3,-3)
mi_setblockprop("Ferrit")
mi_clearselected()

mi_addblocklabel(3.6,-2)
mi_selectlabel(3.6,-2)
mi_setblockprop("Ext")
mi_clearselected()

mi_addblocklabel(8.4,-3)
mi_selectlabel(8.4,-3)
mi_setblockprop("Brass")
mi_clearselected()

mi_addblocklabel(11,-11)
mi_selectlabel(11,-11)
mi_setblockprop("EC80")
mi_clearselected()

-- Peremfeltétel hozzárendelése a geometriához
mi_selectsegment(10,20)
mi_selectsegment(20,10)
mi_selectsegment(20,-20)
mi_selectsegment(15,-40)
mi_selectsegment(8.4,-40)
mi_selectsegment(5,-40)
mi_setsegmentprop("Boundary")
mi_clearselected()
|
-- Zoom állítás
mi_zoomnatural()

-- File mentés
mi_saveas("./m18.fem")

-- Rácsgenerálás
mi_createmesh()

-- Szimuláció
mi_analyze()

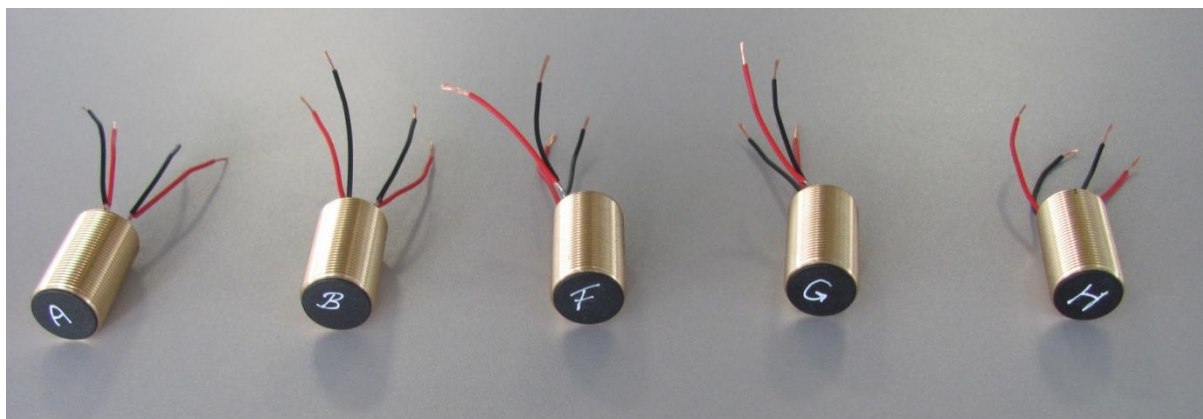
--Eredmény betöltése
mi_loadsolution()

mo_showdensityplot(1,0,600,0,"hmag")
```

11. ábra: A teljes programkód az induktív közelítéskapcsoló megrajzolásához és szimulációjához

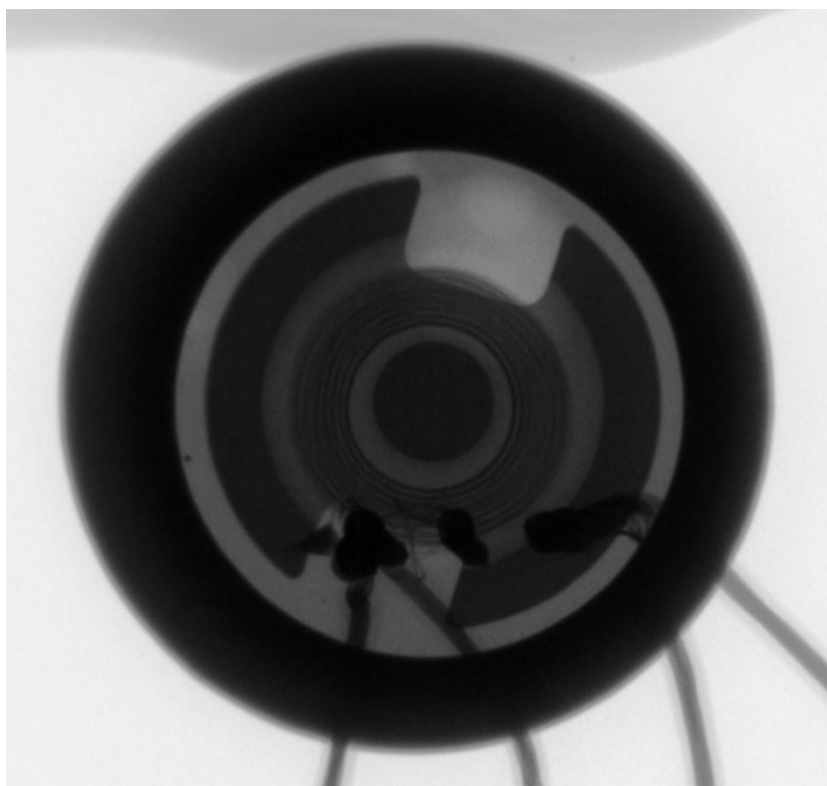
5. A FELADAT ISMERTETÉSE

Mint ahogyan a 2. fejezetben már ismertettem az induktív közelítéskapcsoló elsődleges érzékelési eleme működés során egy elektromágneses teret hoz létre. Az érzékelendő céltárgyat ebbe a térbe helyezzük el és ebben a tárgyban örvényáramok keletkeznek. Ez az örvényáram szintén létrehoz egy mágneses teret, ami a kezdeti mágneses teret megváltoztatja. Ez a változás mérhető a gerjesztő jel amplitúdójában és fázisában, illetve a gerjesztő tekercs paramétereiben. Munkám során az volt a cél, hogy a szenzor kapcsolási távolságát megnöveljem, illetve a beépíthetőségét javítsam, úgy hogy csak a szenzorban található ferritmag geometriáját változtatom. Korábbi TDK és OTDK dolgozataimban azt vizsgáltam, hogy hogyan változik a térerősség a fő érzékelési irányban és a szenzor környezetében. Azért fontos a térerősséget a szenzor környezetében is vizsgálni, mert ha fém környezetbe építjük be, akkor ott szintén örvényáramok keletkeznek, amelyek befolyásolják a szenzor működését. Tehát a cél az volt, hogy a ferrit mag geometriai méreteinek változtatásával a térerősséget szenzor előtt növeljem, míg a környezetében minimalizáljam. A szimulációk alapján meghatároztam két olyan paramétert, ami döntően befolyásolja a térerősséget ebben a két irányban. Ez a ferritmag közepén található henger átmérője illetve a vasmag teljes átmérője. Végeztem továbbá több módosítást is, amik a térerősség szempontjából nem hoztak nagymértékű változást, de kivitel és további vizsgálat szempontjából hasznosnak bizonyultak. Ilyen a vasmag magassága illetve a közepén elhelyezkedő légrés. E szimulációk alapján a Balluff Elektronika Kft. megrendelt két gyártótól 5 különböző vasmagot, amikből öt mintaszenzor került legyártásra. Ezen kívül készült egy hatodik minta is, amit egyéb vizsgálat alá vettünk. A minták felépítése a vasmagokat kivéve teljesen azonos. Áll egy 72 menetes tekercsből, amely úgynevezett litze vezetékből készült. A litze vezeték több, egymástól elszigetelt elemi szálakból áll, nem pedig egy tömör vezetéből. Ez azért előnyös, mert így kisebb a tekercs ellenállása. Ez a tekercs egy műanyag kupakba lett behelyezve, majd a sárgarézt szenzorház lett ráillesztve, végül a mechanikai stabilitás és a ferrit mag rögzítése érdekében epoxigyantával lett kitöltve a ház belseje. A minták az elektronikai alkatrészt nem tartalmazzák, mert az általam végzett vizsgálatokhoz ez nem volt szükséges. Az öt mintát „A”, „B”, „F”, „G” és „H” betűvel jelöltem. A legyártott minták a 12. ábrán láthatóak.



12. ábra: A méréshez legyártott minták

Az „F” jelű mintából kettő darab készült, amiből egyikkel végeztem a mérést, a másikat pedig röntgenes vizsgálat alá vetettük. A vizsgálatról készült kép a 13. ábrán látható.



13. ábra: Az „F” jelű mintáról készült röntgenfelvétel

A felvételen jól látható a ferritmagos tekercs elhelyezkedése a szenzorházban. A sötét foltok a képen a méréshez használt réztüskék forrasztásai.

Az első vizsgálat, amelyet elvégeztem az a méréshez tartozó szimulációs modell alátámasztása méréssel. Ehhez az Agilent 4285aLCR mérőt használtam a 16047A mérőfejjel és meghatároztam egy 50 menetes légmagos tekercs ellenállását és induktivitását. Erre egy későbbi fejezetben részletesen kitérek. Végeztem továbbá vizsgálatokat egy több műszerből álló mérőrendszerben, aminek felépítését a következő fejezetben részletesen ismertetek. A mérőrendszerben végzett mérések során a célom az volt, hogy az „A”, „B”, „F”, „G” és „H” minták tekercseinek érzékenységét vizsgáljam és összehasonlítsam egymással, figyelembe véve a különböző anyagú céltárgyakra történő változást, a fém környezetbe beépítés hatását, illetve az anyagok hőmérsékletfüggését különböző frekvenciákon. Ezekhez EC80-as szerkezeti acélból, rozsdamentes acélból, rézből és alumíniumból készült céltárgyakat használtam és a mintákat EC80, illetve alumínium környezetbe helyeztem. A méréseket -25 °C, 0 °C, 25 °C, 50 °C és 75 °C végeztem 100 kHz és 1 MHz között 100 kHz-es lépésként. Ez a méréssorozat nagyon időigényes feladat, de a mérőprogram segítségével a szükséges idő lecsökkent, hiszen a frekvenciaváltást a szoftver végezte, így csak a mérendő mintát és a céltárgy pozícióját illetve anyagát kellett kézzel módosítani. A mérések ellenőrzéséhez készítettem végeselem-módszerrel elvégzett szimulációt is. Mivel a mérés során sok változó paraméter volt ezért a szimulációt egy Lua szkript segítségével automatizáltam.

6. A MÉRÉSHEZ HASZNÁLT ESZKÖZÖK

Ebben a fejezetben a munkámhoz elvégzett méréshez szükséges mérőrendszert és eszközöket mutatom be. A mérőrendszer az Agilent 4285a LCR mérőjéből egy CTS klímakamrából és egy BMT-ből áll. A mérést egy LabView program segítségével vezéreltem egy személyi számítógépről. A mérőrendszer képe a 14. ábrán látható.



14. ábra: Mérőrendszer a minták vizsgálatához.

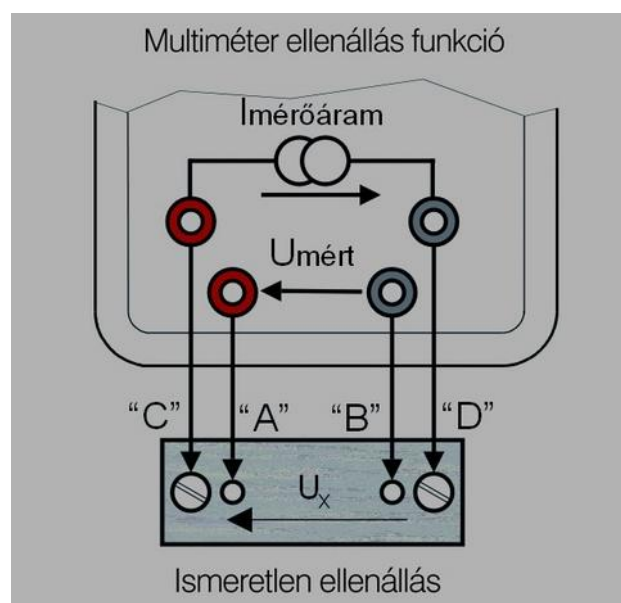
6.1 Agilent 4285a LCR mérő:

Az Agilent 4285 egy nagy pontosságú precíziós LCR mérő [24]. 75kHz – 30MHz-es tartományban képes üzemelni. Segítségével meghatározható a mérendő eszköz impedanciája soros és párhuzamos ellenállása, induktivitása, kapacitása, továbbá képes jósági tényező és fázisszög mérésre is. Az Agilent 4285 a 15. ábrán látható.



15. ábra: Agilent 4285 LCR mérő

A műszer a 0.1%-os pontosságot a Kelvin elv alkalmazásával éri el [25]. Ez azt jelenti, hogy a mérés során nem 2 vezetékot használunk, hanem 4 vezetékot. 2 vezetékos mérés esetén a mérőkábel és a csatlakozók ellenállása is sorban hozzáadódik a mérendő eszköz ellenállásához, míg négy vezeték esetén ez kiküszöbölődik úgy, hogy két külön vezetéken folyik át a mérőáram a mérendő eszközön és két külön vezeték segítségével mérjük az eszközön eső feszültséget. A négyvezetékes mérés a 16. ábrán látható.



16. ábra: A négyvezetékes mérés elrendezése [25]

A műszer a mérés során komplex impedanciát határoz meg, melyből kifejezhető a mérendő eszköz egyéb paramétere, például ellenállása, induktivitása, soros illetve

párhuzamos modell alapján. A gyártó javaslata szerint akkor érdemes alkalmazni a soros modellt, ha a mért impedancia értéke kicsi, ellenkező esetben a párhuzamos modell alkalmazása célszerű. Méréseim során a tekercsek kis impedanciája miatt a soros modellt alkalmaztam, tehát az LS-RS értékeket határoztam meg. A műszer használata előtt kalibrációra van szükség, ahol figyelembe kell venni a mérés során használt kábel hosszát. A kalibráció során három vezeték hossz kiválasztására ad lehetőséget a műszer. Ezek a 0 méteres 1 illetve két méteres kábelek. 0 méteres kábel hossz esetén az 16047A mérőfejet kell az eszközre csatlakoztatni, ami a 17. ábrán látható.



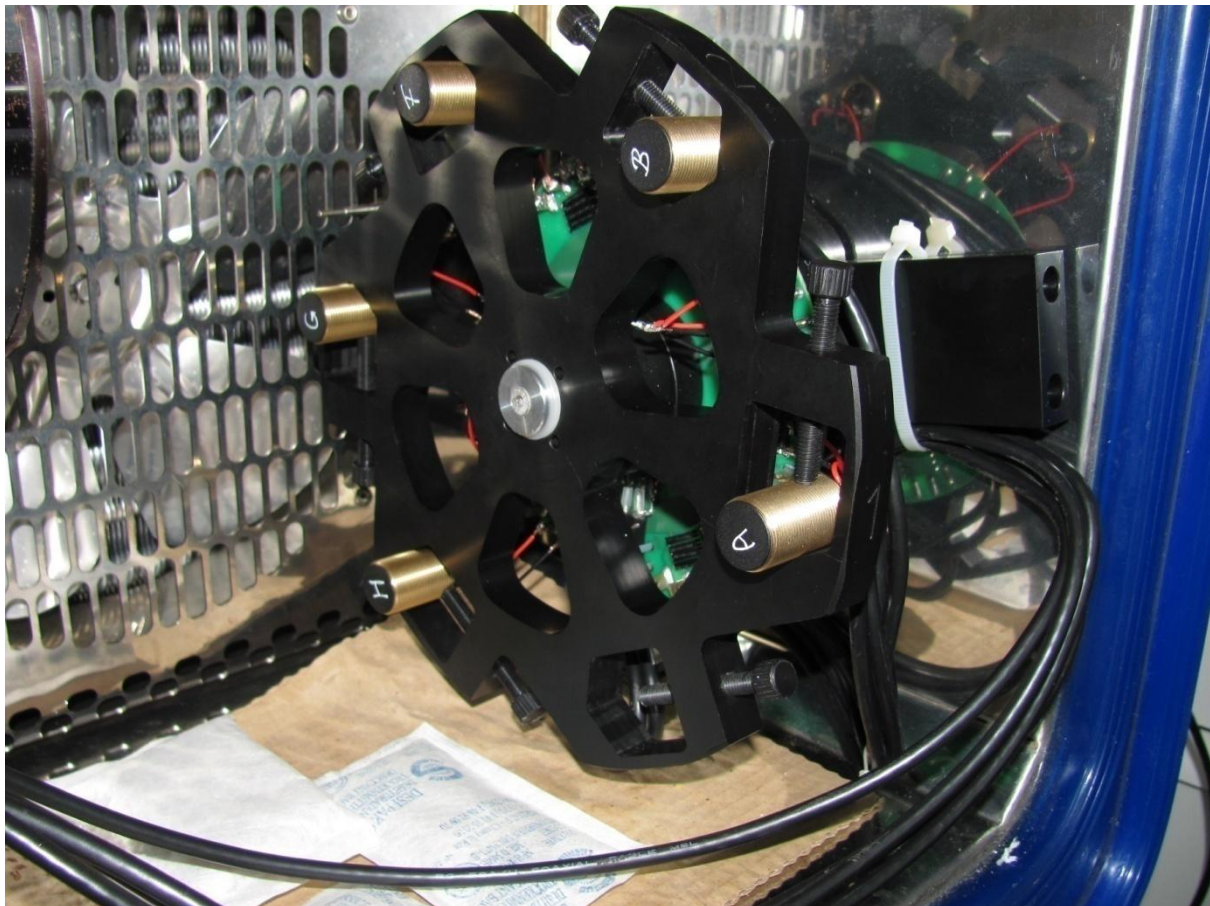
17. ábra: Agilent 16047A mérőfej

Méréseim során a 16047A típusú mérőfejet használtam, illetve két méteres vezetékeket úgy hogy azokat a CTS klímakamrában elhelyezett tárcsára csatlakoztattam. Műszer korrekció során a mérendő eszköz helyére rövidzárat illetve szakadást kell csatlakoztatni. Az 16047A jelű mérőfej rendelkezik egy saját fémlappal, amivel elvégezhető a kalibráció. Az eszköz egy GPIB/USB átalakítóval csatlakoztattam a személyi számítógéphez, így a kalibráció és a mérés egy LabView környezetben megírt mérőprogrammal vezérelhető volt.

6.2 CTS klímakamra és mérőtárcsa:

A méréseimet -25 és 75 °C közötti tartományban több hőmérsékleten végeztem, mely körülmények létrehozásához egy CTS gyártmányú T -40/25 típusú klímakamrát használtam [26]. A kamra űrtartalma 25 liter, amiben -40 és 180 °C hőmérsékletű levegő beállítására

képes. Rendelkezik egy digitális érintőképernyős vezérlési felülettel, ahol könnyedén beállíthatjuk a számunkra szükséges hőmérsékletet, megtekinthetünk különböző hőmérséklet-idő grafikonokat, programozhatjuk a kamra működését és valós idejű visszajelzést kapunk a kamra belső hőmérsékletéről. A kamra ajtaja egy kulcs segítségével rögzíthető. Az eszköz szintén vezérelhető számítógép segítségével egy Ethernet proton keresztül. A kamra egyik oldalán kettő a másik oldalán egy lyuk található, ahol bevezettem a mérőkábeleket, behelyeztem a BMT távolságmérő eszközt, illetve egy mérőtárcsát helyeztem el. A mérőtárcsa a kamrában a 18. ábrán látható.



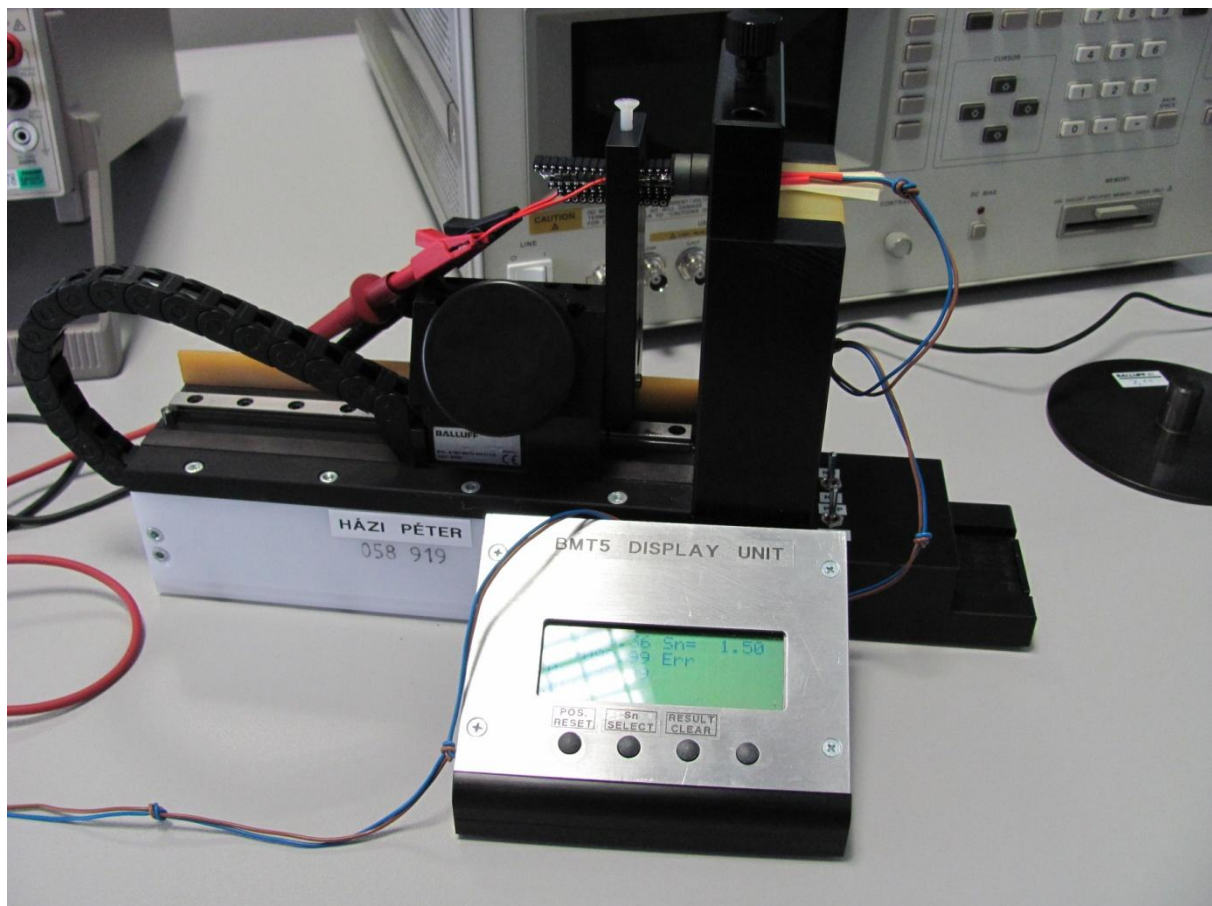
18. ábra: A mérés során használt mérőtárcsa

A mérőtárcsára 6 mérőhelyből és két kalibráló pontból áll. A mérőhelyekre behelyezhetők a mérendő szenzor minták, az egyik kalibráló pontra egy rövidzárat a másikra pedig egy szakadást kell kapcsolni. Nagyon fontos hogy a tárcsa és a minták, illetve a kalibráló vezetékdarabok egyforma hosszúságúak legyenek. A tárcsa kimenete négy darab 2 méteres vezetékkel az LCR mérőhöz csatlakozik illetve megtalálható benne egy mágnes kapcsoló. A tárcsa különböző állása esetén más és más mérőpont csatlakozik az LCR mérőre

a mágneskapcsoló segítségével, így a kamra ajtajának kinyitása nélkül lehetőség van a mérendő minták cserélésére. Ez azért fontos, mert a minták körülbelül egy-, másfél óra alatt veszik fel a környezetük hőmérsékletét, így az összes minta vizsgálata során elég volt egyszer kivárni ezt az időt, valamint a műszerek kalibrációját sem kellett újra elvégezni.

6.3 BMT

A BMT a Balluff Elektronika Kft. saját fejlesztésű belső használatra készített nagy pontosságú távolságmérő eszköze, mely a 19. ábrán látható [5].



19. ábra: BMT távolságmérő eszköz digitális kijelzővel

A távolságmérést egy BML nevű mágnesszalagos útmérő szenzor végzi, mely áll egy olvasófejből illetve 10-20 milliméter széles fémszalagból és az arra felvitt mágnesezhető rétegből. Ezt a réteget a hosszanti irányban két részre osztják, majd adott távolságonként felmágnesezik. Az egyik sáv egy inkrementális adatot tartalmaz, a másik pedig egy helykódot [27]. Ezeket az információkat az olvasófej érintés és mozgás nélkül képes beolvasni és

meghatározni egy kiválasztott viszonyítási ponthoz képest az elmozdulást. A BMT-be egy BML0011 típusú 10 μm -es olvasófej került beépítésre, ami a 20. ábrán látható.



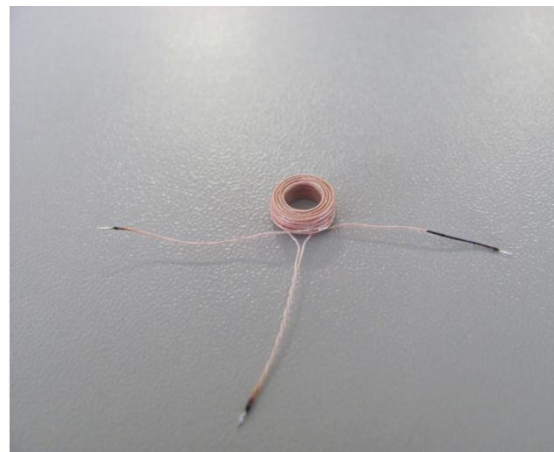
20. ábra: BML0011 olvasófej [5]

Az olvasófej egy sínhez lett rögzítve a BMT házához és egy tekerhető tárcsával lehet az elmozdítani a kívánt pozícióba, illetve az olvasófejhez lett rögzítve egy rúd, amihez a céltárgy csatlakoztatható. Az eszközhöz kapcsolhatunk egy digitális kijelzőt, illetve USB port segítségével személyi számítógépre is köthető.

7. Validációs vizsgálat

Bármilyen mérnöki munka során a szimuláció alkalmazása leegyszerűsítheti és felgyorsíthatja a munkafolyamatot, hiszen a vizsgálandó eszközt vagy tárgyat nem kell legyártani elég csak virtuális környezetben létrehozni egy modellt. Az azonban elengedhetetlen, hogy ez a modell egyezzen, vagy jó közelítést adjon a valódi viselkedéshez. Ezért mindenképpen szükséges a szimulációs modell validálása méréssel vagy analitikus módon, így biztosak lehetünk abban, hogy az eredményeink megfelelnek a valóságnak.

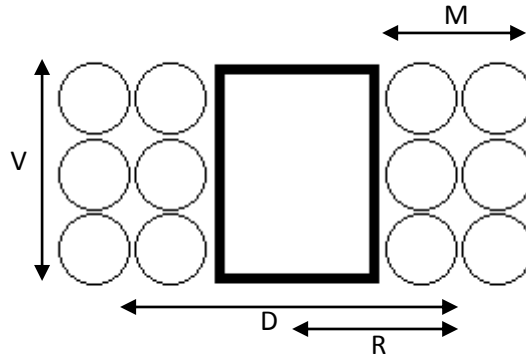
A modellem validálásához egy 50 menetes légmagos tekercset választottam. Ez azért indokolt, mert erre létezik analitikus megoldás is így háromféleképpen bizonyíthatom számításom helyességét. Az Agilent LCR mérővel és a hozzá tartozó 16047A mérőfejjel meghatároztam a tekercs soros ellenállását és induktivitását, majd kiszámoltam ugyan ezeket az értékeket analitikus módon, végül elvégeztem a szimulációt két modell segítségével. Az LCR mérőhöz csatlakoztatott mérőfej és a méréshez használt tekercs a 21. ábrán látható.



21. ábra: A validációs méréshez használt műszer és az 50 mentes tekercs

A mérés során a 16047A mérőfejet csatlakoztattam az LCR mérőhöz elvégeztem a kalibrációt a hozzá tartozó korrekciós rövidzárlappal, majd csatlakoztattam a tekercset. A mérést 100 kHz-en végeztem.

Az induktivitás számításához az (1.46) egyenletet használtam, ahol az R a tekercs sugarát, az N a menetszámot a V a tekercs vastagságát az M pedig a tekercs mélységét jelöli. A paraméterek a 22. ábrán láthatóak.



22. ábra: A számításhoz használt paraméterek

$$L = \frac{0.8(R^2 \times N^2)}{6 \times R + 9 \times V + 10 \times M} \quad (1.46)$$

A tekercs ellenállásának számításához az (1.47) az (1.48) és az (1.49) képleteket használtam.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}, \quad (1.47)$$

$$l = 2 \cdot r_{\text{közepes}} \cdot \pi \cdot n, \quad (1.48)$$

$$A = r_{\text{vezeték}}^2 \cdot \pi \quad (1.49)$$

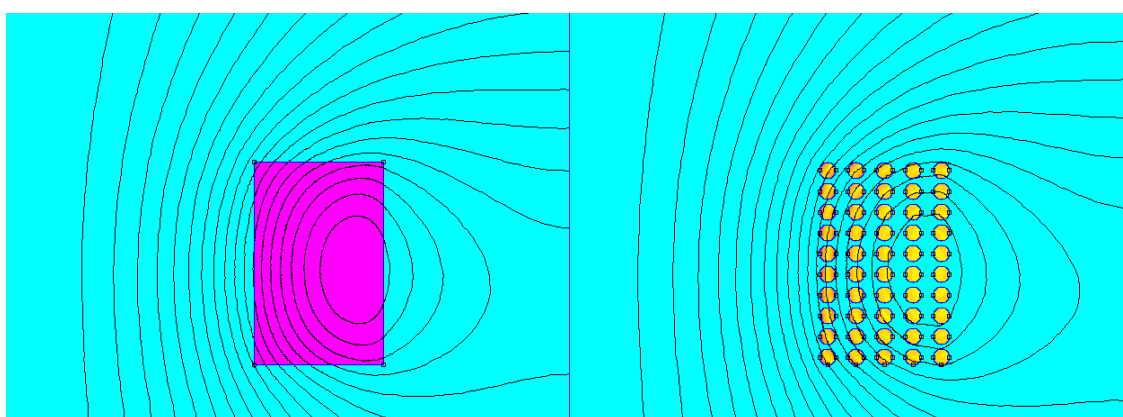
A ρ a réz fajlagos ellenállását jelenti, ami $1,678 \times 10^{-8}$, az l a feltekercselt vezeték teljes hossza, az A pedig a vezeték keresztmetszete. Az $r_{\text{közepes}}$ a tekercs közepén mérhető sugár, az n pedig a tekercs menetszáma, az $r_{\text{vezeték}}$ pedig a vezeték sugara. Következő lépés a feladat megoldása szimulációval, melyhez két különböző szimulációs modellt készítettem. Az egyik esetén a tekercset egy téglalapként rajzoltam be és a blokktulajdonságoknál egy 50 menetes tekercsként definiáltam. A FEMM-ben lehetőség van egy blokkról meghatározni, hogy az egy tekercs és meghatározható a menetszám illetve az egy meneten árfolyó áram értéke. A másik modell esetén menetenként berajzoltam a geometriát és minden egyes kört a tekercs egy meneteként határoztam meg. Így a szoftver egy darab 50 menetes tekercsként kezeli, és ez alapján számolja ki a megfelelő értékeket.

A négy módon meghatározott induktivitás és ellenállás értékek az 1. táblázatban láthatóak.

	Induktivitás [μH]	Ellenállás [Ω]
Mérés	19.41	0.996
Analitikus megoldás	19.30	0.672413793
Szimuláció – menetenként berajzolva	21.5955	0.777851
Szimuláció – egy tekercsként berajzolva	22.0239	0.262753

1. táblázat: A validációs vizsgálat eredményei

Az eredmények alapján jól látható, hogy a tekercs induktivitása mind a 4 esetben közel azonos, de ez nem mondható el az ellenállás értékéről. Ha a tekercset a meneteket befoglaló téglalappal közelítjük, akkor jelentős eltérést tapasztalunk a másik 3 módszerhez képest, viszont menetenkénti szimuláció esetén az ellenállásban minimális eltérést kapunk. Ez annak köszönhető, hogy az utóbbi modell esetén a szoftver figyelembe veszi a menetek közötti parazita kapacitásokat illetve a skin hatást is, aminek köszönhetően nagyon jól modellezi a valóságban történő hatásokat. A 23. ábrán látható a tekercs keresztmetszetén folyó áram.



23. ábra: A tekercsen folyó áram és a vektorpotenciál vonalak a két modell esetén

Jól látható hogy az első esetben a tekercsen átfolyó áram eloszlása egyenletes, míg a második esetben a menetek különböző pontjain más és más az áram erőssége, továbbá jól megfigyelhető a skin hatás jelensége is. Az előző eredmények tudatában elmondhatjuk, hogy a szimuláció jó közelítéssel pontos eredményhez vezet, ha a tekercset menetenként rajzoljuk be. Mint már említettem a számolás ezért jóval több időt vesz igénybe, de a pontos eredmény elérése érdekében szükséges ezt alkalmazni.

8. A KÜLÖNBÖZŐ GEOMETRIÁJÚ VASMAGOK MÉRÉSE ÉS SZIMULÁCIÓJA

8.1 A méréshez tartozó szimuláció

Az elvégzett méréseimhez szimulációkat is készítettem, így ellenőrizve azok helyességét. A szimulációs modellt a 4.1. fejezetben ismertetett módon rajzoltam be és a validáció során meghatározott tekercsmodellt használtam. Így még pontosabb eredmény érhettem el. A szimuláció során a FEMM-be implementált Lua parancssort használtam. Ennek segítségével készítettem egy olyan szkriptet, ami a teljes mérési folyamathoz elvégzi a szimulációt beavatkozás nélkül. A programkód a 1. számú mellékletben található. A program a konzol megjelenítésével és kiírásával kezdődik. Erre azért van szükség, mert az eredmények a konzolra kerülnek kiírásra egy ciklus elvégzése után és így elkerülhetőek az esetleges hibák az értékelés során. Ezután az anyagparamétereket változóként definiáltam majd az eredmények mentéséhez szolgáló fájllelési útvonalát határoztam meg. A teljes szimulációhoz 4 egymásba ágyazott `for` ciklusra volt szükség. Az első a megfelelő geometria betöltéséhez, a második a megfelelő frekvencia beállításához, a harmadik a különböző céltárgy anyagok beállításához, a negyedik pedig a céltárgy távolság változtatásához volt szükséges. A hőmérsékletváltozás úgy modellezhető a szoftverben, hogy az anyagtulajdonságokat hőmérsékletfüggésük szerint megváltoztatjuk. A teljes programciklus végeztével a konzolra kiírt végeredmények egy .txt szövegfájlba kerülnek. Ez tartalmazza a tekercs kiszámolt értékeit, illetve az általam meghatározott sztringeket. Érdekes egyéb sztringekkel kiegészíteni a kiírt paramétereket, például a ciklusban változó paraméterek aktuális értékeit, így egy nagyobb adattömböt könnyebben kezelhetünk a feldolgozás során. A méréshez készített szkript kimenetének részlete a 24. ábrán látható.

```

--> A vasmag
--> 100 kHz
--> EC80 0 0.01 1.882780871185185+I*1.953224293097832 3.108653012136935e-006-I*2.985433376710617e-006
--> EC80 0.25 0.01 0.3082089265701118+I*1.146679782727899 1.824997555646859e-006-I*4.794242943175531e-007
--> EC80 0.5 0.01 0.1586125996074873+I*0.8472833817994134 1.348493384129945e-006-I*2.413343452726231e-007
--> EC80 0.75 0.01 0.1087182183666087+I*0.7107659530446042 1.13121914808471e-006-I*1.619249712026492e-007
--> EC80 1 0.01 0.08471446609826429+I*0.6311543076210561 1.004513279116339e-006-I*1.237218129400459e-007
--> EC80 1.25 0.01 0.0712585772361547+I*0.5810005466232037 9.246910893417619e-007-I*1.023061006790466e-007
--> EC80 1.5 0.01 0.06294451876362647+I*0.5476580031973606 8.716247833269698e-007-I*8.90738656484676e-008
--> EC80 1.75 0.01 0.05748662168060963+I*0.524422906493926 8.346449783912727e-007-I*8.038735265197785e-008
--> EC80 2 0.01 0.05357195646558002+I*0.5074133667040673 8.075734550185309e-007-I*7.415696945675924e-008
--> EC80 2.25 0.01 0.05085775818329805+I*0.49549769765658 7.886090787269825e-007-I*6.983718872519222e-008
--> EC80 2.5 0.01 0.04884143742927551+I*0.4867542332150061 7.746934228707347e-007-I*6.662811457657751e-008

```

24. ábra: A méréshez készített szkript kimenete

A program először kiírja az aktuálisan betöltött geometriát, majd a frekvenciát. Ezután egy-egy ciklushoz tartozó paramétereket és eredményeket. Az első oszlopban a céltárgy anyaga látható, majd az aktuális céltárgytávolság. A következő oszlopokban látható a tekercsen átfolyó áram értéke, a tekercsre eső feszültség értéke illetve a fluxus értéke. Ezen értékekből meghatározható a tekercs induktivitása és kapacitása. Munkám során a mérések és a szimulációk segítségével nagyon sok adathoz jutottam, melyekből nagyon hasznos és sok tapasztalat levonható belőlük. Például, megfigyelhető az induktivitás és ellenállás értékek változása különböző hőmérsékleteken vagy különböző frekvenciákon. Mivel, minden eredmény bemutatása nagyon hosszadalmas lenne, ezért a legfontosabb mérési pontok esetén mutatom be az eredményeket. Így a következőkben 100 kHz-es frekvencián és 25 °C fokos hőmérsékleten elvégzett vizsgálatok eredményeit mutatom be. E szimulációim során nem vettem figyelembe a ferrit mag frekvenciafüggését. A célom jövőben ezt a paramétert is figyelembe venni a pontosabb eredmény elérése érdekében. A méréshez használt mintákba épített ferrit magok a 25. ábrán láthatók.

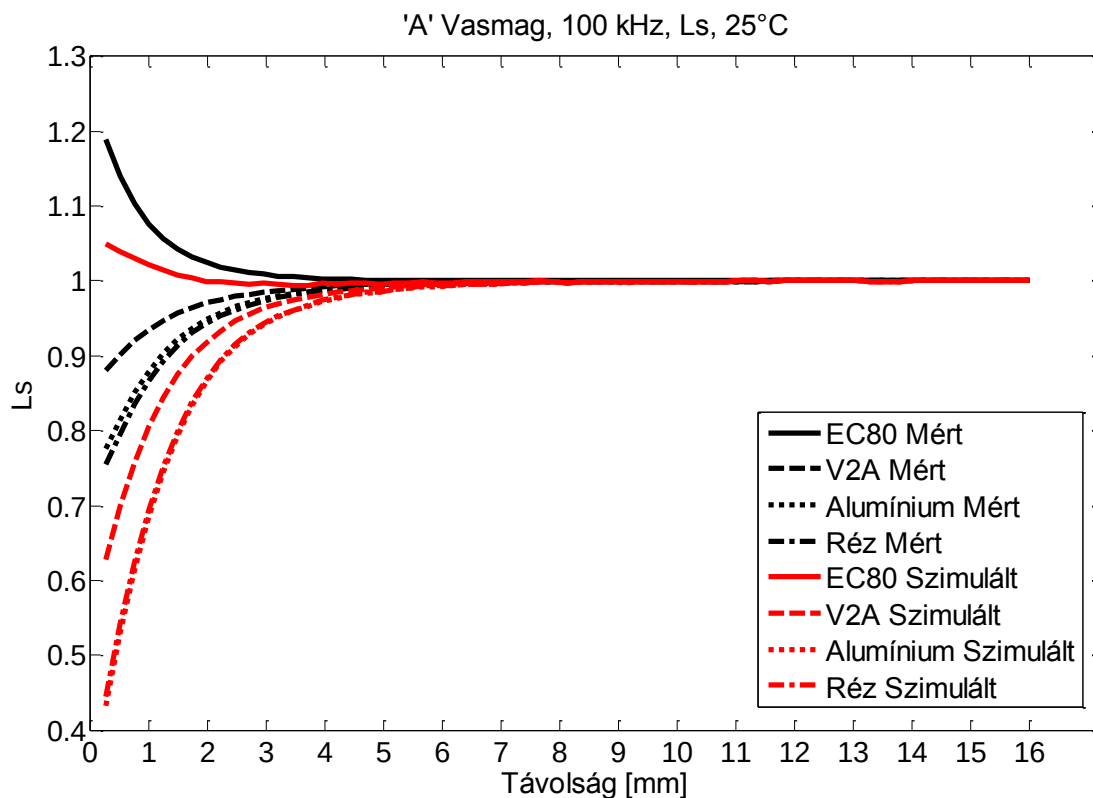


25. ábra: A mintákba épített vasmagok

A magok két gyártótól származnak és anyagukban illetve geometriai paramétereikben is különböznek. A magok pontos geometriai méreteit és anyagparamétereit a dolgozatomban nem közlöm, mert ipari titoknak minősülnek.

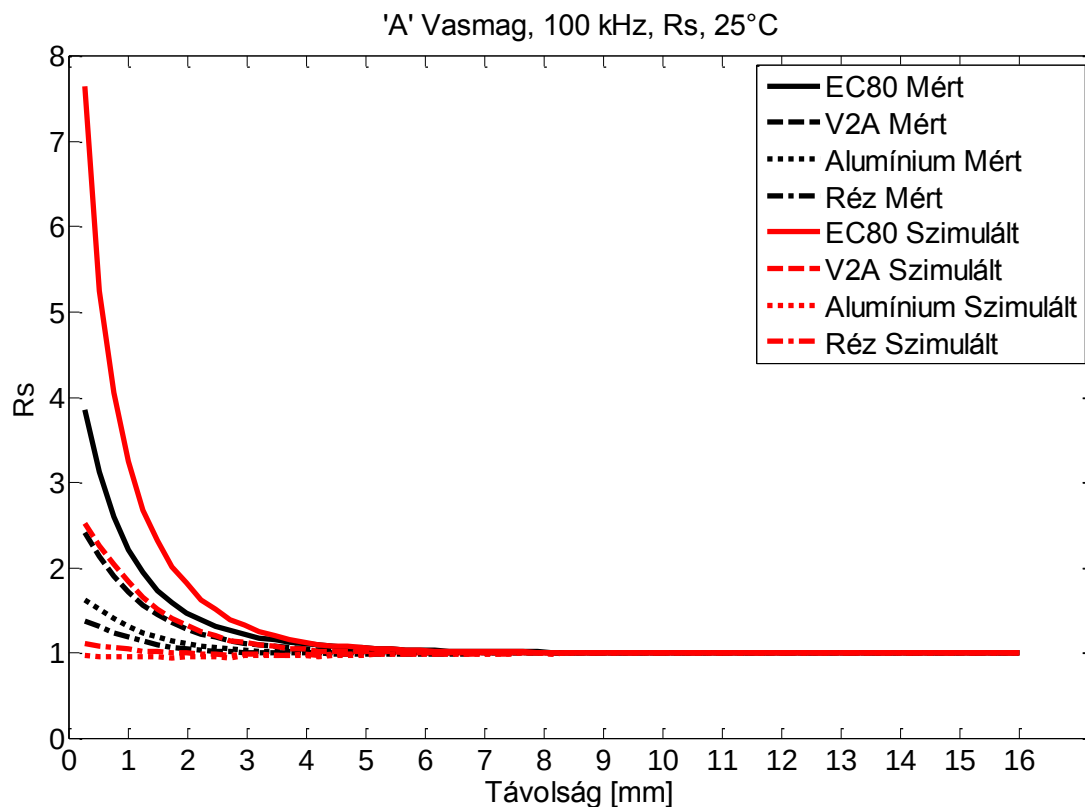
8.2. Mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása

Ebben az alfejezetben az „A” vasmag eredményeit mutatom be, a többi vasmagra vonatkozó eredmény a következő alfejezetben olvasható, amelyben a vasmagok összehasonlítása történik. A 26. ábrán az „A” minta esetén mért és számított soros induktivitás értéke látható a céltárgy távolságának függvényében. Az ábrákon az eredmények normált értéke látható, így könnyebben összehasonlíthatóak a görbék.



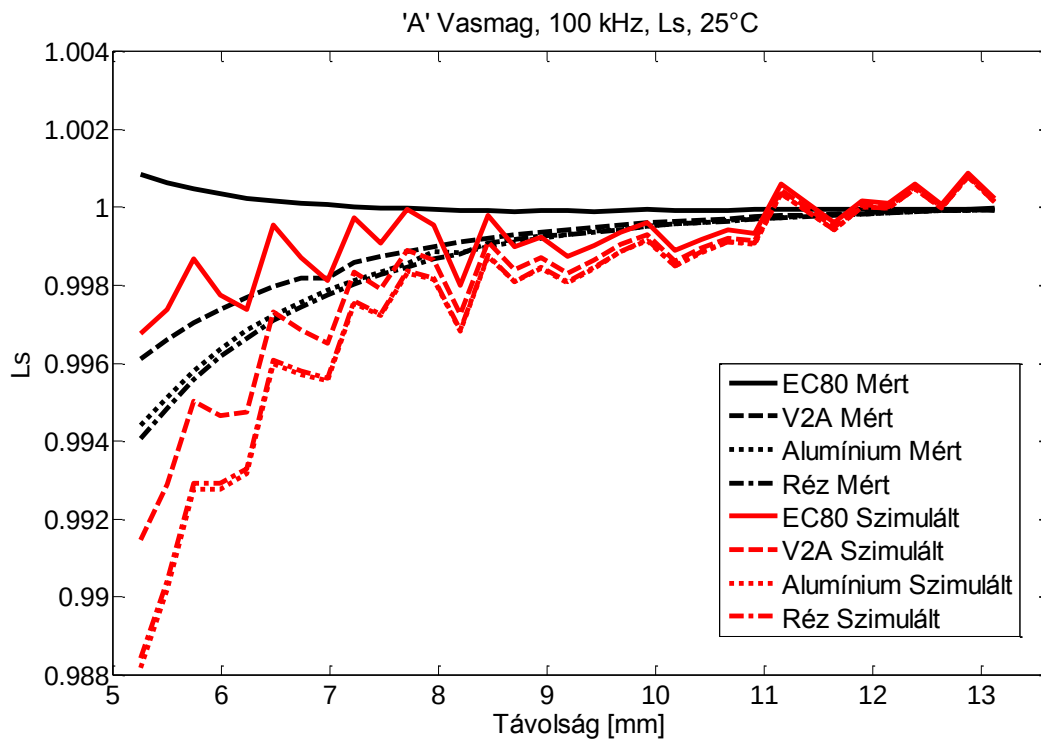
26. ábra: „A” vasmag esetén mért soros induktivitás a céltárgytávolság függvényében

A mért és a számított érték között látható némi eltérés, ami abból ered, hogy nem rendelkezem teljesen pontos adattal a céltárgyak anyagával kapcsolatban illetve a vasmag modellje egy kétdimenziós egyszerűsített modell. A szimuláció során a geometriát hengersizmetrikusnak vettem, de a valóságban található egy kivágás a vasmagokon, ami jól látszik a 25. ábrán. Az eltérésnél fontosabb viszont, hogy a görbék jellege megegyezik. Az ábrán jól látható a különböző anyagokra jellemző karakterisztikája a szenzornak. A 27. ábrán ugyanennek a magnak az soros induktivitás értékei figyelhetők meg a céltárgy távolságának függvényében.

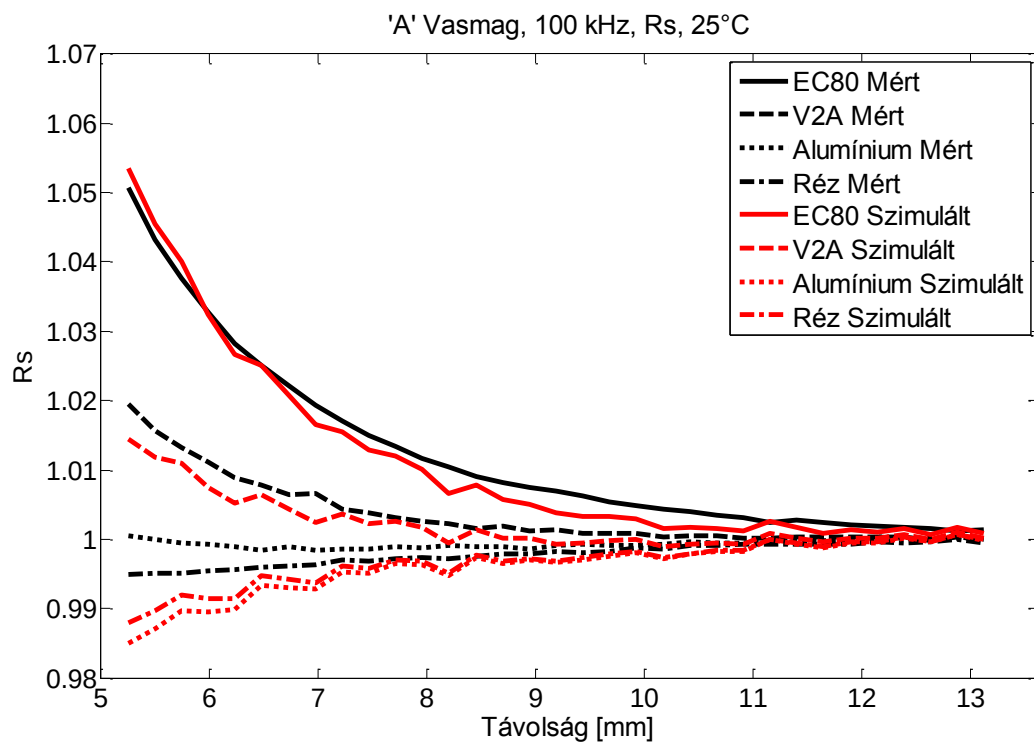


27. ábra: „A” vasmag esetén mért soros ellenállás a céltárgytávolság függvényében

Szintén láthatóak az előbb tapasztalt különbségek, illetve ellenállás esetén is megfigyelhetünk egy karakterisztikát a különböző anyagokra. Annak érdekében, hogy nagyobb szenzor-céltárgy távolságok esetén is használható eredményeket kapjunk, érdemes egy kisebb tartományt közelebbről megvizsgálni. Ezt a tartományt én 5 és 13 mm között jelöltem ki. Ez ezért fontos, mert a gyári szenzor kapcsolási távolsága 8 mm és ehhez képest nézzük a változást a görbe jellegében. A 28. és a 29. ábrán az „A” vasmag LS és RS értékei láthatóak 5 és 13 mm között

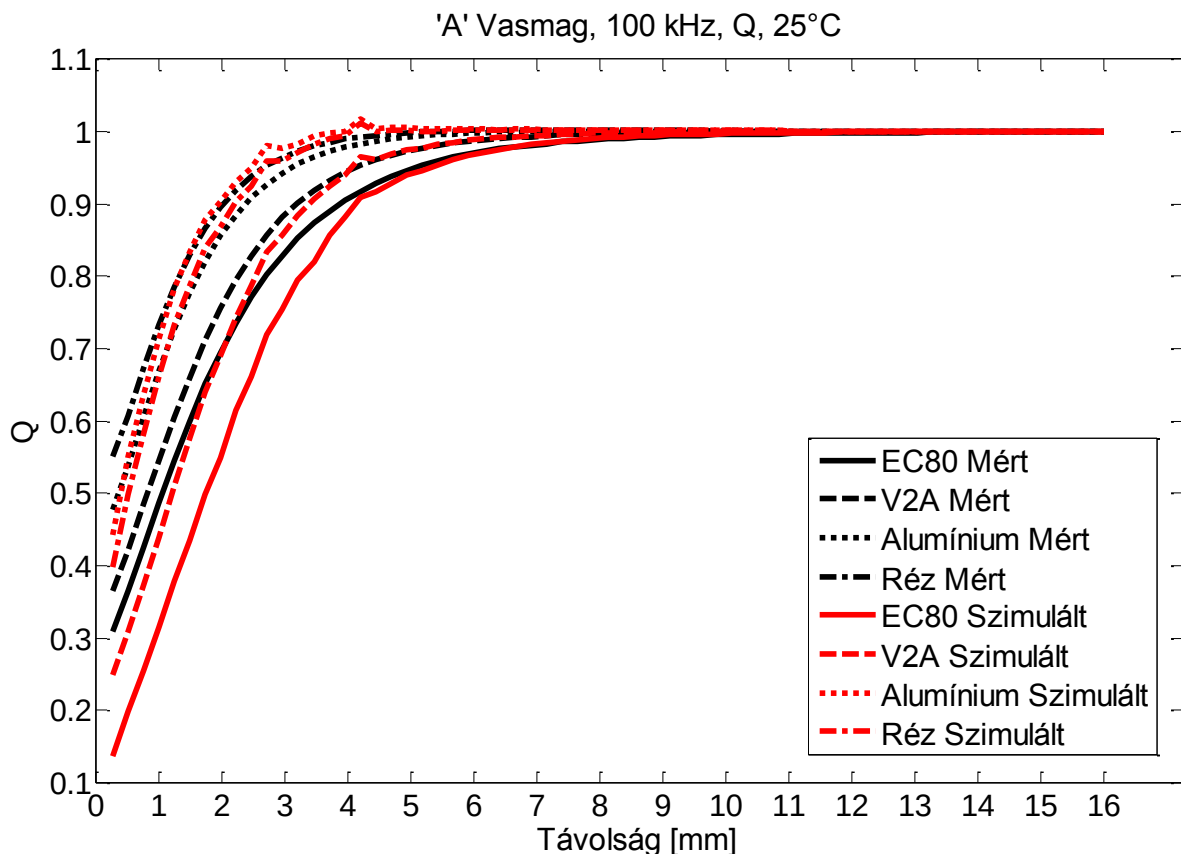


28. ábra: „A” vasmag esetén mért soros induktivitás 5 és 13 mm közötti céltárgytávolság esetén



29. ábra: „A” vasmag esetén mért soros induktivitás 5 és 13 mm közötti céltárgytávolság esetén

A görbéken ismét látható a rendszer karakterisztikája. A 28. ábrán a szimulációval meghatározott LS értékben egy kisebb számítási pontatlanság figyelhető meg, ami pár tized μH . A 30. Ábrán pedig a tekercs jósági tényezője látható a különböző anyagú céltárgyak esetén a target távolság függvényében.

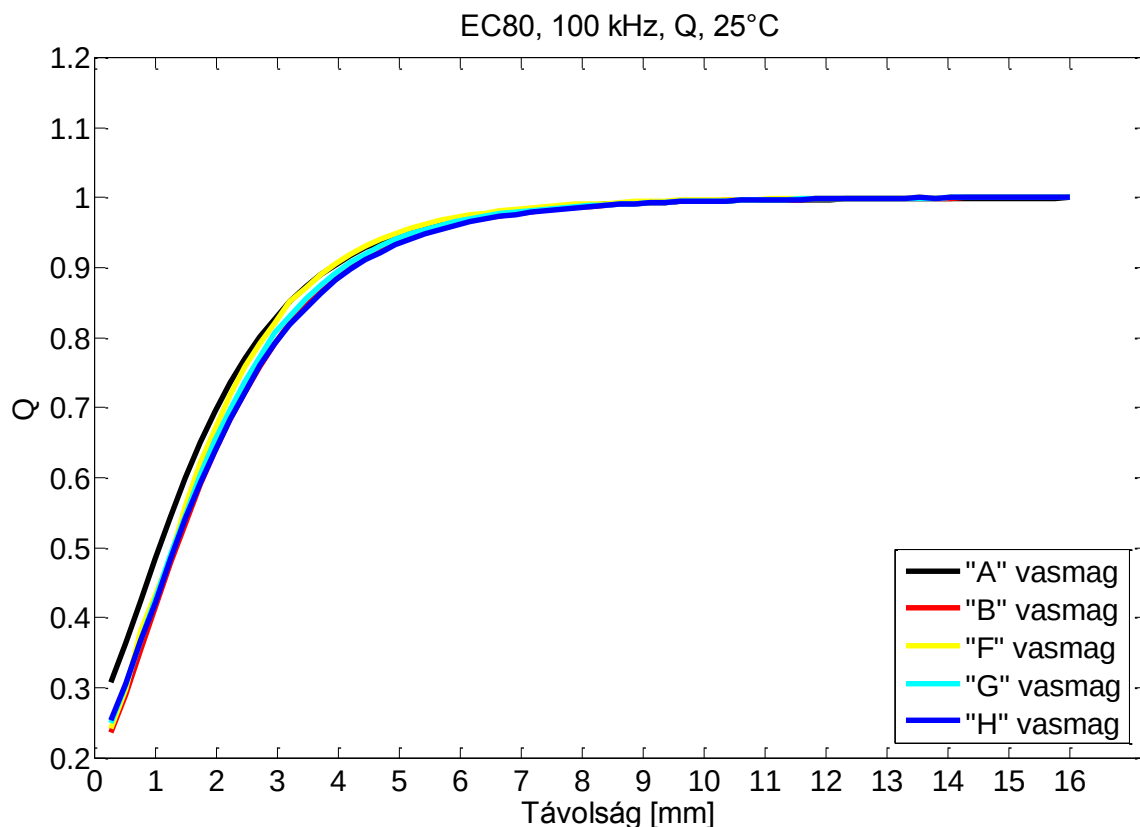


30. ábra: „A” vasmag esetén mért jósági tényező a céltárgytávolság függvényében

Az ábrán szintén a korábban tapasztalt különbségek figyelhetőek meg, de ismét elmondható hogy a görbék tendenciái azonosak. Az előző ábrákon látszik, hogy EC80 szerkezeti acélból készült target esetén a legnagyobb az induktivitás és az ellenállás értéke, míg jósági tényező szempontjából ez a legkisebb. Jól megfigyelhető az is, ahol az induktivitás és ellenállás értéke egy konstans értéket vesz fel mind a 4 féle anyagú céltárgy esetén is.

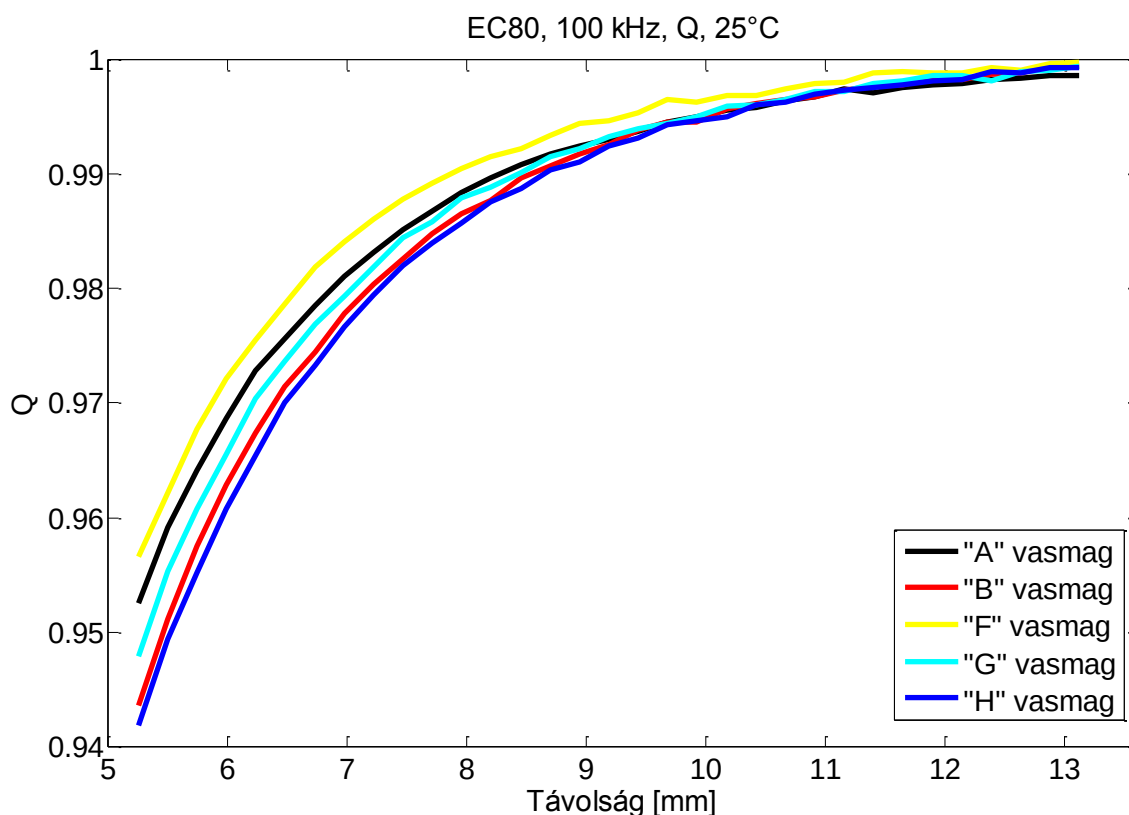
8.3. A különböző minták összehasonlítása

Az előző fejezetben bemutatott ábrákon látható, hogy egy bizonyos távolság után a tekercs paraméterei egy konstans értéket vesznek fel. Ez azzal magyarázható, hogy abban a tartományban már nincs hatással a céltárgy a szenzorra, tehát nem érzékeli azt. A cél az, hogy ez minél nagyobb céltárgy távolság esetén következzen be. Ezt oly módon vizsgáltam, hogy összehasonlítottam a minták jósági tényezőjét különböző anyagú céltárgyak esetén. A könnyebb kiértékeléséhez az eredményeket normáltam, tehát a maximális jósági tényező értékeit az egyes vasmagokra nézve egységnyiinek vettem és ehhez képest vizsgáltam meg a jósági tényező alakulását különböző minták esetén. Így látható, hogy mennyire érzékeny a tekercs a céltárgy távolságának függvényében. Az előző fejezetben bemutattam, hogy a szimulációs és a mérés jellege egyezik, ezért a könnyebb áttekinthetőség érdekében itt csak a mérési eredményeket ábrázolom. A 31. ábrán látható az öt különböző vasmag jósági tényezőjének alakulása céltárgy távolság függvényében EC80-as szerkezeti acélból készült céltárgy esetén.



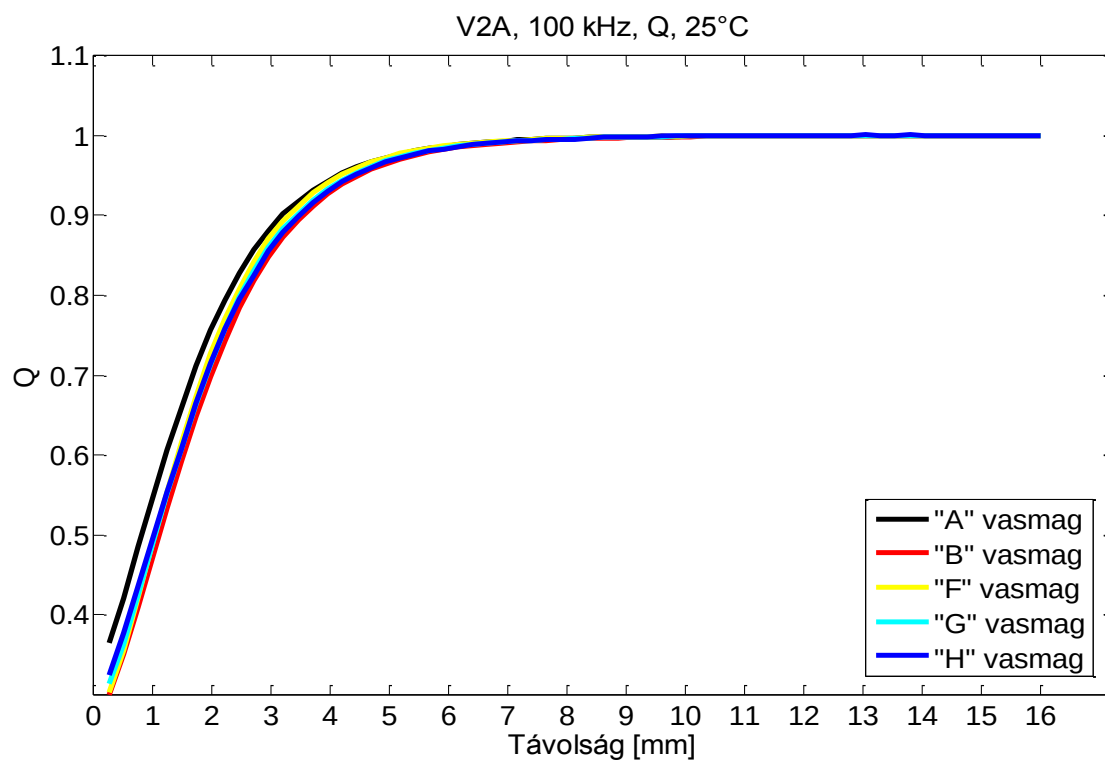
31. ábra: A különböző vasmagok jósági tényezőjének normált értéke EC80 anyagú céltárgy esetén

A görbén jól látható, hogy a jósági tényező alakulása egy tangens hiperbolikus függvényhez hasonlóan alakul, viszont más a függvény meredeksége különböző vasmagok esetén. Ahhoz, hogy jól megfigyelhessük a konstans értéknek beállítását érdemes jobban megvizsgálni az 5 és 13 mm-es tartományt. Ez a 32. ábrán látható.

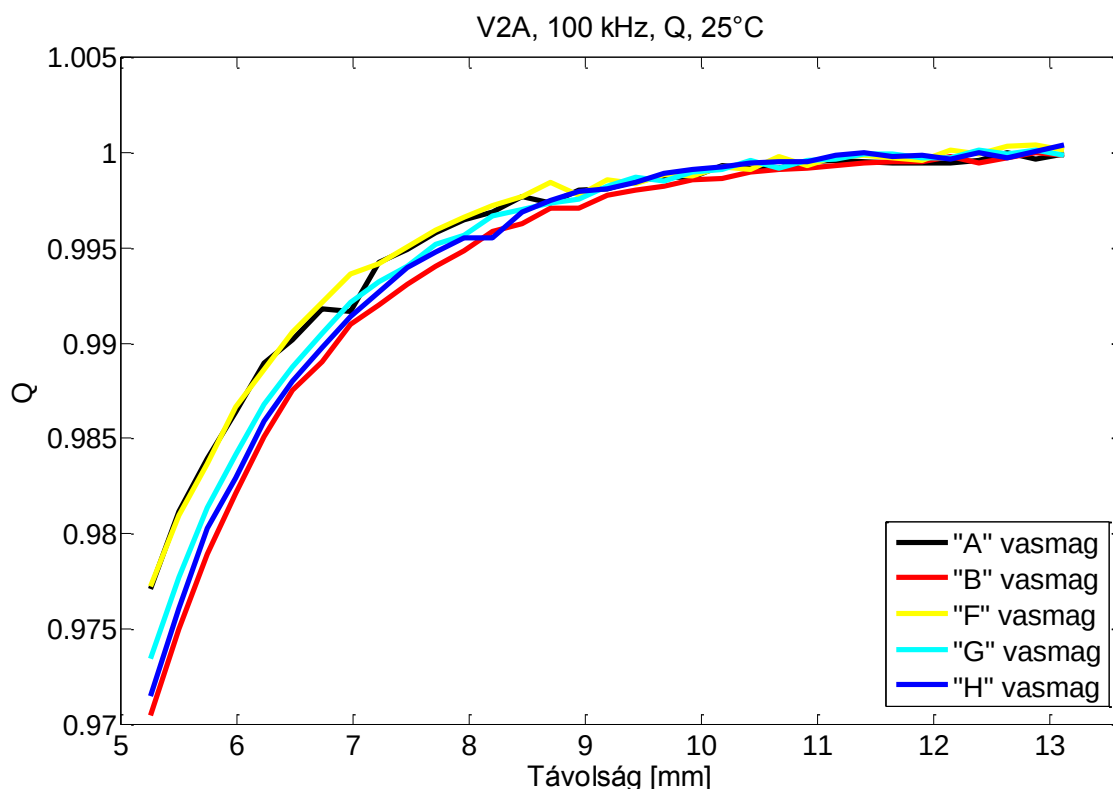


32. ábra: A különböző vasmagok jósági tényezőjének normált értéke EC80 anyagú céltárgy esetén 5mm és 13mm közötti céltárgy távolságban

Jól megfigyelhető, hogy az „F” vasmaggal legyártott minta által leírt függvény meredekebben emelkedik, és kisebb távolságban megközelíti a konstans értéket. Elmondható továbbá az ábrák alapján, hogy a „B” és „H” jelű vasmagok esetén mért jósági tényező nem emelkedik olyan meredekséggel, mint a másik 3 vasmag esetén, görbékük jellege nagyon hasonló. A 33. ábrán szintén az öt különböző vasmag jósági tényezőjének alakulása céltárgy távolság függvényében EC80-as szerkezeti acélból készült céltárgy esetén, illetve a 34. ábrán 5 és 13 mm közötti tartományban.

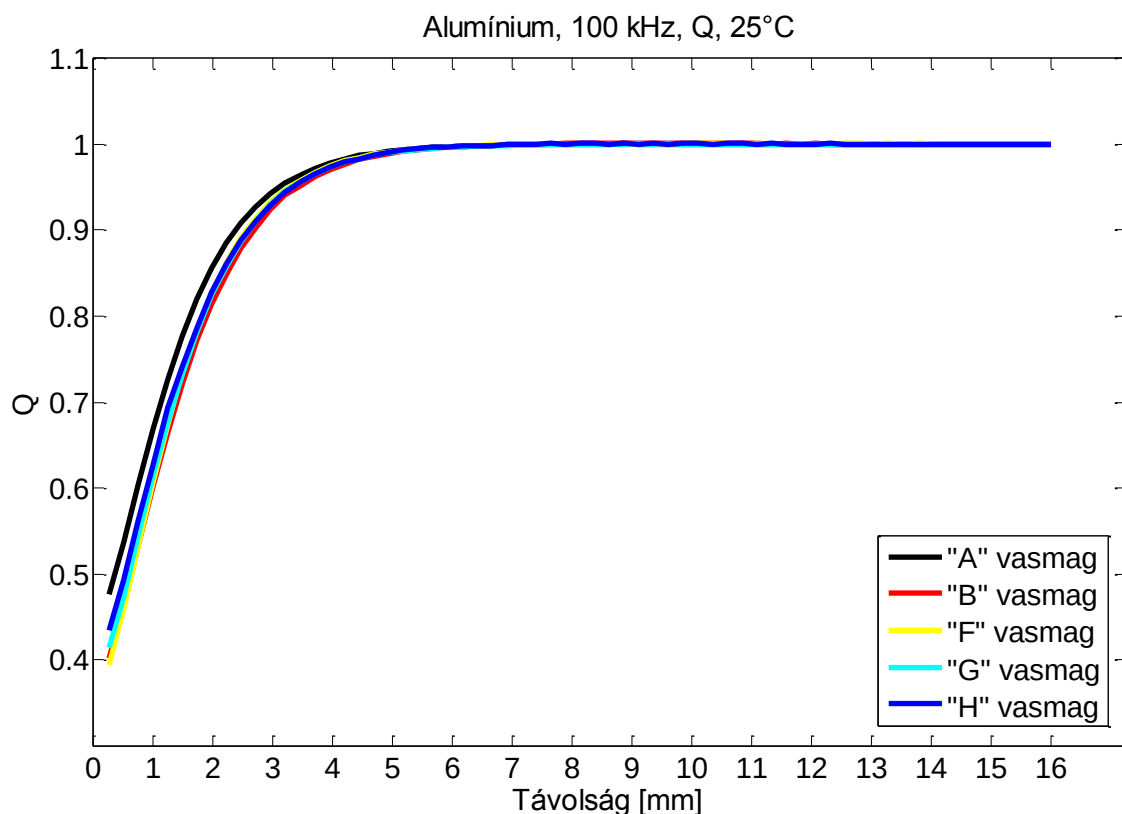


33. ábra: A vasmagok jósági tényezőjének normált értéke rozsdamentes acél céltárgy esetén



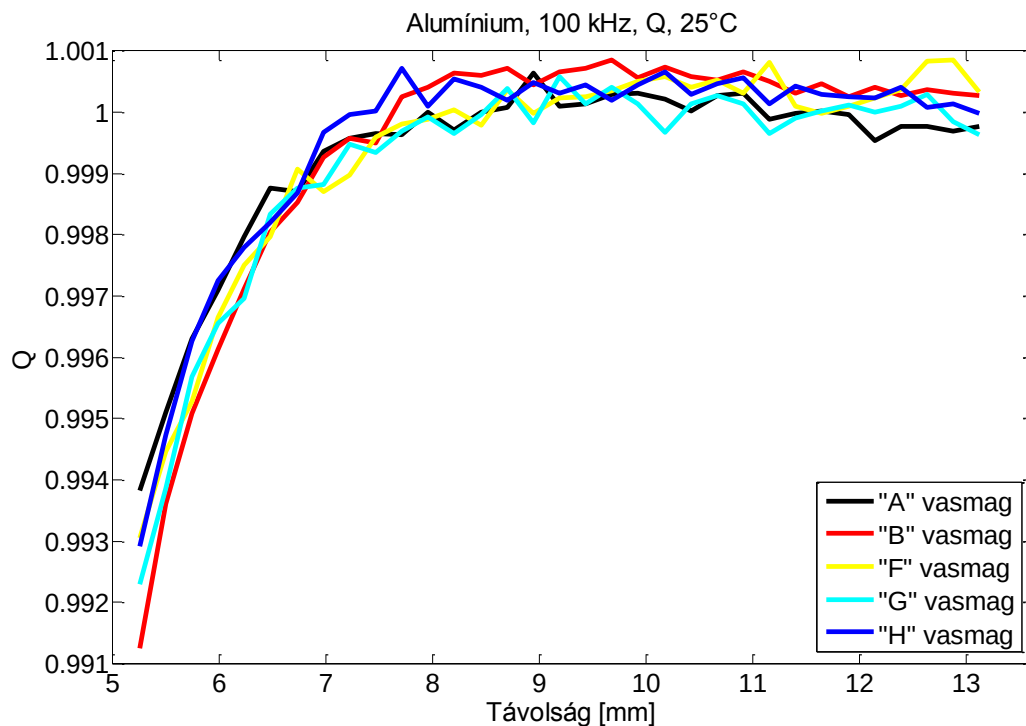
34. ábra: A vasmagok jósági tényezőjének normált értéke rozsdamentes acél céltárgy esetén 5 és 13 mm közötti céltárgytávolságban

Szintén hasonló tulajdonságok figyelhetők meg, mint szerkezeti acél esetén, annyi különbséggel, hogy mind az 5 vasmag esetén meredekebb az értékek növekedése. Ez a rozsdamentes acél anyagtulajdonsága miatt következett be. A 34. ábrán is látható, hogy meredekebb a görbék alakulása. A „F” jelű vasmag esetén mért jósági tényező hasonlóan a szerkezeti acél esetén tapasztalható, szintén meredekebben növekszik a másik 4 vasmag esetén mérthez képest. Továbbá az is megállapítható, hogy a „B” és „H” jelű vasmag görbéje is hasonló tendenciát mutat. A 35. alumíniumból készült céltárgy esetén figyelhető meg a jósági tényező változása.



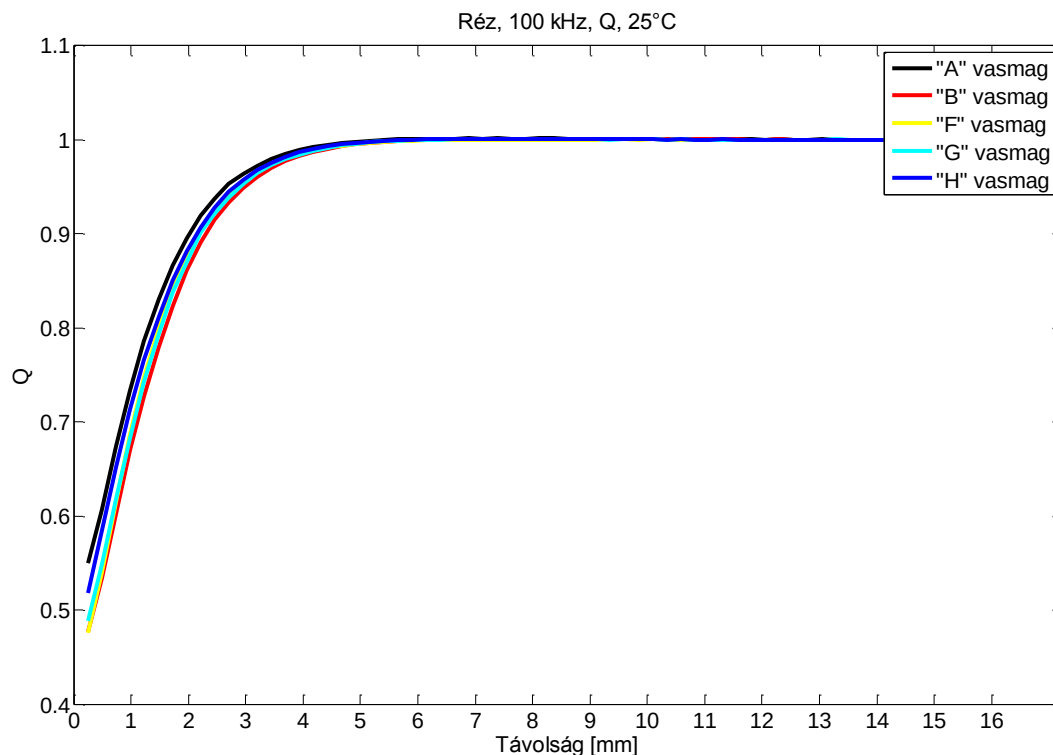
35. ábra: A vasmagok jósági tényezőjének normált értéke alumínium céltárgy esetén

Az ábra alapján elmondható, hogy mind az öt vasmag esetén mért értékek sokkal meredekebben növekednek, mint az előző két esetben. A 36. ábrán az 5 és 13 mm közötti értékek láthatóak.



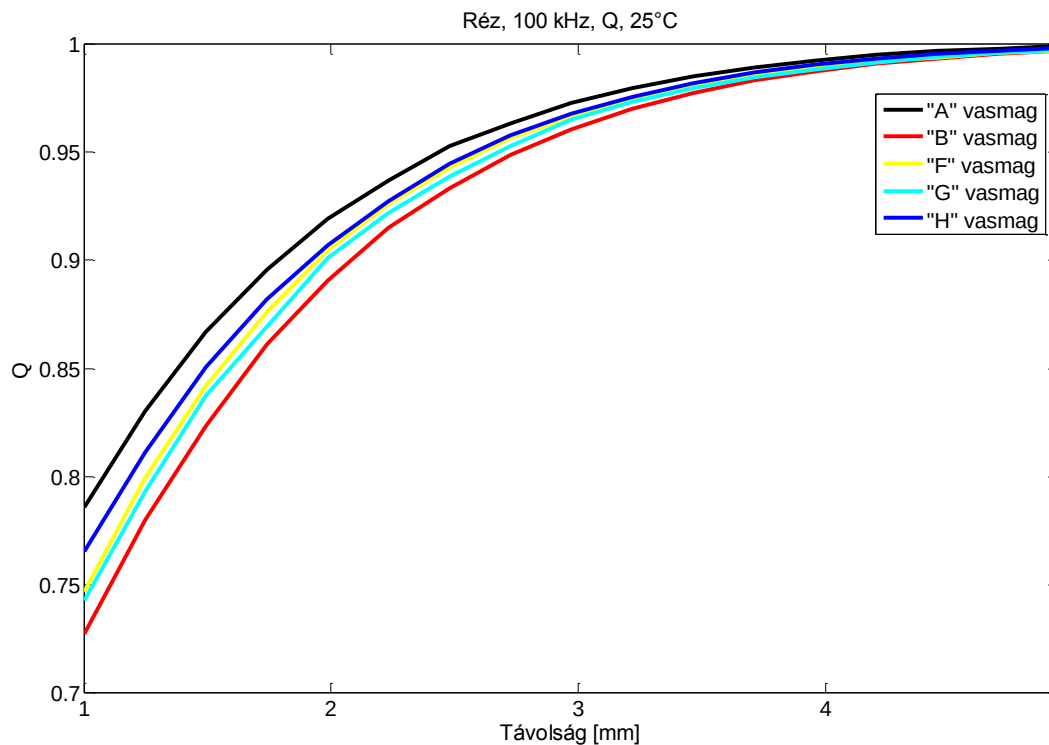
36. ábra: A vasmagok jósági tényezőjének normált értéke alumínium céltárgy esetén 5 és 13 mm közötti céltárgytávolságban

Jól látható, hogy az összes minta esetén mért érték 6 és 7 mm között érik el konstans értéket. Ez az alumíniumból készült céltárgy anyagparaméterinek köszönhető. Hasonlót tapasztalható réz esetén, ami a 37. ábrán látható.



37. ábra: A vasmagok jósági tényezőjének normált értéke réz céltárgy esetén

Jól látható, hogy a görbék már 4 és 5 mm között elérik a különböző vasmagok esetén mért jósági tényező maximumát. Ezért nem érdemes ezt 5 és 13 mm között vizsgálni. A 38. ábrán a jósági tényező alakulása látható 1 és 5 mm között.

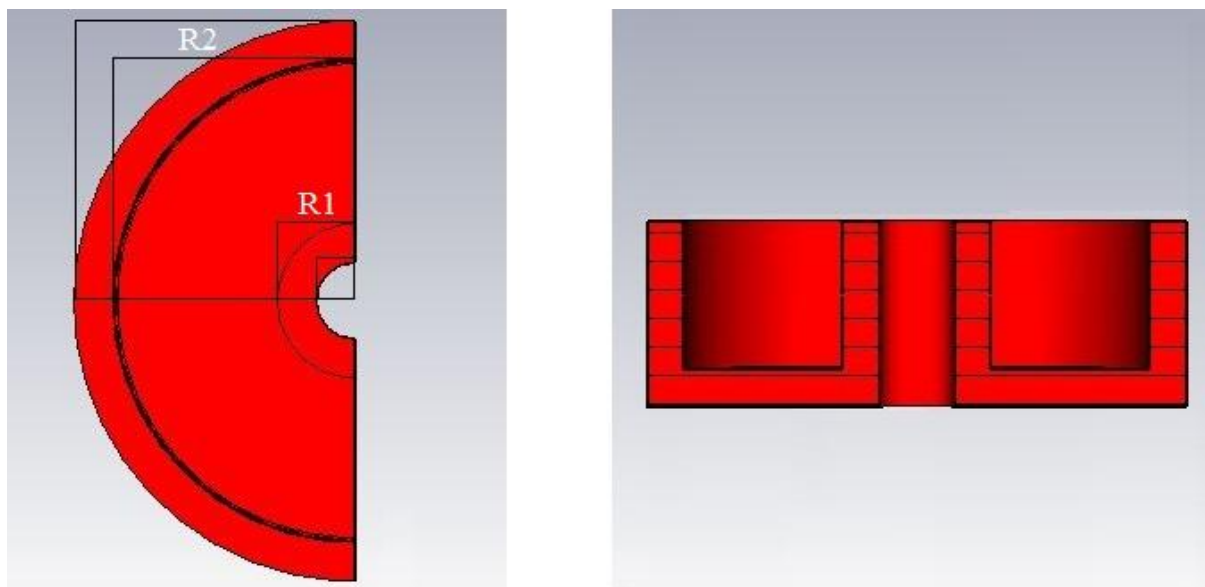


38. ábra: A vasmagok jósági tényezőjének normált értéke alumínium céltárgy esetén 5 és 13 mm közötti céltárgytávolságban

Mindkét ábrán megfigyelhető hogy a „B” vasmaggal épített minta jósági tényezője kevésbé meredeken növekedett, mint a másik négy vasmag esetében. A négy különböző anyagú céltárgy esetén mért értékek alapján elmondható, hogy a „B” és a „H” vasmaggal épített minták a legérzékenyebbek. Elmondható továbbá hogy a nagy vezetéssel bíró anyagokra, mint például az alumíniumra illetve a rézre kevésbé érzékenyek a minták, mint az acélból készült targetekre.

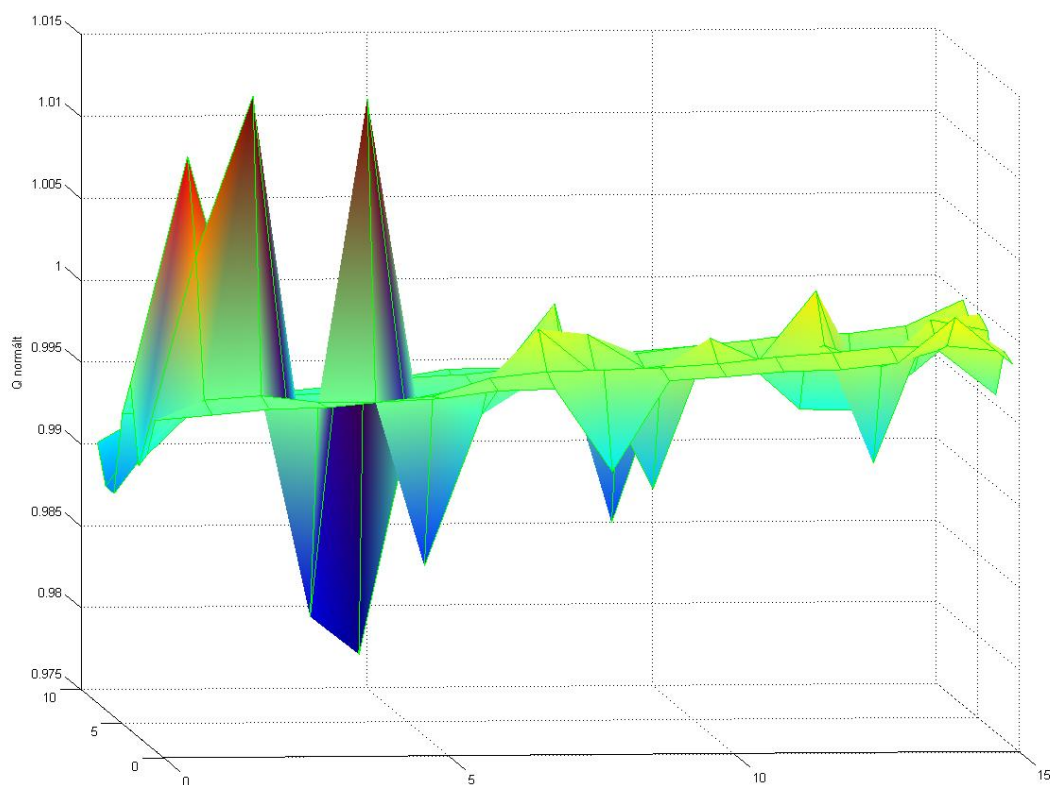
9. A KIMERÍTŐ KERESÉSES SZIMULÁCIÓ

Korábbi TDK és OTDK dolgozatomban végzett vizsgálatok és az előző fejezetben ismertetett tapasztalatok alapján meghatároztam két olyan geometriai paramétert, ami döntően befolyásolja a tekercs érzékenységét, amiből következtetni lehet a kapcsolási távolságra. Ez a vasmag belső hengerének sugara illetve a vasmag teljes átmérője. Ez jól látható az öt különböző minta esetében elvégzett méréseken is. Mivel két különböző paraméter befolyásolja a tekercs érzékenységét, tehát a kapcsolási távolságot, ezért kell lennie egy optimális geometriának. Ennek meghatározásához egy kimerítő keresés nevű szimulációs eljárást alkalmaztam. A kimerítő keresés azt jelenti, hogy az összes lehetséges variációt megvizsgálva jutunk el az optimális értékhez. Ez egy hosszadalmas folyamat sok változó esetén, de kevés változóval könnyen alkalmazható. Ezzel a módszerrel elvégzett szimuláció ebben az esetben nagyon hatékony. Az elvégzendő szimulációkhoz a FEMM környezetbe implementált Lua parancssor segítségével egyszerűen írható egy szkript ami a fent említett két változó esetén megvizsgálja az összes lehetséges geometriát. Az általam írt szkript a 2. számú mellékletben található. Meghatároztam azokat a határokat ameddig a vasmag geometriája kiterjedhet és ezen belül változtatta a szkript a belső henger átmérőjét és a vasmag teljes átmérőjét. A 39. ábrán egy hasonló ferrit mag CAD környezetben megrajzolt geometriája látható félbevágva.



39. ábra: Ferrit mag geometriája CAD környezetben

Az ábrán látható az R1 és R2-es paraméter, amit változott a szimuláció során. A program megírása során egyszerűbbnek véltem azt, hogy nem a geometriába berajzolt pontokat és vonalakat mozgatom a szkripttel, hanem minden egyes lépés elején újra rajzoltatom a ferrit mag geometriáját. Ezután lefutott a szimuláció, majd a tekercs paramétereit kiírta a konzolra illetve kimentette egy fájlba. A kiértékelés során azt vizsgáltam, hogy mekkora a jósági tényező értéke 8 milliméteres céltárgytávolság esetén, majd vettem a normált értékét. Tehát szükség volt a jósági tényező értékére 8 milliméter és 16 milliméter távolságban. Ezzel plusz két változóval bővült a szimuláció. Így összesen 256 szimulációt futtattam a végleges eredmény eléréséhez. Az eredményt egy 3 dimenziós ábrán jelenítettem meg így látványosabb az elért eredmény. Ez a 40. ábrán látható.



40. ábra: 3 dimenziós ábra a kimerítő kereséses szimuláció eredményéről

A 40. ábrán látható a különböző geometriák esetén 8 mm-ren számolt jósági tényező normált értéke. Az x és y tengely a két változót jelenti ami a geometriát határozza meg, a z tengely pedig a jósági tényező normált értékét. Az ábrán jól látható egy minimum érték, ahol nagy az eltérés az egységnyihez képest. Ez a geometria jelenti azt, ami a kapcsolási távolság szempontjából optimálisnak mondható. Az ábrán látszik továbbá pár érték, ami 1-nél nagyobb

értéket vesz fel, ez a szimuláció során bekövetkezett hibáknak tulajdonítható. Célom a jövőben ezt a geometriát részletesebb vizsgálat alá vonni szimulációval és egy esetleges mintagyártás után méréssel is, illetve úgy módosítani a szimulációt, hogy figyelembe vegye a beépíthetőséget is.

10. Konklúzió, jövőbeli tervek

Tudományos diákköri munkámban az ipari világ számára nagyon fontos területen végeztem kutatást. Dolgozatomban ismertettem a szenzorpiac egyik legfontosabb termékének tulajdonságait, működési elvét. Bemutattam az eszköz működését leíró fizikai egyenletekből kiindulva a végeselem-módszerrel történő szimulációjához szükséges potenciálformalizmusok gyenge alakját. A számításhoz egy ipari környezetben is jól használható, ingyenes végeselem szoftvert alkalmaztam, illetve ismertettem a szimulációs folyamat automatizálási lehetőségeit a Lua parancssor alkalmazásával. Megvizsgáltam öt, korábbi vizsgálatok alapján legyártott minták tulajdonságait szimulációval és méréssel. Elvégeztem a szimulációs modell validációját méréssel és analitikus megoldással. Összehasonlítottam a különböző minták érzékenységét a beépített tekercsek jósági tényezőik normált értékei szerint. Implementáltam egy Lua szkriptet ami a kimerítő kereséssel meghatároz egy optimális geometriát. Munkám legfontosabb eredménye, hogy meghatároztam egy olyan geometriát, ami esetén a tekercs érzékenysége maximális, ebből arra következtethetünk, hogy növekedett a szenzor kapcsolási távolsága. Bebizonyítottam, hogy FEMM környezetben végzett szimulációim megfelelnek a valóságnak és jól modellezik azt. Továbbá mérési eredményeim figyelembe veszik a szenzorok hőmérséklet és frekvenciafüggését, különböző geometriájú vasmagok és különböző anyagú céltárgyak esetén. Ezzel egy olyan átfogó adatbázist hoztam létre, amely nagyon hasznos lehet a Balluff Elektronika Kft.-nek a jövőbeli vizsgálatok során.

A jövőben szeretném figyelembe venni szimuláció során is a ferrit magok frekvenciafüggését, hogy még eredmények érdekében. Céлом továbbá a vizsgálataim kiterjesztése a beépíthetőség növelésére. Szimulációimhoz szeretnék MATLAB illetve, C környezetben saját megoldó algoritmust elkészíteni, illetve a számítási folyamatot felgyorsítani CUDA architektúrájú grafikus kártya használatával és genetikus algoritmus alkalmazásával. Így jelentősen lecsökkenthető az optimalizációs szimuláció futási ideje.

11. Irodalomjegyzék

- [1] J. Hegedűs, *Kétállapotú, elektronikus közelítéskapcsolók*. Miskolci Egyetem. Elektrotechnikai - Elektronikai Tanszék, 2011.
- [2] Gy. Bolla, *Szenzorika*. Tanfolyami jegyzet, Festo
- [3] M. Kuczmann, *Jelek és rendszerek*. Universitas, Győr, 2006
- [4] <http://www.kvalix.hu/termek/erzekelo/induktiv/ias.html>
- [5] <http://www.balluff.hu>
- [6] M. Jagiella, Fericean, S., Dorneich, A., "*Progress and Recent Realizations of Miniaturized Inductive Proximity Sensors for Automation*", *Sensors Journal, IEEE*, On page(s): 1734 - 1741 Volume: 6, Issue: 6, Dec. 2006
- [7] M. Jagiella, *Miniaturized inductive sensors for industrial applications*, *Sensors Journal, IEEE*, On page(s): 771 - 778 Volume: 2, Issue: 2, Nov. 2002
- [8] J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. J Wiley, New York, 1962.
- [9] I. Standeszky. *Elektrodinamika*. Universitas, Győr, 2006.
- [10] M. Kuczmann and A. Iványi. *The Finite Element Method in Magnetics*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
- [11] Z. Pólik, M. Kuczmann. *Rádiófrekvenciés Induktivitás Végeselem Analízise és Fejlesztési Lehetőségei*. OTDK Dolgozat, 2009.
- [12] O. Bíró and K. R. Richter. *CAD in Electromagnetism. in Series Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press*, New York, 82, 1991.
- [13] J. M. Jin. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. John Wiley and Sons, New York, 2002.
- [14] G. Gergő, M. Kuczmann, *Monopol Antenna Elektromos Terének Vizsgálata Numerikus Módszerekkel és Reflexiómentes Kamrában*. OTDK Dolgozat, 2011.
- [15] D. Marcsa, M. Kuczmann, Two-dimensional modeling of the motion in induction motor with ferromagnetic hysteresis, *Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique*, vol. 55, No. 4, pp. 351-356, 2010.
- [16] G. Kovács, *Potenciálformalizmusok alkalmazása kvázistacionárius elektromágneses terek szimulációjában*. Széchenyi István Egyetem, M.Sc. Diplomamunka, 2011.

-
- [17] G. Kovács, M. Kuczmann, Solution of the TEAM workshop problem No.7 by the finite element method, *Przegląd Elektrotechniczny* 87(3) pp. 99-102. (2011)
- [18] G. Kovács, *Potenciálformalizmusok összehasonlítása a T.E.A.M. No.7. problémakiírás kapcsán.* TDK, SZE, 2010.április 21.
- [19] I.N. Bronstejn, *Matematikai Kéziköny.* TypoTex, Budapest, 2002.
- [20] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics: User's Manual, 2010.
- [21] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM, 2010.
- [22] R. Ierusalimschy, L. H. de Figueiredo, W. Celes, Lua 5.0 Reference Manual, Rio de Janeiro 2003.
- [23] R. Ierusalimschy, Programming in Lua, Second Edition, Rio de Janeiro, 2006.
- [24] Agilent 4285A Precision LCR Meter: Operation Manual, Japan, 2001.
- [25] F. Pástyán, Az ellenállásmérés problémái, *Villanyszerelők szaklapja*, 2010.
- [26] <http://www.cts-umweltsimulation.de/>
- [27] F. Oláh, G. Rózsa, *Automatikai építőelemek*, Universitas, Győr, 2008

12. Melléklet

1. Melléklet:

```
showconsole()
clearconsole()
mydir="./"
anyag0="EC80"
anyag1="Stainless Steel"
anyag2="Copper"
anyag3="Aluminum, 1100"
if (freq==100000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_opt_100kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==200000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_200kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==300000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_300kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==400000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_400kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==500000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_500kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==600000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_600kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==700000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_700kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==800000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_800kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==900000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_900kHz_output.txt" ,"w"))
end
if (freq==1000000) then
ofile=(openfile(mydir .. "M18_A_1000kHz_output.txt" ,"w"))
```

```
end
for z=0,4 do
    for y=0,9 do
        if (y==0) then
            freq=100000
        end
        if (y==1) then
            freq=200000
        end
        if (y==2) then
            freq=300000
        end
        if (y==3) then
            freq=400000
        end
        if (y==4) then
            freq=500000
        end
        if (y==5) then
            freq=600000
        end
        if (y==6) then
            freq=700000
        end
        if (y==7) then
            freq=800000
        end
        if (y==8) then
            freq=900000
        end
        if (y==9) then
            freq=1000000
        end
        for x=0,3 do
            if (z==0) then
                open(mydir .. "A.fem")
                mi_saveas(mydir .. "/temp/temp_A.fem")
                print("A vasmag")
            end
            if (z==1) then
```

```
open(mydir .. "B.fem")
mi_saveas(mydir .. "/temp/temp_B.fem")
print("B vasmag")
end
if (z==2) then
open(mydir .. "F.fem")
mi_saveas(mydir .. "/temp/temp_F.fem")
print("F vasmag")
end
if (z==3) then
open(mydir .. "G.fem")
mi_saveas(mydir .. "/temp/temp_G.fem")
print("G vasmag")
end
if (z==4) then
open(mydir .. "H.fem")
mi_saveas(mydir .. "/temp/temp_H.fem")
print("H vasmag")
end
mi_probdef(freq,"millimeters","axi",1e-008)
    mi_selectlabel(8.6,1)
    if (x==0) then
mi_setblockprop(anyag0)
end
    if (x==1) then
mi_setblockprop(anyag1)
end
    if (x==2) then
mi_setblockprop(anyag2)
end
    if (x==3) then
mi_setblockprop(anyag3)
end
mi_setgroup(1)
mi_clearselected()
print(freq/1000,"kHz")
for n=0,64 do
    mi_analyze(1)
    mi_loadsolution()
```

```
        if (x==0) then
            print(anyag0," ",((0+n)/4)," ",current1," ",volt1,"
            ",flux1)
            write(ofile,anyag0,"      ",((0+n)/4),"      ",current1,"
            ",volt1," ",flux1,"\n")
        end
        if (x==1) then
            print(anyag1," ",((0+n)/4)," ",current1," ",volt1,"
            ",flux1)
            write(ofile,anyag1,"      ",((0+n)/4),"      ",current1,"
            ",volt1," ",flux1,"\n")
        end
        if (x==2) then
            print(anyag2," ",((0+n)/4)," ",current1," ",volt1,"
            ",flux1)
            write(ofile,anyag2,"      ",((0+n)/4),"      ",current1,"
            ",volt1," ",flux1,"\n")
        end
        if (x==3) then
            print(anyag3," ",((0+n)/4)," ",current1," ",volt1,"
            ",flux1)
            write(ofile,anyag3,"      ",((0+n)/4),"      ",current1,"
            ",volt1," ",flux1,"\n")
        end
        if (n<64) then
            mi_selectgroup(1)
            mi_movetranslate(0,0.25)
        end
    end
end
end
end
closefile(ofile)
```

2. Melléklet:

```

mydir="./"
showconsole()
clearconsole()
ofile=(openfile(mydir .. "output.txt" ,"w"))
for n=0,1 do
    for z=0,15 do
        for y=1,8 do
            open(mydir .. "optim_menet.fem")
            mi_saveas(mydir .. "temp_opt.fem")
            mi_addnode(y*0.2,0)
            mi_addnode(y*0.2,-2.67)
            mi_addnode(7.9-z*0.2,0)
            mi_addnode(6.69-z*0.2,0)
            mi_addnode(7.9-z*0.2,-3.84)
            mi_addnode(6.69-z*0.2,-2.67)
            mi_addsegment(0,0,y*0.2,0)
            mi_addsegment(y*0.2,0,y*0.2,-2.67)
            mi_addsegment(y*0.2,-2.67,6.69-z*0.2,-2.67)
            mi_addsegment(6.69-z*0.2,-2.67,6.69-z*0.2,0)
            mi_addsegment(6.69-z*0.2,0,7.9-z*0.2,0)
            mi_addsegment(7.9-z*0.2,0,7.9-z*0.2,-3.84)
            mi_addsegment(7.9-z*0.2,-3.84,0,-3.84)
            mi_selectgroup(1)
            if (n==0) then
                mi_movetranslate(0,8)
            end
            if (n==1) then
                mi_movetranslate(0,15)
            end
            mi_analyze(1)
            mi_loadsolution()
            current1,volt1,flux1=mo_getcircuitproperties("Coil")
            print(y," ",z," ",n," ",current1," ",volt1," ",flux1)
            write(ofile,y," ",z," ",n," ",current1," ",volt1," ",flux1,"\n")
            mi_close()
        end
    end
end
closefile(ofile)

```