

TDK

**Induktív technológia alapú szögszenzor
tervezése elektromágneses szimuláció
segítségével**

Kovács Adorján

konzulens: Pávó József

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Tartalomjegyzék

Ábrák jegyzéke	4
Táblázatok jegyzéke	5
1. Induktív szögsszenzorok az iparban	8
1.1. Szögsszenzorok	9
1.1.1. Potenciométeres szögmérés	9
1.1.2. Optikai szenzorok	9
1.1.3. Mágneses szenzorok (Hall-szenzor)	10
1.1.4. Kapacitív szenzorok	10
1.2. PCB alapú tekercek	11
1.3. Induktív elven működő szenzorok	11
1.3.1. Aktív tekerccs, passzív céltárgy alapú szenzor	11
1.3.2. Kölsönös induktivitáson alapuló szenzor	13
1.3.3. Adó- és vevő tekerccsből, valamint targetből álló elrendezés	15
1.4. ANSYS Maxwell szoftver	16
1.5. Jelfeldolgozás	17
1.5.1. LUT alapú szenzorok	17
1.5.2. Szinuszos kimenetű szenzorok	18
1.5.3. Zajok és zajszűrő eljárások	18
2. Aktív tekerccs, passzív céltárgy alapú szenzorok	19
2.1. A szenzor általános felépítése és működése	19
2.2. Mérési elvek	20
2.2.1. Induktivitás mérése	20
2.2.2. Frekvencia mérés	20
2.2.3. Ohmos veszteség mérése	21
2.3. Az induktivitás változtatása	21
2.3.1. A tekerccs és a vezetőréteg (target) távolságának változ-	
tatása:	21
2.3.2. A vezetőréteg (target) tekerccsel szemben lévő felületének	
változtatása:	21
2.4. Tekercs gerjesztése	22
2.5. Frekvenciakimenet mérése	23
2.6. Felfutó élek számlálása	23
2.7. Feszültségkimenet mérése	24
3. Szenzor modelljének felépítése	26
3.1. Egy induktív szögsszenzor tipikus felépítése	26
3.2. A hálózati modell	27
3.3. A térszimulációs feladat megfogalmazása	29
3.4. A szimulációs modell felépítése és verifikációja	30
3.4.1. A 2D szimuláció lehetőségei, korlátai	31
3.4.2. A 3D szimuláció lehetőségei, korlátai	32
3.4.3. Az induktivitás frekvenciafüggése	34

3.4.4.	A szimuláció korlátai	35
4.	A szenzor paramétereinek vizsgálata szimuláció segítségével	37
4.1.	A modellezett szenzor jóságát mutató paraméterek	37
4.1.1.	Felbontás	38
4.1.2.	Mechanikai tolerancia	39
4.2.	Geometriai követelmények	43
4.3.	Az induktív szenzor tekercsének tervezése	44
4.3.1.	Tekercs menetszáma (telítettsége)	44
4.3.2.	Tekercs tangenciális nyújtottsága	45
4.4.	Target tervezése	46
4.4.1.	A target javítása egyszerű módon	47
5.	Új szenzor tervek	49
5.1.	Kompenzátoros mérés	49
5.2.	Dupla targetes koncepció	50
5.3.	Analóg enkóder	51
5.4.	Hibrid elrendezés	53
5.5.	Koncepciók összehasonlítása	57
5.6.	További ötletek és továbbfejlesztési lehetőségek	58
6.	A tervezési tapasztalatok összegzése	59
6.1.	Követelmények	59
6.2.	A tervezés lépései	60
6.2.1.	Tervezési döntések	60
6.2.2.	Szimulációs feladatok	60
6.2.3.	Optimalizációs lehetőségek	61
6.3.	Konklúzió	62
7.	Hivatkozások	63

Ábrák jegyzéke

1.	Az aktív tekercs, passzív céltárgy alapú szenzor működési elve . . .	12
2.	Erőiránymérő induktív szenzor felépítésének, 3D-s (balra), illetve 2D-s felülnézeti (jobbra) vázlata	13
3.	Meanderes, kölcsönös induktivitáson alapuló szenzor	14
4.	Adó-vevőtekercsből, valamint targetből álló lineáris szenzor	15
5.	Példa változó keresztmetszetű targetre	22
6.	A felfutóélek számolása a mérési intervallumban	24
7.	Feszültség-kimenetet előállító Colpitts oszcillátor áramköri rajza	24
8.	Az előállított feszültségkimenet	25
9.	Általános felépítésű induktív szenzor	26
10.	Induktív szenzor szög mérésének módja	27
11.	A tekercs és a target hálózati modellje	28
12.	A szimulációban használt egyszerűsített hálózati modell	28
13.	A téglalap-teszt elvi alapja	30
14.	A negyed tekercsmodell	32
15.	A 2D-s tekercsmodellek Mágneses indukciójának tere. balról jobbra: 1 gyűrűs, 2 gyűrűs, 4 gyűrűs és teljesen részletes esetekben	34
16.	Az impedancia képzetes része a frekvencia függvényében	35
17.	+0,5 mm axiális elmozdulás hatása a téglalap-tesztre. A görbék a szürkétől a pirosig a 0.1 mm-es lépésközzel távolodó target téglalap-tesztjeit jelölik.	40
18.	Szendvics elrendezésű target mozgásának hatása az induktivitásra. A görbék a pirostól a liláig 0-0.5mm között, 0.1mm-es közönként mozgatott target téglalap-tesztjeit mutatják.	41
19.	A szendvics és a szimpla elrendezés h -ja axiális elmozdulás esetén.	41
20.	1 mm radiális elmozdulás esetében a frekvenciaráta és az átlagos hiba a tekercs nagyságának függvényében	42
21.	Axiális és radiális elmozdulások átlagos relatív hibája	42
22.	Target axiális és radiális elmozdulásaira különbözően érzékeny elrendezések	43
23.	A téglalap-teszt, változó menetszámú tekercs esetén A pirostól a lila görbéig 11-23 között egyesével nő az egy rétegen található menetszám	44
24.	A lineáris target forgatásának hatása változó nyújtottságú tekercs esetén A sötétkéktől a világoskékig (y tengely mentén pozitív irányba indulva) tartó görbék az egyre nyújtottabb tekercsekhez tartoznak	45
25.	A tangenciálisan változtatott hosszúságú tekercs kimenetének THD-ja és frekvencia rátája	46
26.	Lineárisan változó szélességű target	47
27.	A lineáris és a számított target összehasonlítása	48
28.	Kompenzátoros elrendezés	49
29.	Két targetet alkalmazó szenzor modellje	50

30.	Két targetet alkalmazó szenzor két, egymást kompenzáló induktivitásainak görbéje az elforgatás függvényében: 3-3 görbe tartozik össze, s mutatja egy tekercsre a párhuzamos, valamint az axiális-tól $+0.5^\circ$ -kal kibillentett pozícióban az értékeket.	51
31.	Félkör alakú targetet alkalmazó szenzor 3D modellje	52
32.	Az analóg enkóder-szenzor induktivitás-változásai	52
33.	A kimeneti induktivitások összege	53
34.	Analóg enkóder-hold hibrid elrendezés	54
35.	Hibrid elrendezés bizonytalan pontjai	55
36.	A szenzor kimeneti jelei, ahol a piros görbe az L_s , a kék görbe pedig az L_h értékeket mutatja az elfordulás szögének függvényében.	55
37.	Teljes fedésbe mozgatott téglalap-teszt. Az y-tengelyen az induktivitás, az x tengelyen pedig a téglalap és a tekercs középpontjának különbsége található, valamint a sötétzöldtől a pirosig az egyre szélesebb targetek görbéi láthatók	56
38.	Hálós target modellje	58

Táblázatok jegyzéke

1.	A 3D-s modellek szimulációs paraméterei	33
2.	A 2D-s és 3D-s modellek összehasonlítása	34
3.	A koncepciók összehasonlítása	57

Összefoglaló

Az elsősorban motorokhoz használt szögsszenzorok manapság a technológiai paletta széles skáláján mozognak. Léteznek nagyfelbontású és nagy pontosságú optikai és kapacitív szenzorok, nagy érzékenységgel és felbontású mikrohullám-alapú szenzorok, melyek előnye az, hogy kis méretben lehet megvalósítani őket, illetve vannak induktív technológia alapú szenzorok, melyek a többi technológiáknál jóval robosztusabbak a környezeti zavaró hatásokkal szemben.

Ezen szenzorok elsődleges felhasználása az autóiipar, melynek sajátossága az, hogy folyamatosan változnak a szenzorok irányába támasztott kritériumok. Az elektromos és önvezető autók térnyerése által nagy hangsúlyt kap az EMC-kompatibilitás és a robosztusság, a szenzoroknak ellenállóknak kell lenniük a terükbe bejutó nemkívánatos anyagokkal szemben, mint víz, olaj és egyéb szennyeződések, valamint a mechanikai igénybevétellel kapcsolatban - mint pl. rezgés, axiális és radiális elmozdulások - is magasak az elvárások. Hosszú távon ellenállónak kell lenniük a kopással, illetve az öregedésből fakadó változásokkal szemben. Ezen kritériumok mellett adott pontosság és felbontás elérése (megtartása) a cél úgy, hogy közben a redundancia biztosítva legyen és mindezt alacsony tartott bekerülési költségen kell biztosítani.

A PCB-n megvalósított induktív szenzorok előnye az, hogy olcsók, gyorsan prototípezálhatók, illetve az, hogy nagyon változatos geometriájú kialakításokat lehet létrehozni. Ez a rugalmasság biztosítja a lehetőséget arra, hogy a szenzor geometriájának optimalizálását el lehessen végezni.

Az induktív szenzorok működésének alapja Faraday indukciós törvénye. A szenzorok alapját egy tekercs képezi, mely interakcióban van legalább egy olyan objektummal, mely befolyásolja a tekercs terét. Ez az objektum tipikusan egy mágnes, egy másik aktív vagy passzív tekercs, esetleg egy réz vezető, melyben örvényáram alakul ki. A szögelfordulás hatására az objektum változó módon befolyásolja a kialakult teret, ezáltal a tekercs paraméterei is változnak. A szenzor kimenetén ezt a változó paramétert mérjük.

Az induktív szenzorok három nagy csoportba oszthatók:

1. Aktív tekercs és passzív céltárgy (target) alapú szenzor, mely esetében a gerjesztő tekercs egyben a mérőtekercs is. A targetben kialakuló örvényáramok hatása gyengítik a tekercs terét, ezzel módosítva annak induktivitását.
2. Két vagy több tekercs kölcsönös induktíván alapuló szenzor. Ezen szenzorok esetében az egyik tekercs a gerjesztő tekercs, míg a másik tekercs(ek) végzik az érzékelést. Ebben az esetben mindkét fél aktív.
3. Adó- és vevőtekercsből, valamint targetből álló elrendezés. A működés hasonlatos az 1. verzióhoz, azzal a különbséggel, hogy a gerjesztés és az érzékelés feladatát két külön tekercs látja el.

Dolgozatom célja az 1-es típusú szenzor architektúrájának tervezési és megvalósítási lehetőségeinek vizsgálata. A tervezés paraméterei az automotive ipar

követelményeiből származnak, azaz tolerancia, pontosság, felbontás, fizikai méretek, valamint költségbeli előírásokat kell figyelembe venni.

Elsőként szimulációs modell kialakításával foglalkozom PCB alapú tekercekhez ANSYS Maxwell szoftverben. Ezt követően meghatározom a bemeneti paraméterek kritériumainak teljesülését mutató arányszámokat, majd tanulmányokat végezek a paraméterek közötti összefüggések vizsgálatára.

Végül megfontolásokat teszek egy olyan eljárással kapcsolatban, mely segítségével a megfelelő iterációs lépések elvégzése által adott paraméterekkel rendelkező szenzort lehet tervezni.

A cél egy olyan szenzor előállítása, mely kimenete minél egyszerűbb módon (és ezáltal minél olcsóbb technológiával) feldolgozható. Dolgozatomban ezért kitérek a szenzor kimenetét érintő jelfeldolgozási kérdésekre is [1].

1. Induktív szögsszenzorok az iparban

A szögsszenzorok felé támasztott folyamatosan változó követelményeknek és bővülő lehetőségeknek köszönhetően különböző technológiai trendek figyelhetők meg. Az újabb és újabb favorit technológiák fejlesztői keresik a lehetőséget a minél olcsóbb, hatékonyabb, kevésbé zavarérzékeny szenzorok tervezéséhez és kivitelezéséhez.

Irodalomkutatást végeztem annak érdekében, hogy feltárjam azt, hogy milyen technológiájú szögsszenzorok léteznek, illetve hogy az egyes technológiák milyen előnyökkel-hátrányokkal rendelkeznek, milyen módon jutottunk el a ma legnépszerűbb új technológia, az elektromágneses elven működő induktív szenzorokhoz.

Az induktív technológián alapuló szenzorokat az irodalom alapján strukturális felépítésük szerint három nagy kategóriába lehet sorolni. Ezen kategóriákon belül megtalálhatóak elmozdulás, szög, és erő mérésére alkalmas szenzorok, mely szenzorokkal kapcsolatban megjelent cikkek az induktív technológia körül felmerülő kérdésekre keresik a választ. Érdeemes alaposan megismerni ezeket a kategóriákat, hiszen az egyik típusban megtalált válasz hatással lehet egy, a másik típusal kapcsolatban felmerült probléma megoldására.

Az induktív szenzorok alapját PCB-n megvalósított tekercsek képezik. A nyomtatott áramköri technológia fejlődésével egyre komplexebb és egyre pontosabb geometriákat lehet megvalósítani. Sokan foglalkoztak már ezen tekercsek vizsgálatával és leírásával, mely kutatások eredménye figyelemre méltó dolgozatom témájának szempontjából.

Az induktív technológia kutatása és fejlesztése relatíve kis költségekkel megvalósítható, mivel gyorsan és olcsón lehet PCB tekercsokat gyártani. Ennek eredményeképpen a fejlesztés egy-egy iterációs lépésében valós prototípusokkal lehet dolgozni, a tervezett elrendezést valós eszközön lehet lemérni. Sok esetben azonban a geometria vagy a mérési elv bonyolultabbá válásának köszönhetően sokkal hatékonyabban lehet modellezés és elektromágneses térszimuláció segítségével megvalósítani a geometriák tervezését és lemérését. Ilyen jellegű szimulációkra legtöbbször ANSYS maxwell végeselemes szoftvert használnak, s mivel nekem is ezen szoftver használatára volt lehetőségem megismerkedtem a szoftver működésével, használatával, és ezt használtam a szimulációkhoz.

A szenzorok ipari felhasználása esetén nem csak kizárólagosan a szenzor működési elve, technológiája, pontossága a kérdés, hanem az is, hogy milyen jelfeldolgozási módszerekkel lehet a felhasználó által igényelt jelet előállítani. Sok múlik ezen a ponton, hiszen el kell tudni különíteni a kompenzálható vagy szűrhető hibákat az olyan hibáktól, melyek rontják a mérést. Egyúttal az sem mindegy, hogy az olcsó, PCB-n megvalósított tekercs milyen feldolgozást igényel: egy komplex mérő rendszert (impedancia vagy spektrumanalizátort), vagy egy egyszerű célegységet (AD-vel, timerrel rendelkező kontrollert). Az irodalomkutatás részeként megismerkedtem a jelfeldolgozási és a különböző kompenzációs megoldásokkal.

1.1. Szögsszenzorok

A forgásszög érzékelésére régóta létezik számos megoldás. Az egyes megoldások azonban nagymértékben eltérnek egymástól annak függvényében, hogy mi a célfelhasználás. Változó, hogy egy szenzor hány fordulat átfogására alkalmas, illetve az, hogy milyen pontos kimenetet biztosítva és milyen körülmények között kell működnie. Az alábbi fejezetben olyan szögérzékelési megoldások kerülnek ismertetésre, melyek motorok szöghelyzetének mérésére használatosak. A megoldások ismertetése az automotive iparág szempontjai ismeretében történik. Ebben az iparágban a cél minél olcsóbb kivitelű, minél pontosabb, minél biztonságosabb rendszert létrehozni, mely megfelel a környezeti követelményeknek is: kis helyen elfér és jól bírja az extrém hőmérsékleti körülményeket.

1.1.1. Potenciométeres szögmérés

A potenciométeres mérés alapja az, hogy a szögelfordulás hatására a kivezetések közötti impedancia (ellenállás) változik. Ez a gyakorlatban úgy valósul meg, hogy adott egy (feltekercselt) ellenálláshuzal, melyhez egy csúszó érintkező csatlakozik. Ez az érintkező az ellenálláshuzal két vége mellett harmadik kivezetésként funkcionál. Ezt mozgatva a megfelelő kivezetések között változik az ellenállás az $R = \rho \frac{l}{A}$ képlet szerint, (ahol R a vezeték ellenállását, ρ a fajlagos ellenállást, l a vezeték hosszát és A a vezeték keresztmetszetét jelöli), mert érintkező és a végpont között változik a mérőhuzal hossza. Az ellenálláson eső feszültség változását mérve lehet például mérni annak változását.

Előnyök:

- Egyszerű kivitel.
- Könnyen kiértékelhető mérés.
- Lineáris kimenet.
- Abszolút szögmérés.

Hátrányok:

- Kopásra nagyon érzékeny mechanikai rendszer.
- Hőmérsékletre érzékeny.
- Pontatlan, nagy felbontású kiértékelésre nem alkalmas.
- Korlátozott számú fordulat átfogására alkalmas (tipikusan 1)

1.1.2. Optikai szenzorok

Az optikai szenzorok a következő elvet használják: adott egy tárcsa, mely stabilan rá van rögzítve a mérni kívánt forgó alkatrészre. A tárcsán egy meghatározott minta szerint felváltva vannak fényáteresztő illetve fényt át nem eresztő felületek. A tárcsa mellett adott egy rögzített optikai érzékelő: fény kibocsájtó és fényérzékelő diódák. A tárcsa forgatásának hatására az érzékelő diódán négyyszögjel jelenik meg a fényt kitakaró és áteresztő felületek váltakozásának hatására. A minta változtatásával lehet abszolút pozíciót meghatározni valamint a mérés pontosságát növelni [2, 3, 4].

Előnyök:

- Abszolút szöghelyzet adásra alkalmas tárcsa könnyen kialakítható (több adó-vevő felhasználásával).
- Egyszerű mérési elv.
- Könnyen feldolgozható digitális kimeneti jel.

Hátrányok:

- Mechanikai kivitel érzékeny: a tárcsa rezeghet, elmozdulhat.
- Az optikai érzékelést nagyban rontja a rendszerbe bejutó por, illetve a rendszerben keletkező forgácsolódott részecskék.
- Érzékeny a LED és a tárcsa a gyártási paraméterek szórására.

1.1.3. Mágneses szenzorok (Hall-szenzor)

A HALL-szenzor alapja egy áramjárta vezető hurok, mely egy állandómágnes terét méri. A vezető hurokban lévő elektronok mágneses tér jelenlétének hatására a hurok egyik végére terelődnek. Ez az elmozgás potenciálkülönbséget eredményez a hurok két oldala között. A hurok kialakításától függően lehet két irányban is mérni a potenciálkülönbséget, ezáltal meg lehet pontosan határozni hurok tengelyébe eső mágnes elfordulásának szögét [5].

Előnyök:

- Statikus, nem változó mágneses teret is képes mérni.
- Sok Hall effektet használó IC van a piacon.
- A szenzor kimeneti feszültségének mérésére tetszőlegesen pontos megoldások léteznek.

Hátrányok:

- Rendkívül érzékeny az elektromágneses zajokra.
- A pontos mérés precíziós alkatrészeket igényel, mely drágává teszi a megoldásokat.

1.1.4. Kapacitív szenzorok

A kapacitív szenzorok alapja egy multi-elektrodos elrendezés, mely kinézetre hasonlatos az optikai szenzoréhoz: mintát hordozó forgó tárcsából és a mintával szemben elhelyezkedő állórészből áll. A szenzor mérése az álló és a forgórész közötti kapacitások változásán alapul [6, 7, 8, 9].

Előnyök:

- Kis energiafogyasztása van.
- Nagy felbontás és pontosság.
- Egyszerű felépítésű.

Hátrányok:

- Érzékeny a parazitakapacitásokra.
- Érzékeny a külső elektromos térre.
- Mechanikai zajokra érzékeny.
- Csak viszonylag alacsony szögsebességgel forgó tárgyhoz alkalmas.

1.2. PCB alapú tekercsek

Sok területen alkalmaznak manapság PCB-n kialakított tekercseket: tápáramkörök, inverterek, szenzorok. A szenzorokon belül is több különböző felhasználásban találkozhatunk ilyen tekercsekkel: örvényáramú teszteléshez anyagvizsgáló szenzorokban (ECT: Eddy Current Testing) [10], közelítésérzékelők [11], valamint kémiai vegyületek koncentrációját vizsgáló szenzorok [12] esetében. A PCB-n megvalósított tekercsek előnye az, hogy jól parametrizálható, pontosan kivitelezhető és olcsó tekercseket lehet kialakítani. Sokan foglalkoztak már a tekercsek lehetséges formáinak vizsgálatával. Bizonyos esetekben a tekercs induktivitásának számolása zárt alakba hozható, de az esetek nagy többségében szimuláció segítségével lehet a geometriák induktivitását meghatározni [13, 14].

Topológia alapján alapvetően két különböző típust lehet felfedezni: meanderes, hosszanti elrendezés [14, 15], valamint spirális elrendezés sokszög vagy kör alakban [13, 15]. Meghatározhatók paraméterek, melyek az egyes geometriákat minősítik: az induktivitás frekvencia-függése, a tekercs jósági tényezője. A tekercs geometriája mellett a PCB technológiának köszönhetően könnyedén változtatható a tekercsek menetszáma is (a PCB rétegszámának változtatásával), ezzel is lehet az induktivitásokat hangolni [13].

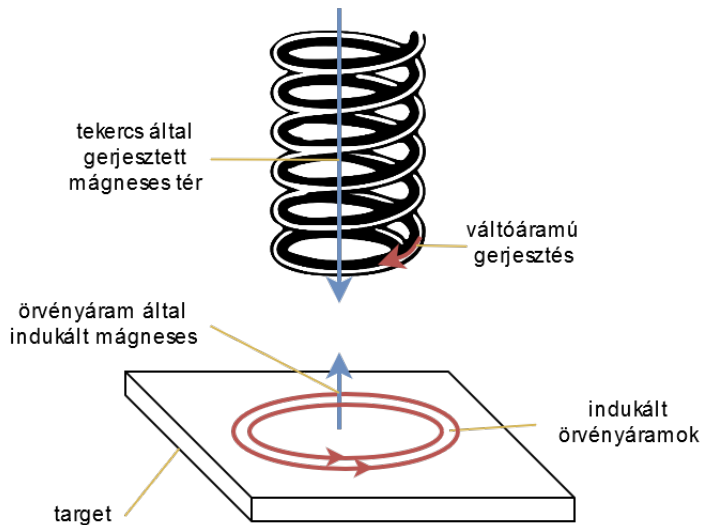
1.3. Induktív elven működő szenzorok

A fentebb ismertetett elfordulás-érzékelésre használt elvek mivel már régóta működnek, jól kifejlett technológiával rendelkeznek, sok működő rendszer bizonyítja hatékonyságukat és megbízhatóságukat. Azonban az automotive ipar folyamatosan újabb és újabb kihívást támaszt a meglévő technológiák így a szögsszenzorok felé is: egyre hosszabb az elvárt élettartam, nagyobb a pontossági igény és a zavarérzéketlenséggel szembeni követelmény. Az elektromos és a fejlesztés alatt lévő önvezető autók megjelenése nagyban gyorsítja ezeket a folyamatokat hiszen szigorodnak a biztonsági kritériumok is. Ennek köszönhetően új elvek, technológiák kipróbálására van szükség. A mechanikai hatásokra való kisebb érzékenysége miatt kezdenek egyre jobban előtérbe kerülni a különböző induktív elvre alapozott technológiák. Az induktív elven működő szenzorokat működési módjuk szempontjából három nagy csoportra lehet osztani. A következő alfejezetekben ismertetem ezeket a típusokat.

1.3.1. Aktív tekercs, passzív céltárgy alapú szenzor

A szenzor mérési elve a 1. ábrán látható, a következőképpen épül fel: van egy tekercs, mely váltóáramú gerjesztést kap, és a tekercssel szemben helyezkedik el egy jó vezető célfelület (target). A tekercs váltóáram hatására elektromágneses teret épít fel maga körül. A változó mágneses tér a célfelületben örvényáramot indukál, mely örvényáram felépíti a maga elektromágneses terét. Ez az ellentét gyengíti az eredeti tekercs terét, ezáltal csökken a tekercs induktivitása.

Ezen működési módszert használó egyik legegyszerűbb és leghatékonyabb kivitel működésének lényege az, hogy az egyik végállásban a target a tekercs teljes felületét eltakarja, ezáltal okozva minimális induktanciát, illetve a másik



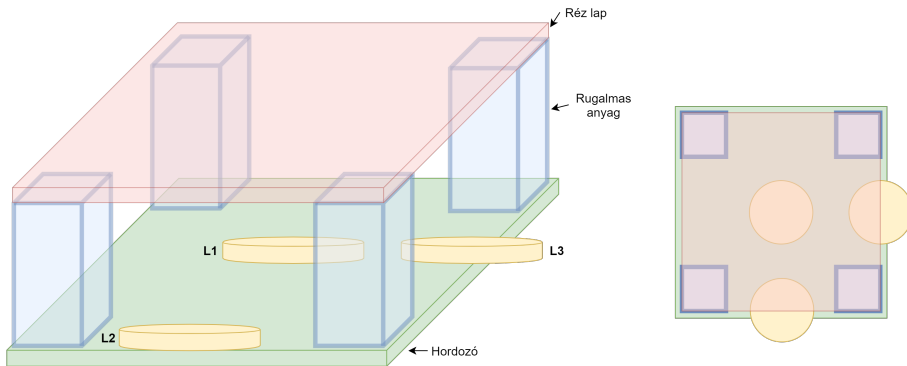
1. ábra. Az aktív tekercs, passzív céltárgy alapú szenzor működési elve

végállásban a tekercs teljesen a közelben levő vezetőanyag hiányában nem kelt örvényáramokat, ezáltal maximális induktivitással rendelkezik. Az ilyen megoldásokból létezik elmuzdulás-érzékelő[16], illetve szögelfordulás-érzékelő szenzor is[17]. Másik egyszerű megoldás az, ha a tekerccsel szemben állandó mágneset helyezünk el[18, 19]. Ekkor az induktivitás megváltozása stabil, és relatíve alacsony frekvencián is tud működni a szenzor. A működési frekvencia alsó korlátját a target vastagsága határozza meg. A frekvencia csökkenésével nő a behatolási mélység, azaz annak érdekében, hogy jelentős nagyságú örvényáramok kialakuljanak a targetben, nem mehetünk bizonyos frekvencia alá. Amennyiben a target PCB-n kerül kialakításra, a frekvenciának MHz nagyságrendűnek kell lennie, míg állandó mágneses esetben elég kHz-es nagyságrendben maradni.

A 2. ábrán látható komplexebb elrendezésben egyszerre három tekercs dolgozik együtt, melyek a megfelelő fizikai kialakítás és elrendezés segítségével a szenzorra ható erők irányának mérésére alkalmasak, a következő módon: adott egy lap, melyen található három tekercs, és mindhárom tekerccsel szemben található egy-egy target egy másik lapon, mely rugalmas anyaggal van rögzítve az első laphoz. Az egyik tekercs méri a két lap távolságát, míg a másik két tekercs az x,y irányú elmozdulást (és a távolságot). A három szenzor kimenetének összevetéséből meg lehet határozni a szenzorra ható erők irányait [20].

Van olyan szenzor, ahol a tekercek sorba vannak kötve egymással, és úgy szolgálnak a mérés alapjául. Így lehet például hajlítást, nyúlást mérni [21], illetve szög szenzor esetében szinuszos kimenetet előállítani, melyből könnyedén számolható az elfordulás szöge [17].

Az elektromágneses szimulációnak köszönhetően lehetőség nyílik bonyolultabb tekercs-geometriák tervezésére és megvalósítására. Ezen geometriák se-



2. ábra. Erőiránymérő induktív szenzor felépítésének, 3D-s (balra), illetve 2D-s felülnézeti (jobbra) vázlata

gítségével elérhető az, hogy minél könnyebben feldolgozható kimenetet tudjunk előállítani.

Létezik szögsszenzor, mely egy tangenciálisan elnyújtott forgó tekercsekkel rendelkezik. A szenzor körlapján három körcikk formájú tekercs található. A tekercsek menetei közötti távolság az egyik sugár irányba tartó oldalon akkora, hogy az egyes menetek felülete eltér egymástól. Ezáltal a tekercs inhomogén teret hoz létre, mellyel szemben ha elforgatunk egy targetet, az induktivitás változni fog [22].

Egy lineáris szenzor spaciális, háromszög alakú tekercscsel rendelkezik, mely elrendezésben a mozgó targettel szemben változó szélességű tekercs található, ez okozza a mérni kívánt effektust, hiszen az induktivitás-változás függ a tekercscsel szemben található target felületétől [23]. Az irodalomban található olyan speciális szarv alakú tekercs is, mely apró szögelfordulások mérésére alkalmas. A tekercs geometriájának segítségével lehet szögelfordulás hatására kialakuló kimeneti jelet hangolni[24].

A végső cél az, hogy a tekercs és a target is a kimeneti jelalak és a zavarérzékenység szempontjából optimális kivitelben valósuljon meg.

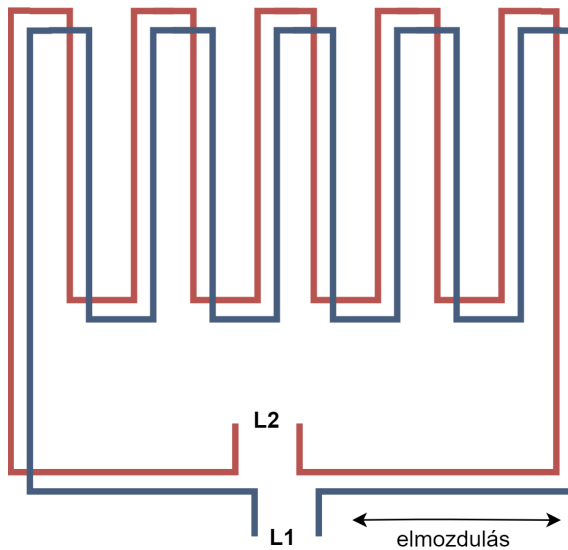
Az egyetlen aktív tekercses elrendezés legnagyobb előnye az, hogy csak az egyik felet kell táplálni, így a másik oldal vezeték nélkül is működőképes. Ennek köszönhetően előszeretettel használják azt a technológiát az orvosi iparban is [25].

1.3.2. Kölcsönös induktivitáson alapuló szenzor

A szenzor működése egy primer és egy vagy több szekunder tekercs közötti kölcsönös induktivitás változásán alapul. A két tekercs között bizonyos esetekben vasmag, más esetekben légmag található. A kölcsönös induktivitás változását vagy a vasmag elmozdulása, vagy a tekercsek relatív helyzetének megváltozása okozza [26, 27]. A primer tekercs váltóáramú gerjesztést kap, amely ezáltal változó mágneses teret hoz létre maga körül, mely tér a szekunder tekercsben

váltóáramot indukál. A kölcsönös induktivitás (vagy az ebből számított csatolási tényező) változásának hatására a szekunder tekercs árama változik, s arányos lesz a fizikai elmozdulással. A szenzorok kimenete így impedancia jellegű, a mérést tipikusan impedancia-analizátorral végzik, vagy feszültségkimenet kialakítása után ADC-vel [26].

Ezen típuson belül léteznek lineáris változást valamint szögváltozást érzékelő kialakítások. Az előzőek kombinációjából erő és nyomaték-szenzor is kialakítható [28]. A tekercsek öninduktivitása nagyban függ attól, hogy rendelkeznek-e vasmaggal, illetve ha rendelkeznek, akkor az a vasmag milyen anyagú és méretű, valamint geometriailag hol helyezkedik el.



3. ábra. Meanderes, kölcsönös induktivitáson alapuló szenzor

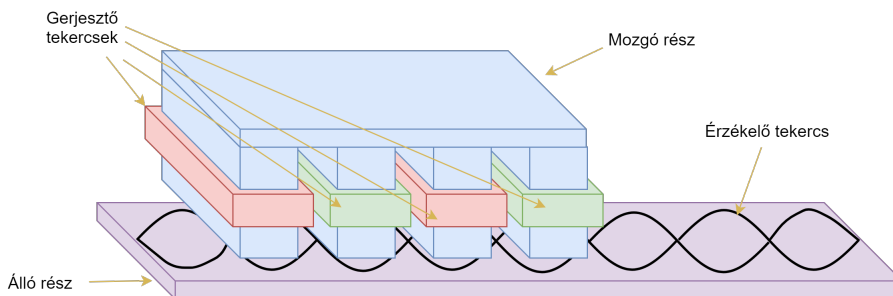
Az ilyen szenzorok legegyszerűbb alapesete a 3. ábrán látható, egy meanderes elrendezés: két kanyargó tekercs egymáshoz képest való síkbeli elmozdulását vagy távolságuk növekedését, esetleg mindhárom irányba való elmozdulást lehet mérni. A 3 irányú elmozdulás mérése egy ügyes mechanikai kialakítás segítségével akár erőmérésre is használható. A meanderező tekercs geometriájának finomításával további linearizálás és pontosítás érhető el a szenzor kimenetén [29, 30, 29, 31]. Ez a meanderes elrendezés mikrométeres szinten is működik a vékonyréteg-technológiának köszönhetően[32].

1.3.3. Adó- és vevő tekercsből, valamint targetből álló elrendezés

A működés hasonlatos az aktív tekercs, passzív target alapú verzióhoz, azzal a különbséggel, hogy a gerjesztés és az érzékelés feladatát két külön tekercs látja el, azaz van egy gerjesztő tekercs, egy target valamint érzékelő tekercs(ek). A gerjesztő és az érzékelő tekercs pozíciója egymáshoz képest fix, a target elmozdulása módosítja a gerjesztőtekercs által az érzékelőtekercsben gerjesztett hatás mértékét.

A legegyszerűbb felhasználása ennek az elrendezésnek a tekercsek és a target közötti rés méretének változtatása és mérése, mely közelítésérzékelőként tud funkcionálni [33]. Egy következő szintén egyszerű és robusztus elrendezés hasonlít egy egyszerű légmagos transzformátorhoz, mely tekercsei koncentrikusan helyezkednek el. A koncentrikus tekercsek egymáshoz képesti elmozdulása módosítja a tekercsek közötti csatolási tényezőt, ezáltal a szekunder tekercsben indukált feszültség amplitúdója változik, mely változás a szenzor kimeneteként szolgál [34]. Az egyszerű távolságszenzor mellett hasonló elveken alapszik egy nyírásérzékelő szenzor is. Frappáns geometriai kialakítás segítségével a dimenziók mentén közeledő vagy távolodó targetek által okozott induktivitásváltozásból lehet a nyírásra következtetni [35].

A minimum két tekercses rendszernek köszönhetően akár igen komplex geometriát is meg lehet valósítani. Az ilyen elrendezések alapja az, hogy a gerjesztő tekercs és az érzékelő egy PCB-n van kialakítva. A gerjesztő tekercs körben helyezkedik el, több menettel úgy, hogy a lehető legnagyobb felületet kihasználja aktív tekercs felületnek. Az érzékelő tekercsek szinuszos formát vesznek fel, ezáltal determinálva azt, hogy a tekercs kimenetén szinuszos jel keletkezzen. Ezen alapelrendezést lineáris elmozdulásra és szögmozdulásra is lehet alkalmazni.



4. ábra. Adó-vevőtekercsből, valamint targetből álló lineáris szenzor

A 4. ábrán egy lineáris elmozdulást mérő elrendezés található. Mind a lineáris, mind a szögsszenzor esetében a kimeneti szinuszos jelek fázisát mérik. Ez nehezen mérhető paraméter, speciális FPGA-alapú feldolgozó áramkör kell hozzá, cserébe pontos kimenettel rendelkeznek: egy ilyen elven működő lineáris szenzor esetében $0.6 \mu\text{m}$ pontosság [36] a szögsszenzor 12 szögperc pontosság érhető el [37].

Egy további megoldás egyszerűbb fizikai felépítéssel rendelkezik, azonban a feldolgozás oldalán magasabb szintű logikára van szükség. A szenzor két érzékelő tekercsel rendelkezik, mellyel szemben két, az optikai enkóderekben használt tárcsákhoz hasonlatos tárcsa helyezkedik el. Ezen tárcsák periódusszáma relatív prím, ezáltal a két feszültségkimenet összevetésével abszolút szöget lehet meghatározni 0.5° -os pontossággal [38].

Bizonyos szenzorok esetében a target nem egy vezető lap (melyben örvényáram indukálódik), hanem egy önmagába zárt tekercs (esetleg egy kondenzátorral hangolt rezgőkör), mely elmozdul egy hosszanti, elnyújtott szinuszos elrendezéssel bíró érzékelő tekercs fölött. Ez az elrendezés nagy felbontás elérésére képes [18, 19]. A szenzor típusának komplexitásából adódóan intuitív alapokon nem tervezhető egy ilyen szenzor, ezért van szükség a sikeres fejlesztés kivitelezése érdekében elektromágneses szimuláció alapú paramétervizsgálatra és optimalizálásra [39, 38].

1.4. ANSYS Maxwell szoftver

Az elektromágneses szimulációs szoftverek piacán az ANSYS Maxwell egy vezető végelem szoftver. Az általam áttanulmányozott kutatások nagyrésze ezt a szoftvert használta, és nekem is adódott lehetőségem a használatára, így a szimulációkat az ANSYS végeleemes szoftver Maxwell moduljával végeztem. A Maxwell modul kifejezetten elektromágneses térszimulációs problémák megoldására lett kifejlesztve, azon belül is kis-és középfrekvenciás feladatokhoz.

Hat nagy feladattípusra osztja az szoftver az elektromágneses problémákat [40]:

- Magnetosztatika (Magnetostatic)
- Örvényáramú analízis (Eddy Current)
- Tranziens mágneses analízis (Transient Magnetic)
- Elektrosztatika (Electrostatic)
- Egyenáramú analízis (DC Conduction)
- Tranziens elektromos analízis (Transient Electric)

A Tranziens megoldó kivételével az összes megoldó adaptív hálógenerálással rendelkezik, ami azt jelenti, hogy a megoldás során a háló lépésről lépésre finomodik úgy, hogy a megadott geometriával rendelkező feladat megoldása a geometrián a megválasztott paraméterek szerint minél pontosabb legyen.

A feladattípusoknak megfelelően a szoftver a Maxwell-egyenleteket a meghatározott módon használja. Az egyenletek alapján előállított peremérték-feladatok megoldásához a végelem-módszert alkalmazza, mely módszert az analitikusan nem megoldható, bonyolult terek megoldására dolgoztak ki. A módszer a vizsgált tartományt véges elemekre, 2D-ben háromszögekre és 3D-ben tetraéderekre bontja, mely elemek alkotják a hálót. A tetraéderek csúcspontjaiban és éleinek felezőpontjában kerülnek a térjellemezők, elemenként másodfokú

kvadratikus polinomokkal. A hálón történő diszkrétizáció után a peremérték feladat egy lineáris egyenletrendszerbe megy át:

$$[S][H] = [J]$$

amely $[S]$ rendszer mátrixa ritka mátrix. $[H]$ az ismeretleneket tartalmazó vektort, $[J]$ pedig az egyenletek jobb oldalát tartalmazó vektort jelöli.

Az egyenlet megoldható ritka mátrixok Gauss-eliminációjával (Sparse Gaussian Elimination). Az egyenletek megoldása után sor kerül a feladattípusonként megadott kifejezések segítségével az energiahiba (vagy az előírt paraméter hibájának) meghatározására. Ez a hiba a rendszer összes energiájára vonatkoztatva mutatja meg azt, hogy a megoldás mennyire jó közelítés. A közelítés elvárt mértéke előírható az adaptív megoldó számára, ez határozza meg azt, hogy hány lépésben kerüljön sor a háló finomítására. A háló finomodásával nő az elemek száma, s ezáltal a feladat megoldásához szükséges számolási igény, azaz a futási idő. A szoftver alkalmazásakor az igazi mérnöki feladat a modell kalibrálása és a kapott eredmények értékelése.

1.5. Jelfeldolgozás

A szenzorok szempontjából a jelfeldolgozás egy kritikus pont. Itt lehet kompenzálni a szenzor hibáit, valamint a zajok, zavarások által okozott hibákat. Ezen a ponton is múlik a szenzor egyszerűsége, és a felmerülő költségek. Lehet tervezni egyszerű szenzort, de ha elég komplex jelfeldolgozást igényel, elveszítjük az egyszerűségből fakadó előnyöket. A következő részben ismertetem azt, hogy milyen jelfeldolgozási megoldások léteznek az induktív szenzorok kimenetének feldolgozására és a hibák kompenzálására.

1.5.1. LUT alapú szenzorok

A legkézenfekvőbb és legegyszerűbb megoldás az, ha a szenzort a konstruálási folyamat során egy referenciaszenzor segítségével lemérjük, és a mérési eredmények alapján felvesszük a karakterisztikáját táblázatos formában (Look-up-table, LUT). A szenzor használata során ezt a karakterisztikát alkalmazva vissza lehet számolni a mért adatokból elmozdulás vagy elfordulás értékeket. Ezen szenzorok esetében kritikus a LUT mérete, valamint a karakterisztika felvételének, mérésének körülményei [5]. A gyárthatóság szempontjából nem mindegy, hogy a karakterisztikát minden egyes szenzor esetében fel kell-e venni, vagy elég egy design-ra egyszer megtenni ezt. Emellett amennyiben a környezeti változók (hőmérséklet, pára, stb.) hatására változik a szenzor karakterisztikája, a LUT-on is változtatni kell.

1.5.2. Szinuszos kimenetű szenzorok

Elfordulásmérés esetén kézenfekvő megoldás szinuszos kimenetet előállítani, hiszen ilyen jelet könnyű előállítani és könnyedén lehet belőle szöveget számolni. A pontosság növelése érdekében sok esetben legalább két (különböző fázisban levő) szinuszt mérnek a szenzor kimenetén. E két jel méréséből arcus tangens számolásával pontosabb kimenetet lehet elérni [38, 41, 8]. Az arcus tangens számolását tipikusan az atan2 függvénnyel végzik, mely két paramétert vár, ezáltal képes kezelni a tangens függvény szakadásait. A szinuszos kimenet mérésére már több ASIC (alkalmazás-specifikus integrált áramkör) megoldás is létezik [41]. Egyes megoldások a \sin - \cos jelpáron végeznek korrekciót és zajszűrést, felhasználva azt, hogy a két jel összepárosítva, x - y változóként felvéve az amplitúdó függvényében valamiféle ovális görbén mozog (Lissajous görbe). [42]

1.5.3. Zajok és zajszűrő eljárások

A szög szenzorok, enkóderek kimenetén sokféle hiba jelenhet meg főképp nullpozíció hiba és osztási hiba [43, 44]. Ezen hibák kiszűrésére és kompenzálására különböző eljárások születtek. Léteznek például önkalibráló algoritmusok optikai szenzorhoz [3], mely a szenzor paramétereiből (LED öregedés, hőmérséklet eltolás) fakadó jeltorzítást hivatottak kompenzálni. Ez sok lehetőséget rejt magában, hiszen a hőmérsékletváltozás az induktív szenzorok esetében is kritikus hatás, kompenzálására szükség van.

2. Aktív tekercs, passzív céltárgy alapú szenzorok

Az irodalomkutatás kapcsán megismerkedtem a különböző típusú induktív elven működő szenzorokkal. Az egyes struktúráknak megvan a maga előnye, hátránya, ezeket összegzem röviden a következőkben.

A kölcsönös induktivitáson alapú szenzor mindkét feléhez hozzá kell férnünk a mérés céljából, ezért ez szögsszenzor esetén jócskán korlátozza az elektronikai megoldási lehetőségeket, hiszen az egyik oldal mindenképpen forog. Ezen szenzorok kimenete a két tekercs közötti csatolási tényező. Ez az elrendezés nagyon pontos mérést képes végrehajtani, amennyiben egy kellő pontosságú impedancia-analizátort helyezünk a kimenetére.

Az adó-vevő alapú szenzor kiküszöböli a forgó kontakt problémáját, azonban továbbra is komplex geometriával és kimenettel rendelkezik. A komplex geometria és feldolgozás növeli a rendszer költségeit, valamint a rendszerben felmerülő hibalehetőségeket. Ezen szenzor feldolgozása ASIC segítségével végezhető beágyazott rendszerek esetében.

Az egyetlen aktív tekercssel rendelkező elrendezések előnye az, hogy nem tartalmaznak komplex struktúrákat, ebből fakadóan a mérésük a többi verzióhoz képest nagyságrendekkel egyszerűbb, valamint ebből fakadóan a működésük is biztonságosabb. Emellett ezen jellegű szenzorok mellett szól az is, hogy a fejlesztések még gyerekcipőben járnak, nagyobb lehetőség van itt újat alkotni. Az egyetlen aktív tekercses szenzorok hátránya az, hogy gerjesztő kör közvetlenül befolyásolja a mérést, így a mérésben ezt jól kell tudni kezelni. A geometria kialakítása kulcsfontosságú a kívánt pontosság eléréséhez, szimuláció segítségével lehet ezen szenzorok pontosságát növelni. Az eddigiekben nem volt jellemző az, hogy tervezésüket szimuláció segítségével végezték volna (a többi felsorolt típusal ellentétben). Az egyetlen aktív tekercssel működő szenzorok működésének szimuláció segítségével történő vizsgálata egészen újszerű dolog, így lehetőség nyílik arra is, hogy új megoldásokat tárjunk fel.

2.1. A szenzor általános felépítése és működése

A szenzor alapvetően nagyon egyszerű felépítéssel rendelkezik: adott egy tekercs, illetve vele szemben egy jól vezető réteggel rendelkező céltárgy (target). A tekercsben váltóáram folyik, mely mágneses teret indukál a tekercs körül. A mágneses tér a targetben örvényáramot gerjeszt, mely örvényáram a tekercs terét gyengítő teret hoz létre. Ez a folyamat összességében befolyásolja a tekercs induktivitását.

Az induktivitás erősen függ az alábbi paramétereiktől:

- A tekercs és a vezetőréteg (target) távolsága.
- A vezetőréteg (target) vastagsága.
- A vezetőréteg (target) tekercssel szembe lévő felülete, geometriája.
- Az eszköz hőmérséklete.

- A tekercs geometriája.

A tekercs tipikusan négyrétegű, nyomtatott áramkörön van megvalósítva, így a geometriája állandó, tehát ezen paraméter változtatása nem képezheti a mérés alapját, azonban mivel erősen befolyásolja az induktivitást, a mérés szempontjából optimálisra kell választani, mint ahogy a target vastagságát is. Mivel nem hőmérséklet szenzort szeretnénk konstruálni, a hőmérsékletváltozás okozta induktivitás-változást is kompenzálni kell.

2.2. Mérési elvek

A szenzor a fent ismertetett fizikai paraméterek változásán alapul (örvényáram, mágneses fluxus, induktivitás), tehát az elsődleges feladat az, hogy valamilyen módon mérve legyen egy ezen paraméterek közül. Mivel direkt módon ezeket a paramétereket nem könnyű mérni, érdemes visszavezetni valami könnyebben mérhető paraméterre.

2.2.1. Induktivitás mérése

Az induktivitást impedanciaanalizátorral lehet mérni [16]. Ezek a műszerek nagyon pontosak, 0.12% pontossággal képesek mérni. Hátrányuk az, hogy nagyon komplex és drága berendezések, nem kivitelezhető az, hogy a szenzor végfelhasználásakor ilyen eszközzel folytassuk a mérést, a gyakorlatban ilyen nem tudunk használni. Impedancia analizátort a szenzor fejlesztése során a szimulációs modell illetve az olcsóbb, specifikus mérőáramkör verifikációjakor érdemes használni.

2.2.2. Frekvencia mérés

Az induktivitást frekvenciamérésre visszavezetve lehet az egyik legegyszerűbb módon mérni. Ez egy rezgőkörben, a rezgőkör frekvencia kimenetét vizsgálva lehet megtenni.

A párhuzamos rezgőkör rezonanciafrekvenciája:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ebből az induktivitás:

$$L = \frac{1}{2\pi^2 f_{osc}^2 C}$$

Ahol f_{osc} a rendszer rezonanciafrekvenciája, L a körben található induktivitás, C a kapacitás. A rezgőkörben található kondenzátor segítségével meg lehet határozni a rezgőkör frekvenciáját (változó induktivitás esetén frekvencia tartományát). Ezáltal megelőzhető az, hogy a több tekercsrel rendelkező szenzorok frekvenciái között interferencia lépjen fel, kiküszöbölve a mérésben az interferencia által okozott kellemetlenségeket, hibákat. A kondenzátorral szemben elvárás az, hogy nagy pontosságú legyen és nagy legyen a hőmérséklet tűrése.

2.2.3. Ohmos veszteség mérése

Az örvényáram-veszteség, valamint a vasmaggal rendelkező szenzor esetében a hiszterézisveszteség ohmos veszteségként jelenik meg a gerjesztett tekercs áramkörében. Ez a veszteség párhuzamos impedancián esett veszteségként mérhető. A mérést egy adaptívan változtatható erősítéssel lehet végezni, mely az oszcillátor kimenetét egy meghatározott szinten tartja, miközben kiszámoja az ehhez szükséges energiát, mely veszteségként távozik a rendszerből.

Mivel a második módszer jóval bonyolultabb és ezáltal költségesebb, a szenzor induktivitását frekvenciamérésre való visszavezetéssel mérjük.

2.3. Az induktivitás változtatása

A szenzor felépítéséből adódóan a következő lehetőségek állnak rendelkezésre az induktivitás változtatására:

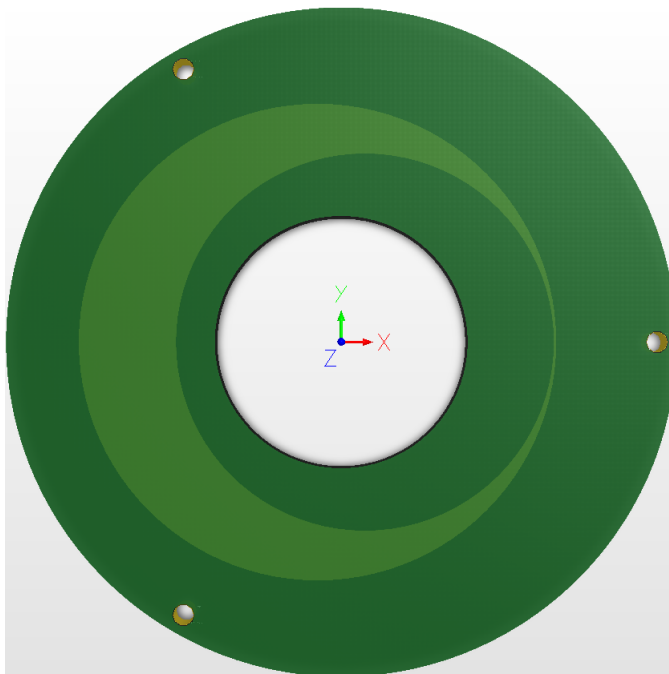
2.3.1. A tekercs és a vezetőréteg (target) távolságának változtatása:

A target eltávolítása azt eredményezi, hogy az örvényáramot keltő tér gyengébb, s ezáltal az ellen-örvényáram kisebb teret hoz létre, mely a nagyobb távolság miatt újfent gyengített hatással érvényesül. Ez a változás ennek köszönhetően igen kis tartomány átfogására képes, viszont azt relatíve nagy felbontással végzi, exponenciális kimenetet biztosítva. Ezt a módot kétféleképpen lehet felhasználni: közelítésérzékelés (ott van-e a target, vagy nincs), illetve nagyon kis tartományú távolságmérés (amire vissza lehet vezetni például adott esetben a szögműködés mérést is).

2.3.2. A vezetőréteg (target) tekercssel szemben lévő felületének változtatása:

A felület változásának köszönhetően az örvényáramok kisebb vagy nagyobb körökben tudnak futni, ezáltal az általuk létrehozott tér gyengébb vagy erősebb lesz. A tér változásának hatására változik a tekercs induktivitása is. A felület változtatása úgy valósítható meg, hogy a tekercs fölött egy olyan targetet mozgatunk, mely egy meghatározott mintával rendelkezik. Egy ilyen változó szélességű minta látható a 26. ábrán is, mely egy szögsszenzorból származik. Ezt a mintát holdnak nevezzük, a későbbiekben többször elő fog kerülni még ez a minta. A minta tekercs fölé eső része, annak felülete, befolyásolja az induktivitást. Az induktivitás-változás ebben az esetben sem lineárisan változik a felület változásával. Ennek értelmében kellő pontosság elérése érdekében kulcsfontosságú feladat a megfelelő minta meghatározása. Ez szimuláció segítségével valósítható meg.

A két változás nem használható mérésre külön-külön a másik figyelembe vétele nélkül. Amennyiben távolítjuk a targetet, figyelni kell hogy a felület ne változzon, s amennyiben a felületet változtatjuk, a távolságra is oda kell figyelni. Ennek elmulasztása olyan hibák megjelenését okozhatja, mely meghiúsíthatja a mérést.



5. ábra. Példa változó keresztmetszetű targetre

2.4. Tekercs gerjesztése

A fentebb ismertetett legegyszerűbb gerjesztési mód a rezgőkörös gerjesztés. A rezgőkör kimenetén szinuszos hullám jelenik meg. Annak érdekében, hogy ez a jel jól mérhető legyen, azaz egyszerű digitális áramkörök elegendőek legyenek a jelfeldolgozáshoz, célszerű négyszögjelet előállítani. A cél az, hogy az előállított jel frekvenciája megegyezzen az eredeti szinusz jel frekvenciájával, azaz a rezgőkör frekvenciájával.

A gerjesztés colpitts oszcillátor segítségével zajlik. Ez a típusú oszcillátor pozitív visszacsatoláson alapszik. Az oszcilláció fenntartásának érdekében két feltétel kell, hogy teljesüljön: a visszacsatolás fázistolásának nullának kell lennie, illetve a feszültségerősítésnek a visszacsatoló ágban 1-nek kell lennie. Ez egy műveleti erősítő segítségével egyszerű módon megvalósítható.

A négyszögjel előállítható inverterek vagy hiszterézises komparátor segítségével.

2.5. Frekvenciakimenet mérése

Ha a tekercsre és a közvetlen közelében hozzá csatlakozó elemekre egy egységként tekintünk, bizonyos értelmezés szerint ezt is nevezhetjük már szenzornak. Ez a szenzor így frekvencia kimenettel rendelkezik. Az eredeti szögmérés szempontjából tehát kulcsfontosságú az, hogy a szenzor kimeneti frekvenciáját milyen pontossággal tudjuk mérni.

A frekvencia mérésére sokféle megoldás létezik, azonban ezek a megoldások különböző pontossággal tudnak mérni és különböző bonyolultságú mérőeszközöket igényelnek. A frekvenciaméréssel kapcsolatban is fontos szempont, hogy minél egyszerűbb és olcsóbb eszköz végezze úgy, hogy közben kívánt mérési pontosságot elérje. Egy adott frekvenciájú négyszögjelen sok paramétert lehet mérni (amplitúdó, frekvencia, fázis, kitöltési tényező), azonban a szenzor kimenetének méréséhez egyedül a frekvenciaadatra van szükség. Ez azt jelenti, hogy a többi paramétert tetszőlegesen befolyásolható, testre szabható a mérési módszer érdekében. A Frekvenciamérésre a legkézenfekvőbb megoldás az, hogyha szenzor kimenetén található négyszögjel felfutó élei közt eltelt időt mérjük. Mivel a szenzor frekvenciája 2-10 MHz között változhat, a mérendő időintervallum 500-100 ns.

2.6. Felfutó élek számlálása

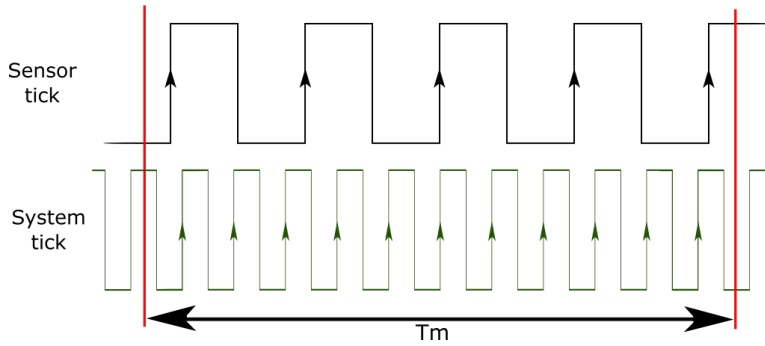
Minden két felfutó él közötti időintervallum méréséhez nagyon pontos időmérésre lenne szükség, azonban ez nem kényszer, hiszen elegendő $250\mu s$ -enként friss adattal szolgálni a kimeneten. Kézenfekvő megoldás tehát az, hogy nem két közvetlen egymást követő felfutóél között eltelt időt mérjük, hanem több élet számlálunk és az aközben eltelt időt mérjük.

Első ötletként felmerül az, hogy beállítunk egy $250\mu s$ -os időzítőt, és az intervallumban érkező felfutó éleket számoljuk, majd az intervallum idejéből és a számolt felfutó élekből meghatározzuk a szenzor frekvenciáját. Ez a módszer azonban rendkívül pontatlan lenne, hiszen a mért jel fázisától függően n vagy $n-1$ élet fogunk számolni, azaz a maximális frekvenciahibánk $\frac{1}{T_{sens}}$ lesz, ahol T_{sens} a szenzor frekvenciájának periódusideje. Ez akkora kiküszöbölhetetlen hibát visz a mérésbe, mely lehetetlenné teszi a kívánt pontosság elérését.

Amennyiben fix számú felfutóél idejét mérjük, a hibánk konstans, de frekvenciafüggő, hiszen változna a mérési intervallum: a frekvencia növekedésével csökken a pontosság.

Változó, de maximált hibával a következő módon folyik az élek számlálása: $250\mu s$ -onként kiadásra kerül egy vezérlő jel, mely meghatározza a mérési intervallumot. A mérési intervallumban számoljuk a szenzor által kiadott négyszögjel felfutó éleit, valamint számoljuk a két szélső (az intervallumba eső első és az utolsó) szenzor felfutóél között a rendszerórajel felfutó éleit. Ilyen módon kiküszöbölhetőek a szenzor fázisából és az intervallum illesztetlenségéből eredő hibák.

A mérés eredménye tehát két számláló érték: a szenzor tick-ek illetve a rendszeróra tick-jeinek száma. Ezen két számlálóértékből meghatározható a



6. ábra. A felfutóélek számolása a mérési intervallumban

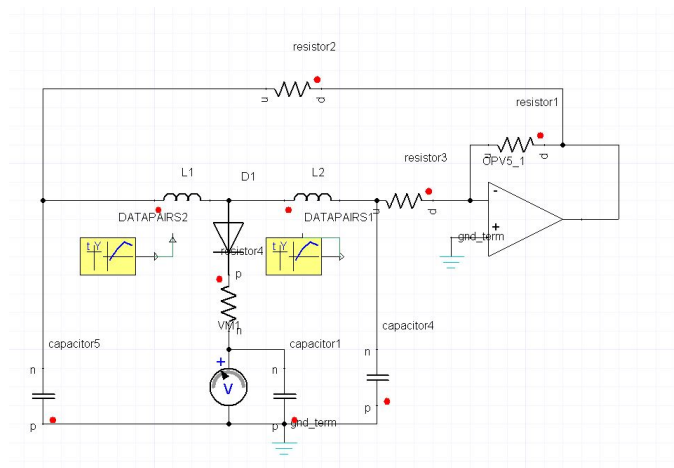
szenzor frekvenciája:

$$f_{sens} = f_{sys} \frac{N_{sens}}{N_{sys}}$$

Ahol f_{sens} a szenzor frekvenciája, f_{sys} a mérő rendszer órajelfrekvenciája, N_{sens} és N_{sys} pedig azt adja meg, hogy a szenzor kimenetén lévő négyyszögjelnek, valamint a rendszeróra négyyszögjelenek hány felfutó éle volt a mérési idő alatt. Ezen érték pontossága így már csak a rendszerórajel pontosságától függ.

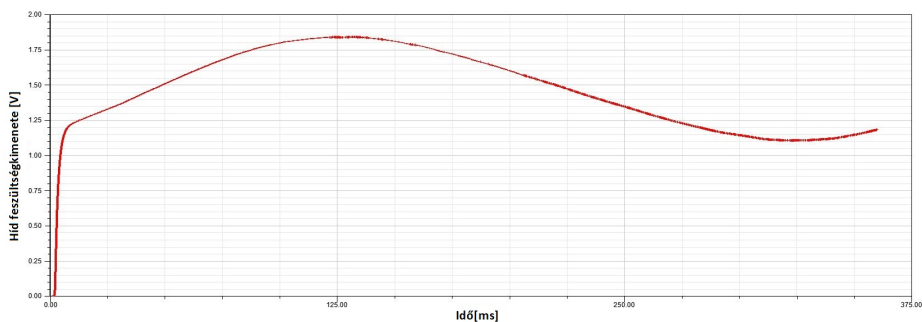
A mért szinuszos frekvenciajel először normalizálva van -1 és 1 közé, majd ideális szinusz esetén ebből kerül számolásra egy kétparaméteres arcus tangens függvény segítségével a szög. Amennyiben a kimenet nem elég szinuszos, look-up table segítségével lehet kompenzálni a szöghiba minimalizálásának érdekében.

2.7. Feszültségkimenet mérése



7. ábra. Feszültség-kimenetet előállító Colpitts oszcillátor áramköri rajza

Az induktivitás változásával a rezgőkör frekvenciája mellett, a kimeneten található szinusz jel amplitúdója is változik. Ez a jelváltozás relatíve kicsi, de megfelelő feldolgozó elektornikával (erősítő és DC eltolás után egy ADC) ez is szolgálhat mérési alapként. Amennyiben két tekercset, melyek egymáshoz képest 90° -ban helyezkednek el (mind geometriailag, mind a kimeneti szinusz jelet tekintve) hídba kötünk, a kimeneti amplitúdó változása szintén szinuszos lesz, és a jelváltozás nagysága a hídnak köszönhetően jóval nagyobb, könnyebben mérhető (0.75V). A 7. ábrán látható egy ilyen hídba kötés elrendezése. A tekercsetek egy Collpitts-oszcillátor pozitív visszacsatolás segítségével tartja rezgésben.



8. ábra. Az előállított feszültségkimenet

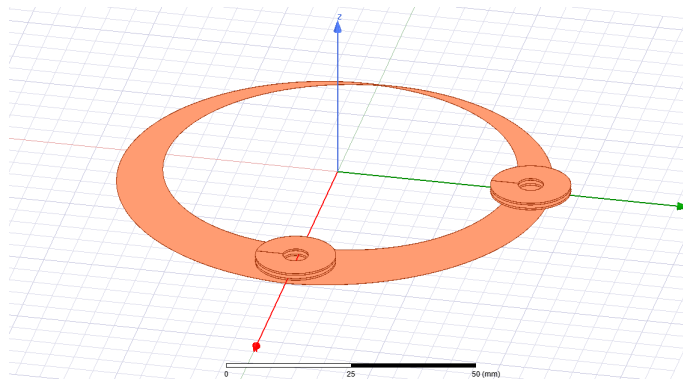
Az amplitúdó változást könnyen lehet mérni úgy, hogy a híd kimenetén levő jel negatív feszültségeit egy dióda segítségével eltávolítjuk, majd a kapott fél-szinusz jeleket egy kapacitás segítségével mintavételezzük. A 8. ábrán látható a kimeneti feszültség-görbe. A mért kimenet végeredményben a kondenzátor feszültsége lesz. Ezzel a megoldással ugyanakkora induktivitás-tartományban változó tekercsek kimenetét kétszeres pontossággal lehet mérni.

3. Szenzor modelljének felépítése

Az irodalomkutatásnak köszönhetően kiderült: annak érdekében, hogy az eddig bemutatott, jelenlegi állapothoz képest tovább tudjunk lépni, elektromágneses szimulációra, és azáltal támogatott tervezésre van szükség. A szimulációs feladat megadásához szükség van geometriai modellekre, amelyeken térszimulációt, valamint hálózati modellekre amelyeken hálózatszimulációt lehet végezni. A geometriai modell tartalmazza a tekercset és környezetét, hálózati modell tartalmazza a rezgőkört a PCB-n megvalósított tekercssel, valamint a feldolgozó elektronikát. Elektromágneses szimulációhoz nem elég feltétlenül egy modellt alkotni, hiszen a feladat komplexitásának és a vizsgált paraméternek függvényében különböző modelleket érdemes létrehozni. A térmodellel kapcsolatban a fő elvárás az, hogy minél jobban fedje a valóságot a vizsgált paraméterek szempontjából. Jelen fejezetben ismertetem egy szög szenzor általános felépítését, valamint azt, hogy milyen szempontok és elvek mentén milyen szimulációs modellek kerültek kialakításra.

3.1. Egy induktív szög szenzor tipikus felépítése

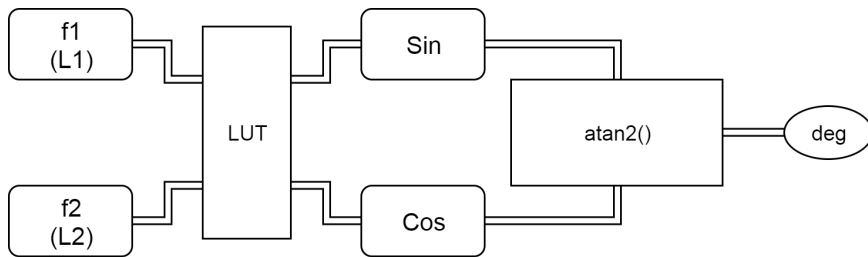
A továbbiakban leírtak jobb megértéséhez szükséges, hogy e helyen részletesebben ismertessek egy általános felépítésű induktív szenzort, melyen be kívánom mutatni a mérés működését, valamint a működés kapcsán felmerülő strukturális kérdéseket. Az itt ismertetett felépítéshez nagyon hasonló létezik már mint egy megvalósított eszköz, mely egy gépjármű-kormány elfordulásának szögét méri. A valódi és a példa modell között egyedül a target geometriájában van különbség, ennek ellenére a felmerülő problémákat jól mintázza a példa.



9. ábra. Általános felépítésű induktív szenzor

A példa geometria a 9. ábrán látható. Adott két tekercs, melyek egy kör mentén egymáshoz képest 90° -ban helyezkednek el. Ez a kör középkörét képezi egy targetnek, mely szélessége a 0° - 180° -os tartományon lineárisan szélesedik, majd a 180° - 360° -os tartományon lineárisan keskenyedek. Tehát ez a target gyakorlatilag egy elnyújtott rombusz hosszabbik átlója mentén a középkörre

való transzformálásból kapható meg. A két tekercs a geometriai elrendezésnek köszönhetően a target elforgatásának hatására egymáshoz képest 90° -al eltolt kimenettel rendelkezik.



10. ábra. Induktív szenzor szög mérésének módja

A 10. ábrán látható a szenzor mérési metodikája. A számolás alapjául szolgáló arcus tangens függvényhez szinuszos bemenettel kell rendelkezni (az egyik jel szinusz, a másik jel 90° -kal eltolt szinusz, azaz koszinusz). Tudjuk, hogy jelen esetben a kimenet nem szinuszos, így a megfelelő kimeneti jel előállításához LUT-os kompenzáció szükséges. A kompenzáció úgy működik, hogy a mért eredményekből felvesszünk egy táblázatot, mely pontonként tartalmazza a kimért karakterisztikát. A mért frekvenciáról a LUT felhasználásával interpoláció segítségével meg lehet mondani, hogy milyen kimenettel rendelkezne, ha szinuszos lenne.

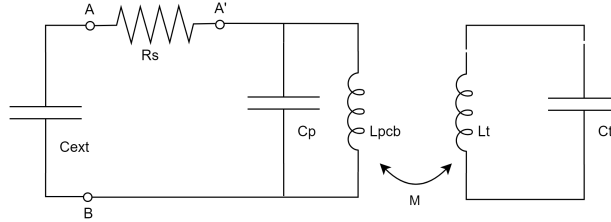
Így végeredményben az eredeti számolási módot tudjuk használni. A bemutatott koncepció kétféleképpen javítható: vagy a kimenetet szinuszossá tesszük a geometria segítségével úgy, hogy ne kelljen LUT-alapú kompenzációt alkalmazni, vagy arra alapozunk, hogy LUT-ot használunk, és ennek tudatában választunk olyan geometriát, mely kimenete a lehető legpontosabb szögértéket adja. Ebben az esetben a kimenet nem lesz feltétlenül szinuszos.

3.2. A hálózati modell

A szenzor hálózati modellje igen egyszerű. A tekercs, a vele szemben lévő target és a tekercshez a rezgőkör kialakítása érdekében kívülről csatlakoztatott kapacitás (C_{ext}) hálózati modellje a 11. ábrán látható [16]. A modell célja az, hogy az AB portok között végbemenő jelenségeket szeretnénk leírni lineáris elemekkel úgy, hogy azok viselkedése minél jobban közelítse a rendszer rezonanciafrekvenciája környéki frekvenciákon a viselkedést. A tekercssel szemben található target a hálózat szempontjából egy másik párhuzamos LC tag (L_t, C_t), mely a szenzor rezgőkörének induktivitásán keresztül csatolásban van (M). A target mozgásának hatására változik a csatolási tényező [45] és a target induktivitása.

A tekercs modelljének minél pontosabb meghatározásához a tekercs induktivitása (L_{pcb}) mellé egy soros ellenállás (R_s) és egy párhuzamos parazita kapacitás (C_p) is kerül.

A modellben az (R_s) soros ellenállás egyenáramú analízisben meghatározható. A rezonanciafrekvencia vizsgálatokor egyszerűsíthetjük a modellt oly módon,

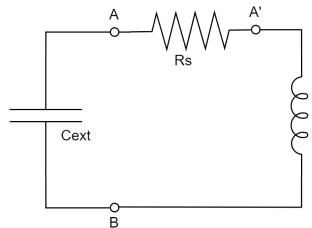


11. ábra. A tekercs és a target hálózati modellje

hogy a C_{ext} és R_s elemek elhagyásával az A'B pontok között található kétpólust helyettesíthetjük egyetlen tisztán képzetes impedanciával, melynek képzetes része reprezentálható egy induktivitással, amely értéke a következő módon számítható:

$$L = \frac{\text{Im}\{Z_{A'B}\}}{\omega}$$

ahol $Z_{A'B}$ az A'B kétpólus impedanciája az ω frekvencián. Az itt meghatározott L induktivitás lesz a továbbiakban a jellemző paramétere a tekercsben a target hatására végbemenő folyamatoknak. A 12. ábrán látható az egyszerűsített helyettesítő kép. Az induktivitás változása egyértelműen leírja azt, hogy a PCB-n kialakított tekercs milyen módon reagál a target változásaira.



12. ábra. A szimulációban használt egyszerűsített hálózati modell

Python szkript segítségével legeneráltam a PCB tekercs pontos geometriáját pontos rétegzettséggel (lekövetve a négyrétegű PCB paramétereit) és vezetőréteg-vastagsággal .stl kiterjesztésben.

A modellt Eddy current solverben számoltam, mely solver egy meghatározott frekvencián a tér meghatározása után az energiamennyiségekből kiszámolja az impedanciát.

3.3. A térszimulációs feladat megfogalmazása

Elsőként a tekercs és a target geometriáját kell megalkotni. A geometria megrajzolását vagy importálását követően az egyes építőelemek anyagparamétereit kell megadni.

Mivel a tekercs egy rezgőkörben található, az elektromágneses feladatot elég szinuszos állandósult állapotban megoldani, hiszen a rezonanciafrekvencia nagyságrendekkel nagyobb, mint a szög szenzor körbeforgásának frekvenciája. Azaz egy-egy szögpozícióban tekinthető a rendszer állandónak, elég a komplex amplitúdóértékekkel számolni az adott pozícióban, nincs szükség tranzienst analízisre. Ez jelentősen leegyszerűsíti a szimulációs feladatot, hiszen az Eddy current solver futási ideje egy pozícióban jóval rövidebb, mint a tranzienst analízisé.

A tekercs gerjesztését többféleképpen is meg lehet adni. A vezető útvonalnak zártnak kell lenniük, azaz a tekercset rövidre kell zárni a modell generalásakor. Ezen zárt útvonalon meg kell határozni egy keresztmetszetet, ahol meg lehet adni a gerjesztést. A gerjesztést lehet szimplán áram formájában megadni illetve tekercs lezárásként. A tekercs lezárás azért praktikus, mert meg lehet adni azt, hogy az adott lezárás hány menetet tartalmaz, azaz a tekercsek modelljében nagyfokú egyszerűsítésre van lehetőség: nem kell egyesével minden menetet lemodellezni, hanem a szoftver a menetszám alapján áramsűrűséggel képes számolni. Amennyiben a modellben több lezárással rendelkezünk, az egyes lezárásokat össze lehet rendelni és azokat közösen egy tekercsként lehet definiálni. Ezen tekercs egységes gerjesztést tud kapni feszültség vagy áram formájában.

Mivel a szimulációkban minket az induktivitás érdekel mint kimenet, nem elég számunkra az, ha a szoftver kiszámolja a térjellemzőket, hanem szükségünk van bizonyos paraméterek kiszámolására. Erre egyszerű lehetőséget kínál a szoftver egy paramétermátrix formájában, melyet a modellhez kell rendelni. A hozzárendeléskor a szoftver megkeresi a modellben található vezető hurkokat, illetve alapul veszi a definiált tekercseket, és a szimuláció futásának végétével kiszámolja páronként a kölcsönös induktivitásokat, valamint az öninduktivitásokat.

A teret le is kell zárni egy felülettel, ami meghatározza azt, hogy mekkora területen menjen végbe a számolás. A tartomány határain a tér nullává válik. Akkorára kell megválasztani a tartományt, hogy ez a feltétel teljesüljön, azaz a tér kellően lecsengjen a határain. A geometriának megfelelően a kialakuló térnek köszönhetően a tekercs síkjára merőleges irányban jóval nagyobb régióra van szükség, mint a tekercs síkjának irányában. A régió nagyságát érdemes hangolni, mert túl kicsi választásával torzulnak a szimulációs eredmények, túl nagy választásával pedig a felesleges számolás szükségtelenül meghosszabbítja a futási időt.

A szimuláció elindítása előtt még meg kell határozni a számítási beállításokat (analysis setup). Itt meg kell adni azt, hogy mekkora frekvencián (frekvenciakon) oldja meg az örvényáramú analízist. Meg kell adni azt, hogy az adaptív háló az egyes finomítási lépések alkalmával hány százalékkal finomítsa a hálót. Elő kell írni egy maximális adaptív iterációs számot, valamint egy konvergencia-

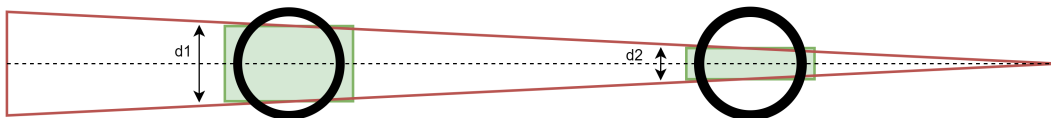
kritériumot, ami megadja, hogy az adaptív lépéseket meddig kell folytatni. A kritérium alapesetben az energiahiba, de be lehet állítani más kritériumokat is (induktivitás változás, stb.).

3.4. A szimulációs modell felépítése és verifikációja

A szimulációs modellel kapcsolatban két elvárás van: legyen minél pontosabb a szimulációs eredmény, és legyen minél rövidebb a futási idő. Ez a két elvárás egymásnak ellentmond, tehát kompromisszumokat kell kötni.

Első lépésben a geometriát kell egyszerűsíteni addig, amíg még az eredeti, bonyolultabb modellhez képest nagyon hasonló értékeket vesznek fel a számunkra fontos paraméterek. Ehhez meg kell határoznunk a számunkra fontos paramétereket.

A szenzor érzékelésének az alapja az, hogy a tekercssel szemben egy változó geometriájú target okoz inductivitás változást. Mivel azt tudjuk, hogy a target tekercssel szembe levő geometriája forgatás hatására változik, a geometriai korlátozásoknak köszönhetően ez a változó geometria jól közelíthető egy változó szélességű téglalappal. A 13. ábrán látható az, hogy egy egyenesre kiterített targetet milyen módon lehet az adott pontokban egy-egy téglalappal közelíteni.



13. ábra. A téglalap-teszt elvi alapja

A téglalap rövidebb oldalának hossza (d) a forgatás hatására változik úgy, hogy a téglalap középpontja folyamatosan a tekercs középpontja fölött marad. A téglalap hosszabbik oldala, mely nem változik, akkora, hogy túllóg a tekercsen annyival, hogy a benne létrejövő tér abban az irányban lecsengjen a targetben, tehát a téglalap hossza ne befolyásolja a kialakult teret.

Annak érdekében, hogy összehasonlításokat lehessen tenni a modellek között, bevezettem a téglalap-tesztet. A téglalap-teszt azt jelenti, hogy veszünk egy tekercset, mellyel szemben elhelyezünk egy téglalap alakú targetet. A téglalap alakú target egyik oldala fix, a tekercsen túllóg, a másik oldala parametrikusan változik úgy, hogy a téglalap súlypontja mindvégig a tekercs középpontja felett maradjon. A parametrikus változás fő paramétere a target rövidebb oldalának középvonalától mért hossza (d_r). Egy tipikus teszt esetében a d_r 0mm-től a tekercs él-szélessége +1-2mm-ig ment. A téglalap-teszt segítségével egyszerű módon össze lehet hasonlítani az egyes geometriák viselkedését.

A modell kialakítása közben az volt az elvárás, hogy legyen minél egyszerűbb, legyen minimalizálva az elemek száma és ezáltal a számolási igény úgy, hogy közben a téglalap-tesztet elegendő pontossággal adja: minél kisebb eltérés legyen az inductívásgörbék között.

Második lépésként meg kell határozni azt az optimális hibaszázalékot, amivel stabil eredményeket tudunk kapni, melyek jellegre megegyeznek a valósággal.

Nem elvárás az, hogy minden esetben a pontos paramétereket határozzuk meg, sok esetben elég a változások és a jelenségek léptékéről és irányáról információt szerezni a szimuláció által. Ilyen esetekben tudunk engedni a pontosságból a futási idő javára.

3.4.1. A 2D szimuláció lehetőségei, korlátai

A szimulációk alapvetően 2D-ben és 3D-ben végezhetőek. Bizonyos speciális geometriák esetében a tér vizsgálatához elegendő egy szimmetriasíkot két dimenzióban szimulálni, hiszen az a teret egyértelműen meghatározza.

Kétdimenziós esetben kétféle szimmetria használható fel az egyszerűsítésre:

- Hengerszimmetrikus feladat esetében elég a Z tengelytől az X tengely pozitív irányában megadni a geometriát. A számolt eredmény az XZ félsík Z tengely körüli körbeforgatásából kapott 3D-s térre fog kiadódni.
- Descartes-koordináta-rendszerben megadott feladat esetében egy olyan elrendezés terét vizsgáljuk, mely végtelennek tekinthető az egyik irány mentén. A végtelenségnek köszönhetően az feltételezhető, hogy ebben az irányban nem változik a tér. Ez az irány tipikusan az y, tehát az xz sík egyértelműen meghatározza a teret. Mivel tisztában vagyunk azzal, hogy a tér nem végtelen, ezen szimmetriával rendelkező térből megadható a szoftvernek az, hogy mekkora y szakaszt kívánunk venni, s az fogja meghatározni az induktivitás-értéket.

Sok esetben érdemes élni a 3D szimuláció 2D-s problémává való egyszerűsítésével, mert ez nagyságrendekkel gyorsabban kiszámítható feladatot eredményez [38]. Mindazonáltal ennek az egyszerűsítésnek korlátai is vannak: csak olyan geometriájú feladatot lehet 2D-ben számolni, amely a fenti szimmetria-feltételek valamelyikének legalább közelítően megfelel [34].

Felmerül a kérdés, hogy a mi esetünkben milyen módon lehet alkalmazni a 2D-s szimuláció előnyeit.

A hengerszimmetrikus megközelítés a tekercs esetében könnyen alkalmazható, hiszen maga a tekercs nagyjából hengerszimmetrikusnak mondható. A szoftverben megadható az, hogy a keresztmetszetben megadott menetekre úgy tekintsen, mintha azok spirálként mennének körbe, így jól lehet szimulálni a tekercs induktivitását, tetszőleges pontosságot elérve. Ha targetet is szeretnénk vizsgálni, a téglalap-teszt ilyen formán kör-tesztté alakul, hiszen a hengerszimmetriának köszönhetően a target kör alakot vesz fel. Ebben a modellben a két végállapotot pontosan fel lehet venni (teljes fedettség vagy fedetlenség), valamint lehet vizsgálni teljes fedettség esetén a target távolságának hatásait.

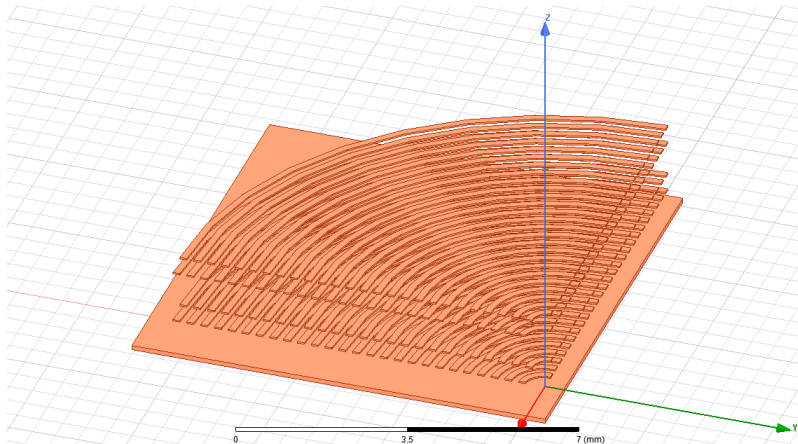
A Descartes-koordináta-rendszerben megadott esetben a tekercs formája torzul, hiszen a spirál vagy köralak helyett párhuzamos vezetőkötegpár jelenti a tekercset úgy, hogy a kötegekben ellentétesen folyik az áram. A modell mélységét úgy lehet meghatározni, hogy megnézzük: milyen paraméter esetén lesz a tekercs induktivitás-értéke megegyező a 3D-s, maximális részletességgel rendelkező modell induktivitásával. A paraméter hangolósakor a kiindulási érték

az az érték volt, amely esetében a két tekercs felülete megegyezik. Ez az intuitíven megadott paraméter nem volt rossz tipp, a kívánt induktivitást kellő pontossággal megközelítő paraméter 0.7 mm-rel kisebb mélységet definiált (8 mm-es sugarú tekercs esetében). Ezen geometria körülményei közt a téglalap-teszt valóban egy téglalap alakú targettel működik, azonban a tekercs is téglalap alakú. Ezen geometria esetében nem tudunk közvetlen következtetéseket levonni, paramétereket meghatározni az eredeti geometriára vonatkozólag, azonban ezen geometria esetében a tekercs-target távolság mellett a target tekercs síkjával párhuzamos elmozdulásának hatását is lehet vizsgálni. Bár az induktivitás görbe közvetlenül nem jelent hasznos információt, annak változásából, és a modellen belüli egymáshoz képest való összehasonlításából lehet következtetéseket levonni a zavarérzékenységre.

Érdekesség, hogy a két típusú 2D-s szimuláció pont kiegészíti egymást, hiszen az egyik esetében a tekercs viselkedik a 3D-s modellnek megfelelően, míg a másik esetben a target.

3.4.2. A 3D szimuláció lehetőségei, korlátai

A 3D-s szimuláció segítségével képesek vagyunk a tényleges eszközt lemodellezni, azonban a futási idő nagyságrendekkel megnő. 3D-ben is bőven van lehetőség egyszerűsítéseket bevezetni, szimmetriákat keresni. A tekercs sok íves résszel rendelkezik (gyakorlatilag ívek építik fel) azonban a szoftver számára az íves részek jelentik a legnagyobb kihívást, hiszen ott lesz a legsűrűbb a háló.



14. ábra. A negyed tekercsmodell

Az első felmerülő ötlet az, hogy a téglalap-teszthez nem szükséges az egész modellt vizsgálni, elegendő annak a negyedét venni, hiszen mind a téglalap mind a tekercs az XZ, YZ síkokra szimmetrikus. A 14. ábrán látható negyed-modell számítása jó egyszerűsítést ad úgy, hogy negyedakkorára tudjuk csökkenteni a

számítási igényeket. Egyedül arra kell odafigyelni, hogy a kimenetként kapott induktivitás-érték az eredeti negyede.

A második lehetőség az, hogy négyrétegű tekercs helyett kétrétegűn végezzük a számítást. A toroid valamint a szolenoid tekercs induktivitása is egyaránt négyzetesen függ a menetszámtól. A PCB-n kialakított tekercs fluxusa is négyzetesen változik a menetszám változtatásával, tehát bátran feltételezhető az is, hogy az induktivitás-érték négyzetesen változik a menetszámmal, tehát a kétrétegben számolt érték négyzete lesz a négyrétegű tekercs induktivitás-értéke.

Harmadik lehetőség az, hogy a tekercset több menettel rendelkező gyűrű(k)ként adjuk meg. A gyűrűk esetében a szoftver áramsűrűséggel számol, amely a hengeren belül egyenletes meneteloszlást feltételez. A négyrétegű tekercset háromféleképpen lehet gyűrűkre bontani. A 15. ábrán látható a különböző modellek mágneses indukciójának tere.

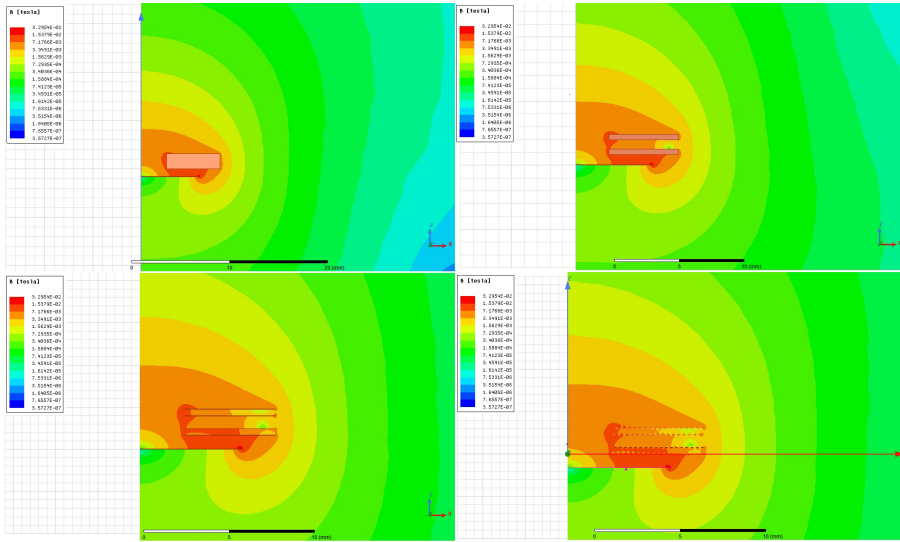
- 1 gyűrű: Ebben az esetben mind a négy réteg egy gyűrűbe tartozik. Azonban mivel a PCB rétegek közötti távolság nem egyforma (a középső szigetelő réteg vékonyabb, mint a két szélső), az egyenletes árameloszlás rossz közelítést ad, relatíve nagy lesz a hiba.
- 2 gyűrű: Ebben az esetben a felső és az alsó két réteget foglaljuk egy-egy gyűrűbe. Ez már egész jó közelítést ad, azonban az egyenletes eloszlás még mindig okoz hibát a vastagság miatt.
- 4 gyűrű: Ha minden egyes réteg kap egy gyűrűt, az egyenletes eloszlás csak a spirálok területén érvényesül, tehát pontosan az eredeti modellünket mintázza. Ez a modell nagyon pontos közelítést ad a téglalap-tesztben.

Összességében ha a négygyűrűs modellt használjuk, az eredeti 72 spirált tartalmazó modell helyett négy íves formát tartalmaz a modell. Ez a modell bonyolultságát tekintve az 1. táblázat szerint ötödakkora elemszámot jelent és több, mint tizedakkora futási időt.

Modell	CPU time [min:sec]	adaptive passes [number]	Solver DCS4 [matrix]	Param [tetrahedra]	Induct. [μH]
1 gyűrű	00:36	7	28701	19666	46.93
2 gyűrű	00:49	7	39666	27029	45.47
4 gyűrű	00:59	5	42133	29617	45.08
részletes	11:20	3	241759	170403	44.87

1. táblázat. A 3D-s modellek szimulációs paraméterei

A gyűrűk tesztelését 2D-ben is elvégeztem, hiszen a téglalap-teszt végállapotaiban gyakorlatilag megegyezik a két modell. A 2. táblázatban látható, hogy az induktivitás-értékek 0.5-1 μH -val eltérnek egymástól. Ez annak köszönhető, hogy mind a két szimuláció 1%-os energiahiba-paraméterrel futott, azonban mivel a 2D szimuláció jóval kevesebb elemmel rendelkezik, az ott számolt eredmény



15. ábra. A 2D-s tekercsmodellek Mágneses indukciójának tere.
balról jobbra: 1 gyűrűs, 2 gyűrűs, 4 gyűrűs és teljesen részletes esetekben

jóval pontosabb. Amennyiben teljesen targettel fedett esetet nézzük, a 2D, 3D szimulációk értéke akkor lesz egymáshoz nagyon közel, ha a 3D szimuláció hibáját a tizedére vesszük (2D-ben 1%, 3D-ben 0.1%). Targettel teljesen fedett esetben így: $L_{3D} = 23,476\mu H$; $L_{2D} = 23,467\mu H$.

Modell	L 3D [μHH]	L 2D [μHH]
1 gyűrű	46.93	47.92
2 gyűrű	45.47	46.02
4 gyűrű	45.08	45.59
részletes	44.87	45.54

2. táblázat. A 2D-s és 3D-s modellek összehasonlítása

3.4.3. Az induktivitás frekvenciafüggése

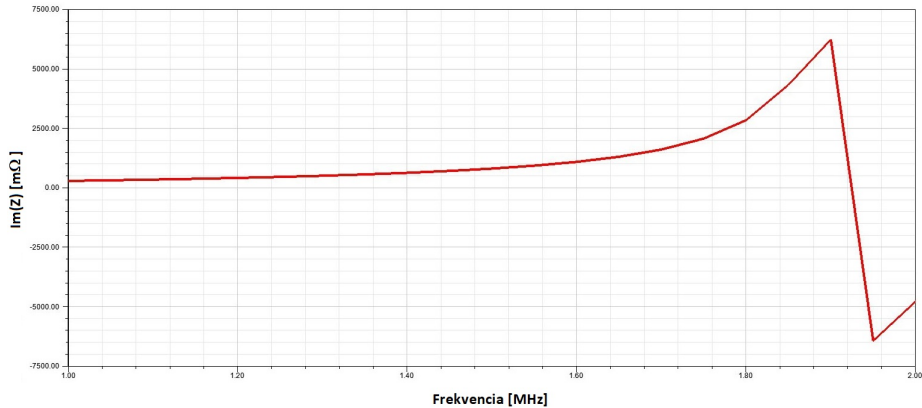
Felmerül a kérdés, hogy a működési frekvenciatartományon változik-e mérvadó mértékben a tekercs induktivitása. Ahogy közelítjük a határfrekvenciát (ameddig a behatolási mélység nagyobb, mint a vezető vastagsága), az induktivitás egyre jobban változik. A szenzor működési frekvenciatartományán 10 pontban meg lett határozva a rezgőkör impedanciájának értéke (a kapacitás fixen volt megadva, 200pF-nak választva). A számolt impedancia képzetes részének görbéje a 16. ábrán látható. A párhuzamos LC tag eredő impedanciája:

$$Z = i \frac{L\omega}{1 - \omega^2 LC}$$

Ahol Z az impedancia, ω a vizsgált körfrekvencia. Jelen vizsgálat esetében a veszteség elhanyagolható, hatása a rezonanciafrekvenciára minimális. A rezonanciafrekvencián a nevező nulla, ekkor vált az impedancia képzetes része előjelet.

$$\omega = 2\pi f_{osc} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Ez a vizsgált tartományon belül minden csak numerikus hiba nagyságrendjében tért el a középfrekvencián mért induktivitásból számolt rezgőkör frekvenciájával. Ennek köszönhetően nincs szükség arra, hogy a frekvencia változtatásával keressük minden esetben a rezonanciafrekvenciát, hanem elegendő a középfrekvencián szimulációval meghatározott induktivitásértékből számolni. Ez indokolja továbbá azt is, hogy a veszteség elhanyagolható, nem szükséges vele számolni.



16. ábra. Az impedancia képzetes része a frekvencia függvényében

3.4.4. A szimuláció korlátai

Szimuláció használatakor tudatosítani kell magunkban azt, hogy rengeteg korlátozással vagyunk körülvéve. A szimuláció nem alkalmas arra, hogy a valóságot tökéletesen leképezze, nem lehet kizárólag szimuláció segítségével tervezett terméket rögtön a piacra dobni. A szimuláció arra jó, hogy a részleteire lebontott feladat egy-egy komponensének viselkedését vizsgáljuk, és ez alapján meghatározzuk a továbbfejlesztési irányokat.

Ha egy részprobléma vizsgálatához egyszerűsített modellt alkalmazunk, elérhető az, hogy nagyságrendekkel gyorsabban fog lefutni a szimuláció, azaz órákat, esetleg napokat fog igénybe venni hetek vagy hónapok helyett, valamint a futáshoz szükséges adattároló mérete nem haladja meg a terrabyte-os nagyságrendet.

A futás idejét meghatározza:

- A geometria bonyolultsága:

2D, 3D geometria, stb. A geometria meghatározása egy külön művészet, a szimulációs mérnök feladata.

- A hardver erőforrások:

A szoftver felhasználói kézikönyve szerint egy liszenszt négy magon lehet futtatni, így célszerű ha a gép ilyen felszereltséggel rendelkezik, valamint a hardveres virtualizációt érdemes kikapcsolni. A megfelelő működéshez magonként 8GB RAM-ot ír elő a kézikönyv, valamint ideális esetben GPU-val is kell rendelkeznie a gépnek a hatékony számolás érdekében. Az általam használt gép hat magos, 32 GB ram-al rendelkezik, valamint egy erős videokártyával.

- Az elvárt pontosság (hibaszázalék):

Az előírt pontosság nagyban meghatározza azt, hogy az adaptív hálózó hány iterációt végez el. Az egyes iterációk ideje exponenciálisan nő. Ezen a ponton kerül előtérbe az, hogy a legtöbb esetben nem a pontos adatokra van szükség, hanem a jelenség, a változás jellegére, így elég nagyobb hibaszázalékkal dolgozni.

- Az iterációk száma:

A szenzor szimulációja esetében bizonyos paramétereket lépésenként meg kell vizsgálni. Jelen esetben tipikus vizsgálat a körbeforgatás, vagy a téglalap-teszt esetében a téglalap szélességének változása vagy a téglalap targethez képesti x, y irányú mozgása. Amennyiben több paramétert veszünk fel, az alapesetben azt jelenti, hogy a szoftver minden variációt lefuttat, szóval három 10 paraméteres iteráció esetében ezer szimuláció fut. Ebben az esetben is a szimmetriák keresésével valamint a hibára optimalizálással lehet az iterációk számát racionalizálni. A hibára optimalizálás azt jelenti, hogy például ha egy 3D-s modellben forgatunk egy hold alakú targetet, minimum akkora lépésközzel érdemes forgatni, hogy a numerikus hiba által okozott eltérés (ingadozás) az induktivitásban jóval kisebb legyen, mint az elforgatás hatására létrejött változás. Ez az általam használt modell és futási paraméterek esetében (mely iterációnként kb. 10 perces nagyságrendű futási idővel rendelkezett) azt jelenti, hogy maximum 5°-os részletességgel érdemes forgatni a targetet.

4. A szenzor paramétereinek vizsgálata szimuláció segítségével

Annak érdekében, hogy érdemi következtetéseket tudjunk levonni a szenzor működésével kapcsolatban, alaposan meg kell vizsgálni az egyes komponenseit, azok működését.

Ebben a fejezetben ismertetem azokat a paramétereiket, melyek alkalmasak lehetnek arra, hogy egy-egy komponenst s a komponensek kombinációja által a szenzort minősíteni tudják.

Ezt követően ismertetem azon vizsgálódások eredményeit, melyeket a tekerccsel, a targettel, valamint jelfeldolgozó áramkörrel kapcsolatban végeztem.

Ennek segítségével lehet a későbbiekben az egyes szenzor-designokat egymással összehasonlítani.

4.1. A modellezett szenzor jóságát mutató paraméterek

Egy szög szenzor megrendelésekor, követelményeinek meghatározásakor alapvetően két fő jellemző paramétert lehet definiálni: felbontás és pontosság. Emellett még fontos megadni azt, hogy mekkora tartományon várjuk el azt, hogy abszolút kimenettel rendelkezzen. Motorok szenzorainak esetében tipikusan nem elvárás, hogy ez a tartomány 360° fölött legyen. Sőt a kvadratúra enkóderok esetében a nullimpulzus és számláló logika nélkül egy-egy inkrementnyi elfordulást tudunk csak érzékelni. Egy kormány szög-szenzor esetében azonban az az elvárás, hogy mindkét irányba nagyjából 2-2 fordulat befogására alkalmas legyen a szenzor. Ez a kiterjesztett tartomány többféleképpen elérhető. A jelen dolgozatban ismertetett szenzorokkal szemben az elvárás az, hogy minimum 360° -os tartományban abszolút jellel rendelkezzenek, valamint könnyen lehessen kiterjeszteni a szenzort úgy, hogy több elfordulást is tudjon mérni (multiturn).

A szenzor felbontása és pontossága egyrészt függ attól, hogy milyen feldolgozó elektronikát alkalmazunk, milyen modulok találhatóak a szenzor kimenetén, másrészt függ attól, hogy mekkora a szenzor kimenetének frekvenciájátja.

A szinuszos kimenetű szenzorok esetében a számolt szög pontosságát befolyásolja azt, hogy kimeneti jel mennyire szinuszos. A jel szinuszosága többféleképpen meghatározható. Egyik megoldás az, hogy vesszük a jel FFT-jét, majd kiszámoljuk az egyes kimeneti jelek THD-ját [38]. A THD (Total Harmonic Distortion, teljes felharmonikus torzítás) megadja, hogy az FFT felharmonikus komponensei hogyan viszonyulnak az alapharmonikushoz, azaz mennyire tér el a jel egy szinusztól:

$$THD_f = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1}$$

Ahol V_n az egyes FFT komponenseket jelöli, a THD_f pedig azt jelenti, hogy a fundamentális frekvenciára vonatkoztatjuk az értéket. A THD alapján össze lehet hasonlítani a kimeneti jeleket egymással. Az FFT és az abból számított THD mellett egy másik mutató is létezik a kimenet szinuszoságára. Ha a kimeneti jeltől rendelkezünk egy alapjellel, valamint egy a 90° -al eltolt jellel, ki

tudjuk számolni azt, hogy a szenzor mekkora szöget lát. A számolt szög és a referenciaszög összehasonlításából születik meg egy, a szenzor pontosságára vonatkozó paraméter, a szöghiba. A target pontosításával lehetőség van arra, hogy a nyers szög hibát lecsökkentsük vagy megszüntessük, amivel lehet a pontosságot növelni.

Szinuszos kimenetű szenzor esetében tehát leíró paraméter lehet a THD, valamint az átlagos szöghiba (esetleg maximális szöghiba...)

LUT kompenzációt használó szenzor esetében az a szerencsés, ha a szenzor kimenetére egyetlen kikötésünk van, az, hogy legyen stabil ez a kimenet. A szenzor felbontását erősen befolyásoló tényező az, hogy mekkora méretű (hány adatot tartalmazó), hány bites LUT-ot használunk a kompenzálásra.

Feszültségkimenet esetén a pontosságot és a felbontást meghatározzák a mérésre felhasznált ADC paraméterei, valamint a szenzor kimenetén illetve az ADC bemenetein levő jelek feszültségtartománya. Ez a tartomány további költségek árán módosítható például műveleti erősítő segítségével, hogy az ADC teljes tartományban működjön.

4.1.1. Felbontás

A fentebb felsorolt mérési elvek közül mindegyik esetében kulcsfontossággal bír az, hogy a kimeneten mekkora változást ér el a fizikai paraméterek változása.

Mivel a szenzor elsődlegesen változó paramétere a 3.2 fejezetben ismertetettek szerint az induktivitás, ennek vizsgálatára érdemes bevezetni egy mutatót, mely megadja a legkisebb és a legnagyobb induktivitás-érték arányát. Legyen ez az induktivitás-ráta, melynek jelzése: R_L . Az induktivitás-rátát a következőképpen kapjuk meg:

$$R_L = \frac{\max(L)}{\min(L)}$$

ahol az induktivitás a maximumát akkor veszi fel, amikor nincs target a terkerccsel szemben, a minimumát pedig akkor, amikor a legszélesebb a target. Mivel a kimeneten az induktivitás egy rezgőkörben található, érdemes megnézni azt is, hogy milyen paraméterrel lehet leírni az induktivitás-változást. Erre be lehet vezetni egy másik mutatót, melynek neve frekvenciaráta R_f ami a szenzor kimenetén a mérés során mért legkisebb-legnagyobb frekvenciaértékek aránya.

$$R_f = \frac{\max(f)}{\min(f)}$$

A szimulációból az R_L könnyen számolható, míg a felbontásról az R_f mond sokat. Vizsgáljuk meg, hogy milyen összefüggés adható meg a két paraméter között. Az alábbi képlet szerint adott, hogy:

$$\min(f) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\max(L)C}}; \max(f) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\min(L)C}}$$

Írjuk fel R_f -et a rezonanciafrekvencia képletének segítségével:

$$R_f = \frac{\max(f)}{\min(f)} = \frac{2\pi\sqrt{\max(L)C}}{2\pi\sqrt{\min(L)C}} = \sqrt{\frac{\max(L)}{\min(L)}} = \sqrt{R_L}$$

a frekvenciaráta tehát gyöke az induktivitásrátának.

A frekvenciamérés módja is nagymértékben befolyásolja a pontosságot. Amennyiben a 2. fejezetben ismertetett módon zajlik a frekvenciamérés, a pontosság nagymértékben függ a mérőfrekvenciától. A felbontás azonban a szenzor alappfrekvenciájától: $\min(f) = f_0$, a mérési időtől (T_m) és a frekvenciarátától (R_f) függ. A szenzor alappfrekvenciájának azt a frekvenciát tekintjük, ami akkor alakul ki a rezgőkörben, ha nincs target a tekerccsel szemben (vagy nagyon keskeny az a szakasz, ami a tekerccsel szemben található), azaz a tekerces induktivitása a legnagyobb, így a rezgőkör frekvenciája a legkisebb. Bevezethetünk egy paramétert, b -t, ami azt adja meg, hogy az adott alappfrekvencián f_0 működő, adott mérési intervallummal T rendelkező kimenet hány bites felbontást eredményez.

$$b = \lfloor \log_2(\lfloor T f_0 R_f \rfloor - \lfloor T f_0 \rfloor) \rfloor$$

Ha a szenzor alappfrekvenciáját és a mérési időt adottnak vesszük, a felbontás kizárólag a frekvenciarátától függ, így ez egy jó paraméter a szenzor jellemzésére.

Analóg jel esetében is meghatározó a kimeneti jeltartomány, valamint az ADC felbontása, ami a katalógusban megtalálható paraméter.

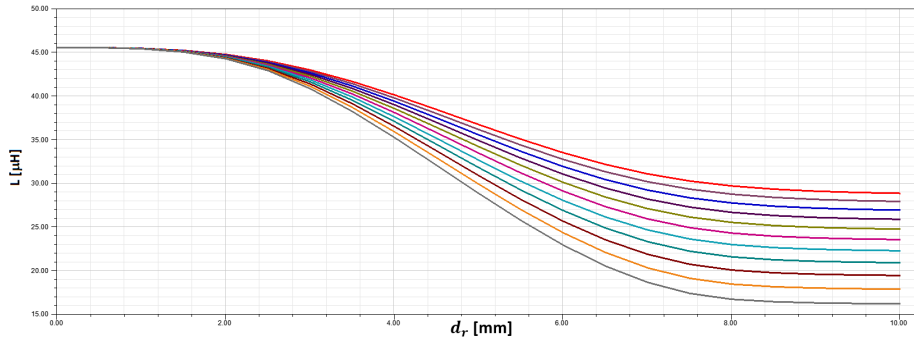
4.1.2. Mechanikai tolerancia

Ipari felhasználási környezetben a szenzor nagyon fontos paramétere az, hogy milyen toleranciával bír az egyes zavarásokkal szemben. Meg lehet határozni azt, hogy a mechanikai toleranciából fakadó zaj hogy viszonyul a szenzor frekvencia rátájához, azaz egy axiális vagy radiális elmozdulás hány százalékos változást jelent az alapállapothoz képest. Fontos tehát megvizsgálni a toleranciából fakadó zajt, és viszonyítani azt a frekvenciarátához, valamint az f_0 alappfrekvenciához, azaz hogy mekkora tartományban változik a tekerces frekvenciája mérés közben, és ehhez képest mekkora tartományban változik a frekvencia a zavaráshoz képest.

Ahhoz, hogy általános mutatót lehessen ezzel kapcsolatban bevezetni, először is tekintsük át, hogy milyen jellegű mechanikai problémák jöhetnek szóba:

- elmozdulás, rezgés a modell szerinti x, y, z irányokban
- összeszerelés hatására keletkező pozíció offset
- öregedés, fáradás, mechanikai hatás következtében létrejövő deformáció
- a felfogatás hibáinak következtében axiális iránytól való szögeltérés

Valamilyen módon a mechanikai zajokat is modellezni kell annak érdekében, hogy minél hatékonyabban tudjuk tanulmányozni a hatásukat. A modell esetében alapvetően három elmozdulástípus képzelhető el könnyen, mely típusok kombinációiból kiadódnak a felsorolt mechanikai problémák:



17. ábra. $+0,5$ mm axiális elmozdulás hatása a téglalap-tesztre. A görbék a szürkétől a pirosig a $0,1$ mm-es lépésközzel távolodó target téglalap-tesztjeit jelölik.

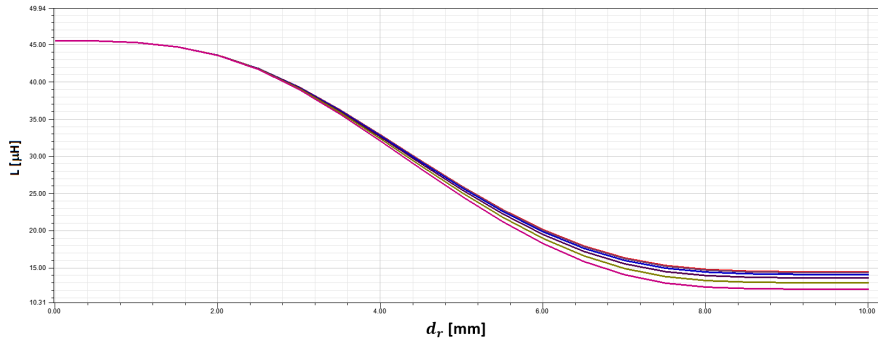
- axiális: Target és a tekercs síkjára merőleges az elmozdulás, a modell szerinti z irányban
- radiális: A Target síkjában, a modell szerinti xy irányban való elmozdulás.
- “billenés”: A target a közepén található tengely mentén elbillen, ezáltal a target átellenes oldalával szemben helyezkedő tekercsekkel szemben gyakorlatilag ellentétes axiális mozgás történik (minimális szögelfordulással, mely elhanyagolható ezen esetben, hiszen a target sugara a szélességéhez képest jóval nagyobb). Ez tehát azt jelenti, hogy vissza lehet vezetni a billenés vizsgálatát axiális elmozdulás vizsgálatára.

A hibát h átlagos relatív induktivitásként adjuk meg, és a következő módon értelmezzük, számoljuk:

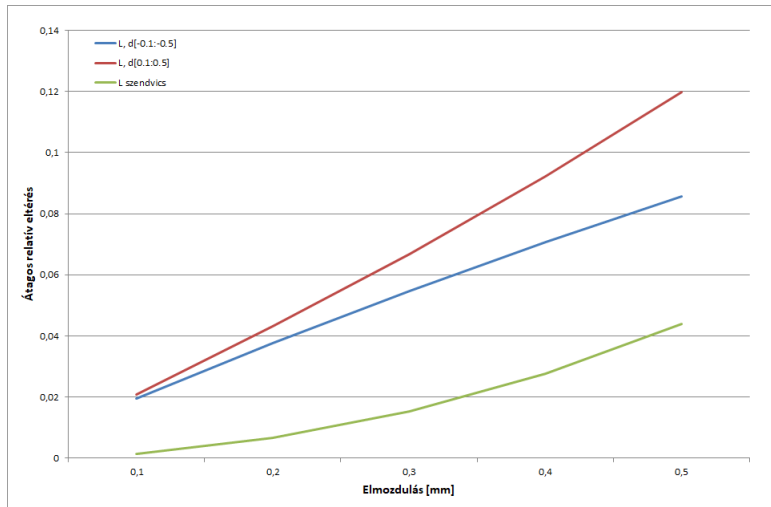
$$h = \frac{\sum_{i=1}^n |Lref_i - L_i|}{\sum_{i=1}^n Lref_i}$$

Ahol n a szimulált pozíciók számát jelöli, L_i az adott szöghelyzetben, adott eltolás esetében vett induktivitást, $Lref_i$ az adott szöghelyzetben, az eltolás nélküli induktivitást jelenti. Oda kell figyelni arra, hogy azonos szöghelyzetben lévő induktivitás-értékeket hasonlítsunk össze, azaz L_i és $Lref_i$ azonos szöghelyzetbeli értékek legyenek. A szöghelyzet megkapható az $\theta = i\Delta\theta$ képlettel, ahol $\Delta\theta$ az iterációnkénti elfordulást jelöli, tipikusan $3-5^\circ$ értéket vesz fel. Minden egyes adott elmozdulási pozícióban végrehajtottam a téglalap-tesztet, és a kimeneti görbe pontonkénti átlagos eltérését (abszolút értékben) elosztottam a nullhelyzetben lévő átlagos induktivitásértékkel. Ez az egy paraméter leírja azt, hogy egy adott elmozdulási pozícióban mekkora az átlagos relatív induktivitás-változás.

Az axiális elmozdulás hatásai az 17. ábrán láthatóak. Az elmozdulás hatása az elvártaknak megfelelően igen aszimmetrikus: minél nagyobb a tekercssel szemben levő felület, annál nagyobb az elmozdulás hatása.



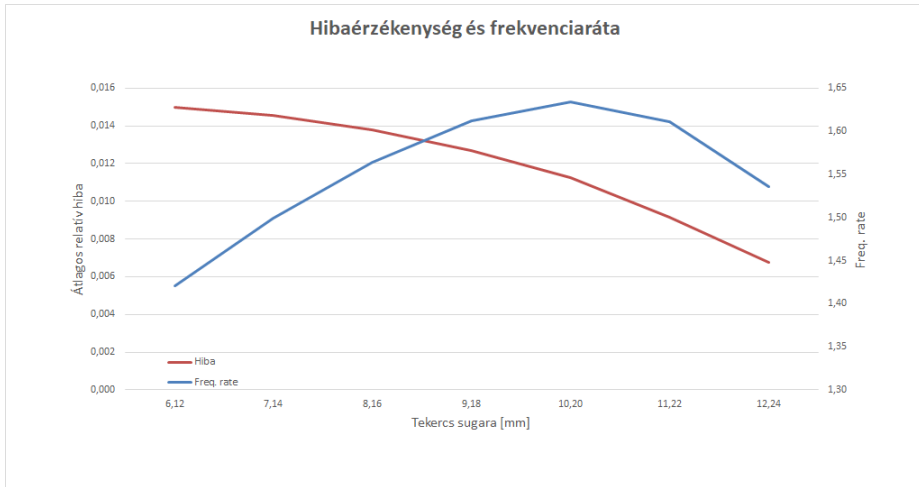
18. ábra. Szendvics elrendezésű target mozgásának hatása az induktivitásra. A görbék a pirostól a liláig 0-0.5mm között, 0.1mm-es közönként mozgatott target téglalap-tesztjeit mutatják.



19. ábra. A szendvics és a szimpla elrendezés h -ja axiális elmozdulás esetén.

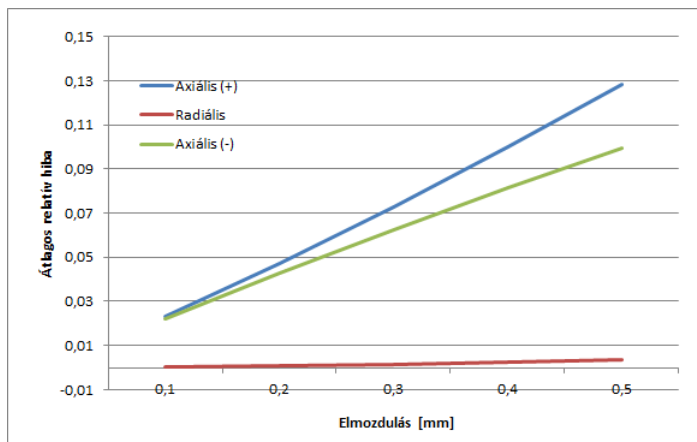
Az axiális elmozdulások kiküszöbölésére lehet megoldás az, ha a target a tekercs két oldalán, úgynevezett szendvics-formában helyezkedik el. A téglalap-teszt eredménye a mozgatott tekercsre a 18. ábrán látható. Észrevehető az, hogy az axiális mozgatás eredményeképpen létrejött induktivitás-változás mértéke (a h csökkenése) mellett a frekvenciaráta is változott azáltal, hogy egy helyett két target hat a tekercsre: az $R_f = 1,39$ -ről $R_f = 1,77$ -re nőtt. A két oldalon található targeteket axiális irányban mechanikailag jól rögzíteni kell egymáshoz, ami azt eredményezi, hogy amikor az egyik oldalon a target közeledik, a másik oldalon távolodik, ezáltal bizonyos mértékben önmagát kompenzálja a rendszer. A kompenzálás mértéke a 19. ábrán látható. A két felső (piros és kék) vonal a nullhelyzettől \pm irányban történő elmozdulások átlagos relatív hibáját mu-

tatják, míg az alsó (zöld) vonal a szendvics elrendezés hibáját (ahol szendvics két feléből az egyik + a másik - irányban mozdul el a tekercshez képest).



20. ábra. 1 mm radiális elmozdulás esetében a frekvenciaráta és az átlagos hiba a tekercs nagyságának függvényében

A radiális elmozdulás hatásai a 20. ábrán láthatóak. Azonos szélességű target esetében a tekercs méretének növelésével az átlagos hiba csökken. A frekvenciaráta maximuma ott van, ahol a tekercs szélessége a target szélességénél 2mm-el nagyobb.



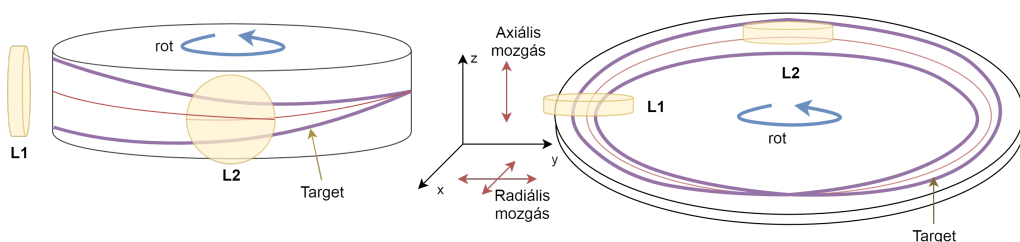
21. ábra. Axiális és radiális elmozdulások átlagos relatív hibája

Ezen két függvény alapján kell meghatározni a tekercs méretét aszerint, hogy számunkra mi a fontos: mekkora érzékenységet szeretnénk illetve mekkora frekvenciarátát. Ennek értelmében ha kellően nagyra választjuk a tekercset, a ra-

diális irányú mozgás zavaró hatása lecsökken, adott méretű target esetében, ugyanakkor a frekvenciaráta is csökken.

A 21. ábrán jól látható az, hogy a tekercshez rögzített koordináta rendszerben vett axiális és a radiális elmozdulások hatása nagyban eltér. Egy 0.1-0.5mm-es elmozdulási tartományt nézve az axiális elmozdulás által okozott átlagos eltérésnek átlagosan 1.88%-a a radiális elmozdulás által okozott eltérés.

Amennyiben kiderül az, hogy egy-egy tekercs vagy szenzor olyan mechanikai körülmények közé kerül, hogy irányok szerint nagyságrendekkel eltér a hatások mértéke, meg lehet tenni azt, hogy a szenzor geometriáját áttervezzük eszerint. A tekercs axiális és a radiális elmozdulásának toleranciái közti különbségeknek köszönhetően érdemes megfontolni azt, hogy a szenzor felépítését milyen orientációban érdemes megtervezni, azaz a tekercs axiális iránya párhuzamos vagy merőleges legyen a target axiális irányára.



22. ábra. Target axiális és radiális elmozdulásaira különbözően érzékeny elrendezések

A 22. ábrán látható módon meg lehet oldani ugyanis azt, hogy ugyanazon az elven működő geometriát egy henger palástjára helyezzük el, és a henger érintősíkjára helyezzük a tekercset, ezáltal a target axiális elmozdulásaira toleránsabb lesz az elrendezés, mint a radiálisokra, hiszen a target axiális elmozdulása a tekercs szempontjából radiális elmozdulást jelent és fordítva. Míg ha azt a geometriát a tengelyre merőleges síkban rajzoljuk fel és a tekercset egy ezzel szemben lévő párhuzamos síkra helyezzük, a szenzor a target radiális elmozdulásaira lesz toleránsabb, míg az axiálisokra kevésbé lesz toleráns.

4.2. Geometriai követelmények

Abban az esetben, ha a szenzort valós környezetben szeretnénk felhasználni felmerül a kérdése annak, hogy egy adott design elhelyezhető-e a mérni kívánt eszközön. Ez sokszor igen szűk előírást jelent a tekercs vagy a target méreteire vonatkozólag. Ezek a méretbeli előírások képesek teljes mértékben befolyásolni a szenzor mérési elvét, ugyanis látni fogjuk, hogy technológia működését biztosítandó vannak minimum előírások például a target szélességével kapcsolatban.

4.3. Az induktív szenzor tekercsének tervezése

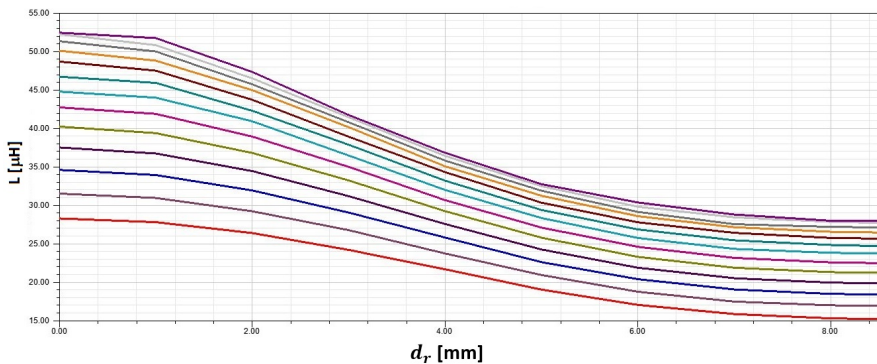
A tekercs paramétereivel kapcsolatban alapvetően két fő kérdés merül fel. Egyrészt az, hogy mennyire telített tekercset érdemes létrehozni, azaz az induktivitás növelése milyen hatást gyakorol a téglalap-teszt görbéréjére. Másrészt pedig az, hogy amennyiben hold alakú targetet forgatunk a tekercs előtt, mekkora az optimális tangenciális irányú nyújtottsága a tekercsnek.

4.3.1. Tekercs menetszáma (telítettsége)

A téglalap-teszt segítségével könnyedén lehet összehasonlítást végezni azonos méretű, de különböző menetszámú tekercsek között. Megvizsgáltam, hogy az adott menetszámú tekercssel szemben forgatott target mekkora frekvenciáját eredményez, illetve a teszt kimenet milyen tartományon lineáris. A vizsgálat-hoz a négy-gyűrűs, 3D modellt használtam, minden esetben a tekercs egyforma átmérővel rendelkezett. A 23. ábrán látható eredmények esetében a menetek sűrűsége állandó volt, tehát minél kisebb volt a menetszám, annál nagyobb lett a tekercsen belül található szabad terület.

A második esetben a tekercs gyűrűjének külső és belső átmérője is adott volt, miközben változott a menetszám. Ez a vizsgálat arról ad képet, hogy a tekercs meneteinek szélessége és a menetei közötti távolság, clearance milyen hatással vannak az induktivitásra.

A mérés feldolgozásaként a kimeneti görbéket Python program dolgozta fel. A program mélységi keresés segítségével határozza meg azokat a tartományokat, melyek megfelelő induktivitás-rátával rendelkeznek, valamint a tartományon belüli induktivitás-görbe kellő meredekséggel bírnak. Ezen programmal meg lehet határozni az adott tekercsátmérőhöz és induktivitás-tartományhoz tartozó optimális menetszámot és target szélességtartományának értékét.

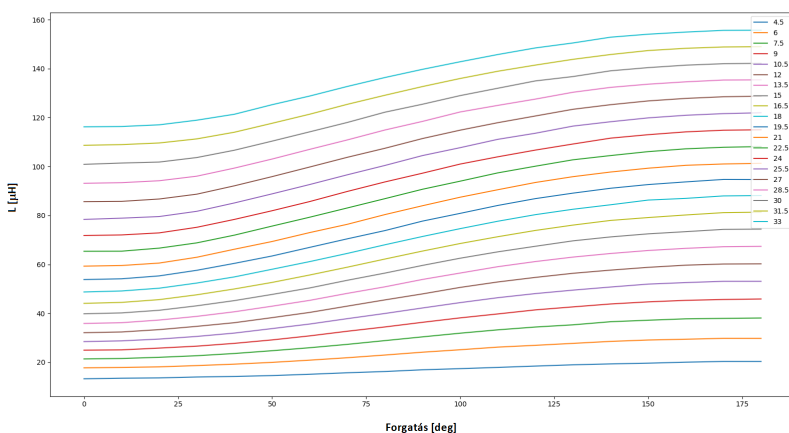


23. ábra. A téglalap-teszt, változó menetszámú tekercs esetén

A pirostól a lila görbéig 11-23 között egyesével nő az egy rétegen található menetszám

4.3.2. Tekerics tangenciális nyújtottsága

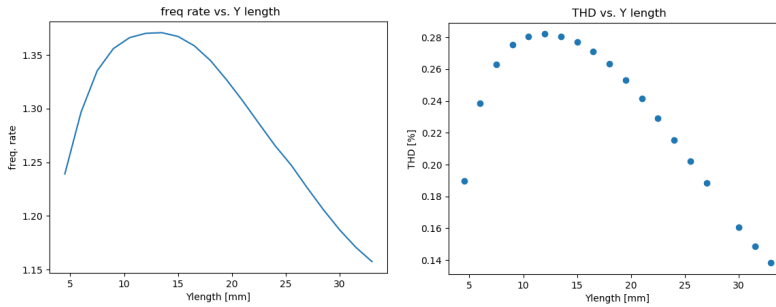
A tekerics geometriája szempontjából felmerül kérdésként az, hogy mi az előnyösebb: minél kisebb szeletet érzékelni a targetból, azaz egy radiálisan nyújtott tekerics, vagy minél nagyobb szeletet érzékelni, azaz egy tangenciálisan nyújtott tekerics. A tekerics nyújtottságának vizsgálatakor nem volt elég a téglalap-tesztet alkalmazni, hiszen nem tudunk azzal az elhanyagolással élni, hogy a target tekerics által látott metszete téglalap alakú, hiszen pont ez képezte a vizsgálat tárgyát, azaz milyen hatással van az induktív-tás-változásra az, hogy mekkora és milyen íves target-részt lát a tekerics. A vizsgálat lineárisan változó szélességű targettel folyt. A téglalap-teszt eredménye a különböző tekerics-nyújtottságokra a 24. ábrán látható.



24. ábra. A lineáris target forgatásának hatása változó nyújtottságú tekerics esetén

A sötétkéktől a világoskékig (y tengely mentén pozitív irányba indulva) tartó görbék az egyre nyújtottabb tekercekhez tartoznak

Két paramétert vizsgáltam: a tekerics frekvenciarátáját, valamint egy körbeforgatás által okozott kimenet szinuszoságát. Mivel a target szimmetrikus, a kimenetet elég 0° - 180° tartományon vizsgálni. A szinuszoság megállapítására az ANSYS beépített FFT kalkulátorát lehet használni, mely automatikusan elvégezte a kimenet Fourier-transzformációját. Az elforgatás következtében létrejött fél-szinusz FFT kimenetéből Python program számolt THD-t a szinuszos jelekre, hogy megállapítsuk annak szinuszoságát. Adott volt egy téglalap alakú tekerics (az egyszerűség kedvéért 1 gyűrűs modellel), melynek a tangenciális irányú nyújtottsága változott. Minden egyes tekerics esetében körbeforgattam a targetet, 10° -os lépésközzel. A forgatás eredményeként létrejött kimenő jelek tangenciális nyújtottság szerinti összehasonlítása a 25. ábrán látható.



25. ábra. A tangenciálisan változtatott hosszúságú tekercs kimenetének THD-ja és frekvencia rátája

Érdekes tapasztalat volt, hogy a frekvenciaráta és a THD ugyanolyan jellegű görbét vesznek fel a tekercs szélességének változtatásával, tehát ebben a helyzetben is kompromisszumot kell hoznunk, hiszen a minél kisebb THD és minél nagyobb frekvenciaráta elérése a célunk, hiszen a frekvenciaráta a felbontást határozza meg, míg a THD a nyers hibát.

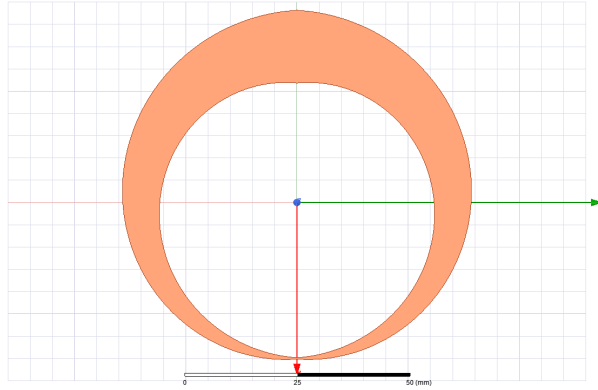
A tekercs telítettség vizsgálatához használt mélységi kereső szkript ezen eredményhalmaz feldolgozására is képes amennyiben megadjuk a szükséges paramétereket (frekvenciaráta, kvázi lineáris tartomány).

4.4. Target tervezése

A target tervezése kulcskérdés a szenzor szempontjából, hiszen a target paramétereit lehet a legkönnyebben módosítani, mivel itt van a legkevesebb kikötés. A gyártás szempontjából a legegyszerűbb és legkényesebb megoldás az, ha a targetet PCB-n alakítjuk ki. Így nagyon pontos geometria kialakítására van lehetőség úgy, hogy egyedül a PCB gyártási paramétere limitálnak minket, azaz a vezetőréteg vastagsága adott értékeket vehet fel, valamint a legkeskenyebb réz vezető sáv is elő van írva. A target vastagsága befolyásolja a szenzor működési frekvenciáját, hiszen minél nagyobb a frekvencia, a skin-hatásnak köszönhetően elegendő egyre kisebb vastagságú target.

A target tervezéséhez kicsit tovább kellett gondolni a téglalap-tesztet. Ha a lineárisan változó szélességű téglalapot egy körívre vetítjük, egy lineárisan változó szélességű targetet kapunk. Egy teljes periódusban, azaz egy körfordulás alatt a target szélessége a minimumtól a maximumig (0° - 180°), majd a maximumtól a minimumig (180° - 360°) változik. Ez a target a 26. ábrán látható módon néz ki.

A target minimális és maximális szélességének megválasztásához fel tudjuk használni a tekercs vizsgálataiból származó eredményeket. A meghatározott lineáris tartomány és a frekvenciaráta kiadja a target körívmenti szélességének minimumát és maximumát. A target minimumát a targetben kialakuló örvényáramok által felépített tér korlátozza. A szimulációs eredményeken jól látszik,



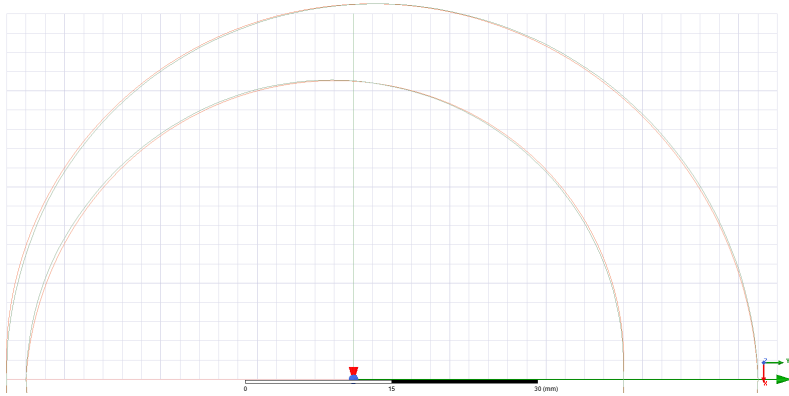
26. ábra. Lineárisan változó szélességű target

hogy ha 2mm-nél keskenyebb a target, az örvényáramok kis felületen tudnak létrejönni, azaz a tekercssel szemben lévő induktivitás elhanyagolható, a szélesség változása nagyon kis léptékű induktivitás változást okoz. A target legszélesebb pontját a tekercs átmérője korlátozza. A kellő érzékenységhez szükség van egy kritikus induktivitás-értékre, ami a gyakorlatban egy minimális menetszámot jelent. A szimulációk alapján minimum 3-4 menet kell hogy legyen a target teljes szélességén túl. Ez összességében egy tipikus tekercs paramétert nézve (0.15 mm clearance, 0.15 mm track szélesség), körülbelül 2mm-t jelent az átmérőre nézve. Tervezési ökölszabályként lefektethető az, hogy a target szélességének $[2mm : D_{tekercs} - 2mm]$ tartományon kell mozognia.

4.4.1. A target javítása egyszerű módon

Amennyiben meghoztuk a döntést a fentebb leírt design kérdésekkel kapcsolatban, felmerül a lehetősége annak, hogy megpróbáljuk a target geometriáját módosítani úgy, hogy az szinuszos kimenetet adjon a körbefordulás hatására. Első lépésként elvégezzük a lineáris target szimulációját. A lineáris target méretei (maximális és minimális szélesség) a korábban ismertetett telítettségi téglalapteszt segítségével lettek meghatározva, azaz a target maximális szélessége 2mm-el kisebb, mint a tekercs átmérője, illetve a minimális szélessége 2mm. A forgatás léptéke a lehető legkisebb, hogy minél nagyobb felbontással rendelkezünk adatokkal a targetról. Ezen felbontást maximalizálja a szimuláció energiahibája, ami miatt a kimenet nem lesz egyenletes. Ezt kiküszöbölendő 5°-os lépésekben szimuláltam a lineáris targetet.

Ezt követően kiszámoltam a szenzor kimeneti frekvenciáját a körbeforgatás függvényében a rezonanciafrekvencia képletének segítségével. A kapott frekvenciamenet mellé helyezünk egy úgynevezett "kívánt" frekvenciamenetet, ami egy szinuszos függvény. Mivel mindkét frekvenciamenet egy 180°-os tartományon monoton nő, egyértelműen össze lehet rendelni őket úgy, hogy a kívánt frekvenciamenethez pontonként meg tudjuk adni azt, hogy a lineáris target mely



27. ábra. A lineáris és a számított target összehasonlítása

pozíciójában veszi fel a rezgőkör azt a frekvenciaértéket, azaz a kívánt frekvenciamenethez pontonként target-szélesség rendelhető. Ezt követően le lehet generálni egy új targetet, amely frekvenciaválasza jobban megközelíti a kívánt kimenetet. A 27. ábrán látható a lineáris és a számolt target különbsége. A két target jól illeszkedik egymáshoz, ami azt jelenti, hogy a lineáris target elég jó közelítést ad a szinuszos kimenetre az adott paraméterek mellett (4.1%-os hiba)

A nagy lépésközzel, nagy hibával, egy iterációból ily módon számolt target átlagos relatív induktivitás hibája (az ideális szinuszéhoz képest) 2.79%. Ez az eredmény a lépésköz és az energiahiba csökkentésével, valamint esetleg több iteráció elvégzésével a tovább javítható.

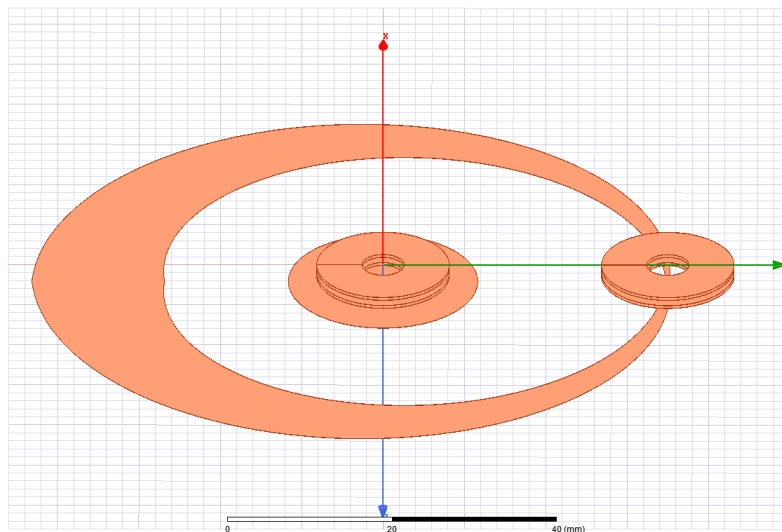
5. Új szenzor tervek

Az előző fejezetekben ismertetett vizsgálatok alapján fel tudjuk mérni azt, hogy melyek az induktív szenzorok kulcsparaméterei, amelyek alapján az ilyen elven működő szenzorokat rangsorolni tudjuk teljesítmény alapján. A legfontosabb paraméterek a frekvenciaráta, ami meghatározza a felbontási képességünket, valamint az alapprofrendencia f_0 , azaz hogy mekkora a tekercs rezonanciafrekvenciája target-nélküli állapotban. Másik fontos paraméter a hibátűrés, azaz hogy az adott elrendezés mennyire érzékeny az axiális illetve a radiális elmozdulásokra, valamint az excentricitásra. Nem mellékes kérdés továbbá az sem, hogy a szenzor milyen kimenettel rendelkezik, a kimenet egy körbefordulás alatt hány-szor képes bejárni a frekvenciáját, azaz hány-szoros felbontással rendelkezik, valamint hogy a feldolgozásához milyen komplexitású rendszer szükséges.

A modellalkotás és a szimulációk során felmerült jópár koncepció ötlet, mely ötletek megoldásokat hordoznak magukban a szenzorra jellemző egyes probléma típusokra. A következő fejezetben ismertetem az általam létrehozott új koncepciókat és összehasonlítom őket az eddig ismertetett paraméterek szerint.

5.1. Kompensátoros mérés

Az előző fejezetben ismertetett hibaforrások közül a legnagyobb hatással az axiális elmozdulás bír a tekercs induktivitására, így felmerül a kérdés, hogy milyen formában lehet esetleg kiküszöbölni az ilyen jellegű hibákat. Egy megoldási lehetőség látható a 28. ábrán.



28. ábra. Kompensátoros elrendezés

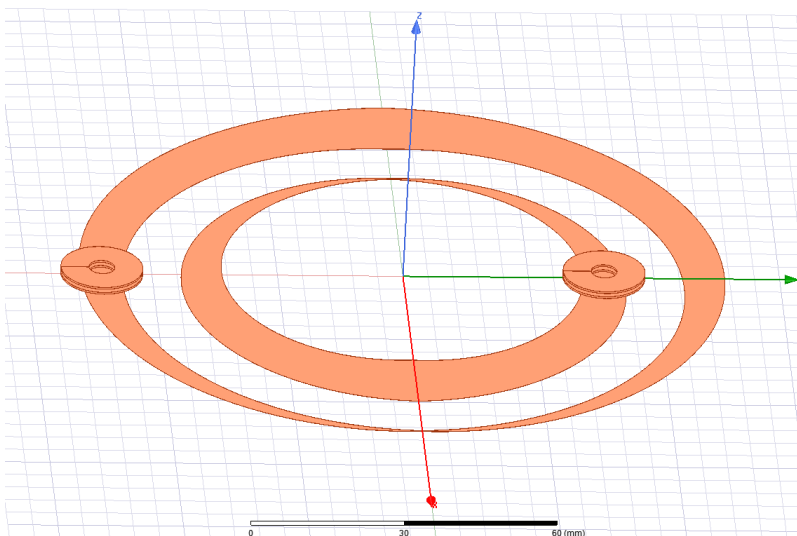
A szenzor geometriája kiegészül plusz egy tekercsrel illetve egy, azzal szemben elhelyezkedő targettel. Azt a plusz targetet használhatjuk az előforduló

hibák kompenzálására. A referenciaszenzor segítségével a mechanikai zajok mellett a potenciálisan a környezetből érkező egyéb zavarásokat is ki lehet küszöbölni. A kiköszöbölés történhet a digitális jelfeldolgozási szint előtt, de bizonyos esetekben a digitális feldolgozásban is megoldható a probléma.

Ezt a koncepciót nagy axiális tolerancia jellemzi, egyszeres felbontás mellett.

5.2. Dupla targetes koncepció

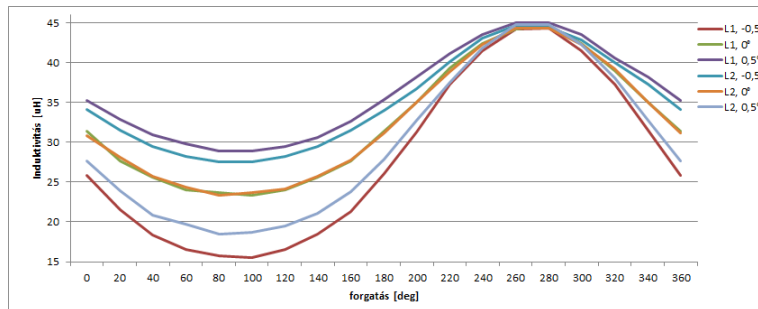
Sok motorra szerelt szenzorban jelent problémát az excentrikus mozgás, ami azt jelenti, hogy egy fordulat közben a target hol közelebb kerül, hol eltávolodik az érzékelő tekercstől. Az induktív szenzor esetében ez közös módusú hibát okoz, ami nehezen kompenzálható. Olyan megoldásban kellett gondolkodni, ami ezt a problémát potenciálisan ki tudja küszöbölni.



29. ábra. Két targetet alkalmazó szenzor modellje

Az automotive rendszerbe tervezett szenzoroknak szigorú biztonsági előírásoknak kell megfelelniük, ezért redundánsoknak kell lenniük. A redundancia jelen esetben azt jelenti, hogy egy tekercs-pár (melyek alapesetben szinuszoszínusz kimenettel rendelkeznek, és amelyekből meghatározható az arcus tangens függvény segítségével a szög) helyett két tekercs pár dolgozik párhuzamosan. Jogosan jön szóba az a felvetés, hogy a két plusz tekercset a redundancia mellett esetleg kompenzációra is használjuk. Így született meg a dupla targetes koncepció, mely a 29. ábrán látható. Ezen koncepció esetében a két target koncentrikusan helyezkedik el egy lemezen, egymással 180° -os fázistolásban, és két tekercs egymással 90° -ban az egyik targetet, a másik két tekercs a másikat érzékeli. Ennek köszönhetően az a tengely kibillenésére az egymással szembe lévő, különböző targeteket mérő tekercsek jeleit ellentétes módusban zavarja. A 30. ábrán jól látható hogy mivel a két target különböző sugáron helyezkedik el,

a kibillenés hatása a két tekercsen nem lesz egyforma, azonban mivel a targetek sugarának aránya határozza meg a két okozott hatás induktívitás-változásban megjelenő különbséget, a kompenzációkor ezt figyelembe lehet venni.



30. ábra. Két targetet alkalmazó szenzor két, egymást kompenzáló induktívitásainak görbéje az elforgatás függvényében: 3-3 görbe tartozik össze, s mutatja egy tekercsre a párhuzamos, valamint az axiálistól $\pm 0.5^\circ$ -kal kibillentett pozícióban az értékeket.

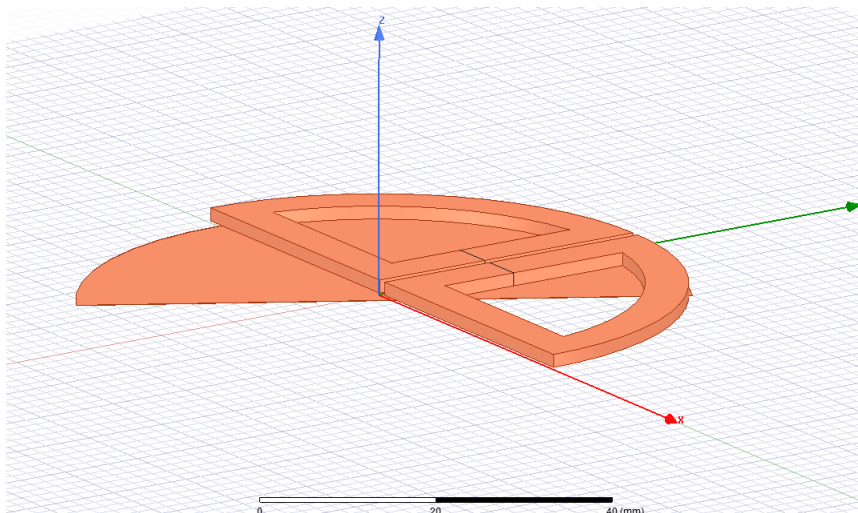
Ez a megoldás elvben hasonlít ahhoz az elrendezéshez, amikor a tekercs mindkét oldalára helyezük a targetet (szendvics elrendezés). Azonban a szendvics megoldás mechanikai problémák sorát veti fel. A dupla targetes megoldás könnyen megvalósítható a 3.1 fejezetben bemutatott példakonstrukció kisebb volumenű változtatásaival.

Jelen konstrukció egyszeres felbontással bír, hiszen a frekvenciaráta két végértéke között egyszer megy végig egy körbefordulás alatt. A frekvenciaráta értéke 1,38. A rendszer az axiális elmozdulásokra érzékeny, azonban az axiális tengelyből való kibillenés által okozott hibák kompenzálhatóak.

5.3. Analóg enkóder

Felmerült az a kérdéskör, hogy hogyan lehet maximális kimeneti tartományú (frekvenciaráta), de mégis egy körbefordulás alatt abszolút kimenettel rendelkező szenzort konstruálni. Az ötlet alapja az, hogy egy tekercs maximális frekvenciatarományát akkor használjuk ki, ha a teljes fedettségig eljutunk. A következő koncepció szerint megoldható az, hogy négyszer bejárjuk egy irányba az induktívítástartományt egy körbefordulás alatt. Két tekercssel lehet érzékelni a két-két fel illetve lefutó induktívitás-változást. A két tekercs kétféle változásából kiadódik az, hogy minden változáskor tudjuk azt, hogy éppen a fordulat mely szakaszában vagyunk.

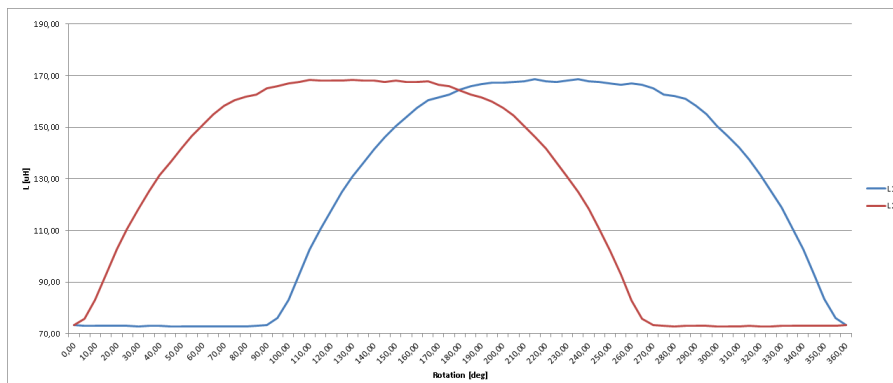
A 31. ábrán látható a koncepció modellje. Redundancia nélkül két tekercsünk van, melyek felülete lefedi a kör egynegyedét. (A modell körcikkekkel lett megvalósítva, de valójában a rendszer működik körgyűrű-cikkkel is.) A tekercsekkel szemben egy félkör alakú target található. A körbefordulás hatására mindig csak egy tekercs kimenete változik, de mindig változik egy tekercs kimenete.



31. ábra. Félkör alakú targetet alkalmazó szenzor 3D modellje

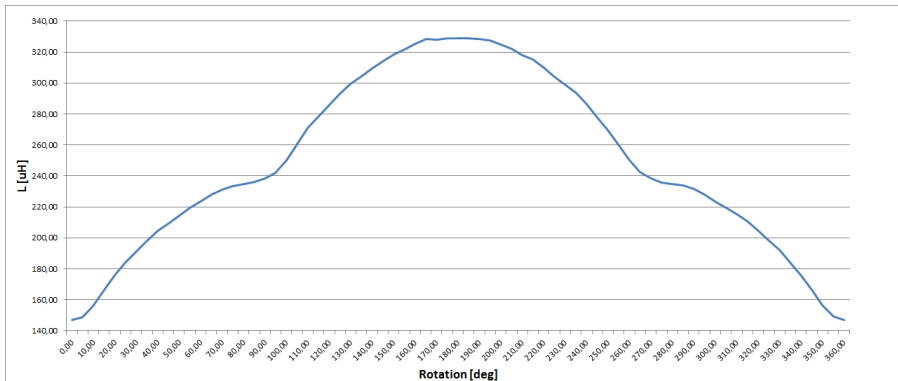
Ez az elrendezés gyakorlatilag egy enkódernek megfeleltethető, ami 2 inkrementtel rendelkezik fordulatonként, de az inkrementek között folytonos átmenet van, ami így valójában analóg kimenetet jelent. Egy másik megközelítésben az inkrementek száma jelenti azt, hogy hányszorosát tudjuk elérni egy adott frekvenciárával rendelkező szenzor frekvenciájának. A 32. ábrán látható a két tekercs kimenete 360°-os elforgatás függvényében a kimeneti jel.

A kimeneti induktív-értékek összeadásával vagy kivonásával (ami megoldható úgy, hogy a két tekercset sorba kötjük azonos vagy ellentétes tekercseléssel) egy jól feldolgozható háromszögjelet kapunk, mely LUT segítségével feldolgozható és a szögkimenet előállítható. A 33. ábrán látható a két induktív-érték összege. A jelalak szimmetriája nem a legtekéletesebb, hiszen a



32. ábra. Az analóg enkóder-szenzor induktív-érték-változásai

tekercsek illesztéséből fakadóan az induktivitás-menet nem egyenletes, van egy betörése. Ez az egyenetlenség a target formájának módosításával kikompenzálható: a félkör szélein és a negyedelő pontban a target szélességének nagyobbak kell lennie a többi pozícióbeli szélességhez képest.



33. ábra. A kimeneti induktivitások összege

Ez a koncepció 2x-es pontossággal rendelkezik, viszont a feldolgozásához bonyolultabb logika szükséges (amennyiben a tekercseket külön-külön mérjük). A target és a tekercs nagyobb felülettel rendelkezik, így nagyobb párhuzamos irányú tolerancia érhető el.

Így összességében 1,52-es frekvenciaráta érhető el egyoldalú target segítségével. Amennyiben szendvics elrendezést használunk, a szenzor kevésbé lesz érzékeny az axiális zavarokra, és a frekvenciarátája 2.02-re emelkedik.

Mivel ez a koncepció nagy felületű tekercsekkel dolgozik, a fentebb ismertetett axiális vagy merőleges elmozdulás-vizsgálat csak részben érvényes erre a koncepcióra.

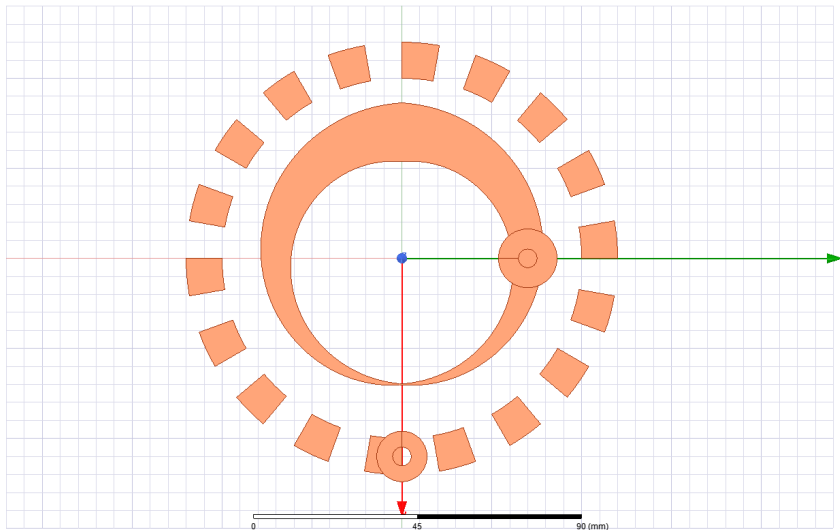
5.4. Hibrid elrendezés

A következő koncepció ötvözi az előző kettőben felhasznált elképzeléseket, miszerint érdemes meglépni azt, hogy nem egy targettel operálunk, valamint hatékonyan lehet bevetni a frekvenciaráta növelése érdekében az analóg enkóder struktúráját.

Ennek nyomán jött létre a 34. ábrán látható koncepció. Két targetünk van: az egyik egy hagyományos változó szélességű, hold formájú target, mely egy tekercssel mérve 180°-os tartományon tud abszolút kimenetet adni. A második target teljesen hasonlít egy enkóder geometriájához: egy körgyűrűből kiszelt cikkek sorozata alkotja, mintha egy sakktábla egy sorát görbítettük volna egy körívre.

Feltételezzük, hogy a hold targettel szemben lévő tekercs ideális szinuszos frekvencia-kimenettel rendelkezik 360° elforgatás hatására.

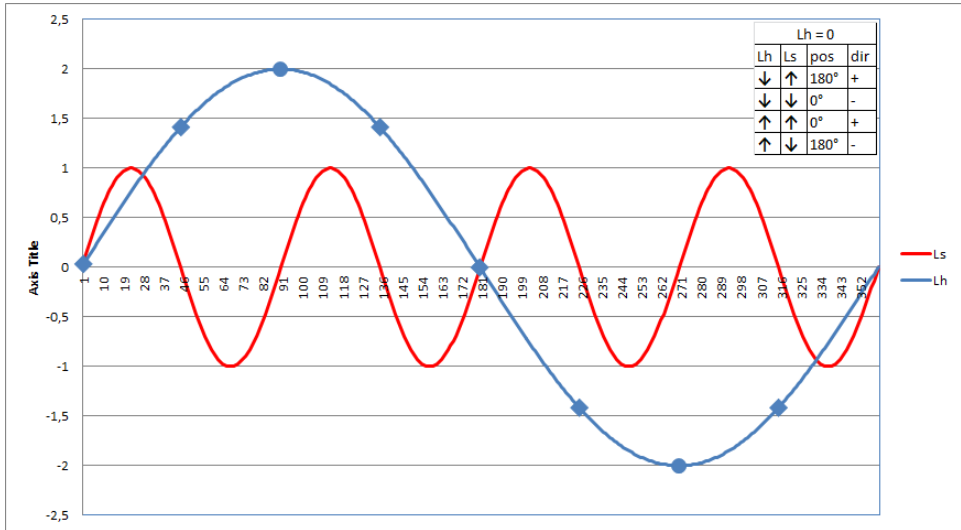
Ehhez képest a sakktábla-target $\frac{360}{N}$ fokban rendelkezik hasonlóan szinuszos kimenettel, ahol az N a cikkek számát, azaz a pólusszámot jelenti. Meg kell



34. ábra. Analóg enkóder-hold hibrid elrendezés

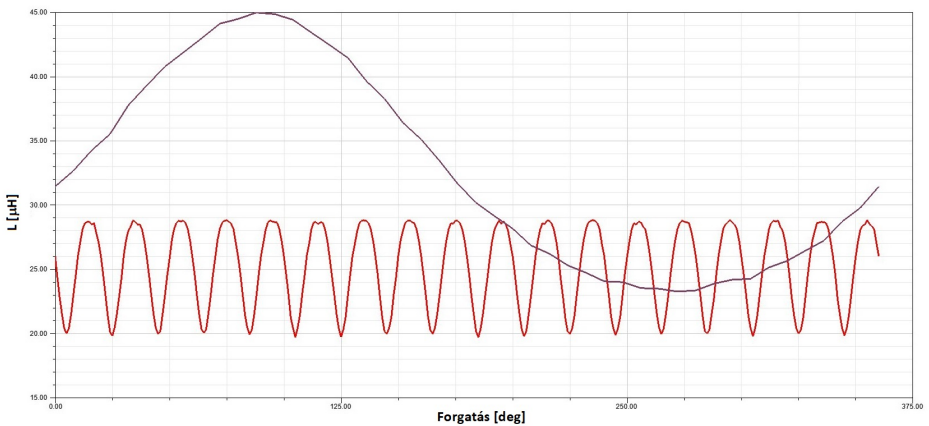
vizsgálni azt, hogy miképp lehet biztosítani, hogy abszolút szögkimenettel rendelkezünk, és milyen korlátozásaink lesznek. Amennyiben úgy pozicionáljuk a sakktáblát a holdhoz képest, hogy a hold maximális (vagy minimális) szélességének vonalához illesztjük a körgyűrűcikk egyik oldalát, a két jel fázisa 90 fokot fog eltérni. A szenzor szimulált kimeneti jelei a 36. ábrán láthatóak. A kisebb tekercs, mely a sakktábla-targetet méri, 1.21-es frakvencia rátával rendelkezik, míg a lineáris target 1.39-essel. Ennek a fázisnak köszönhetően a két jelből meghatározható az abszolút pozíció. Egyedül bekapcsoláskor adódnak problémák, hiszen van néhány olyan pozíció-pár, amikor nem tudjuk eldönteni azt, hogy kettő közül melyik pozícióban vagyunk. Alapvetően minden olyan pontban, amikor a sakktáblás target kimenetén nullátmenet van, a két jel kimenete kétértelmű, ez $2N$ esetet jelent egy fordulat alatt. Ezalól kivételt képez a hold alakú target minimum illetve maximum értéket felvevő pozíciója, ugyanis ilyenkor ezen target jele önmagában meghatározza az abszolút pozíciót. Így összességében $2N - 2$ bizonytalan ponttal rendelkezik az elrendezés.

Ez a bizonytalanság könnyen kiküszöbölhető úgy, hogy a bekapcsoláskor az az eszköz (motor), aminek a szögét mérjük, elforgatja a targetet annyival, hogy biztosan meg lehessen mondani azt, hogy a kettő közül melyik pozícióban van. (Ez az elforgatás nem elképzelhetetlen, hiszen például egy kormányrendszer esetében a bekapcsoláskor sok járműben alaphoz elfordul pár fokot a kormány) Ekkor a négy eset (két pozícióból 2-2 irányba indulhat a rendszer) a két jel változásának iránya szerint szétválasztható, és a pozíció pontosan meghatározható. A 35. ábrán látható a két érzékelőtekercsből (L_s = sakk-tekercs, L_h = hold-tekercs) származó teoretikus szinusz jel (normalizálva -1:1 valamint -2:2 közé a könnyebb átláthatóság érdekében). A sakktábla-tekercs változásának



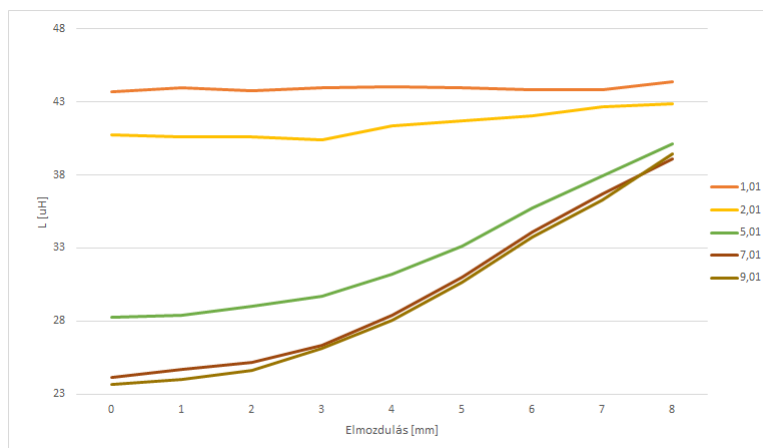
35. ábra. Hibrid elrendezés bizonytalan pontjai

iránya meghatározza a mozgás irányát, míg a két tekercs változás-irányának kizárólagos kapcsolata meghatározza a pozíciót. A változók kiértékelését a döntési hely függvényében másképp kell végezni. A 35. ábra jobb felső sarkában található táblázat a normalizált érték $L_s = 0$ esetében mutatja a kiértékelés logikáját. Amint meghatároztuk bekapcsoláskor a pozíciót, a jel folytonosságának feltételezésével élve egy körbefordulásra az abszolút pozíciót minden esetben meg tudjuk állapítani.



36. ábra. A szenzor kimeneti jelei, ahol a piros görbe az L_s , a kék görbe pedig az L_h értékeket mutatja az elfordulás szögének függvényében.

A szög számítása úgy zajlik, hogy a félhold target segítségével először meghatározásra kerül egy nagyjából pozíció (adott felbontással a 360° -os tartományon), majd a sakk target segítségével a pontosodik a pozíció adott felbontással $\frac{360}{N}$ tartományon. Ezáltal összességében N -szeres felbontás érhető el. Fontos megvizsgálni azt, hogy mekkora lehet az N , a rendszer pólusszáma, milyen geometriát vehet fel a sakktábla-target. Ezen paraméter tervezésekor végig kell menni egy sor olyan kérdésem, melyek megválaszolására az előző fejezetben tettünk kísérletet. A 37. ábrán látható, hogy adott szélességű téglalapok a tekercshez képesti teljes fedésből (0 mm) elmozgatva milyen induktivitás-változással rendelkezik egy 8mm sugarú tekercs esetében. A megfelelő frekvenciárata elérése érdekében szükséges, hogy a tekercs keresztmetszetével egyforma, vagy annál maximum 2mm-el keskenyebbek legyenek a target élei. A gyűrűcikket érdemes egy négyzettel közelíteni, ahol a négyzet egyik oldala a cikk középkör-menti hossza, a másik oldala pedig a sugár irányú szélessége.



37. ábra. Teljes fedésbe mozgatott téglalap-teszt. Az y-tengelyen az induktivitás, az x tengelyen pedig a téglalap és a tekercs középpontjának különbsége található, valamint a sötétzöldtől a pirosig az egyre szélesebb targetek görbéi láthatók

Úgy kell tehát megválasztani a target sugarát, valamint a körcikkek szélességét, hogy N számú cikket választva (ahol N páros, hiszen egy "teli" cikket egy "üres" cikket követ) az adódó körcikkek paraméterei optimálisak legyenek. Elképzelhető továbbá az is, hogy amennyiben a feldolgozás szinusz jelet igényel, az üres és a teli cikkek méretét úgy kell tervezni, hogy azok különbözőek legyenek, valamint hogy nem a körcikkek lesz az ideális target-geometria.

A 34. ábrán ábrázolt változaton $N = 18$ a pólusszám. Ezen példány esetében a tervezési paraméterek célfüggvénye az volt, hogy a két koncentrikus target szélessége ne haladja meg az eredeti geometriai méreteket. Így lett a hold target sugara kisebb, valamint a sakktábla-target szélessége keskenyebb.

Ez a koncepció N -szeres pontosságot tud elérni, ahol az N 16-20 között mozgó természetes szám.

5.5. Koncepciók összehasonlítása

Az előző részben ismertetett koncepciók rendelkeznek előnyökkel és hátrányokkal. Objektív módon a frekvenciaráta szerint lehet rangsorolni a koncepciókat. A frekvenciaráta mellett fontos paraméter az, hogy a szenzor egy körbefordulás alatt hányszor járja meg a frekvenciatartományt, azaz a felbontása hányszoros. Emellett még bizonyos korlátozásokkal a korábbi fejezetben ismertetett vizsgáló mérések alapján más paraméterek segítségével lehetőség van arra, hogy a rendszerek hibatűréséről is tudjunk megállapításokat tenni.

Modell	Felbontás	R_f	Axiális érz.	Radiális érz.	Billenés érz.	Feldolgozó logika
Kompenzátor	1x	1,38	kicsi	átlagos	átlagos	egyszerű
Analóg enk.	2x	1,52	átlagos	kicsi	kicsi	egyszerű
Dupla target	1x	1,38	átlagos	átlagos	kicsi	összetett
Hibrid target	18x	1,21	átlagos	átlagos	átlagos	összetett

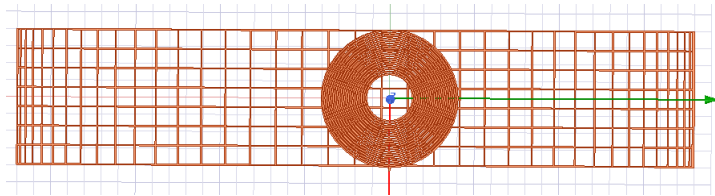
3. táblázat. A koncepciók összehasonlítása

Az axiális, a radiális, valamint a billenésre való érzékenységgel kapcsolatban nem végeztem konkrét szimulációkat az egyes koncepciók esetében, azonban a 4. fejezetben tett vizsgálatok alapján intuitív módon kategóriákba sorolhatóak az egyes koncepciók.

5.6. További ötletek és továbbfejlesztési lehetőségek

Az eddig ismertetett koncepciók maguk után hagynak jónéhány kérdést, felvetést, amik mellett nem érdemes, elmenni, hiszen a későbbiekben majd ezek mentén lehet tovább indulni a javítások érdekében.

Ötlet szinten felmerült az, hogy a target struktúráját meg lehet változtatni. A teljes felületű targetben "szabadon" alakulnak ki az örvényáramok, egyedüli korlátozás az, hogy mekkora a target szélessége. Ha azonban a target egyfajta hálós geometriát vesz fel, mint ahogy az a 38. ábrán látható, a targeten belül is megvezethetőek az örvényáramok. A PCB technológiának köszönhetően tetszőleges függvénnyel leírt target megvalósítható tetszőleges számú rétegben, összeköttetésekkel.



38. ábra. Hálós target modellje

Egy másik továbbfejlesztési lehetőség az analóg enkóderben rejlik. Ha a két tekercs két, egymással relatív prím cellaszámú sakktáblasor-mintájú targetet lát, a két kimeneti jel, melyek az elforgatás hatására szinuszosan változnak, egy körbefordulás alatt sohasem fogja felvenni ugyanazt az értéket. A két érték beolvasásával és némi feldolgozó logika segítségével megvalósítható az, hogy egy körbefordulásra abszolút szöget tudjunk adni, úgy, hogy közben a frekvenciaráta is javul. Amennyiben N fokszámú sakktáblát választunk, a kimenet N -szeres felbontással bírhat.

6. A tervezési tapasztalatok összegzése

A dolgozat eddigi részében ismertetett módszerek, megközelítések, valamint azok megalkotása közben létrejött tapasztalatokat érdemes összegezni. Jelen fejezetben megpróbálom összegyűjteni a főbb tapasztalatokat, tanulságokat, amik szükségesegek lehetnek egy automotive szenzor tervezéséhez. Nem kívánok új információkat közölni itt, csak egyfajta szintézisként az eddigi tapasztalatokat rendszerezem.

6.1. Követelmények

A követelmények determinálják azt, hogy milyen úton kell elindulni a tervezéssel. A korlátozásoknak köszönhetően csak bizonyos elrendezések jöhetnek szóba, így a tervezés során elsőként a követelményeket kell tüzetesen megismerni, feltárni a lehetséges opciókat.

- Fizikai méretek:

Adott, hogy a szenzort hol szeretnénk elhelyezni: közvetlenül a kormánytengelyen, vagy a rack-ban, esetleg az aktuátoron. Előfordulhat az is, hogy ez a szenzor egy tengely nélkül, vezeték általi kormányozáshoz van tervezve, ekkor megint mások az elvárások, lehetőségek, hiszen nem kell a tengelynek átmennie a targeten. Az elhelyezés determinálja a fizikai méreteket, valamint azt, hogy milyen jellegű zavarásokra kell toleránsnak lennie a szenzornak. Egy tipikus szenzor-méret adat: 8cm átmérőjű, 3cm magasságú henger, melyen átmehet egy 3 cm átmérőjű tengely.

- Felbontás:

Egy kormányzóg-szenzor esetében az elvárás $\Delta\theta = 0.02^\circ$ -os felbontás, ami azt jelenti, hogy 15 bitesnek kell lennie a kimenetnek:

$$\lceil \log_2\left(\frac{360}{\Delta\theta}\right) \rceil = 15bit$$

Ez a felbontás a mérési módszertől, a mérő rendszer működési frekvenciájától és a frekvenciarátától függ.

- Pontosság:

A szenzor szöghibája a 360° -os tartományon maximum 1° -os csúcstól csúcsig történő hibában van maximalizálva. Ezen szöghibát okozhatják mechanikai hatások (elmozdulás, kibillenés) valamint a target tökéletlensége. A megadott célhely mechanikai tolerancia paraméterei meg vannak adva: $\pm 0,2\text{mm}$ axiális elmozdulás lehetséges, valamint $0,1\text{mm}$ radiális.

6.2. A tervezés lépései

A követelmények alapján látjuk azt, hogy milyen korlátozásokkal kell megbirkóznunk, illetve milyen lehetőségeink vannak a nehézségek megoldására és kikerülésére. Látva a helyzetet egy sor döntést meg kell hozni a felhasználandó technológiára és annak működésére vonatkozóan. A döntések meghozatala után akár szimuláció segítségével lehet meghatározni, behangolni a geometria paramétereit. A szimuláció segítségével több iterációs lépés végrehajtásával egy optimalizációs feladat is definiálható.

6.2.1. Tervezési döntések

Először el kell dönteni, hogy a targetet az axiális tengelyre merőleges síkban, vagy tangenciális irányban, egy palásként kívánjuk megvalósítani. Ezen döntés meghozatalában segítenek a toleranciaparaméterek.

Emellett azt is el kell dönteni, hogy a kimenet szempontjából mi a cél: egy lehetőleg minél szinuszosabb jel-pár előállítása, melyből arcus tangenssel szög számítható, vagy egy olyan jel, mely a lehető legnagyobb frekvenciárátával rendelkezik a 360°-os tartományon, és LUT segítségével kiszámítható az, hogy a mért eredmény pontosan mit jelent fokban.

6.2.2. Szimulációs feladatok

A koncepció kialakítása után térszimulációval kell megtámogatni a tervezést. A meghatározott paraméterekkel létre kell hozni egy modellt, majd azt vizsgálni, finomítani kell annak tükrében, hogy miképpen szerepel a követelmények teljesítésében.

- Modell-alkotás, visszaellenőrzés:

A szimulációs feladatok elvégzéséhez egy elég pontos, ám elég egyszerű modellt kell felépíteni. Ez ritkán sikerül elsőre, így a modellalkotás egy iteratív folyamat: kompromisszumok mentén kell kialakítani az ideális modellt, amely a vizsgált paraméter szempontjából elég jó, és a számítási ideje is megfelelő léptékű.

- Modell vizsgálata komponensenként, lehetőleg 2D-s szimuláció bevonásával:

A megfelelő modell megtalálása után a szenzor jellemző paramétereit úgy kell meghatározni, hogy a modell egyes komponenseit külön-külön vizsgáljuk. Így érdemes vizsgálatokat folytatni a tekerics geometriájával kapcsolatban (menetszám, külső-belső átmérő, nyújtottság), valamint a target geometriájával kapcsolatban (minimális, maximális szélesség, target alakját leíró függvény). Sok vizsgálat 2 dimenzióban is lefolytatható, ami azt eredményezi, hogy lehet pontosabb eredményt elérni, rövidebb futási idővel.

- Frekvenciaráta meghatározása

A mérés alapja a legtöbb esetben az induktivitás-változás, ami rezgőkörös mérés esetén frekvenciaváltozást eredményez. A felbontást meghatározó paraméter a frekvenciaráta. A frekvenciarátát befolyásolja a target típusa: szimpla vagy szendvics, hálós vagy homogén, hold vagy sakktábla-alakú. Más és más előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek az egyes target-típusok frekvenciaráta és hibatűrés szempontjából.

6.2.3. Optimalizációs lehetőségek

Amennyiben jó modellel rendelkezünk, a vizsgálatok során egyértelművé válik az, hogy milyen paraméterek határozzák meg a működést, melyek azok a paraméterek, amelyek optimalizálásával javíthatjuk a szenzor teljesítményét. A dolgozatban tárgyalt különböző típusú szenzorok esetében ezek a következők:

- Target formája alapesetben

Színuszos kimenetet váró feldolgozóáramkör esetében fontos az, hogy a target hatása által előállított jel színuszos legyen. Ez elérhető úgy, ha a target formáját optimalizáljuk. Az optimalizáció esetében a célfüggvény lehet az, hogy minél kisebb legyen a szöghiba, vagy a h minimalizálása.

- Target formája analóg enkóder vagy sakktábla esetben

Az analóg enkóder valamint a sakktábla esetében a bemutatott kimeneti jelek vagy nem elég színuszosak az arctan számításához, vagy nem elég stabilan monotonok a LUT-os megoldás teljes kihasználásához. Ezen problémára is a geometria módosításával lehet megoldást keresni. Az optimalizáció célfüggvénye a kimeneti jel színuszossága, vagy egyenletessége lehet.

- Ideális tekercs és targetméret meghatározása Sakktábla esetben

Sakktábla esetben a target szélessége, sugara, valamint a telített-üres részek aránya illetve a tekercs átmérője határozza meg az induktivitás-változást. Ezen paraméterek jól definiálhatóak, egymástól nem teljesen függetlenek, így egy viszonylag jól leírható paraméterteret adnak meg. Az optimalizáció így hatékonyan végrehajtható. Célfüggvény lehet a minél nagyobb frekvenciaráta, vagy a kimenő jel színuszosságának növelése.

6.3. Konklúzió

Az eddigiekben ismertetett szempontok, optimalizációs lehetőségek nem vehetőek minden esetben egyenlő súllyal figyelembe, nem valósíthatóak meg maradéktalanul. A tervezés során be kell ismerni azt, hogy nem vagyunk képesek a teljes paraméterteret lefedni, és abból kiválasztani az optimális megoldást, hanem korlátos információmennyiség birtokában kell meghozni több korlátozottan racionális döntést. A fejlesztés egy iteratív folyamat, ennek köszönhetően előfordulhat az, hogy két iteráció között az egyik paraméter javul, de azt egy másik paraméter kárára teszi. Összességében tehát úgy érdemes a tervezési stratégiát kialakítani, mely mellett tudatosítjuk, hogy csak több iteráció végrehajtása után fogunk tudni érdemi eredményt felmutatni, azaz egy iteráció ne jelentsen túl bonyolult számítást.

7. Hivatkozások

- [1] S. M. I. Manfred Jagiella, Sorin Fericean and A. Dorneich, „Progress and recent realizations of miniaturized inductive proximity sensors for automation.” *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 6, NO. 6,, December 2006.
- [2] T. Dziwinski, „A novel approach of an absolute encoder coding pattern.” *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 15, NO. 1,, January 2015.
- [3] L. D. M. G. S. G. Valentino Liberali, Fabio Cherchi and G. Torelli, „A digital self-calibration circuit for absolute optical rotary encoder microsystems.” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, VOL. 52, NO. 1, February 2003.
- [4] J. E. F. Sarbajit Paul, Junghwan Chang and S. Mukhopadhyay, „A novel high-resolution optical encoder with axially stacked coded disk for modular joints: Physical modeling and experimental validation.” *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 18, NO. 14, July 2018.
- [5] Y. L. Shuanghui Hao and M. Hao, „Study on a novel absolute magnetic encoder.” *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, February 2009.
- [6] F. M. Jordi Naqui, „Angular displacement and velocity sensors based on electric-lc (elc) loaded microstrip lines.” *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 14, NO. 4,, April 2014.
- [7] G. C. M. M. L. v. d. H. Manel Gasulla, Xiujun Li and J. W. Spronck, „A contactless capacitive angular-position sensor.” *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 3, NO. 5,, October 2003.
- [8] S. W. C. H. Dezhi Zheng, Shaobo Zhang and X. Zhao, „A capacitive rotary encoder based on quadrature modulation and demodulation.” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, VOL. 64, NO. 1,, January 2015.
- [9] S. NIHTIANOV, „Measuring in the subnanometer range.” *IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE*, March 2014.
- [10] H. G. Ramos and A. L. Ribeiro, „Present and future impact of magnetic sensors in nde.” *Procedia Engineering* 86 406 – 419, 2014.
- [11] M. M. D. S. Alexandre Baratella Lugli, Reinaldo Borsato Rodrigues, „A new method of planar inductive sensor for industrial application.” 978-1-4799-0224-8/13/31.00 ©2013 IEEE, 2013.
- [12] N. L. X. C. X. Z. Xing Ding, Xiangdong Chen, „An inductive salt solution concentration sensor using a planar coil based on a pqcr-l circuit.” *Sensors and Actuators A* 263, 2017.

- [13] M. Ulvr, „Design of pcb search coils for ac magnetic flux density measurement.” AIP ADVANCES 8, 047505, 2018.
- [14] N. S. Nikola Jeranče, Dragana Vasiljević and G. Stojanović, „A compact inductive position sensor made by inkjet printing technology on a flexible substrate.” Sensors 1288-1298; doi:10.3390/s120201288, December 2012.
- [15] T. M. Gregory Moreton and P. Williams, „Using finite element modelling and experimental methods to investigate planar coil sensor topologies for inductive measurement of displacement.” AIP ADVANCES 8, 047503, August 2017.
- [16] K. B. L. Z. Milica Kistic, Nelu Blaz and M. Damjanovic, „Inductive tangential displacement sensor.” 978-1-5090-1389-0/16/31.00 ©2016 IEEE, 2016.
- [17] szerzo, „Low cost planar coil structure for inductive sensors to measure absolute angular position.” 978-1-5090-4860-1/17/31.00 ©2017 IEEE, 2017.
- [18] A. Babu and I. Bobby George, Member, „A wide range planar coil based displacement sensor with high sensitivity.” 978-1-5090-3596-0/17/31.00 ©2017 IEEE, 2017.
- [19] A. Babu and I. Bobby George, Member, „Design and development of a new non-contact inductive displacement sensor.” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 18, NO. 3,, February 2018.
- [20] X. Z. Li Du and J. Zhe, „An inductive sensor for real-time measurement of plantar normal and shear forces distribution.” IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 62, NO. 5,, May 2015.
- [21] P. W. G. Moreton, T. Meydan, „Investigation and characterization of a planar figure- of-eight coil as a curvature sensor.” 978-1-5090-1012-7/17/31.00 ©2017 IEEE, 2017.
- [22] H. J. Xu Peng, „A new eddy current sensor composed of three circumferential gradient winding coils.” 978-1-4673-5221-5/13/31.00 ©2013 IEEE, 2013.
- [23] R. D. Manfred Jagiella, Dr. Sorin Fericean and A. Dorneich, „New magneto-inductive sensing principle and its implementation in sensors for industrial applications.” 0-7803-8692-2/04/20.00 ©2004 IEEE., 2004.
- [24] I. D. A. F. I. Ali Karami Horestani, Student Member and I. Christophe Fumeaux, Senior Member, „Rotation sensor based on horn-shaped split.” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 13, NO. 8,, August 2013.
- [25] A. L. J. Cerón-Hurtado, N. M., „Wireless zero-power small displacement sensors.” 978-1-4799-6836-7/14/31.00, 2014.

- [26] S. M. Djuric, „Performance analysis of a planar displacement sensor with inductive spiral coils.” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 4, April 2014.
- [27] N. Anandan and I. Bobby George, Member, „Design and development of a planar linear variable differential transformer for displacement sensing.” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 17, NO. 16,, August 2017.
- [28] D. P. M.J. Warren-Forward, R.M. Goodall, „Three-dimensional displacement and force transducer.” IEE PROCEEDINGS-A, Vol. 139, No. 1,, januar 1992.
- [29] B. B. M. D. S. Čuriü, L. Naÿ and L. Živanov, „Planar inductive sensor for small displacement.” PROC. 26th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROELECTRONICS, May 2008.
- [30] M. D. Snezana M. Djuric, Laszlo Nagy, „Inductive displacement sensor for force measuring in humanoid robotic application.” 978-0-7695-3669-9/09 25.00 © 2009 IEEE, 2009.
- [31] L. F. N. S. M. D. Mirjana S. Damnjanovic, Ljiljana D. Zivanov and B. N. Biberdzic, „A novel approach to extending the linearity range of displacement inductive sensor.” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 44, NO. 11,, November 2006.
- [32] J. F. D. Dinulovic, D. Hermann and H. H. Gatzen, „Development of a linear micro-inductosyn sensor.” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 42, NO. 10,, October 2006.
- [33] K. H. T. Bingnan Wang and P. Orlik, „An accurate contactless position sensor with planar resonators.” 978-1-4799-8287-5/16/31.00 ©2016 IEEE, 2016.
- [34] I. A. M. R. L. Alessandro Danisi, Graduate Student Member and I. Yves Perriard, Senior Member, „Electromagnetic analysis and validation of an ironless inductive position sensor.” IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 62, NO. 5,, May 2013.
- [35] I. G. A. Z. M. I. B. J. A. Bruce J.P. Mortimer, Member and I. Tharaka Gonetilleke, Member, „Development of a planar shear sensor.” 978-1-4577-0220-4/16/31.00 ©2016 IEEE, 2016.
- [36] X. C. Qifu Tang, Liang Wu and D. Peng, „An inductive linear displacement sensor based on planar coils.” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 18, NO. 13,, July 2018.
- [37] L. W. Qifu Tang, Donglin Peng and X. Chen, „An inductive angular displacement sensor based on planar coil and contrate rotor.” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 15, NO. 7,, July 2015.

- [38] Y. D. C. G. M. J. Zijian Zhang, Fenglei Ni and H. Liu, „A novel absolute magnetic rotary sensor.” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 62, NO. 7,, July 2015.
- [39] L. X. C. G. L. L. D. W. Lin Ye, Ming Yang, „Optimization of inductive angle sensor using response surface methodology and finite element method.” 0263-2241/ - see front matter 2013 Published by Elsevier Ltd., November 2013.
- [40] i. ANSYS, „Ansys maxwell online help.” Release 19.0, December 2017.
- [41] M. Rahal and I. Andreas Demosthenous, Senior Member, „An ASIC front end for planar high-frequency contactless inductive position sensors.” IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 58, NO. 9,, September 2009.
- [42] P. H. Reza Hoseinnezhad, Alireza Bab-Hadiashar, „Calibration of resolver sensors in electromechanical braking systems: A modified recursive weighted least-squares approach.” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 2,, April 2007.
- [43] M. Y. L. D. Zou An, Zhao Hui*, „Analysis calculation and testing of rotary inductosyn angle measuring errors.” Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, July 2014.
- [44] Y. G. Du Chunyang, „Error analysis and compensation for inductosyn-based position measuring system.” 0-7803-7883-0/03/17.00 © 2003 IEEE, 2003.
- [45] P. B. R.S. Popovic, J.A. Flanagan, „The future of magnetic sensors.” Sensors and Actuators A 56, 1996.