



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamos Energetika Tanszék

**Ritkaföldfém és magashőmérsékletű szupravezető
állandómágneses szinkron cső motor/generátor
optimalása személygépjármű felfüggesztés
komponenseihez**

PhD disszertáció

Készítette: Zádor István (okleveles Közlekedésmérnök)

Konzulensek:

Dr. Vajda István, egyetemi tanár, Villamos Energetika Tsz.

Dr. Palkovics László, egyetemi tanár, Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.

Budapest, 2008. december 8.

1 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet fejezem ki elsősorban Horváth Dánielnek, aki szakmai tudásával és ötleteivel folyamatosan segítette munkámat. Köszönöm segítségét Dr. Vajda István tanár úrnak a konzultációkért, Falvy Bencének a MatLab-ban készült modellhez, Verebes Bélának az építési munkákban, nyújtott segítségéért. Köszönöm segítségét az egész SuperTech csoportnak, hogy lehetővé tették munkámat, biztosították a szükséges műszaki-, elméleti háttérrel. Köszönetemet fejezem ki továbbá Dr. Palkovics Lászlónak, Széll Péternek, Dr. Németh Hubának és Kádár Lehelnek, akik hozzáférést biztosítottak a Knorr-Bremse cég és a Gépjárművek tanszék, tudásához, és biztosították a teljes projekt anyagi háttérét. Folyamatos segítséget nyújtottak a projekt során a felmerülő problémák megoldásában.

Hálás köszönet támogatásukért!

2 TARTALOM

1	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	2
2	TARTALOM.....	3
3	BEVEZETÉS	5
4	IRODALMI ÁTTEKINTÉS – CSŐGENERÁTOROK, LENGÉSCSILLAPÍTÓK	6
4.1	PASSZÍV LENGÉSCSILLAPÍTÓK.....	6
4.2	VEZÉRELHETŐ (FÉL-AKTÍV) LENGÉSCSILLAPÍTÓK	8
4.2.1	<i>Olajos lengéscsillapítók.....</i>	9
4.2.2	<i>Levegővel szabályozott felfüggesztés.....</i>	10
4.2.3	<i>Rheologikus lengéscsillapítók</i>	11
4.2.4	<i>Elektromágneses elvű forgógépek, csavarorsós kialakítással (fél-aktív).....</i>	12
4.2.5	<i>Állandó mágneses szinkron csőgenerátor</i>	12
4.3	VEZÉRELHETŐ (AKTÍV) LENGÉSCSILLAPÍTÓK.....	13
4.3.1	<i>Csőmotorok.....</i>	13
4.4	LINEÁRIS ELEKTROMÁGNESES GÉPEK FEJLESZTÉSE	14
4.4.1	<i>Sík lineáris motorok</i>	14
4.4.2	<i>Csőmotor / generátorok</i>	15
4.4.3	<i>Vezérlési lehetőségek</i>	20
4.5	ÖSSZEFOGLALÁS	22
5	ÁLLANDÓMÁGNESES LENGÉSCSILLAPÍTÓ FEJLESZTÉSE	23
5.1	MŰKÖDÉSI ELV	23
5.2	ELMÉLETI HÁTTÉR.....	24
5.2.1	<i>Mágnesek</i>	24
5.2.2	<i>Ferromágneses anyagok és tekercsek.....</i>	25
5.2.3	<i>Indukált feszültség</i>	28
5.3	MÁGNES-KÖR MODELL (MAPLE).....	28
5.3.1	<i>A modell felépítése.....</i>	29
5.4	VÉGESELEMES MODELL (MATLAB)	32
5.4.1	<i>A modell felépítése.....</i>	34
5.5	AZ ELSŐ PROTOTÍPUS.....	38
5.6	VALIDITÁS VIZSGÁLAT MÉRÉSEKKEL	39
5.7	OPTIMALIZÁLÁS	41
5.7.1	<i>Mágnes munkapontja</i>	41
5.7.2	<i>Ferromágneses anyagválasztás.....</i>	42
5.7.3	<i>Fogtárcsák bemetszése.....</i>	43
5.7.4	<i>Fogindukció</i>	43
5.7.5	<i>Rézkitöltés növelése</i>	44
5.7.6	<i>A fognyomaték csökkentése.....</i>	47
5.7.7	<i>Sugár irányú optimalizálás</i>	49
5.7.8	<i>Hosszirányú optimalizálás.....</i>	49
5.7.9	<i>Megvezetés optimalizálása.....</i>	50
5.8	MELEGEDÉS SZÁMÍTÁS (ANALITIKUS ÉS VÉGESELEMES)	52
5.8.1	<i>Rézveszteség.....</i>	53
5.8.2	<i>Vasveszteség</i>	53
5.8.3	<i>Prototípus melegedés mérése (validáció).....</i>	55
5.8.4	<i>Melegedés.....</i>	56
5.9	EREDMÉNYEK	58
5.10	ÖSSZEFOGLALÁS	58
5.11	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK AZ ÁLLANDÓMÁGNESES LENGÉSCSILLAPÍTÓ TÉMAKÖRÉBEN	59

6	IRODALMI ÁTTEKINTÉS – MAGAS HŐMÉRSÉKLETŰ SZUPRAVEZETŐK (MHS) ..	62
6.1	MAGAS HŐMÉRSÉKLETŰ SZUPRAVEZETŐK (MHS)	62
6.2	TÖMBI MAGAS HŐMÉRSÉKLETŰ SZUPRAVEZETŐK (MHS), MINT ÁLLANDÓ MÁGNESEK.....	64
6.3	MHS VILLAMOS GÉPEK.....	65
6.4	SZUPRAVEZETŐ ÉS ÁLLANDÓ MÁGNESES RENDSZEREK.....	67
6.5	ÖSSZEGZÉS.....	68
7	MHS ALKALMAZÁSA SZEMÉLYGÉPJÁRMŰ LENGÉSCSILLAPÍTÓBAN	69
7.1	SZUPRAVEZETŐ FELMÁGNESEZÉSE.....	69
7.1.1	<i>Mágneses tértől mentes lehűtést (Zero Field Cooling) követő impulzuszámítás</i>	69
7.1.2	<i>Mágneses térben hűtés (Field Cooling), mágnesezés</i>	73
7.2	SZUPRAVEZETŐ LEMÁGNESEZŐDÉSÉNEK (RELAXÁCIÓ) MÉRÉSE.....	76
7.2.1	<i>Mérési elrendezés a relaxáció méréseknél</i>	76
7.2.2	<i>Szupravezető mágnesek relaxációja</i>	77
7.2.3	<i>Relaxáció mérés kontra-polár elrendezésben</i>	79
7.2.4	<i>Relaxáció a kontra-polár mágnesek tasztóerejében</i>	81
7.2.5	<i>Összegzés</i>	82
7.3	SZUPRAVEZETŐS ÁLLANDÓ MÁGNEST TARTALMAZÓ CSÓMOTOR	82
7.3.1	<i>MHS Modellelés</i>	83
7.3.2	<i>Mágnes-kör modell (Maple 9.5)</i>	84
7.3.3	<i>Végelem modell (MatLab 7.1)</i>	87
7.4	SZUPRAVEZETŐS (MHS) CSÓMOTOR LEHETŐSÉGEK	88
7.4.1	<i>Nitrogénnel hűtött ritkaföldfém mágneses csómotor</i>	88
7.4.2	<i>Ferromágneses MHS csómotor</i>	90
7.4.3	<i>Paramágneses MHS csómotor</i>	91
7.5	ÖSSZEFOGLALÁS	94
7.6	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK AZ MHS CSÓMOTOR TÉMAKÖRÉBEN	94
8	ÁLLANDÓ MÁGNESEK MINT RUGÓK, A FELFÜGGESZTÉSBE N.....	96
8.1	IRODALMI ÁTTEKINTÉS	96
8.1.1	<i>Hagyományos rugók a felfüggesztésben</i>	96
8.1.2	<i>Állandó mágneses lebegtetés</i>	97
8.2	MÁGNESES RUGÓ KIALAKÍTÁSA	99
8.2.1	<i>Mágnesek közti tasztító erő mérése</i>	100
8.2.2	<i>Végelem modell (QuickField)</i>	101
8.2.3	<i>Analitikus számítás</i>	101
8.3	MÁGNESES RUGÓ OPTIMALIZÁLÁSA	102
8.3.1	<i>Csómotor állórészének alkalmazása</i>	103
8.3.2	<i>Ferromágneses cső alkalmazása</i>	104
8.3.3	<i>Mágnesekben keletkező veszteségek</i>	105
8.4	ÖSSZEFOGLALÁS	105
8.5	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK AZ ÁLLANDÓ MÁGNESEK MINT RUGÓK TÉMAKÖRÉBEN	106
9	KONKLÚZIÓ.....	107
10	IRODALOMJEGYZÉK.....	108
11	MELLÉKLETEK.....	115
11.1	I. MELLÉKLET – TÉZISEK ÖSSZEFOGLALÁSA	115
11.2	II. MELLÉKLET – JELMAGYARÁZAT	118
11.3	III. MELLÉKLET - A SZUPRAVEZETÉS RÖVID TÖRTÉNETE ÉS FIZIKAI ALAPJAI	118

3 BEVEZETÉS

Korunk járműipari fejlesztései: az elektronikus fék, ABS, ESP, elektronikus kormány, az X-by-wire rendszerek a járművezérlő egységek villamos hajtásának fokozott alkalmazását vetítik előre. Ennek következménye, hogy jelenleg is a hagyományos rendszereket, mint a felfüggesztés, váltó, ablaktörlő, fényszóró is fokozatosan felváltják az automatikus és vezérelhető elektronikus elemek. A felfüggesztéseknél a vezérelhetőség a rugóval párhuzamosan működő lengéscsillapító keménységének vezérlésével valósul meg. A hagyományos hidraulikus lengéscsillapítók csupán egyetlen erő-karakterisztika megvalósítására képesek, ami kompromisszumot jelent a biztonság, vagy az utaskényelem szempontjából. Jelenleg a világon fejlesztés alatt álló vezérelhető lengéscsillapítók között - melyek főleg levegős, olajos, rheologikus folyadék alapúak - csupán egyetlen, a BOSE cég foglalkozik az elektromágneses lengéscsillapítókkal. A rendszer komponense egy állandómágneses szinkron csőmotor, amely megvalósítja a jármű aktív felfüggesztését. Az állandómágneses villamos gépek egyre szélesebb körben kerülnek járműipari felhasználásra, hiszen a mágnesek és a vezérlő elektronika egyre olcsóbban beszerezhető. Ezen gépek előnyei, hogy nincs szükség a forgórészbe bevitt energiára, nagyon jó a gép energiasűrűsége és hatásfoka is.

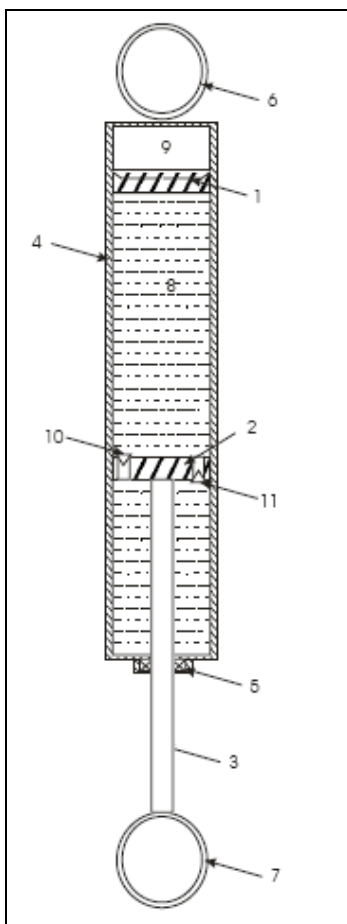
Doktori munkámban egy állandómágneses szinkron csőmotor tervezésével foglalkoztam, pontosabban egy szinkron csőmotorhoz hasonló gép tervezésével. A rendszer optimalizálását végeztem el személygépjármű lengéscsillapító alkalmazásra, ami a jó vezérelhetőség mellett a lengési energia részbeni visszatáplálására is alkalmas. Kutatásaim gerincét az eszköz megtervezése adja, a vezérlés, szabályozási körök tervezése fejlesztése nem a disszertációm témája. Megvizsgáltam továbbá, hogy a magas hőmérsékletű tömbi szupravezető (MHS) mágnesek hogyan használhatóak fel ilyen alkalmazásokban. Az MHS alkatrészek 77 K üzemi hőmérsékletű hűtést igényelnek. E nehézséget a jövőben várhatóan enyhíti a hűtési rendszerek fejlődése. Elkészítettem egy állandómágneses csőmotor-generátor személygépjármű lengéscsillapító alkalmazásához a tervezési eljárást analitikus mágnes-kör modell és végeeselemes szimuláció alkalmazásával. A tervezés során optimalizáltam számos lengéscsillapító specifikus gépparamétert, és következtetéseket vontam le különböző konstrukciójú gépek tulajdonságairól, melyeket nemzetközi szinten még nem publikáltak. A tervezésnél peremfeltétel volt a lengéscsillapító befoglaló mérete és az alkalmazott mágnesek legnagyobb energiaszorzatú ponton történő működése, valamint a megengedett veszteségszint. Célja egységnyi térfogatból kinyerhető, legnagyobb csillapító erő elérése volt adott veszteségszintet figyelembe véve. Vizsgáltam a gép jellemző ciklikus terhelése (futómű igénybevétel) közben a melegedést is. Vizsgáltam az állandó mágnesek jármű rugókénti alkalmazhatóságának lehetőségét, és készítettem egy konstrukció tervezetet, melynél megvalósítható az állandó mágneses járműfelfüggesztés, azaz a rugózás és a vezérelt lengéscsillapítás tisztán állandó mágnesek és elektronika alkalmazásával. Megvizsgáltam az MHS mágnesek viselkedését, időben változó tulajdonságaikat (relaxáció). Vizsgáltam a működést jellemző paraméterek hatását a relaxáció folyamatára, a kontra-polár elrendezésű MHS tömbök között kialakuló mágneses tér eloszlását. A méréseket egyszerű modell segítségével igazoltam.

4 IRODALMI ÁTTEKINTÉS – CSÓGENERÁTOROK, LENGÉSCSILLAPÍTÓK

Egyetlen úttest sem tökéletesen sima, ezért a járművek kerekei a forgómozgáson kívül vertikális mozgást is végeznek. Nagy sebességnél ezek a mozgások rendkívül rövid idő alatt mennek végbe, ezért az úttestre merőleges terhelések a nehézségi gyorsulás sokszorosát is elérhetik. Ennek következtében a járműre igen nagy lökészerű erők hatnak, amelyek annál nagyobbak minél nagyobb a mozgató tömeg. A rugózás és a csillapítás együttes feladata a lökések mérséklése, amin keresztül jelentősen befolyásolják az utazási komfortot, utas-biztonságot, kanyarstabilitást és egyéb menetdinamikai paramétereket. Az utasnak kellemetlen, esetenként egészségre is ártalmas lökések, az áru, a rakomány tönkremenetele, a jármű alkatrészeinek túlzott igénybevétele miatt a lökéseket lengésekké alakítja a felfüggesztés. Az utazás biztonságánál a legfontosabb szempont, hogy a kerék és az úttest között folyamatos legyen a kapcsolat, hiszen csak így vihető át az erő (fékező-, hajtó-, kormány erő). Kanyarstabilitásnál a belső kerekek kis tapadása miatt fellépő oldalirányú vezetőerő csökkenése a jármű megcsúszását eredményezheti, ezért a felfüggesztésnek gondoskodnia kell a kerekek folyamatos tapadásáról. A rugót és a lengéscsillapítót a kerékfelfüggesztések (tengelyek) és a karosszéria, illetve az alvázkeret közé szerelik. Működésüket természetesen segítik a gumiabroncsok is. A lengéscsillapítók hatására a jármű lengései gyorsabban csillapodnak. Így a biztonságot és az utazási komfortot is javítják. A kerekek és a karosszéria lengései különböző frekvenciájúak, tehát a jó lengéscsillapítót úgy kell beállítani, hogy mindkét lengést hatásosan csillapítsa. [Jör83]

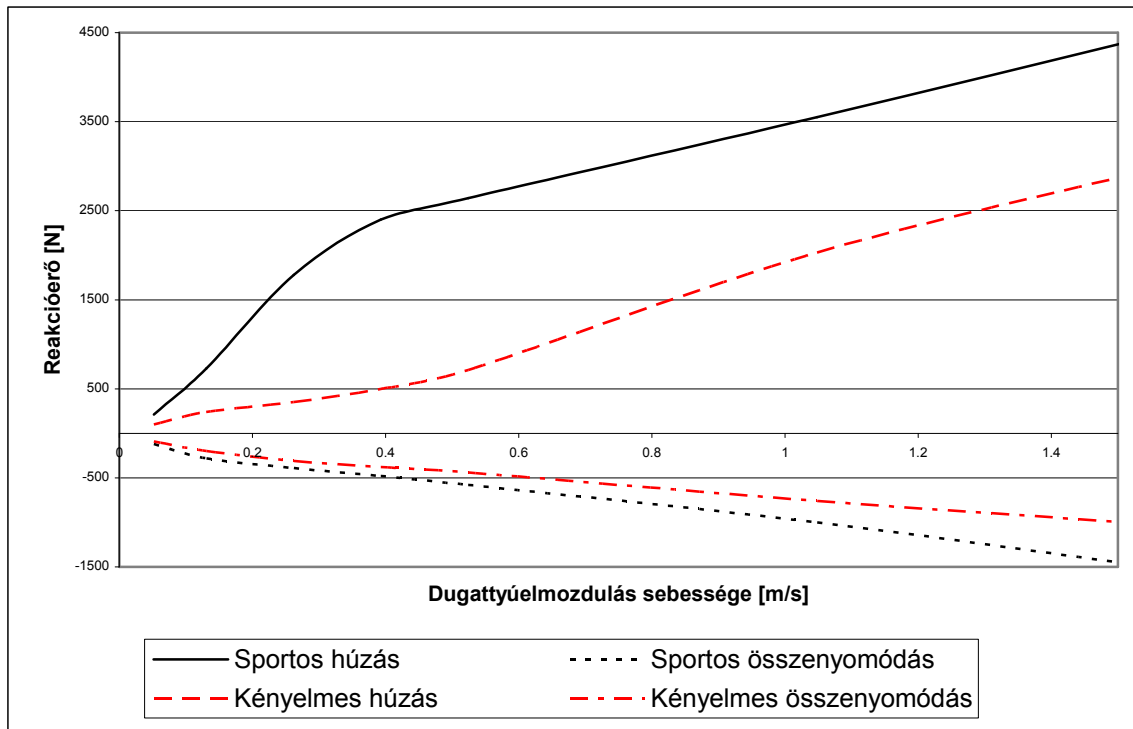
4.1 Passzív lengéscsillapítók

A lengéscsillapítóknak elsődlegesen biztonsági és utas kényelmi szerepük van. Ez a két szempont egymásnak ellentmondó paraméter beállításokat követel, mely követelmények kielégítése kihívást jelent. A hagyományos (passzív) lengéscsillapítók csupán egyetlen, meghatározott karakterisztikát képesek megvalósítani, azaz egy bizonyos függőleges kerékmozdulási sebességre egy bizonyos reakcióerővel tudnak reagálni. Ezekkel az eszközökkel tehát, vagy a biztonság, vagy az utas-kényelem szempontjai elégíthetők ki teljes körűen. Napjainkban, főleg gazdasági szempontok miatt, mégis főleg ilyen eszközöket alkalmaznak járművekben. Passzív lengéscsillapítók közül főleg hidraulikus, teleszkópos lengéscsillapítókat használnak. Ezek hengerében a dugattyú mozog és olajat vagy gázt kényszerít kis furatokon, vagy szelepeken való átáramlásra. A közeg áramlási ellenállása a szelepek furatok keresztmetszetétől függ, amely a rugók kinyúlásakor és összenyomódásakor más és más. Amennyiben a szelepnívó kicsi, a csillapítás és a hő fejlődése nagy mértékű lesz. A leginkább használt lengéscsillapítók egy vagy több tartályos hidraulikus rendszerek. Ezeknél a rendszereknél a csillapított lengési energia hővé alakul. Az 1. ábrán egy egycsöves olajos lengéscsillapító felépítése látható. [Lév78]



1. ábra: Egy csöves olajos lengéscsillapító (1:kamrafenék; 2:dugattyútárcsa; 3:dugattyúrúd; 4:ház; 5: megvezetés; 6: karosszéria felfogatás; 7: lengőkar felfogatás; 8: csillapító folyadék; 9: légkamra; 10: kompressziós szelep; 11: depressziós szelep)

A személygépkocsikban használt passzív lengéscsillapítók nagytöbbsége a következő ábrán látható karakterisztikák közötti reakcióerők elérésére képesek. A 2. ábrán egy SACHS típusú manuálisan állítható keménységű lengéscsillapító két végállását (komfort - sport) mutatja. A kialakult erő a dugattyú elmozdulás dinamikájának függvénye. Kemény (nagy reakcióerejű) karakterisztikát általában sportautókban használnak, míg puhább lengéscsillapítókat családi autókban, ahol a komfort és az utas kényelem növelése a szempont. A karakterisztika lehet progresszív, lineáris illetve a 2. ábrán látható degresszív is. A 2. ábrán a folytonos vonalú görbe, a kemény sportos lengéscsillapítót, míg a szaggatott a kényelmes lengéscsillapítót jellemzi.



2. ábra: Erő-karakterisztika

Látható, hogy összenyomásra és széthúzásra a lengéscsillapító más-más csillapítóerővel reagál. Összenyomódáskor (kátyú) ugyanis fontos, hogy a lengéscsillapító keménysége miatt ne billenjen meg a kocsiszekrény. A két karakterisztika igényét a 3. ábrán szemléltetett útviszonyok teszik szükségessé. A lengéscsillapítók üzemi körülmények között mindkét irányban (húzás, nyomás) 0 - 0.5 m/sec-os sebességek között üzemelnek, de szélső esetben előfordulhat az 1 m/sec-os dugattyúsebesség is, ezért e küszöbérték feletti vizsgálat nem szükséges. [Jör83]

4.2 Vezérelhető (fél-aktív) lengéscsillapítók

A bevezetőben már említettek alapján, érthető, hogy a lengéscsillapító vezérelhetősége milyen fontos a jármű stabilitási és az utasok komfortérzete szempontjából. A Darmstadt Egyetem Automatizálási Intézetében ezen felül bizonyították, hogy a vezérelhető lengéscsillapítókkal felszerelt gépkocsinak rövidebb a fékútja, és kevesebb üzemanyagot is fogyaszt. [Tob06] Ezért is irányul sok fejlesztés a világban arra, hogy a csillapítóerőt minél gyorsabban, egyszerűbben és természetesen minél olcsóbban lehessen vezérelni. Jelenleg két fő fajtája van a vezérelhető lengéscsillapítóknak:

1. A fél-aktív felfüggesztés azt jelenti, hogy egy lengéscsillapító, mely képes például a 2. ábrán bemutatott csillapító erő elérésére, képes legyen egy gyengébb reakcióerővel is fellépni azonos dugattyúsebességen. Ehhez megfelelő vezérlésre, szabályozásra, és egy biztonsági állapot meghatározására van szükség, amennyiben az automatika, vagy a lengéscsillapító meghibásodna. A fél-aktív felfüggesztések csökkentik a fékutat, és nagymértékben növelik a biztonságot, komfortérzetet, illetve a menetstabilitást. [Tob06]



3. ábra: Útviszonyok lengéscsillapító igénye [Weboo]

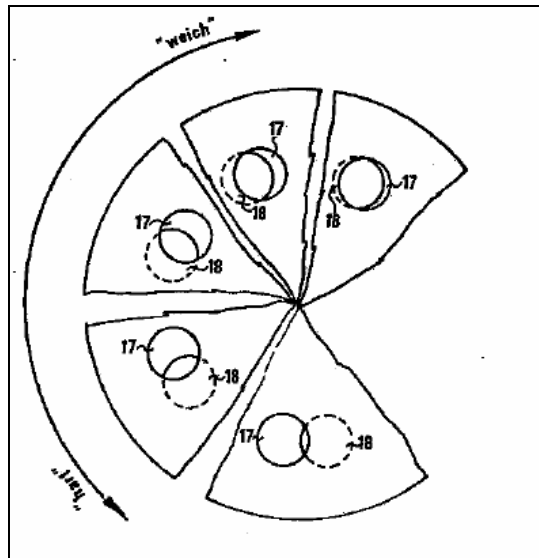
A szabályozás akkor alkalmazható a járműveknél, ha az automatika képes megvalósítani a legkeményebb reakcióerőről a legpuhább reakcióerőre való szabályozást állandó dugattyúsebességen mindössze 0.5 msec alatt. [Kno06]

2. Az aktív felfüggesztés egy olyan rendszer, amelynél energia betáplálásra is van lehetőség, és így dugattyúsebességtől függetlenül a megvalósítható eredeti karakterisztikánál (2 ábra) nagyobb reakcióerő is elérhető. Ebben az esetben a menetstabilitás igen magas szintre növelhető, de igen komoly elektronikai és energetikai háttérre is szükség van a fedélzeten. Ezen lengéscsillapítók a rugó ellenében is képesek erőt kifejteni (aktuátorok), tehát segítségükkel a jármű dinamikai paraméterei kézben tarthatóak. [Jör83]

4.2.1 Olajos lengéscsillapítók

Az olajos lengéscsillapítóknál a szabályozást az áramlási keresztmetszet szabályozásával lehet megvalósítani. Erre többféle megoldás is született:

- Az egyik megoldásnál két egymás felett elhelyezett lyuktárcsával ez egyik elfordulásával szabályozzák a csillapító erőt. Az egymás felett lévő lyukak metszet felülete csökken illetve nő, amikor az egyik tárcsát forgatjuk, ahogy azt a 4. ábra szemlélteti. A forgatással valósul meg a vezérlés, mivel az olaj átáramlási keresztmetszete, és így a lengéscsillapító keménysége is változni fog. [Sza82]



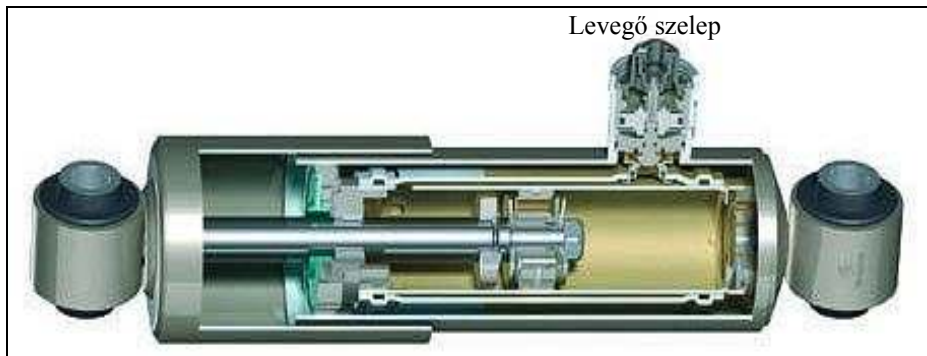
4. ábra: Egymás felett elforduló lyuktárcsák [Sza82]

- Vannak megoldások elektromos szelepvezérlésre, de lehetőség van mágneses és hidraulikus szabályozásra is. Az eszközök mindegyikénél az átáramlási keresztmetszetet változtatják, csupán a vezérlés elve különbözik.
- Ugyan nem szabályozott, de változó karakterisztikák megvalósítására képes az olyan két csöves lengéscsillapító, amelynek oldalfalába bordázott bemarásokat készítenek. Ez azért fontos, mert terhelt és terheletlen állapotban, amikor a lengéscsillapító más-más pozícióban van az átáramlási keresztmetszet módosul az oldalfalban lévő bemarások mélységével. Ennek következtében változik a csillapító erő is, amely terhelt járműnél nagyobb, míg üres járműnél a komfortérzet javítása céljából kisebb. [Lév78]
- A SACHS cég kifejlesztett egy olyan rendszert, amelynél a porlasztóhoz hasonlóan elektronikusan vezérelhető a csillapító folyadékot áteresztő szelep keresztmetszete. Ezzel folyamatos szabályozást tesznek lehetővé (Continuous Damping Control (CDC)). A már említettek szerint a rendszer így fél-aktív felfüggesztés tulajdonságait valósítja meg. [Web00]

Ezeknél a rendszereknél a fő gondot az jelenti, hogy mivel mechanikai jellegű a beavatkozás, így a kívánt erő-karakterisztika, illetve reakcióerő viszonylag lassan realizálható.

4.2.2 *Levegővel szabályozott felfüggesztés*

A ZF SACHS cég fejlesztette ki a légrugós járművek felfüggesztésének szabályozásához használható rendszert (5. ábra), melynél a lengéscsillapítóban lévő levegő nyomásával állítják be a szükséges csillapító karakterisztikát (Pneumatic Damping Control (PDC)). Ez főleg kamionoknál használják, ahol lényegesen eltérnek a felfüggesztési követelmények teljesen terhelt és üres járműveknél, de a rendszer alkalmazása a városi buszoknál is elterjedt. [ZF07]

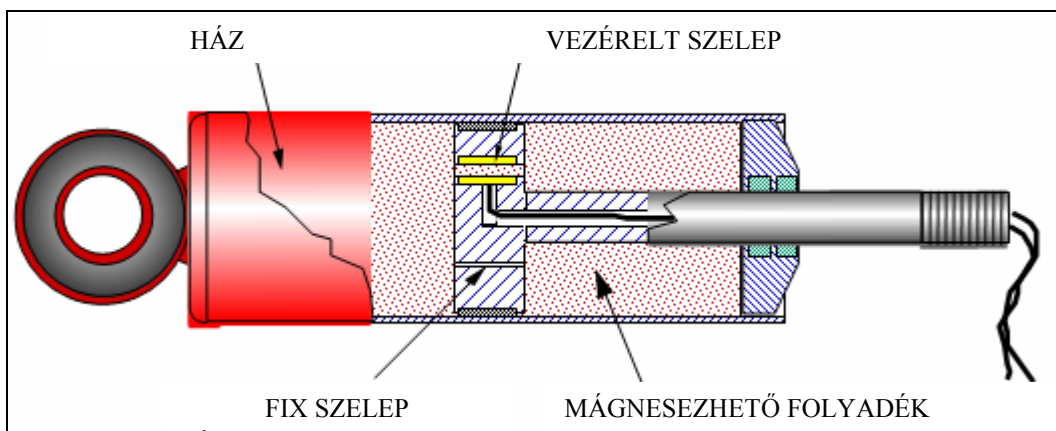


5. ábra: Levegővel szabályozott lengéscsillapító [ZFO7]

Ennél a rendszernél a fő gondot szintén az jelenti, hogy mivel pneumatikus a beavatkozás, így a kívánt reakcióerő viszonylag lassan realizálható. Az ilyen rendszerek nem kínálnak folyamatos gyors vezérlést, de az álló helyzetben megvalósítható állítást igen, ami lehetővé tesz hosszabb távú, de változtatható menetdinamikai tulajdonságokat. [ZFO7]

4.2.3 Rheologikus lengéscsillapítók

A rheologikus lengéscsillapítóknak (6. ábra) nem az átáramlás keresztmetszetét változtatják, hanem az olajat cserélik ki olyan speciális folyadékra, melynek a viszkozitását változtatni lehet különböző eljárásokkal. A legelterjedtebbek a mágnesesen szabályozott lengéscsillapítók. A mágnesezhető folyadékokba nano méretű ferromágneses anyagot kevernek, amit egy elektromágneses térrel igen egyszerűen lehet sűrűsíteni, azaz a „folyadék” viszkozitását változtatni. A sűrű folyadék nehezebben folyik át ugyanazon a keresztmetszeten így a reakcióerő nagyobb lesz. A rendszer fejlesztésénél komoly nehézséget jelent olyan fémszemcsés közeget létrehozni, melynek szemcséi nem „süllyednek le” nyugalmi helyzetben, azaz folyamatosan teljesen homogén közeg van jelen. Ennek a lengéscsillapító típusnak az a hátránya, hogy nem tudnak a hagyományos lengéscsillapítók karakterisztikájától lényegesen eltérni, tehát a vezérlési tartomány nem különösebben nagy. Ennek az az oka, hogy a szükséges biztonsági előírás nem valósítható meg másként. [Lor06, Webo4]



6. ábra: Rheologikus lengéscsillapító felépítése [Webo4]

4.2.4 Elektromágneses elvű forgógépek, csavarorsós kialakítással (fél-aktív)

Az elektromágneses lengéscsillapítók lényegében villamos gépek. Ezeknél a lengéscsillapítóknál, nem hővé, hanem villamos energiává alakítható a jármű lengési energiája, melyet így hasznosíthatunk. Alapvetően az állandó mágneses szinkrongép típusok jöhetnek szóba. Ezek a forgó, cső és a lineáris szerkezetek. Villamos gépeknél kétfajta üzemet különböztetünk meg: a generátoros és a motoros üzemet.

Generátoros üzemnél a mágnes mozgása, azaz a tekercsekben történő fluxus változás az állórész tekercsekben feszültséget indukál. Amennyiben a tekercsrendszert vagy akár külön-külön a tekercseket is rövidre zárjuk, abban az esetben áram folyik bennük, amely elektromágneses teret hoz létre. Ez a mágneses tér lassítani igyekszik a mágnes mozgását, azaz fékezi az elmozdulást Lenz törvényének megfelelően. [Ret76] Ebben az esetben nincs szükség külső energiaforrásra ahhoz, hogy megvalósítsuk a lengéscsillapítást, azonban megfelelő vezérlést alkalmazva lehetőség nyílik a fél-aktív felfüggesztés elemének megvalósítására.

Motoros üzemnél villamos energiából kapunk mechanikai energiát, amit a jármű lengésének csillapítására, vagy menetdinamikai okokból (pl. nagy sebességű kanyarvétel) a lengéscsillapító felkeményítésére fordítunk. Ebben az üzemben olyan eszközt készíthetünk, amellyel megvalósítható a jármű aktív felfüggesztése, tehát a gép képes aktuátorként a rugó ellenében is hatni.

Forgó szinkrongépeknél az állórész hornyokban helyezkedik el a tekercselé, míg a forgórészen kapnak helyet az állandó mágnesek. Ilyen gépek alkalmazásakor a problémát az jelenti, hogy a kerék egyenes vonalú (vertikális) mozgását milyen módon lehet forgó mozgássá alakítani. Mindezt persze minél kisebb energia veszteséggel, és megfelelő geometriai paraméterekkel rendelkező eszközökkel, amelyek a futóműnél helyezhetőek el. A megoldást egy csavarorsó alkalmazása jelentheti, mely egy a kerékfelfüggesztéshez rögzített menetes persely, ami a kerékkel együtt mozog. A perselyben helyezkedik el a menetes szár, ami az orsó mozgásának következményeként forgó mozgást fog végezni. A menetes szárhoz csatlakozik a szinkron gép forgórésze, és így az már, mint motor / generátor működhet. A forgógép alkalmazásának előnye a már kiforrott és széles körben alkalmazott gép illetve vezérlő elektronika alkalmazhatósága. [Nico6]

4.2.5 Állandó mágneses szinkron csőgenerátor

Ezen villamos gépeknél nem törekszenek az aktív vezérlésre (motoros üzem) csupán a generátoros üzem egyszerű szabályozására. Ez a rendszer csupán a fél-aktív vezérlés megvalósítására alkalmas, de felépítésében hasonló az állandó mágneses motorokkal. Ebben az esetben is van lehetőség a jármű lengési energiájának kinyerésére. [Zado5]

Egy 5 KW-os állandó mágneses szinkron csőgenerátor fejlesztését tárgyalja egy cikk, melyben 200 V-os kimenő feszültséget értek el. A rendszer modellje, melyet a legyártott modellen végzett mérésekkel igazoltak a minimális fognyomaték elérést optimalizálta. Végeselemes modell alapján készült a szerkezet, melynek mozgórészén sugár irányban mágnesezett mágnesek vannak a fognyomaték csökkentése és a nagyobb teljesítmény elérése miatt. [Nor04]

4.3 Vezérelhető (aktív) lengéscsillapítók

Az aktív felfüggesztés lényege, hogy energia befektetéssel a lengéscsillapító aktuátorként is működhet, azaz képes a felfüggesztésben elhelyezett rugó ellen hatni, míg a fél-aktív vezérlés csupán a maximális erő karakterisztika alatt képes működni. (4.2 fejezet)

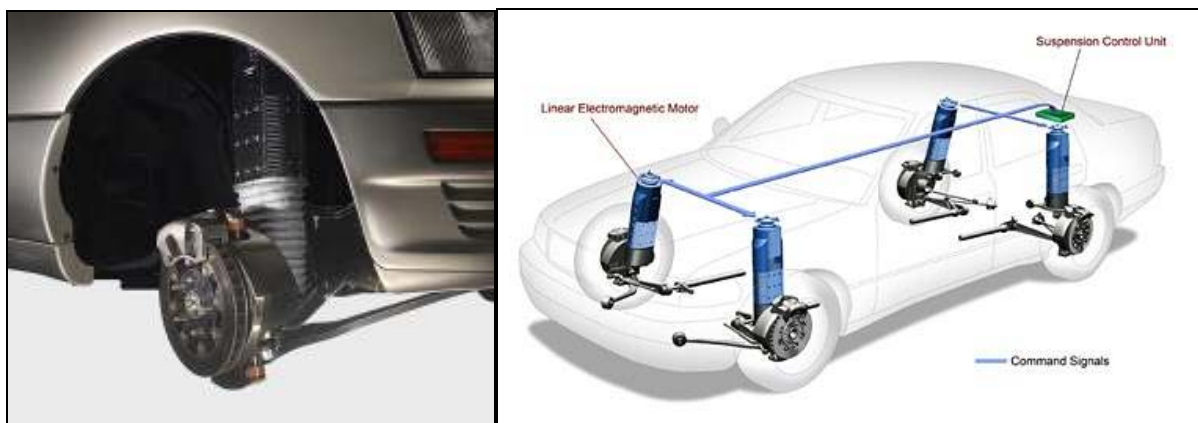
4.3.1 Csőmotorok

Csőmotorokat lengéscsillapítóban alkalmazásra sokhelyen vizsgálnak a világon. Indiai kutatók például analitikus modellen végzett számítások alapján optimalizálják az állandó mágneses szinkron csőmotorokat. Vizsgálják a véghatásokat és a tipikus paramétereket is. A rendszer pontos leírása és a modell felépítése nem érhető el a szakirodalomban. Eredményeiket csupán 2007 nyarán publikálták. [Frao7].

Egy másik cikk vasúti felfüggesztésben alkalmazható csőmotorokat (lengéscsillapítóként) vizsgál. Ezt a konstrukciót kombinálják mechanikai elemekkel, melynek paramétereit közötti kapcsolatot tárják fel. Számításaik hitelesítésére hasonlóképpen prototípuson végzett méréseket végeztek. [Kje01]

4.3.1.1 BOSE cég lengéscsillapítója

A BOSE cég kifejlesztett egy a szinkron csőmotor elvén alapuló aktív jármű lengéscsillapítót és vezérlő elektronikát, amely képes megvalósítani a teljesen vezérelhető (aktív) felfüggesztést (7. ábra). Evvel a rendszerrel lehetőség nyílik a lengési energia hasznosítására (generátoros üzem) illetve energia betáplálással képes a jármű aktív elemeként is működni (motoros üzem). Egy átlagos út során energiaigénye például csupán $\frac{1}{4}$ része a fedélzeti légkondicionáló energiaigényének. Mivel a lengéscsillapító - amely lényegében egy csőmotor - meglehetősen nagy helyet foglal, ezért torziós rugóval oldották meg a jármű rugózását. Az elektronikus rendszer lehetővé teszi a gyors beavatkozást, mely funkciók együttesen igen komoly előnyöket kölcsönöznek a rendszernek. A tudományos eredményeket nem hozták még nyilvánosságra és a rendszer geometriai paramétereire se nyújtottak be szabadalmat, csupán a vezérlő logika megtervezésére. [Web01, Sza04]



7. ábra: A BOSE rendszere [Web01]

4.3.1.2 Csőmotor anyagválasztása

Angliában készült szabadalom, melynek témája olyan járműlengéscsillapító, mely hibrid járművek akkumulátorát tölti generátoros üzemben. A szabadalomban kitérnek arra, hogy ezen rendszer igazán komoly teljesítményeket abban az esetben tudna előállítani, ha nehéz tehergépjárműveken alkalmaznánk. A rendszer eleme egy állandó mágneses (gyűrű) szinkron csőmotor. Az igénypontokban az alkalmazott anyagokra (rozsdamentes acél, alumínium) illetve a hagyományos lengéscsillapítókhoz viszonyított méretnövekedésükre tér ki részletesen. [Szabo7]

4.3.1.3 Energia menedzsment

A jármű energia menedzsmentjét vizsgálják Dán kutatók, akik számításokat készítettek állandó mágneses lineáris motor (aktív felfüggesztés) energiaviszonyainak becslésére. Ezen számítások alapján a modell segítségével kalkulálható az adott jármű és az alkalmazott lengéscsillapítók alkalmazásával a mechanikai lengésből nyert villamos energia melyet lehetőség van a fedélzeti akkumulátorokba tölteni. [Stro7]

4.3.1.4 A Jaguár cég fejlesztése

A Jaguár autógyár megbízásából végeztek kutatásokat a Laughborough-i egyetemen, állandó mágneses szinkron csőmotorok, mint személygépjármű futóművek, témakörében. A tanulmányozás motivációját az adta, hogy a világon lévő aktív lengéscsillapító fejlesztések elérték korlátaikat és meglehetősen drágák. Ezen rendszerek a hidrosztatikus, hidrogáz, hidropneumatikus és hidraulikus rendszerek. A kutatott állandó mágneses rendszer vezérlésének, egyszerű felépítésének köszönhetően, egy teljesen új felfüggesztési rendszert tesz lehetővé. Ezen rendszer minden szempontból kedvezőbb, mint a hagyományos rendszerek. Az elkészült modelleket és algoritmusokat az aktív vezérléshez egy 1/4 jármű modellen tesztelték. [Bes07]

4.3.1.5 Interneten elérhető videók

A BMW hidraulikus aktív felfüggesztésének installálása, a Lotus F2 versenyautó számítógép vezérelt hidraulikus lengéscsillapítójának bemutatása, és a Formula 1 versenyautók aktív felfüggesztésének alkalmazása és fejlődését bemutató videó látható az Interneten, mely mutatja a rendszer alkalmazásának hatásait és előnyeit. [Webo8]

4.4 Lineáris elektromágneses gépek fejlesztése

Lineáris szinkrongépeknél az állórészen lévő tekercsek előtt haladnak az egyenes vonalú mozgást végző „rotoron” elhelyezkedő állandó mágnesek. Az egyenes vonalú elmozdulás éppen megfelel a szerkezet lengéscsillapítókénti alkalmazására. Ezeknél a gépeknél a geometriai kialakítással, és a vezérléssel lehet elérni különböző keménységű lengéscsillapító karakterisztikákat. A kihívást főleg az jelenti, hogy a szükséges reakció erő elérése minél kisebb térfogatú géppel megvalósítható legyen.

4.4.1 *Sík lineáris motorok*

Sík lineáris motoroknál a mozgórész az állórész tekercselések síkjával párhuzamosan mozog. A felépítésük tökéletes mása egy forgógépnek, amely fel van metszve a középpontig, és ki van terítve. Ennek megfelelően tekercselésük és elrendezésük is nagyon sokféle lehet. [Nico0]

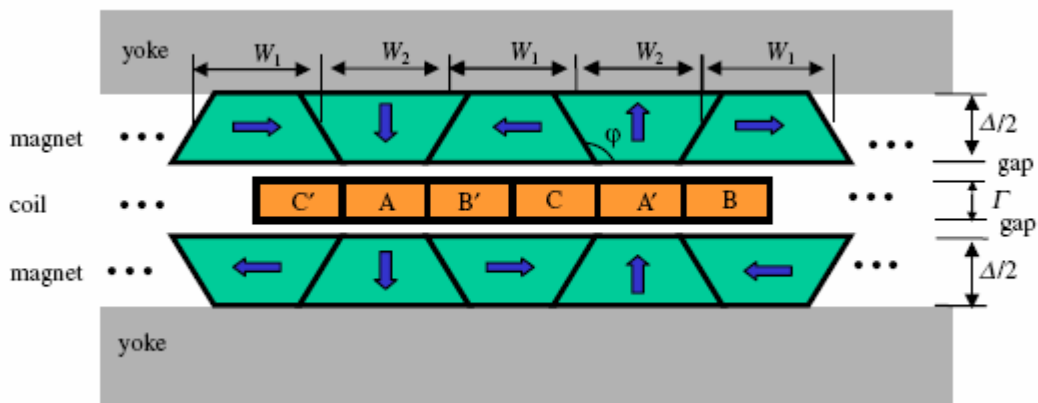
Ezen gépek nem alkalmasak jármű felfüggesztésekbeni alkalmazásra, mivel lényegesen nagyobb térfogatú rendszerek.

4.4.1.1 Légmagos tekercselés lineáris motoroknál (LIM)

Japánban olyan légmagos tekercsű állórészű sík lineáris motorokat fejlesztenek, melyeket analitikus és véges-elemes számításokkal modelleznek. Tárgyalják a pozitív és a negatív tulajdonságokat, és útmutatást adnak az ilyen rendszerű motorok alkalmazási területeiről. [Gyuo1]

4.4.1.2 Halbach mágneses LIM

Koreai kutató intézetben fejlesztettek ki egy olyan speciális mágnes kialakítást alkalmazó lineáris motort (8. ábra), melynek szegmenseit úgy optimalizálták, hogy minél kisebb méretből valósítsanak meg lehetőség szerint minél nagyobb húzóerőt. Ezt a lineáris aktuátor eszközt nagy sebességű és precíziós alkalmazásokra fejlesztették. [Moo06]



8. ábra: Halbach mágneses LIM állandó mágnesei és fázistekercselése [Moo06]

Ipari lineáris motorokat, megvezetőket, szervomotorokat, és mágneses rugókat is forgalmaznak különféle alkalmazásokra a világon. Az Amerikai LinMot cég például fejlesztéseket is végez Svájci üzemében az egyedi alkalmazások kielégítésére. [Web06]

4.4.2 Csőmotor / generátorok

4.4.2.1 Louisiana State University

Louisianában az egyetemen, foglalkoztak a lineáris szinkron csőmotorok lengéscsillapítókénti alkalmazásával. Elsősorban azt vizsgálták, hogy milyen elrendezés a megfelelő. Az alábbi típusok kerültek szóba:

- Állórészen: tekercselés a hornyokban, mozgórészen: szembefordított mágnesek
- Állórészen: tekercselés a hornyokban, mozgórészen: héj-mágnesek
- Állórészen: légrés tekercselés, mozgórészen: szembefordított mágnesek
- Állórészen: héj-mágnesek, mozgórészen: tekercselés a hornyokban
- Állórészen: héj-mágnesek, mozgórészen: tekercselés hornyon kívül

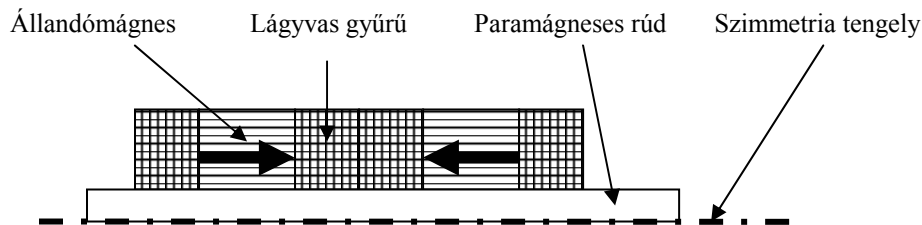
A tanulmány kimondja, hogy a tekercselt résznek feltétlenül kisebbnek kell lennie, mint az állandómágneses résznek, hogy az energiaveszteség minimális legyen. A horony nélküli motoroknál megállapítja, hogy a valós légrés és így a fluxus sűrűség is lényegesen nagyobb, ami csökkenti az indukált feszültséget (fluxus változás). A tanulmány szerint a legmegfelelőbb az állórészen hornyokban elhelyezett tekercselés, és a mozgórészen héj-mágnesek alkalmazása, mivel a szembefordított mágneseknél az armatúra reakció kisebb. [Olyo4]

4.4.2.2 Mozgó mágnesek csillapítása

Egy 2001-es szabadalomban vázolták a mágnesezett dugattyú tekercsben való mozgásakor keletkező fékezőerőt generátoros üzemben. A megfelelő elektronika alkalmazásával és szabályozással megvalósítható a lengési energia nagy részének kinyerése is. [Sza01]

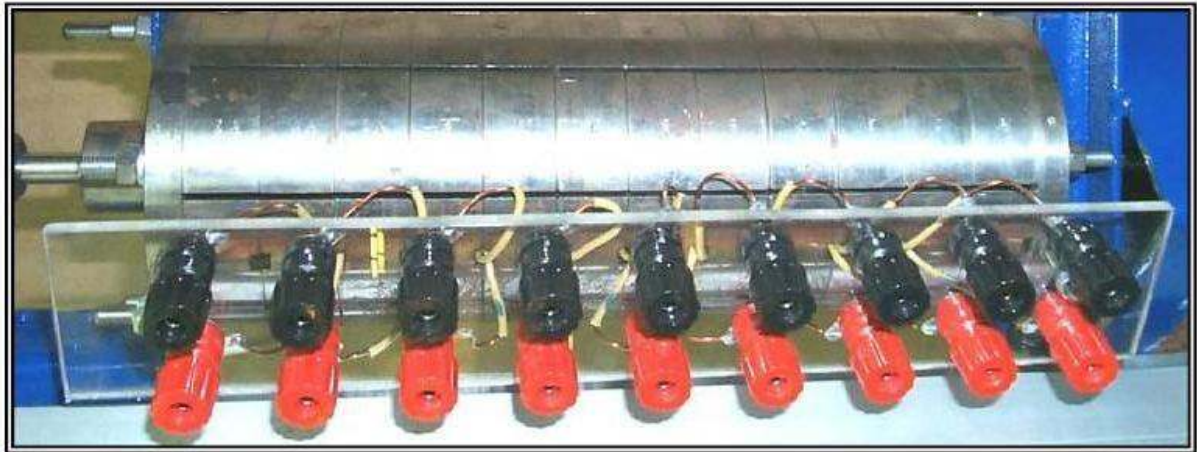
4.4.2.3 Olasz tanulmány

A szerzők állandó mágneses lineáris motorokat vizsgálnak. Elsőként a sík lineáris motorok felépítését tanulmányozzák, azok közül is az egy- és kétoldalas konstrukciókat. Főleg analitikus számításokat használnak a gép paramétereinek számítására. Ezek után rátérnek a csőmotorok tanulmányozására a mozgórészen a héj és a gyűrű mágnesek összehasonlítására, melyhez már véges elemes módszert használnak. Az erőszámítást a Maxwell Stress Tenzorral végzik. A vizsgált minta egy 10 cm átmérőjű csőmotor, melynek mozgórésze csupán 3 cm. A mozgórész hossza rövidebb az állórésznél, amelynek speciális formájú elemeit külön egységekből gyártották le. A mozgórész csupán két gyűrű-mágnesből áll, melyek között ferromágneses gyűrűk helyezkednek el. A gyűrűk egy paramágneses rúdra vannak felfűzve (9. ábra).



9. ábra: Mozgórész felépítés

Az állandó mágneseknél nyíllal szokás megadni a mágnesezés irányát, ami így kiadja az \vec{E} -i (a nyíl csúcsa) és \vec{D} -i (a nyíl eleje) pólust. Külön vizsgálják generátoros és motoros üzemben is a tekercsek külön- illetve együttes rövidzárását, vezérlését. Az elkészült prototípus állórészen minden tekercsét kivezették, hogy vizsgálható legyen a motor, fékező illetve húzóereje a tekercsvezérléstől függően (10. ábra).



10. ábra: Prototípus tekercskivezetései

Az eszközre pozícióadó is került, melynek fontos szerepe volt a részletesen vizsgált szabályozás és vezérlés kérdésében. [Lato4]

4.4.2.4 Örvényáram veszteség csökkentése az állórészben

Fejlesztések folynak csőmotorokkal kapcsolatban, mivel az állandómágneses szinkron kivitelűeknél az örvényáram veszteség komoly gondot okoz a transzverzálisan tekercselt állórészű gépeknél. Ezen energiaveszteség csökkentésére végeztek analitikus számításokat, és méréseket egy csőmotor, aktuátor mozgatasakor. A kutatás eredményeként azt kapták, hogy az elmetszett fogakban az állórészen negyedére csökkenthető az örvényáram veszteség azáltal, hogy az áramutak lényegesen megnőnek. [Nas94]

4.4.2.5 Kialakítás optimalizálás sugárirányban mágnesezett mozgórészű lineáris motornál

Japánban egy olyan állandómágneses (héjmágnes) szinkron csőmotor optimalizálásával foglalkoztak, melynek sugárirányban vannak mágnesezve a mozgórészen elhelyezett mágnesei. Analitikus és véges-elemes (FEM) számításokkal is igazolják, hogy az ilyen gépekben a mozgórész átmérőjének és a teljes gép átmérőjének aránya illetve a pólusosztás és a teljes gép átmérőjének aránya milyen módon befolyásolja a reakcióerőt, illetve a gép hatásfokát. [Jia05]

4.4.2.6 Armatúra reakció

Angliai műszaki egyetem kutatói állandó mágneses csőmotor modelljét készítették el, melynek armatúra reakcióját vizsgálták. A részleges lemágnesezést és az alkalmazott neodímium mágnesek karakterisztikáját alapul véve vizsgáldták. A mozgórészen kvázi-Halbach mágnesezést alkalmaztak, mely nagyon speciális elrendezésben volt alkalmazva (horonyosztásonként két mágnes gyűrű). A mágnesek felületén a lemágnesező tér behatolását vizsgálták. [Jia08]

4.4.2.7 Mozdó tekercselésű sugárirányban mágnesezett állandómágneses gép

A szakirodalomban fellelhetőek olyan cikkek is, melyek analitikus és véges-elemes számításokat mutatnak be egy olyan gépre vonatkoztatva, melynek állórészen sugárirányban mágnesezett állandó mágnesek vannak és azokat körülvevő külső

véges hosszúságú armatúra mozog. Lényeges kérdés, hogy milyen módon lehet növelni a fluxuskapcsolódást az ilyen típusú gépekben. Vizsgálja még a légmagos és a lágyvasas armatúrát illetve a sugárirányú és az axiálisan mágnesezett állórészű gépeket, amelyekben optimalizálja a fognyomatékot az armatúra hosszával. [Jiao3]

4.4.2.8 Tisztán állandómágneses mozgórészű csőmotor

Egy Japán cikk olyan csőmotor analitikus és FEM számítását tárgyalja, amelynek mozgórészén a szembefordított mágnes gyűrűk között sugárirányban mágnesezett mágnes gyűrűk helyezkednek el. Ezzel a megoldással a mozgórészre bevitt gerjesztés lényegesen növelhető, azonban a mágnes-kör ellenállása megnő. [Seo04]

Állandó mágneses csőmotorok különböző konstrukciós kialakításait vizsgálták a padovai egyetemen. Különböző konstrukciók sajátosságait, mint például a reakcióerő, ár és természetesen a hátrányos tulajdonságokat is modellezték. Két és háromdimenziós FEM analízist végeztek, melyeket prototípusokon végzett mérésekkel igazoltak. [Nico3]

4.4.2.9 Fognyomaték csökkentés

Egy Oroszországban bejelentett szabadalom olyan csőmotort tárgyal, melynek álló és mozgórészén is van tekercselés, viszont a különböző mértékű horonyferdítést vizsgálva optimalizálták a különböző geometriájú csőmotor fognyomaték csökkentését. [Sza83]

A cikk egy korong mágneseket alkalmazó hornyolt PM szinkron csőmotor fognyomatékát vizsgálja analitikus és végeselemes szimulációkkal. Analizálja a különböző konstrukciók hatását, és vizsgálja a fognyomaték csökkentés lehetőségeit. A szimulációkat ők is mérésekkel ellenőrizték. [Zhu97]

Állandó mágneses csőmotorok fognyomaték csökkentési módszereit tárgyalja egy cikk, mely a forgógépekhez hasonló technikák átültetésével alkalmazza azokat lineáris rendszerekre. A cikk az erő lüktetésén kívül harmonikus analízist is végez. [Maho8]

4.4.2.10 Csőmotorok fázisszáma

Egy cikkben egy 5 fázisú állandó mágneses szinkron csőmotor analitikus és végeselemes modellezéséről olvashatunk. Az összefüggéseket az állandó mágnesek hosszának függvényében vizsgálják, és semmilyen más optimalizálást nem végeznek. További érdekesség, hogy a horonyosztásnyi szegmenseket az állórészen elszigetelik egymástól, nem mágnesezhető anyag alkalmazásával. [Tom07]

Koreai műszaki egyetemen készült tanulmány egy egyfázisú állandó mágneses csőmotor kétdimenziós modelljének bemutatására. AC generátorokat különböző kialakítású mágnesekkel vizsgálták. A cél minden esetben a fognyomaték csökkentése volt. Összehasonlítást végeztek ezen kívül a teljesítmény, teljes súly, veszteségek, és a súly/teljesítmény arány szempontjából. Az eredményeket hasonlóképpen egy egyfázisú prototípuson végzett mérésekkel igazolták. [Ahm06]

4.4.2.11 Indukció eloszlás a csőmotorokban

Egy tanulmány különböző mágnesek alkalmazását, és különböző mágnes elrendezéseket vizsgál. A számítás az indukció-eloszlás változását vizsgálja a

rendszerben. Analitikus számításokat végez a motor húzóerejének számítására, melyet véges-elemes szimulációval igazol. [Jia99]

4.4.2.12 Kialakítás optimalítása

Lehetőség van az állandó mágneses gépek geometriai kialakítását optimalizálni, hogy valamely paraméter a legnagyobb legyen. Ez a paraméter leginkább a gép teljesítménye, melyre számos optimalizációs folyamatot dolgoztak ki. Ezen optimalizálások főként forgógépeknél már alkalmazott, vagy ott is gondot okozó megoldások, de lehetnek alkalmazás specifikus teljesítménynövelő eljárásokkal is találkozni. [Zado6], [Zado7], [Zado8]

A Lisaboni műszaki egyetem kutatói készítettek egy tanulmányt, melynek motivációja, az autókon alkalmazott aktív felfüggesztések, jelenlegi fejlesztéseinek magas költsége és komplexitása volt. Vizsgálatukban a hidraulikus és az állandó mágneses aktív vezérelésű rendszereket hasonlítják össze. Bemutatják az aktív vezérlés modelljét és egy ilyen lengéscsillapítóval szemben támasztott követelményeket. Vizsgálják gyűrű és korong mágnesek, illetve sugárirányban mágnesezett mágnesek alkalmazásának lehetőségét is. Elkészült egy prototípus is, melyet $\frac{1}{4}$ jármű modellen mértek le és eredményeit a szimulációs eredményekkel vetették össze. Bizonyítják, hogy azonos térfogattól és súlytól lényegesen nagyobb erők érhetőek el, mint hidraulikus rendszereknél, és a megfelelő vezérlő elektronika könnyedén alkalmazható a járművek fedélzetén. Következő lépésként a hűtés kérdését vetik, fel, mellyel tovább csökkenthető a rendszer térfogata és súlya. [Ismo6]

4.4.2.13 Örvényáramú lengéscsillapítás

Németországban vizsgálták egy alumínium csőben mozgó állandó mágnes mozgásának fékezőerejét, amelyet egy forgó excenterrel mozgatnak. Eredményként azt állapítják meg, hogy a hibrid illetve az elektromos járműveknél fontos szerepe lehet egy ilyen lengéscsillapítónak. Ezt ugyanis gazdaságosan lehet kivitelezni, és alumínium cső helyett tekercseket is lehet használni az állórészen, hogy a lengési energia egy részét hasznosítsuk. [Golo1]

Kanadai kutató intézetben készítettek szimulációs és analízáló modellt a mágneses rugó és lengéscsillapító fejlesztéshez. A rendszer két állandó mágnesből és a megvezetésre és a csillapításra szolgáló alumínium csőből áll. A mozgó mágnes sebességével arányos az alumínium csőben folyó örvényáramok mágneses terének csillapítása (lineáris), míg a mágnesek mérete, típusa szabja meg a passzív rugóerő karakterisztikát. Egy ilyen elemmel megvalósítható a passzív felfüggesztés. A modell elkészülte után prototípuson végzett mérésekkel igazolták a feltevéseiket. [Babo8]

4.4.2.14 Hullámerőmű – lineáris generátor

A világon egyre nagyobb teret hódít az óceánok hullámválasztási energiájának hasznosítása. Erre sok kutatás irányul, melyek közül egy Svéd kutatócsoport (a Svéd kormány támogatásával) végzett kutatásokat lineáris generátor optimalizálása terén. Véges-elemes modellt készítettek, amit analitikusan igazoltak. Vizsgálták a légrés nagyságának a reakcióerőre gyakorolt hatását is, de az optimalizálás legfőbb eredménye a hosszabb mozgórész alkalmazásának jelentősége volt. [Nilo6]

Egy tanulmány a hullámerőművek felépítését elemzi. Kétoldali lineáris motorokat, csőmotorokat és egyéb speciális kialakítású szerkezeteket vizsgál melyek térfogati és hullámválasztási kinyerhető energia szempontjai szerint optimalizál.

Vizsgálja a hullámok közötti távolságokat, melyek meghatározásával kapcsolt rendszerek előállítására is van lehetőség. [Osk03]

4.4.2.15 Dupla mágnes gyűrűs csőmotor

Az Angliában benyújtott szabadalom olyan állandó mágneses csőgenerátor rendszert mutat be, mely alkalmas lehet lengéscsillapítókénti alkalmazásra. A felépítés különlegessége, hogy egymás belsejében lévő állandó mágnes gyűrűkből áll. Ezek tengelyirányban vannak mágnesezve és egymással szembe vannak fordítva. A köztük lévő légrésemben mozog a tekercs. [Sza05]

4.4.2.16 Energia átalakítók hibrid járművekben

Kínai kutatók egy csoportja kidolgozott egy olyan belsőégésű boxer motor tengelyével összekapcsolt állandó mágneses csőmotor szerkezetet, amelyik képes a belsőégésű motorok mechanikai energiáját maximális határfokon villamos energiává átalakítani. A szerkezet lágyvas anyagainak kiválasztására és a pólusszám optimalizálására fektettek nagy hangsúlyt, hiszen az adott geometriai körülményeken kívül ezen optimalizálásokra volt szükség. [Pino6]

4.4.2.17 Mágnesrendszer alkalmazása gépjármű lengéscsillapítóként

Szabadalmat nyújtottak be 2003 márciusában az Egyesült Államokban (Meritor Heavy Vehicle Technology), mely szabadalmaztatja a tekercsben mozgó mágneses henger által létrehozott energia visszatáplálásának lehetőségét a jármű akkumulátorába. [Sza03]

4.4.2.18 Mágnesvasutak lebegtetése

A Japánban lévő mágnesvasút lebegéséről a szerelvényen lévő nagyon erős rövidre zárt HTS elektromágnesek gondoskodnak. Ezen mező a pályán elhelyezett tekercsekben feszültséget indukál és az elektrodinamikus lebegtetés elvén megemeli a szerelvényt. Ezen eljáráshoz készült egy tanulmány melyben a fedélzeti HTS tekercsüket váltották fel speciális Halbach kialakítású mágnesekre és egy 1,5 m átmérőjű tesztkeréken végzett mérések alapján összehasonlították az effektusokat. A szimulációs eredmények nem vágtak össze teljes mértékben ezért további vizsgálatok szükségesek. [Huno8]

4.4.3 Vezérlési lehetőségek

Az előző fejezetben bemutatott állandó mágneses szinkron csőmotor/generátor eszközök állandó rövidzárban csupán egyetlen reakció erő karakterisztika megvalósítására alkalmasak, akár egy passzív lengéscsillapító. Ahhoz hogy az eszköz előnyeit kihasználjuk szükséges valamifajta vezérlés alkalmazása.

- Fél-aktív vezérlés: Ebben az esetben az eszközt generátoros üzemben tudjuk működtetni és a fázisok szakadása – rövidzárása között egy megfelelő kapcsolóval pulzus szélesség modulációval van lehetőség a rövidzárási áram, azaz a kívánt reakció erő elérésére.
- Energia visszatáplálás: Ebben az esetben komolyabb teljesítmény elektronika alkalmazása szükséges, mely képes a többlet energiát a fedélzeti akkumulátorba visszatölteni.
- Aktív vezérlés: Ennél az alkalmazásnál az elektronika lehetővé kell, hogy tegye az energia betáplálását az eszközbe, mely így lehetővé teszi a motoros üzem alkalmazását is.

A jármű energia menedzsmentjét vizsgálják Dán kutatók, akik számításokat készítettek állandó mágneses lineáris motor (aktív felfüggesztés) energiaviszonyainak becslésére. Ezen számítások alapján a modell segítségével kalkulálható az adott jármű és az alkalmazott lengéscsillapítók alkalmazásával a mechanikai lengésből nyert villamos energia melyet lehetőség van a fedélzeti akkumulátorokba tölteni. [Stro7]

Járműmodell készítésére, fejlesztésére nyújtottak be szabadalmat, melyben az utas kényelmi és biztonsági szempontokat vizsgálják a fél-aktív lengéscsillapító által támasztott követelményeken keresztül. A fél-aktív lengéscsillapítót adottnak tételezve a modellben, vizsgálják a dinamikai hatások javulását és különböző vezérlési metódusokat vizsgálva az utas kényelmi és biztonsági paraméterek teljesülését. [Kyu05]

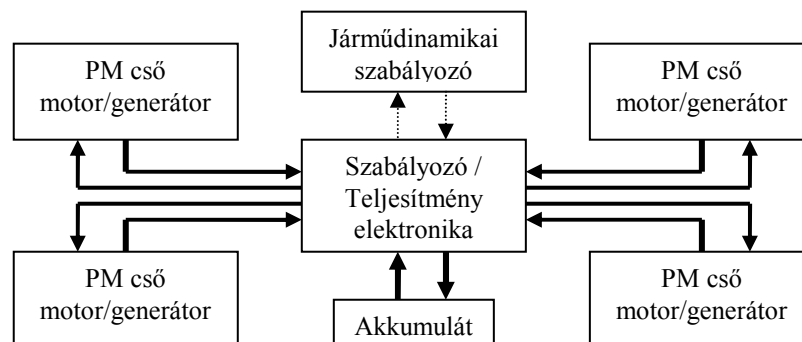
Létezik egy Brazil tanulmány egy komplett felfüggesztés fejlesztésre, mely szintállító rugó illetve fél-aktív lengéscsillapító fejlesztésével valósítja meg az utas kényelmi és biztonsági követelményeket különböző vezérlő hurkok segítségével. Megvalósították tehát a szabályozó kört is melyet alkalmasnak ítélnék a későbbiekben akár termékként is a piacra vinni. [Sae94]

Aktív lengéscsillapító vezérlési sémát mutat be az aktuátor szükséges erejének csökkentése érdekében történő szabályozó kör optimalizálásán keresztül egy tanulmány. Ezen eljárással a lengő tömeg energiája is csökkenthető. A végzett szimulációk eredményeit $\frac{1}{4}$ jármű modellen is tesztelték. [Fra99]

Pulzus szélesség modulációval (PWM), pozícióadóval ellátott, vezérelt állandó mágneses szinkron motor aktuátorkénti üzemét és elrendezését mutatja be egy Japán cikk, melynél egy benzinmotor kisegítő berendezéseként használják az eszközt. [Eido6]

Egy tanulmány a három szintű PWM vezérlés egy olyan fajtáját mutatja be, melyben kisműveltséggel szabályozható egy MOSFET által kapcsolt nagyfeszültségű hálózat, mely elektromágneses aktuátort vezérel. [Yio7]

Ezen irodalmi fejlesztések fényében belátható, hogy csőmotor lengéscsillapítót alkalmazó járműveken szükséges a fedélzeti elektronika és kommunikáció magasabb szintű alkalmazása. A 11. ábrán a logika egy sematikus ábrája látható.



11. ábra: Állandó mágneses lengéscsillapító szabályozó blokkvázlata

Meg kell említeni, a rendszer biztonsági követelményeit is. Ez főként azt jelenti, hogy ha a vezérlő rendszer meghibásodik milyen módon lehet biztonsági állapotként megvalósítani egy előre definiált passzív karakterisztikát. Erre szolgálhatna esetlegesen a rézgyűrűk alkalmazása, vagy a hiba üzemben fázisokra kapcsolt előre definiált ellenállás is. Ezen elemek biztosíthatnák a lengéscsillapító biztonsági, passzív üzemét.

4.5 Összefoglalás

Ebben a fejezetben áttekintettem a világon létező lengéscsillapító és lineáris villamos gépes fejlesztéseket. Csoportosításomban elsőként a hagyományos passzív lengéscsillapítók felépítését mutattam be, majd különböző fél-aktív lengéscsillapítókat, amelyeket hidraulikus, pneumatikus, elektromos illetve mágneses módon szabályoznak. Bemutattam az evvel kapcsolatos szabadalmakat és a szakirodalomban bemutatott ilyen irányú fejlesztések menetét és eredményeit is. Aktív lengéscsillapítót csupán egy amerikai cég fejleszt, akik nyilvánosságra hozták ugyan az eredményeket de a szakirodalomban nem részletezték a fejlesztés menetét, annak részleteit. Eszközükre szabadalmat sem nyújtottak be tehát a rendszerrel kapcsolatos információk csupán a tulajdonságaira korlátozódnak.

Ezek után bemutatásra kerültek a lineáris villamos gépek kutatásai. Főként csőmotorokkal kapcsolatos újdonságokat tárgyaltam, de említettem sík motorokat is, melyek kutatásai igen érdekes fejlesztéseket eredményeztek. Részletesen kitértem a cső generátorok fékező erejének számításával, modellezésével kapcsolatos kutatásokra, és minden olyan méretezési kérdést felvető munkára, ami az általam tervezett csőgenerátor tervezésekor segítséget nyújthat, és kiindulási alapként szolgálhat.

Ezen információk még inkább bizonyították, hogy az iparban létező vezérelhető lengéscsillapítók még nem tökéletesen kiforrott rendszerek. Nagy szükség van egy egyszerű felépítésű, olcsó, biztonságosan működő lengéscsillapítóra. A jól működő rendszerek jelenleg még nagyon drágák, az egyszerűbb kivitelű termékek, pedig nem teljesítik teljeskörűen a követelményeket. Nem elég gyors a szabályozási hurok, és nem megfelelő a vezérelhető tartomány, amellyel a járművek megfelelő stabilitása és kényelmi funkciói megvalósíthatóak. Fontos volt megismerni a járműlengéscsillapítók új generációinak működését, funkcióit, hogy útmutatást adjanak a jelenleg preferált működési, értékbeli és geometriai paraméterbeli szempontokhoz.

A villamos csőmotorok fejlesztései nagyon sok segítséget nyújtottak a járműlengéscsillapító specifikus fejlesztés, optimalizálás megvalósításához. Megismertem a számítási metódusokat, és a meglévő rendszerek tulajdonságait. Segítségükkel világossá váltak a munka folyamán esetlegesen felmerülő problémák, amelyekre így fel tudtam készülni.

Mindezen információk alapján lényeges adatok álltak rendelkezésemre, hogy a kutató-fejlesztő munkát megkezdjem.

5 ÁLLANDÓMÁGNESES LENGÉSCSILLAPÍTÓ FEJLESZTÉSE

Az eddig említettek alapján látható, hogy a vezérelhető lengéscsillapítók még nem tökéletesen kiforrott, optimalizált rendszerek. Egy egyszerű kivitelű elektromosan vezérelhető lengéscsillapító még nincs kifejlesztve. A csőmotorok területén is vannak hiányosságok, a generátoros üzem optimalizálását illetően, illetve az elrendezések vizsgálatában is.

Ennek megfelelően kezdtem bele egy olyan munkába, amely a 3 fázisú állandómágneses csőgenerátorok fejlesztésén és optimalizálásán keresztül megoldást nyújthat korunk jármű lengéscsillapítókkal szemben támasztott követelményeinek fokozottabb kielégítésére.

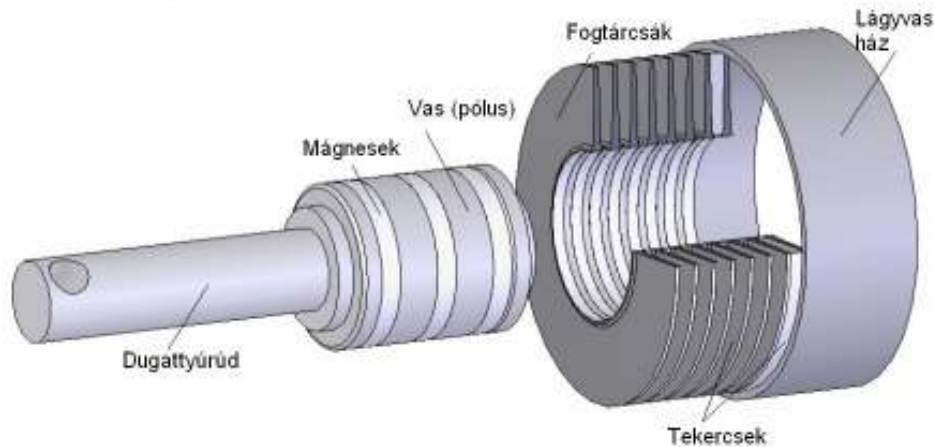
Célom az volt, hogy egy olyan eszköztervező modellt készítssek, amely alkalmas a tetszőleges követelményként megadott paraméterek beállításával, beépített optimalizálásokon keresztül, eredményként a szerkezet reakcióerejét szolgáltatni. Ez a reakcióerő az állandó mágneses szinkron cső motor/generátor állandó rövidzárásakor keletkező erő. Az eszköz fejlesztésénél nem térek ki mélyen a vezérlés kérdésre, de belátható, hogy e generátor alkalmas lesz a lengési energia visszatáplálására, megvalósítható vele a felfüggesztés fél-aktív és aktív vezérlése is. A modell alkalmazható gépjármű lengéscsillapítók tervezésére de egyéb alkalmazások tervezésére is lehetőség van, ahol e lengéscsillapító alkalmazása előnyökkel jár.

5.1 Működési elv

Az állandómágneses szinkron csőmotorok felépítésüket tekintve hasonlóak a szinkron forgó gépekhez. Ebben az esetben azonban a mozgórész (rotor) nem forgó, hanem egyenes vonalú mozgást végez. Jelen esetben is a mozgórészen helyezkednek el az állandó mágnesek, amelyek a mozgórész pólusai. Az állórészen kapnak helyet a ferromágneses anyagból készült fogak, illetve a köztük elhelyezkedő tekercsek. A legnagyobb különbség az, hogy a csőmotoroknál a mágnesek (pólusok) áthaladnak a tekercsek belsején (12. ábra).

Ezen lineáris rendszereket lehet generátoros és motoros üzemben is használni. Motor üzemben a berendezés villamos energiát alakít haladó mozgássá (mechanikai energia), míg generátoros üzemben a mozgó alkatrész mechanikai energiája alakul át villamos energiává.

Lengéscsillapítókénti alkalmazáshoz munkámban elsődlegesen a generátoros üzemre fókuszáltam, mivel ehhez az üzemállapothoz nincs szükség külön külső energia betáplálására. Ezen üzemnél a mozgó mágnesek az állórész tekercsekben feszültséget indukálnak, amit a mágnesek haladásával kialakuló indukcióváltozás okoz. A feszültség hatására amennyiben zárt a tekercselés köre, áram folyik, ami a tekercset gerjesztve elektromágneses mezőt hoz létre. Ez a mágneses mező mindig úgy alakul ki, hogy a mozgó állandómágneses mezőt fékezze, ahogy azt Lenz törvénye megállapítja. [Lis60]



12. ábra: Állandó mágneses szinkron csőmotor felépítése

5.2 Elméleti háttér

Villamos gépeknél a legfontosabb paraméter a felhasznált anyagok mágneses tulajdonságai. Az alkalmazott ferromágneses anyagok, illetve az állandó mágnesek paraméterei lényegesen befolyásolják a gép teljesítményét.

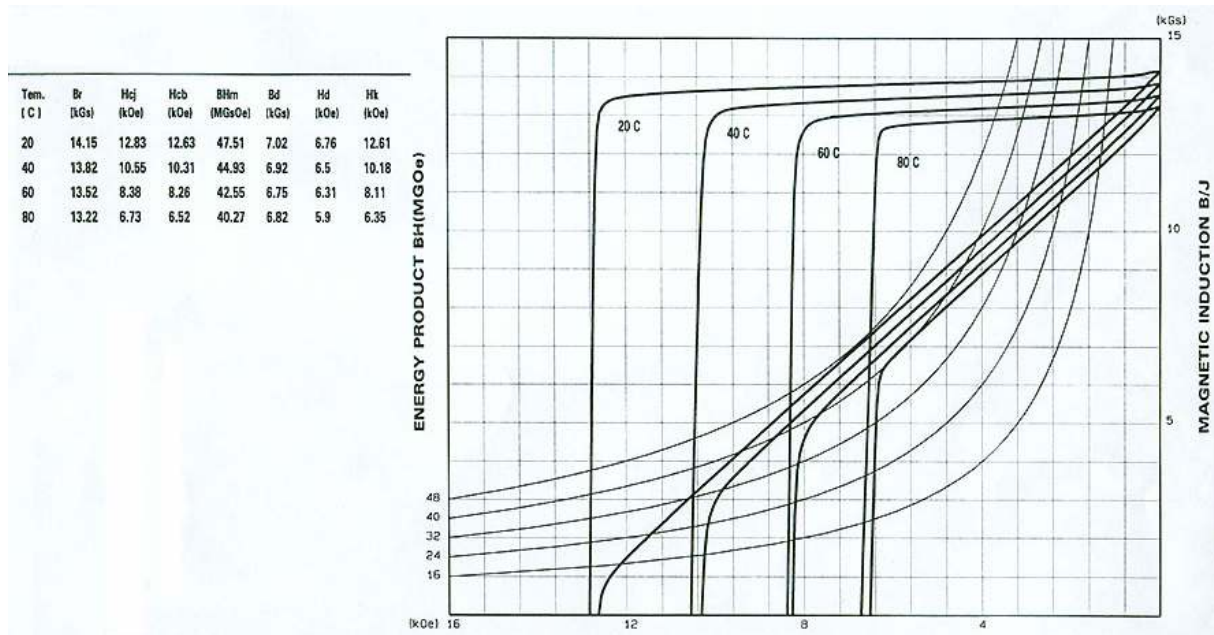
5.2.1 Mágnesek

A forgógépeknél is alkalmazott állandó mágnesek általában ritkaföldfém mágnesek, neodímium illetve szamárium-kobalt porkohászati úton készült anyagok. A kettő között csupán az ár és a Currie-hőmérséklet a lényeges különbség (11. ábra). [Web02]

	NbFeB	Sm ₂ Co ₁₇
Sűrűség [g/cm ³]	7.5	8.4
Curie hőm. [°C]	310	720
Indukció [T]	1.3	1.1
Térerő [KA/m]	900	900
Korozív	Igen	Nem
Ár [HUF] (5*10*50 mm)	522	2022

1. táblázat: Ritkaföldfém mágnesek adatai

Az állandó mágnesek hőmérséklet függése igen fontos szempont. A 13. ábrán látható, hogy az általam későbbiekben alkalmazott N48 mágnes (Neodímium) B-H görbéje miként változik különböző hőmérsékleteken.



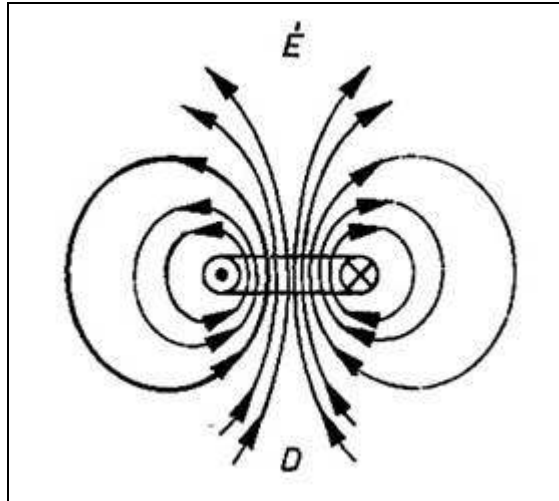
13. ábra: Neodímium mágnes hőmérséklet függése [Web02]

A neodímium – vas - bór (NdFeB) típusú mágnesek azon ritka földfém alapú mágnesek egyike, amely minden eddigi mágnes koercitív erejét és energiaszorzatát meghaladja. Mint porkohászati termék, a ritka földfém alapú mágnesek újabb generációját képviseli. NdFeB típusú mágnesek kifejezett előnye a kisebb méret és tömeg mellett a nagyobb megbízhatóság és a kiváló mágneses tulajdonságok. Ennek a mágnes típusnak felületvédelmet kell biztosítani, mert annak hiányában korrodálódik. Az NdFeB típusú mágnesek felületvédelme lehet horgany (Zn), nikkel (Ni) és festék réteg is.

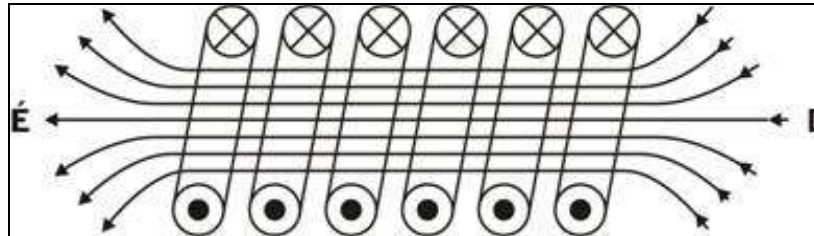
Magasabb hőmérséklet tartományban elsősorban a stabilan működő szamárium-kobalt mágnesek használatát ajánlják a kereskedők. A mágnes anyagösszetétele miatt nem korrodálódik és ellenáll sav, lúg roncsoló hatásának is. [Web02]

5.2.2 Ferromágneses anyagok és tekercsek

A mozgó töltéshordozók a környezetükben lévő teret különleges, energiával töltött állapotba hozzák, amelyet mágneses erőternek nevezünk. A mágneses teret erővonalakkal ábrázoljuk, melyek iránya az áram irányától függ. A mágneses erővonalak önmagukban záródó erővonalak, amelyek sem nem keresztezhetik, sem nem érinthetik egymást. Több vezető körül kialakult, mágneses terek átfedik egymást és eredő mágneses teret hoznak létre. A 14. - 15. ábrákon egy körvezető és egy tekercs mágneses tere látható. [Web05]



14. ábra: Körvezető mágneses tere

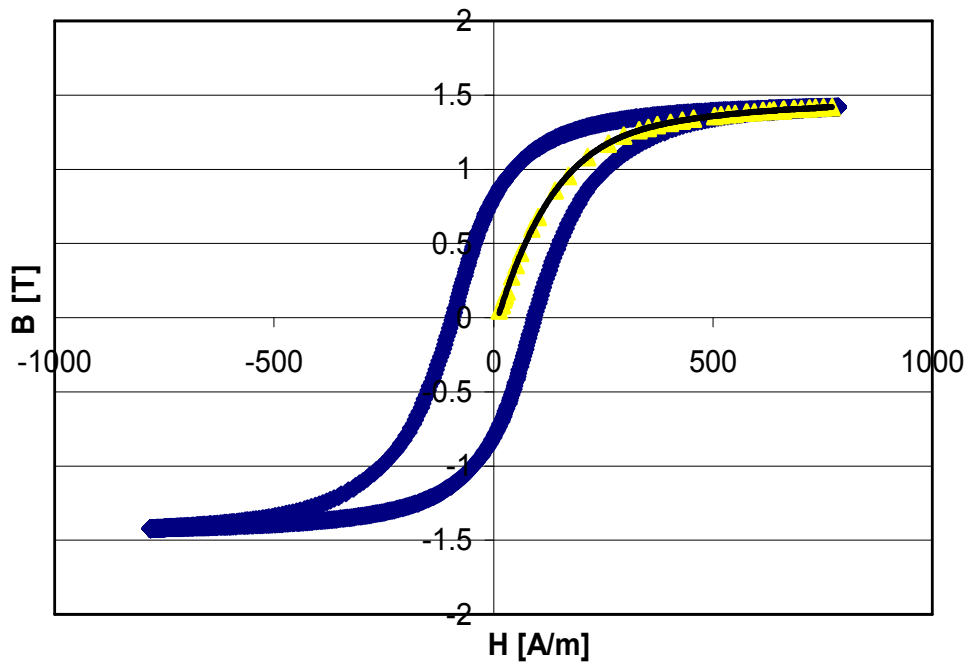


15. ábra: Tekercs mágneses tere

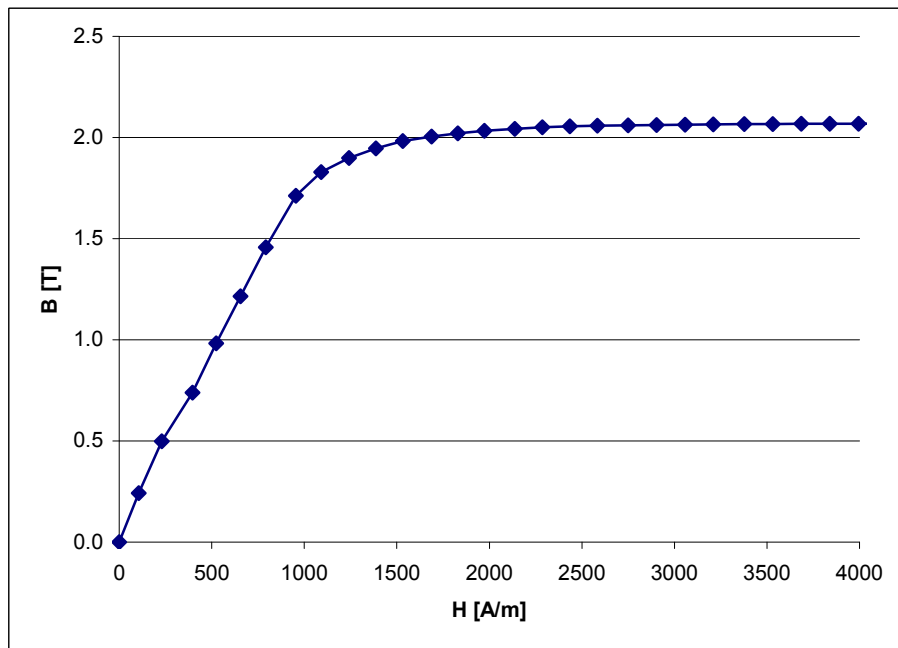
A vas és néhány más fém, valamint bizonyos ötvözetek és oxidok mágnesezhetőek, azaz környezetükben mágneses teret hoznak létre. Ezeket az anyagokat ferromágneses anyagoknak nevezzük. A ferromágneses anyagok lehetnek kemény- vagy lágy-mágneses tulajdonságúak.

- A kemény mágneses anyagok a külső mágneses tér hatásának megszűnte után is megőrzik mágnesességüket, ezek az állandó mágnesek.
- A lágy mágneses tulajdonságot mutató anyagok a külső mágneses hatás megszűntével mágnesességük túlnyomó részét elvesztik. A visszamaradt részt remanens mágnesességnek nevezzük. Lágy mágneses anyagokból készülnek a tekercs vasmagjai, a transzformátorok és motorok lemezei.

A ferromágneses anyagok nagyon jól vezetik a mágneses erővonalakat. Ha a mágneses térbe ún. vasmagot helyezünk, akkor majdnem minden erővonal ezen a vasmagon halad keresztül a könyökpont eléréséig. Ez a könyökpont az anyag mágnesezési görbéjéből illetve a „szűz”-görbéjéből leolvasható, amelyet a 16. – 17. ábrák szemléltetnek.



16. ábra: C10-es típusú acél mágnesezési és szűzgörbéje



17. ábra: Az ARMCO (alacsony széntartalmú acél) anyag szűzgörbéje

A diagrammokból látható, hogy míg a C10-es acél könyökpontja 1.3 T, addig az Armco anyag könyökpontja 2T. A C10-es vas görbéjének meredeksége azonban, ami arányos a permeabilitással (mágneses vezetőképesség) lényegesen nagyobb. Az Armco anyag jó mágneses tulajdonságait az alacsony (csupán 0.05%) széntartalmának köszönheti. [Més07]

A B [T] mágneses indukció a tér intenzitására jellemző mennyiség, lényegében az indukcióvonalakra merőleges felületegységen áthaladó indukcióvonalak számát jelöli. A H [A/m] a mágneses térerősséget jelöli. Köztük anyagjellemzőként a permeabilitás teremt kapcsolatot.

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad [1]$$

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} [Vs / Am] \quad [2]$$

Ahol μ_0 a vákuum permeabilitási tényezője, míg μ_r a relatív permeabilitási tényező, amely azt az értéket jelzi, hogy a mágneses indukció hányszor nagyobb az adott anyag jelenlétében, mint a vákuumban. Értéke az anyagok többségénél állandó, a változás jellegét az anyag mágnesezési görbéje mutatja.

5.2.3 Indukált feszültség

Az indukált feszültség vezető anyagokban indukálódik az indukció változásának következtében. Ez a feszültség minden vezető anyagban kialakul, ahol a közvetlen környezetben lévő mágneses tér megváltozik. Analitikus képlete a következő:

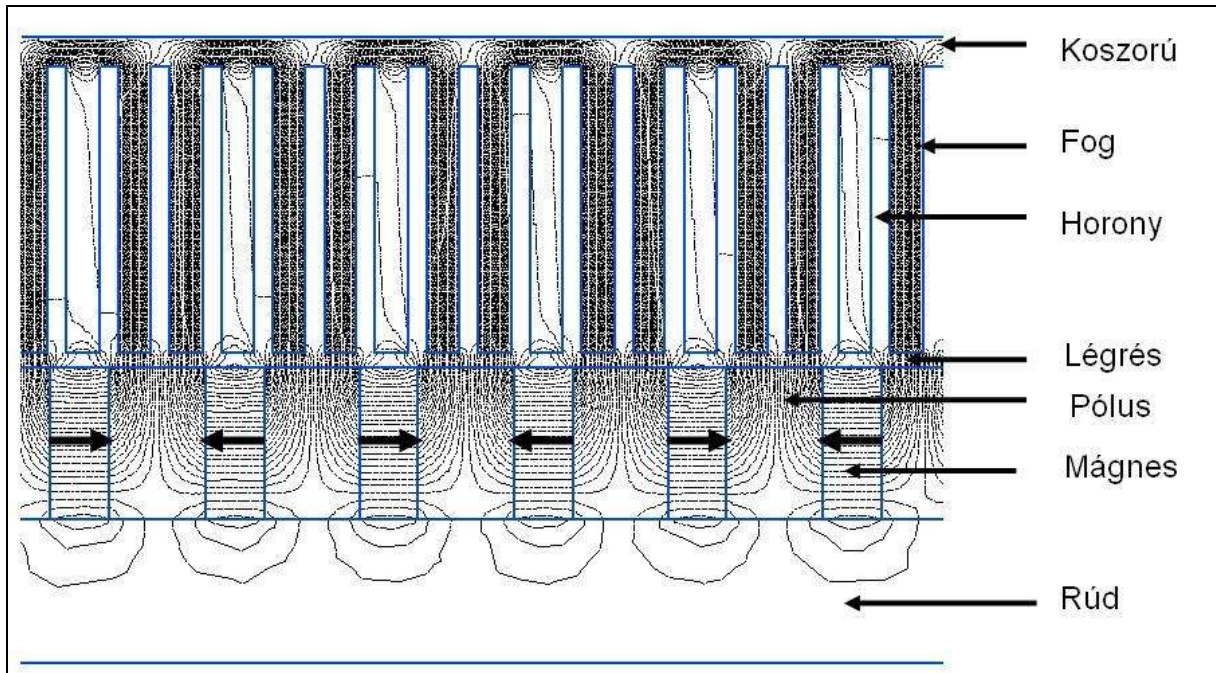
$$\phi = \int_A B * dA \quad [3]$$

$$U_i = N * \frac{-d\phi}{dt} \quad [4]$$

Melyben Φ a fluxus, \mathbf{B} a mágneses indukció, \mathbf{A} a tekercs felülete, U_i az indukált feszültség, t az idő és \mathbf{N} a tekercs menetszáma. Amiből az is következik, hogy a mágnes sebessége, és erőssége fogja meghatározni a feszültség aktuális értékét. A lágyvas környezet pedig befolyásolhatja az indukció gradiensét.

5.3 Mágnes-kör modell (Maple)

A vizsgálatok után analitikus modellt készítettem a mágneskör-modell segítségével, hogy a pontos geometriát meghatározzam. A modell felépítése a 18. ábrán látható. A modell bemenő paraméterei az elrendezés (gyűrű, tárcsa, vagy sugárirányban mágnesezett mágnesek), befoglaló méretkorlátok (d=80 mm, hosszúság=300 mm), alkalmazott légrés (0.5-2 mm), mozgó- és állórész sugárirányú megosztása (30-70 %), fázisszám (1-5), a lágyvas anyagminősége (B-H görbe) és az állandó mágnes (neodímium) választott munkapontja (0.5-1 T). Utóbbi a mágnes szobahőmérsékleten ismert karakterisztikájából meghatározott maximális energiasűrűségű pont (0.6 T). Ez azért fontos, hogy az adott térfogatú mágnesből, a lehető legnagyobb energiát használjuk fel. A számításban a mágnes gerjesztését állítom szembe a lágyvas anyagok és a légrés geometriájától függő mágneses ellenállásukkal. Analitikus számításaimat a QuickField (FEM) programmal ellenőriztem.



18. ábra: 3 fázisú csőmotor hengersizmetrikus erővonalképe (tekercselés a hornyokban)

Az ábrán látható elrendezésnél a hornyokban foglalnak helyet a tekercsek és a pólusokat a mágnesek között elhelyezkedő lágvas gyűrűk palástfelülete. A modell eredményül, a gép olyan geometriai méreteit adja meg, amelynél az állandó mágnesek az előre definiált munkapontban működnek és a lágvas anyagok sem mennek telítődésbe.

5.3.1 A modell felépítése

A modell felépítése a lineáris generátor geometriai paramétereinek megállapítására, számolására szolgál. A tervezésnél a szempont az adott térfogatból kinyerhető legnagyobb reakcióerő, teljesítmény elérése volt. Ennek egyik legfontosabb összetevője, hogy az állandó mágnesek a maximális energiasűrűségű ponton üzemeljenek.

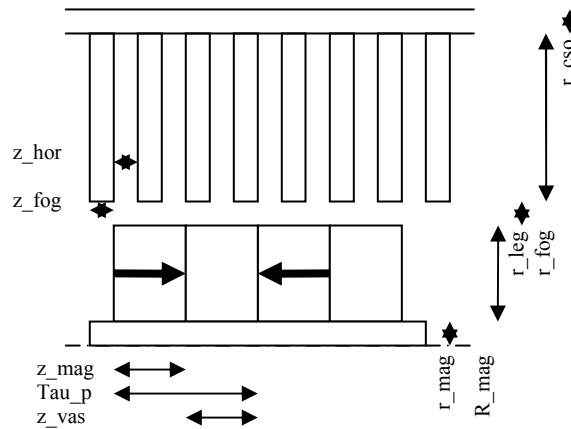
Mivel az általam használt mágnesek (neodímium) B-H karakterisztikája szobahőmérsékleten lineáris ($B_{\max}=1.2 \text{ T}$; $H_{\max}=840.000 \text{ A/m}$), ezért a munkapontot $0.6 \text{ T} - 420.000 \text{ A/m}$ pontra kell méretezni.

Ha tudjuk, hogy mi a mágnesünk B és H értéke, és tudjuk, hogy a gépünkben a vas alkatrészek milyen mágneses indukció értéknél telítenek be illetve milyen mértékben szeretnénk átmágnesezni őket, akkor a geometriai paraméterek számíthatóak. Mivel a gép elsősorban generátoros üzemben (fékezés) fog működni ezért a mozgórész mozgásakor indukálódott feszültséget kell maximalizálni. Mivel a sebesség állandó a mágneses indukciót kizárólag a mozgórész pólusokon tudjuk maximalizálni, de csupán olyan mértékben, hogy a vas pólusunk soha ne telítsen be.

$$\psi = \phi \cdot N \quad [5]$$

$$U_{\text{indukált}} = -\frac{d\psi}{dT} \quad [6]$$

Ahol Φ a tekercs fluxus, ψ a tekercsel kapcsolódott fluxus, dT az időlépcső, és U_i a tekercsben indukálódott feszültség. A geometriai paraméterek elnevezéseit a 19. ábra mutatja be.



19. ábra: A gép keresztmetszeti képe és a modellben használt elnevezések

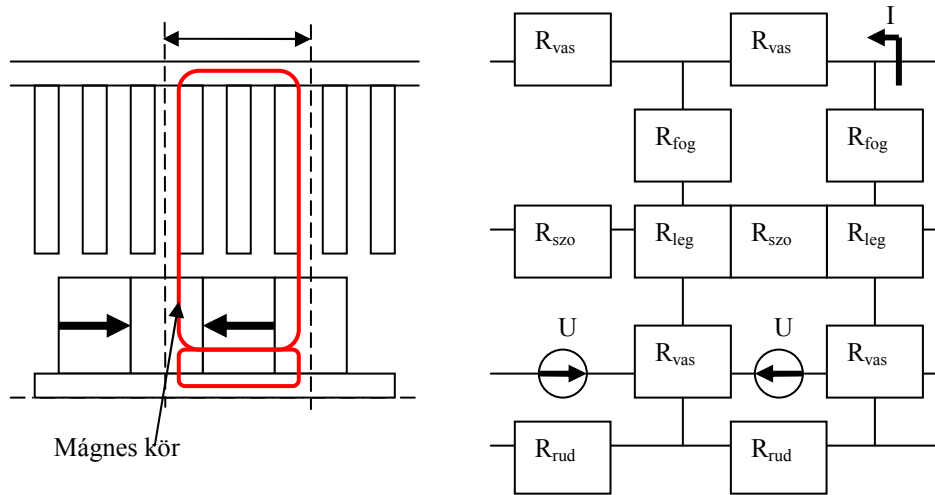
Ahol:

- z_{hor} : a horonyszélesség
- z_{fog} : a fogszélesség
- z_{mag} : a mágnes szélesség
- z_{vas} : a vas szélesség
- τ_p : a pólusosztás szélessége
- r_{mag} : a mágnesgyűrű belső sugara és a paramágneses rúd sugara
- R_{mag} : a mágnesgyűrű külső sugara
- r_{leg} : a légrés vastagsága
- r_{fog} : a fog hossza
- r_{cso} : a koszorú (cső) vastagsága

A mágnes körben található alkatrészek mágneses, illetve bemenő fix paraméterei a következők:

- $B_{mágnes} (B_{mag}) = 0.6 \text{ T}$
- B-H görbe Armco ferromágneses anyag
- $B_{pólus} (B_{vas}) = 1.8 \text{ T}$
- $B_{fog} (B_{fog}) = 2 \text{ T}$
- $B_{koszorú} (B_{cso}) = 1.6 \text{ T}$
- $R_{teljes} (r_{full}) = 0.004 \text{ m}$
- μ_o (levegő permeabilitása) = 1.2566 Vs/Am
- $\mu_{mágnes} = 1.136 * \mu_o = 1.4275 \text{ Vs/Am}$
- $\mu_{vas} = 2400 * \mu_o = 3015.84 \text{ Vs/Am}$
- $R_{teljes} (r_{full}) = 0.08 \text{ m}$

Ezen geometriának megfelelő mágnes kör modellt a 20. ábra szemlélteti. Látható hogy csupán egyetlen kört modellezek, és a mozgórész véghatásait elhanyagolom, mivel a mozgórész 14 pólusú.



20. ábra: A gyűrű mágneses mozgórészű géphez tartozó mágnes kör modell

A fenti ábrákon szemléltetett elrendezésben és modellben gyűrű mágnesek vannak a mozgórészen, melyek közepén nem mágnesezhető (paramágneses) rúd helyezkedik el. A modell az elrendezés változásával változik, ha tárcsa mágneseket használunk a mozgórészen, illetve ha sugár irányban mágnesezett mágnesgyűrűket és bennük ferromágneses rudat használunk. A modell mindhárom elrendezésre elkészült. A modellben az áramkörü elemeknek megfelelő mágneses egységek a következők:

$$U = H_{\text{mágnes}} * l_{\text{mágnes}} \quad [7]$$

$$I_i = B_i \cdot A_i \quad [8]$$

$$R_i = \frac{l_i}{\mu_i \cdot A_i} \quad [9]$$

Ahol U a mágneses gerjesztés, I a fluxus (Φ) és R_i az adott elem mágneses ellenállása.

A modell számolási elve, hogy a mágnes megadott munkapontján a B (bemeneti paraméter) értékhez tartozó H értéket veszi alapul. Az alkalmazott mágnes (neodímium) karakterisztikája szobahőmérsékleten ugyanis lineáris. A mágneskörben a változó csupán a mágnes hossza ($z_{\text{mag}}=l_{\text{mágnes}}$), azaz, hogy milyen hosszúnak kell lennie a mágnesnek, hogy a megkívánt mágneses paramétereket a különböző elemekben megkapjuk, tehát átmágnesezze az adott mágnes-kört.

$$H_{\text{mágnes}} \cdot l_{\text{mágnes}} = I \cdot R_{\text{eredő}} \quad [10]$$

Ha megkaptuk a mágnes hosszát, akkor a fluxus és a vas anyagok előírt értékeiből számolható a vas (pólus) hossza, azaz megkapjuk a pólusosztást. A pólus hosszát az határozza meg, hogy az előírt felületi 1.8 T indukciót (B_{vas}) a mágnesből kilépő fluxusok összege ($B_{\text{mágnes}} * A_{\text{mágnes}}$) mekkora felületen hozza létre (A_{vas})

$$B_{\text{mágnes}} \cdot A_{\text{mágnes}} = B_{\text{vas}} \cdot \frac{A_{\text{vas}}}{2} + B_{\text{rud}} \cdot A_{\text{rud}} \quad [11]$$

A pólusosztás meghatározása után az állórészen hasonlóképpen számolt fogak vastagságát számolom ki. A fázisszámnak megfelelően a fog vastagságból és a pólusosztásból számítható a horony szélessége az alábbi képlet alapján:

$$\tau_p = F \cdot (z_{fog} + z_{horony}) \quad [12]$$

Ahol F a fázisszám.

Ezen számítások alapján változó paraméterekkel végeztem a számításokat. A változtatott paraméterek a következők voltak:

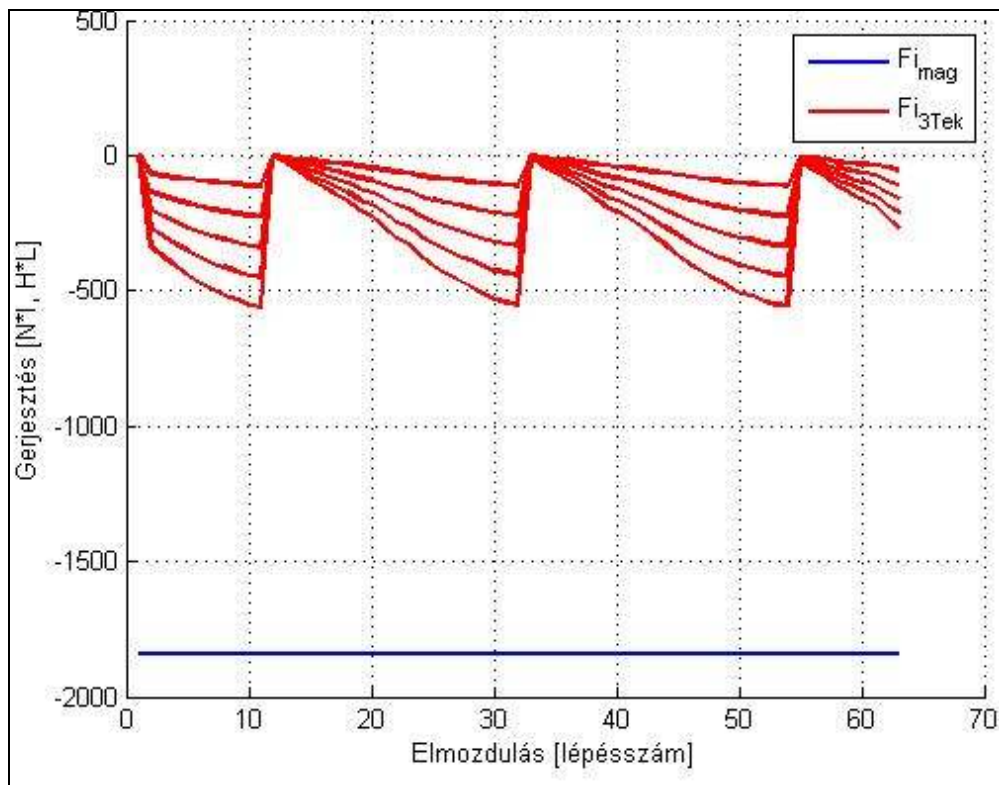
- Fázisszám az állórészen;
- Álló és mozgórész sugárirányú aránya a teljes rendelkezésre álló sugárhoz;
- Elrendezések: Gyűrű vagy Korong mágnesek a mozgórészen, Sugárirányban mágnesezett gyűrű mágnesek;
- Légrés nagysága (r_{leg});
- A mágnes munkapontja (B_{magnes}).

5.4 Végeselemes modell (MatLab)

Az analitikus számításból megkapott geometriát felhasználva, MatLab 7.1 program alkalmazásával véges elemes (FEM) szimulációt végeztem. A modell célja az volt, hogy egy adott sebességen mozgó dugattyúra ható reakcióerőt kiszámolja, és így lehetővé tegye a különböző geometriák összehasonlítását.

Bemeneti paraméterek voltak a lágvas anyag jellemzői (B-H görbe), a csőmotor felépítése (gyűrű vagy tárcsa mágnesek), az állórész tekercsek rövidzárása (fázisban, vagy külön), fognyomaték csökkentő metódus (pólusferdítés, horonyferdítés, nincs fognyomaték csökkentés), horonyzáró ék anyaga, mozgórész sebessége (lengéscsillapítóknál maximum 1 m/s) és a csőmotor hosszirányú maximális méretei (mozgó és állórész).

A modell statikus diszkrét állapotok sorozatából (mozgó rész elmozdítása) számol dinamikusan létrejövő hatásokat (mágneses tranziens). Eredményül megkapjuk az állórészben folyó rövidzárási áramokat, üresjárású indukált feszültségeket, induktivitásokat. Ezen értékekből a Maxwell Stress Tenzor segítségével számolható, hogy mekkora fékezőerő hat a mozgó részre. A modell ezeken kívül számolja a teljesítményt, az indukált (üresjárású) feszültséget, rövidzárási áramot és egyéb paramétereket. Fontos volt ábrázolni a lemágnesesződés értékeléséhez szükséges gerjesztéseket is, hogy az alkalmazott állandó mágnesek ne mágnesesződjenek le maradandóan (21. ábra).

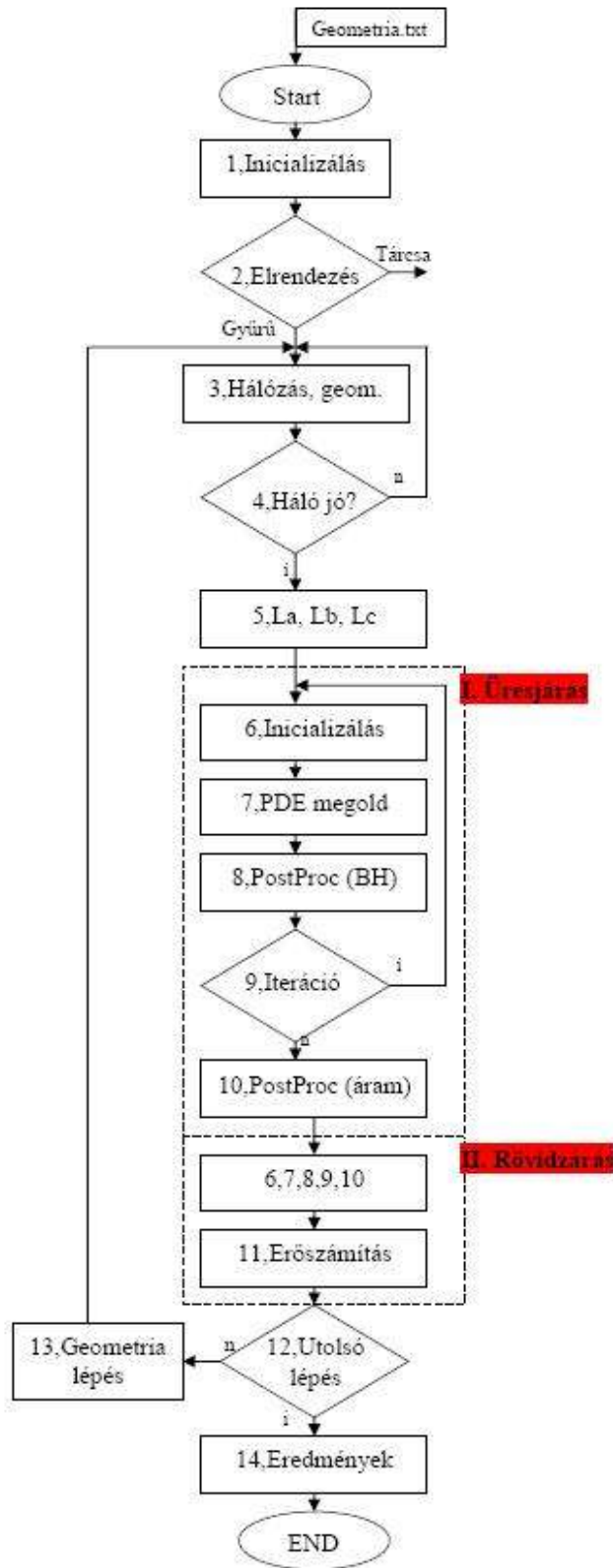


21. ábra: Lemágneseződés szemléltetése a gerjesztésekkel ($F_{i_{mag}}$: mágnes gerjesztése, $F_{i_{3Tek}}$: a három fázis együttes ellengerjesztése különböző dugattyúsebességeken)

Ezek után számos analitikusan számolt paramétert is eredményez a modell, mint például az egység súlya, körülbelüli anyagára stb.

5.4.1 A modell felépítése

A FEM modell felépítését a 22. ábra szerinti blokk diagramm szemlélteti.



22. ábra: A végeelem modell (MatLab 7.1) blokk diagrammja

O, Indítás

A tpmmsimint.m file indítása

1, Inicializálás

Anyagparaméterek megadása:

- réz fajlagos ellenállása
- permeabilitás (levegő, réz)
- horonyzáró ék anyaga
- mozgórész felépítése gyűrű vagy tárcsa
- tekercsek külön vagy fázisban rövidre zárva
- sebesség megadása (ciklusban is lehet)
- fognyomaték csökkentés módja (tört horonyszám, pólusferdítés)
- fogfej egység megadása (ciklusban is lehet)

Futtatási paraméterek:

- mozgórész indulási pozíció
- futtatási hossz
- 1 Tau_p hány lépésre legyen felosztva
- Maximális megengedett iteráció a BH görbénél a permeabilitás meghatározásához
- Tolerancia szint megadása (hiba mikor elég kicsi)
- Induktivitás számítás módja (FEM/Analitikus)
- Állórész és mozgórész kívánt hossza
- BH görbe választás (C10/Armco)
- Háló finomítás [db finomítás]

Számolt értékek:

- menetszám
- ellenállás
- lépésidő, futtatásidő becslés
- lépéshossz
- lépések [db]

Induktivitás számítás analitikusan:

Az feltételezve, hogy a tekercsek tere a fogban záródik, a horonyfelületén sugárirányban lépésről-lépésre kiszámoljuk az aktuálisan a vizsgált felületbe eső menetek gerjesztését, abból fluxust, majd a fluxus kapcsolódást kapjuk meg minden lépésszámban. Ezt integrálva és az árammal elosztva kapjuk a szórt induktivitást.

2, Elrendezés

Az elrendezés kialakításnál ebben a kódban csak a gyűrű kialakítás geometria berajzolása lehetséges. A korábbi modelleknél választható opció volt a tárcsa alakú mágnesek használata is.

3, Hálózás, geometria berajzolása

- geometria berajzolása
- lépés növelése
- hálózás (FEM)

4, Háló elég finom-e

Vizsgálja az inicializáláskor beadott háló finomítási darabszámot. Ha nem elég finom akkor finomít rajta még egyszer (MatLab eszköz)

5, Induktivitás számítás FEM-mel

Amennyiben az inicializáláskor megadtuk akkor az induktivitás véges elem módszerrel történik. Egyik fázisba (A) beadunk 2 A fázisáramot, mágneseket kivesszük (levegő lesz a helyükön), a mozgórészt léptetjük és közben minden lépésben kiszámoljuk a fluxus változást fázisonként (L_{AB} , L_{AC}).

$$L_{AA} = \frac{\varphi_{AA}}{2} \quad [13]$$

Ahol φ a fluxus. Ezt mind a 3 fázisra elvégezzük, melyből:

$$L_{Am} = -L_{AB} - L_{AC} \quad [14]$$

$$L_{As} = L_{AA} - L_{Am} \quad [15]$$

$$L_A = L_{As} + \frac{3}{2} L_{Am} \quad [16]$$

I. ÜRESJÁRÁS

Üres járási feszültség kiszámítása

6, Inicializálás (FEM PreProcessing)

Állandó mágnesek a mozgórészen és nincsen áram az állórészen.

7, PDE (Partial Differential Equations) megoldó

Parciális differenciál egyenletek megoldása minden háromszögben.

$$-rot\left(\frac{1}{(r * \mu)} \cdot rotA_\varphi\right) = rotM + J \quad [17]$$

Ahol r a háromszög milyen sugáron van, μ permeabilitás, A_φ vektropotenciál M mágnesezettség, J áramsűrűség, amelyből megkapjuk a A_φ vektorpotenciált

8, Post process (BH görbe)

Megoldandó a

$$rotA_\varphi = B_x + B_y; \quad [18]$$

$$B_{abs} = \sqrt{(B_x^2 + B_y^2)} \quad [19]$$

Meghatározni a B-ből a H-t a BH görbén, majd a B/H megadja a μ -t.

9, Vektorpotenciál hiba megfelelő-e

Számoljunk-e újra vektorpotenciált? (n-edik lépés), azaz, ha még nem értük el az 1 ben inicializált maximális iterációs számot a következő képlettel:

$$(A_{\varphi(n)} - A_{\varphi(n-1)})^2 > (A_{\varphi(1)} - A_{\varphi(0)})^2 / 1000 \quad [20]$$

10, Post Process (Áram) Fluxusszámítás:

$$\varphi_m = 2 \cdot \pi \cdot \int A_\varphi ds \frac{1}{s} \quad [21]$$

Ahol φ a fluxus, és s a horonyfelület.

Fluxuskapcsolódás számítás:

$$\psi_m = \frac{d\varphi_m}{dt} \cdot N \quad [22]$$

Ahol N a menetszám.

A következő lépésben első értéként 0.0001 Ampert adunk be a tekercsekbe és megoldjuk a következőket:

$$U_R + U_L + \frac{d\psi_m}{dt} = 0 \quad [23]$$

$$I \cdot R + \frac{dI}{dt} \cdot L + \frac{d\psi_m}{dt} = 0 \quad [24]$$

$$\frac{dI}{dt} = -I \cdot \frac{R}{L} - \frac{d\psi_m}{dt} \cdot \frac{1}{L} \quad [25]$$

Ezt az elsőrendű differenciál egyenletet iterációval megoldani míg a 24 egyenlet kisebb nem lesz mint 0.1.

II. RÖVIDZÁR

Teljesen azonos az üres járási blokkal, csak itt az ott kiszámolt áramokat visszaírjuk mind a 3 fázisba

11, Erőszámítás

Az erőt a Maxwell Stress Tenzor segítségével számítjuk. A vizsgált felületünk egy olyan palástfelület mely körbeveszi a mozgórészt és sugara a légrés felének méretével megegyező. A vizsgált henger a problémátérrel megegyező hosszúságú. A hengerpalást vonalában megkeressük az ottani háromszögeket (2D FEM), és azok B_x és B_y értékeit.

$$f = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_x \cdot B_y \cdot V_{korong} \quad [26]$$

Ahol V_{korong} a lépéshez tartozó korongtérfogat, míg f a lépéshez tartozó erő. Ennek összegeként kapjuk a reakcióerőt.

12, Utolsó lépés-e

A mozgórész lép-e még vagy ez volt az utolsó lépés.

13, Mozgórész lép, geometria újrarajzolása

Berajzolja az elmozdult mozgórészt

14, Eredmények

Eredmények kimentése file-ba.

- Indukció üres járásban és rövidzárban
 - Mágnes felületén
 - Fogban
 - Póluson
- Erő
- Szerkezet súlya
- Áram
- Üres járási feszültség
- Mágnes és tekercsek gerjesztése
- Menetszám
- Fluxus változás
- Induktivitás

5.5 Az első prototípus

A modellek megalkotásával párhuzamosan készült el egy „deszkamodell”, amellyel az analitikus és véges elemes számítások eredményeit (feszültség, áram és erő) igazoltam mérések útján.

Ez a prototípus egyszerűen beszerezhető elemekből készült, és kialakításában sem volt bonyolult. Már a kezdeti stádiumban látszott, hogy a legnagyobb problémát, a mozgórész megvezetése fogja okozni, hiszen a választott 2 milliméteres légrést a mozgó és az állórész között tartani kellett. Az első prototípusnál a légrés egy danamid cső volt, amiben mozgott a mozgórész, és amire illeszkedett az állórész. A tekercseléseket is én készítettem, amelyek mindegyikét kivezettem, hogy a mérések alatt lehetőség nyíljon tetszés szerinti (külön-külön vagy fázisban) kapcsolásra, rövidzárásra. Ezt úgy tudtam megtenni, hogy az állórészen elhelyezett fogtárcsák mindegyike be volt metszve. A mozgórészen korong mágneseket használtam, amelyek egymással szembe fordítva helyezkedtek el (kontra-polár elrendezés). Ez az elrendezés azért hasznos, mert a mágnesek között elhelyezett korongok palást felülete lesz majd a gép pólusa, mely így nagy pólusindukciók elérését teszi lehetővé. Ezeket kétkomponensű ragasztóval ragasztottam össze, ami megfelelő merevséget biztosított. A mozgórészen elhelyezett tárcsák átmérője 40 mm míg az állórész külső átmérője 80 mm volt (50%-os $R_{\text{mozgórész}} / R_{\text{állórész}}$). A pólusosztása 15 mm volt mely 10 mm-es ferromágneses korong és az 5 mm-es mágnes korong adott ki. Evvel szemben 3 fázisú tekercselés volt, melynek fogszélessége 3 mm, míg tekercsszélessége 2 mm volt. Az egység felépítése a 23. ábrán látható.



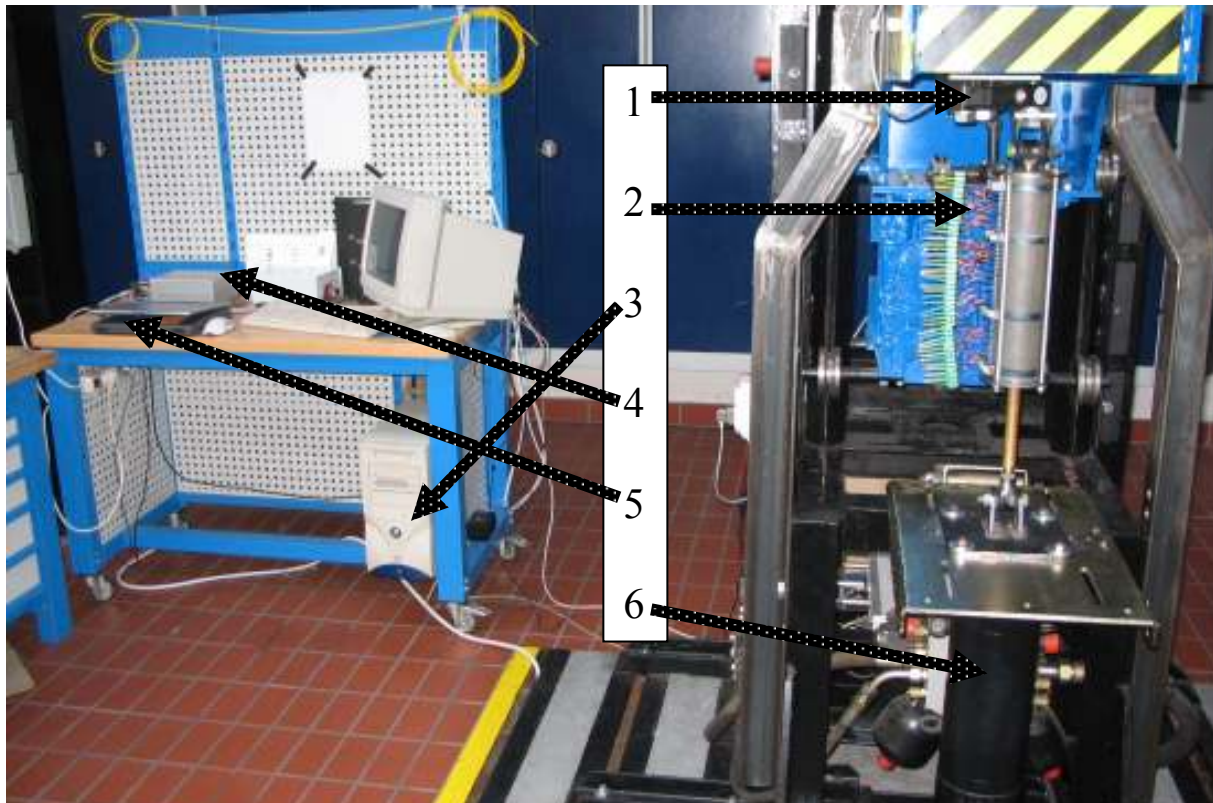
23. ábra: A prototípus I felépítése

5.6 Validitás vizsgálat mérésekkel

Ezt követően a szerkezetet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárművek Tanszékére vittem. A tanszék laboratóriuma fel van szerelve egy olyan pulzátorral, amely alkalmas a lineáris mozgás teljes variációs spektrumát lefedni külső irányítással. A rendszer MatLab AutoBox perifériákkal, MatLab simulink programmal vezérelhető. Az erőmérést a pulzátorra szerelt nyúlásmérő bélyeges erőmérő cellával végeztem, amely CAN protokollon keresztül kommunikált a MatLab AutoBox-al. A feszültség és áram értékeket a MatLab Simulinkben írt programmal rögzítettem. A mérési elrendezés és maga a pulzátor is a 24. ábrán látható. A mért paraméterek melyeket a modelleim is szolgáltatottak a következők voltak:

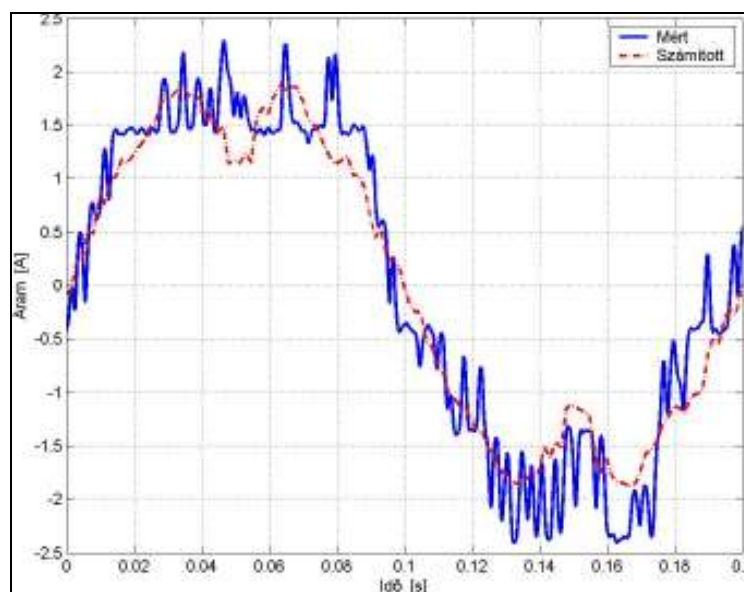
- Tekercsek ellenállása
- Tekercsek induktivitása
- Indukált feszültség különböző dugattyúsebességeken
- Rövidzárási áram különböző dugattyúsebességeken
- Fékezőerő különböző dugattyúsebességeken

A méréskor a pulzátort háromszög jellel vezéltem, azaz a fel és lefutási szakaszokban állandó sebességet tudtam elérni. Ezen sebességen mértem az MatLab AutoBox környezetet az üres járási feszültséget és a rövidzárási áramokat a fázisokban és a tekercsekben külön-külön is. A lengéscsillapító egy erőmérő cellán keresztül volt rögzítve a mozgó pulzátor talapzatra, amely így folyamatosan szolgáltatotta a kialakult reakcióerő értékeket. Ezen mért értékek összevethetőek voltak a szimulált értékekkel.

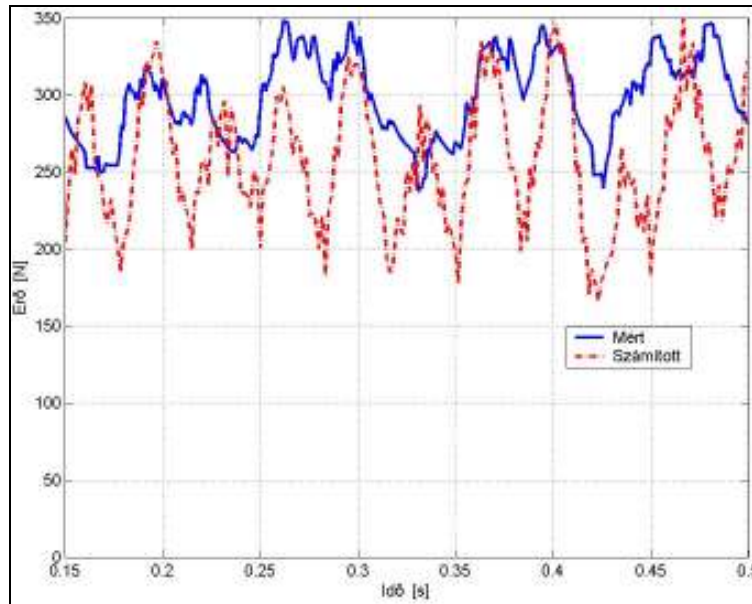


24. ábra: Az első prototípus mérése (1: Erőmérő cella; 2: Mágneses lengéscsillapító; 3: Pulzátor vezérlés; 4: MatLab alapú mérőrendszer (AutoBox); 5: Feszültség és áram mérő modul; 6: Pulzátor munkahenger)

A már említettek szerint a maximális dugattyúsebesség 1 m/sec, tehát a modellben és a mérésekkor is ezen az értéken vizsgáltam a rendszert. A legnagyobb áram és feszültség értékek is ekkor alakulnak ki. A mérésekkor a tekercseket külön-külön, illetve fázisonként zártam rövidre. A mérési és a szimulációs eredmények a 25.-25. ábrákon láthatóak.



25. ábra: Mért és szimulált rövidzárási áram értékek a Prototípus I-nél.



26. ábra: Mért és szimulált reakcióerő értékek a Prototípus I-nél.

Az erő értékeknél rögtön szembetűnik a különbség, ami annak köszönhető, hogy a prototípuson a mozgórész megvezetésére szolgáló danamid cső megmunkálásakor nem sikerült elérni a kívánt pontosságot. Ennek köszönhetően mérhető volt a dugattyú pozíciójától függő erő érték, melyet a modellezésnél nem tudtam figyelembe venni. Az állórész geometriai változtatásait azonban figyelembe vettem a modellben és minden változtatható paramétert ráillesztettem a prototípus paramétereire, mely így eredményként a reakcióerőben is csupán 5%-on belüli eltérést mutatott. Ezt az eredményt megfelelőnek ítéltem a további munka szempontjából.

5.7 Optimalizálás

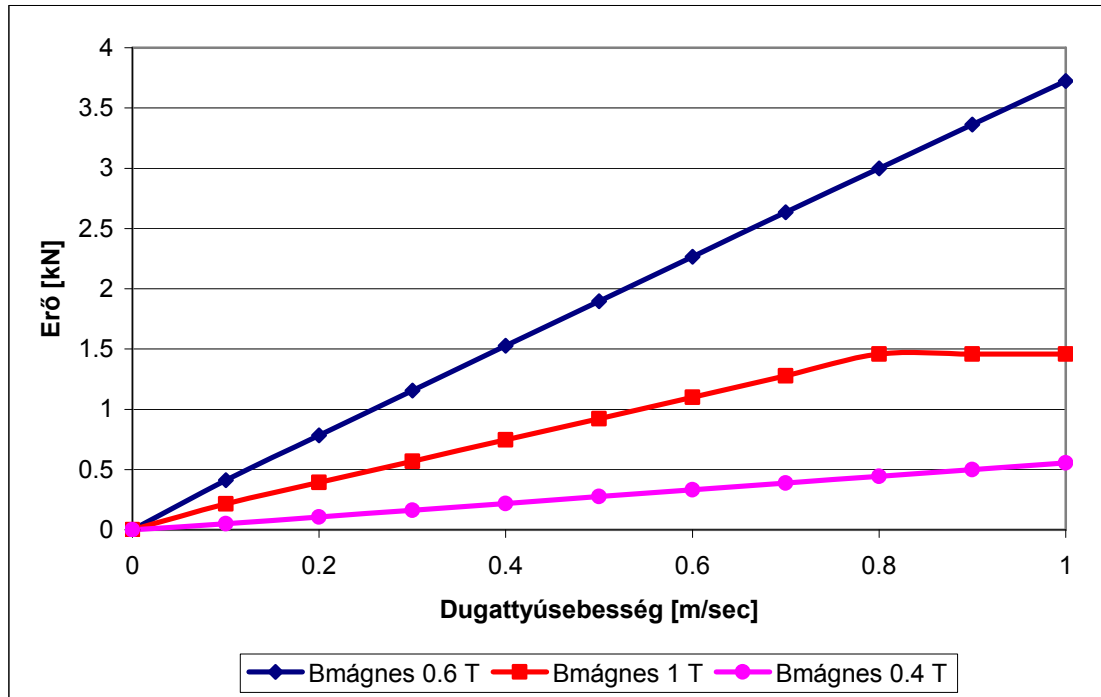
A mérések után a modellem tehát megfelelőnek bizonyult a probléma leírására, mivel a mért adatokkal megegyező eredményeket szolgáltat, ezért a jármű lengéscsillapítók szempontjait figyelembe vevő optimalizálásra alkalmazható. Az optimalizálás főleg térfogatcsökkentésre, illetve adott térfogattal elérhető reakcióerő növelésre irányult.

5.7.1 Mágnes munkapontja

A már korábban említetek szerint a mágnes karakterisztikája 20 °C hőmérsékleten lineáris. Munkapontját a mágnes-kör ellenállása szabja meg. A maximális energia szorzatot a 0.6 T felületi indukcióértékhez tartozó 420 000 A/m térerősségű munkapontban kapjuk. Vizsgálataimban kitértem a munkapont reakcióerőre gyakorolt hatásának elemzésére. Összehasonlításom alapja az azonos térfogattól elérhető fékezőerő volt. Mivel kontra-polár elrendezésű mágnesrendszerrel van szó a mozgórészen, belátható, hogy a mágnes munkapontjából következő felületi indukcióértéktől függ a pólus fluxus, hiszen a mágnes tengelyirányú felülete minden esetben azonos. Ebből következik, hogy 1 T felületi indukció esetén azonos mágnes-kört feltételezve nő a mágnes tengelyirányú hossza, hiszen a mágnesben a térerősség lecsökken. Mivel a fluxus is növekszik, azonos ferromágneses anyagot alkalmazva (telítési indukció szempontjából) a

mágnesek közötti lágyvas gyűrű tengelyirányú méretét is növelni kell, hogy ne menjen telítésbe az anyag. Ebből következik, hogy azonos mozgórészen kevesebb pólus helyezhető el, mely így kisebb reakcióerőt eredményez.

A 27. ábrán látható, hogy az alacsonyabb energia szorzatú ponton működő mágneset üzem közben a lemágneseződés is veszélyezteti (áramkorlátozás a mozgórészen).

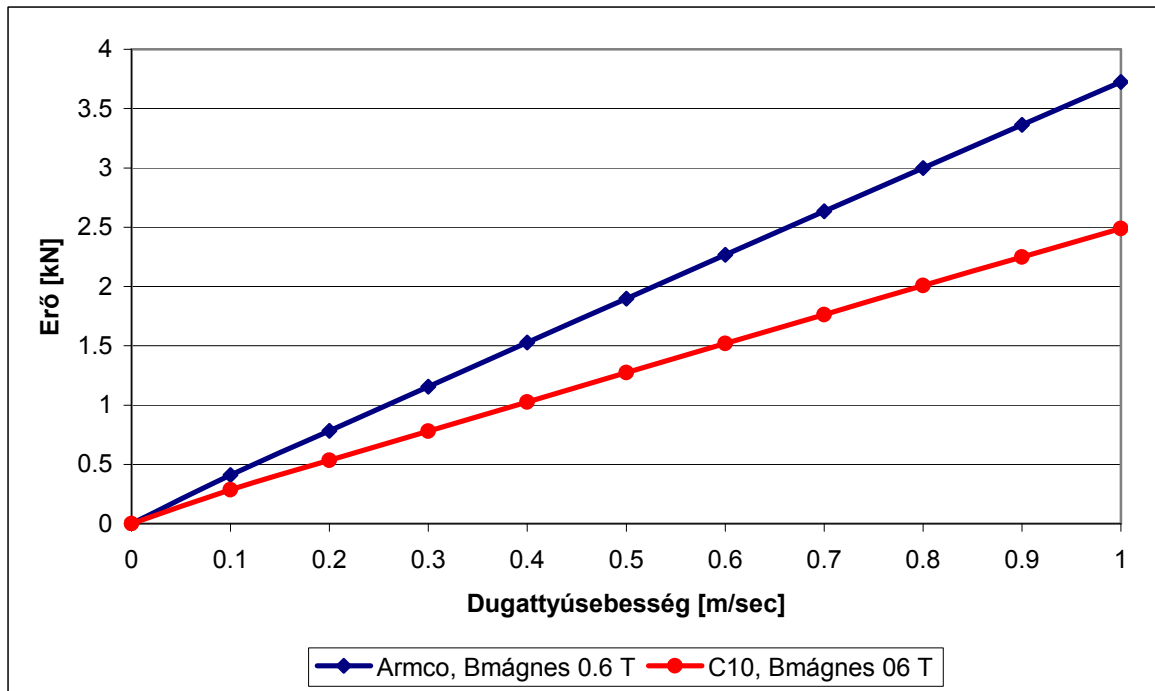


27. ábra: Mágnes munkapontjának a reakcióerőre gyakorolt hatása

Ezek mellett a kis pólusméret növeli a gyártási költségeket is, hiszen az állórészen meg kell valósítani a három fázisú tekercselést, fogak kialakítását, ami kis méretekből komoly nehézségeket okozhat. [Zado7]

5.7.2 Ferromágneses anyagválasztás

A csőmotor ferromágneses anyagának igen komoly szerepe van a gép teljesítményének alakulásában. B-H görbéje ugyanis megadja, hogy mely mágneses indukció értéket képes még magába „gyűjteni”. Ez a paraméter azért fontos, mert mágneses szempontból minél jobb anyagot használunk, annál több indukció vezetésére képes, és így a gép pólusindukciója is nagyobb lehet. A korábbi fejezetben már említettek szerint alapvetően két anyagot vizsgáltam: a C10 és az Armco vasakat. A C10-es anyag telítési indukció értéke 1.6 T, míg az Armco anyagnak 2 T. Az e két anyagból épített gép reakcióerejének összehasonlítása a 28. ábrán látható.



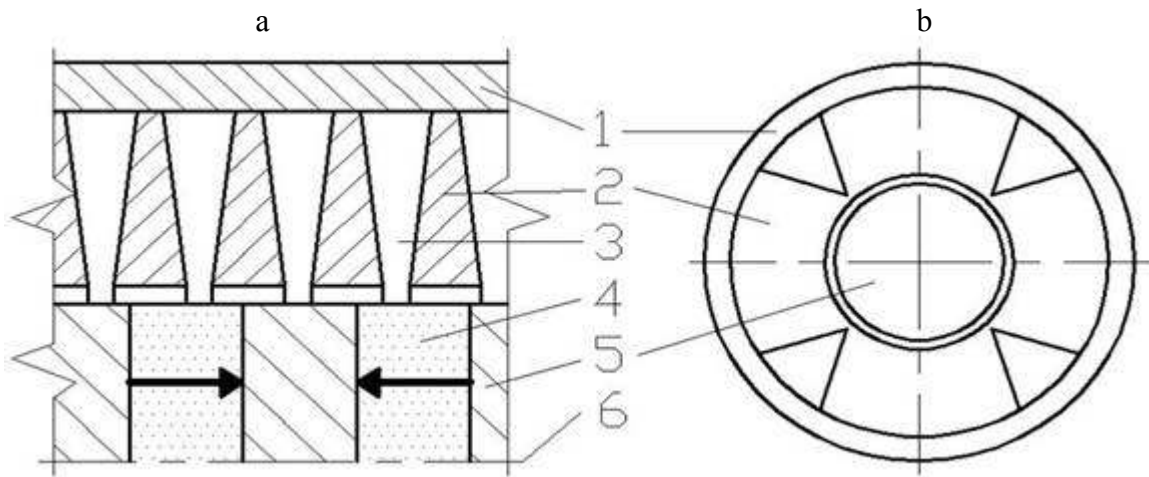
28. ábra: A gépben alkalmazott lágyvasak reakcióerőre gyakorolt hatása

5.7.3 Fogtárcsák bemetszése

Mivel a tekercsek a hornyokban foglalnak helyet, ezért a tekercsek kivezetéséről gondoskodni kell. Ez meglehetősen bonyolult, főleg a tekercs első menetének, a gép mozgórészéhez közel eső végének bevezetése. Mindez úgy oldható meg, hogy a tárcsába (fog) egy radiális irányú hornyot vágunk. Amennyiben a fogat teljesen bemetszük, akkor meggátolható egyidejűleg a működés közben benne meginduló örvényáramok kialakulásának nagy része (köráram) is. Így egyidejűleg csökkenthető az örvényáramú veszteség, a fogakban a melegedés mértéke, és egyszerűen kivitelezhető a tekercsek kivezetése is. [Nas94]

5.7.4 Fogindukció

A gép teljesítményének szempontjából fontos, hogy az állórész hornyokat minél jobban kitöltsék a rézvezetők, illetve, hogy minél nagyobb térfogatúak legyenek. Ha a fogak vastagságát az állórészen sugárirányban kifelé csökkentjük úgy, hogy a fogak metszetfelülete ne változzon, akkor mivel a lengéscsillapítónk hengeres, a fogakban az indukció értéke konstans értéken marad a teljes hosszon ha a szórást is figyelembe vesszük. Ebben az esetben a hornyok térfogata viszont megnő, tehát növelhető bennük az elhelyezhető tekercstérfogat, ami teljesítménynövekedést eredményez. A metszetfelületek azonos értéken tartását el tudjuk érni a fogak „tortaszetelehez” hasonló kimetszésével is, mint azt a 29./b ábrán láthatjuk. [Zado7b], [Zado6b]



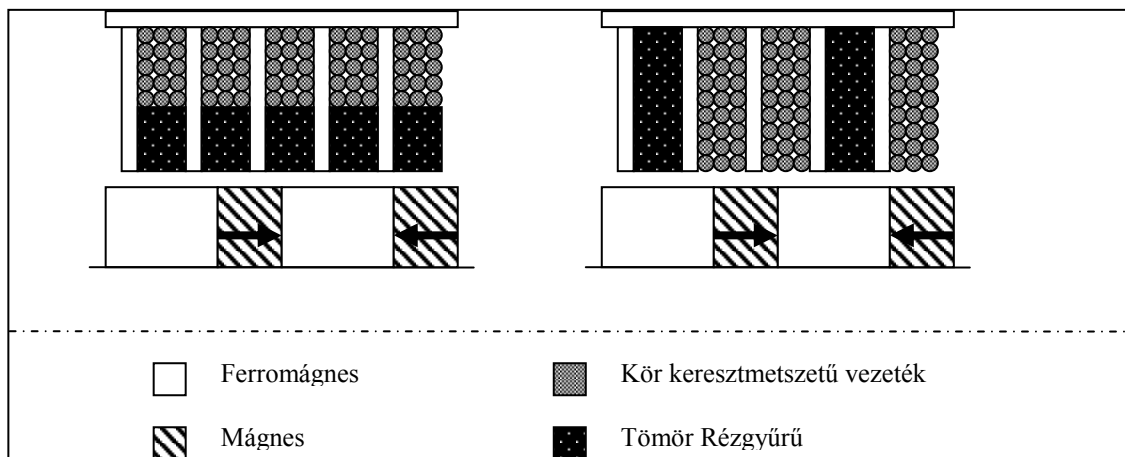
29. ábra: Fogprofil optimalizálása a): fogszűkítés; b): kimetszés (1: koszorú, 2: fog, 3: horony, 4: mágnés, 5: vasgyűrű, 6: körszimmetria tengely)

5.7.5 Rézkitöltés növelése

A gép teljesítménye tovább növelhető, ha a hornyokban növeljük a réz kitöltést. Ez azt jelenti, hogy a horonyfelületből mekkora részt tudunk rézzel kitölteni. Ez azért fontos, mert ha például azonos menetszám mellett jobb a kitöltés, akkor a huzal ellenállása kisebb lesz, melynek következtében a zárlati áram nagyobb lesz. Jelenleg (kör keresztmetszetű huzallal ($d=1$ mm)) 51%-os a kitöltés párhuzamos falú fogakat feltételezve, ami különböző módokon növelhető.

Lehetőség van négyzet keresztmetszetű huzalok alkalmazására, amik jobban illeszkednek egymáshoz, és így javítják a kitöltést (230. ábra).

Ha fékezőerő még mindig nem elegendő, akkor lengéscsillapító specifikus megoldás lehet a tömör rézgyűrűk alkalmazása. Ebben az esetben a rézgyűrűk egy konstans dugattyúsebességtől függő értékkel megnövelik a csillapítóerőt, amely így nem lesz vezérelhető, de a közel 100%-os kitöltés miatt lényegesen megnő az erő. A fennmaradó tekerceslt részekkel továbbra is elérhető a vezérlés, azonban egy magasabb erőtartományban. A rézgyűrűk mennyiségét és helyzetét különböző képen alkalmazhatjuk. Lehetőség van a tekercesek alá a horony feléig (sugarirányban) elhelyezni a gyűrűt illetve az egyik teljes fázis minden hornyában elhelyezni őket.



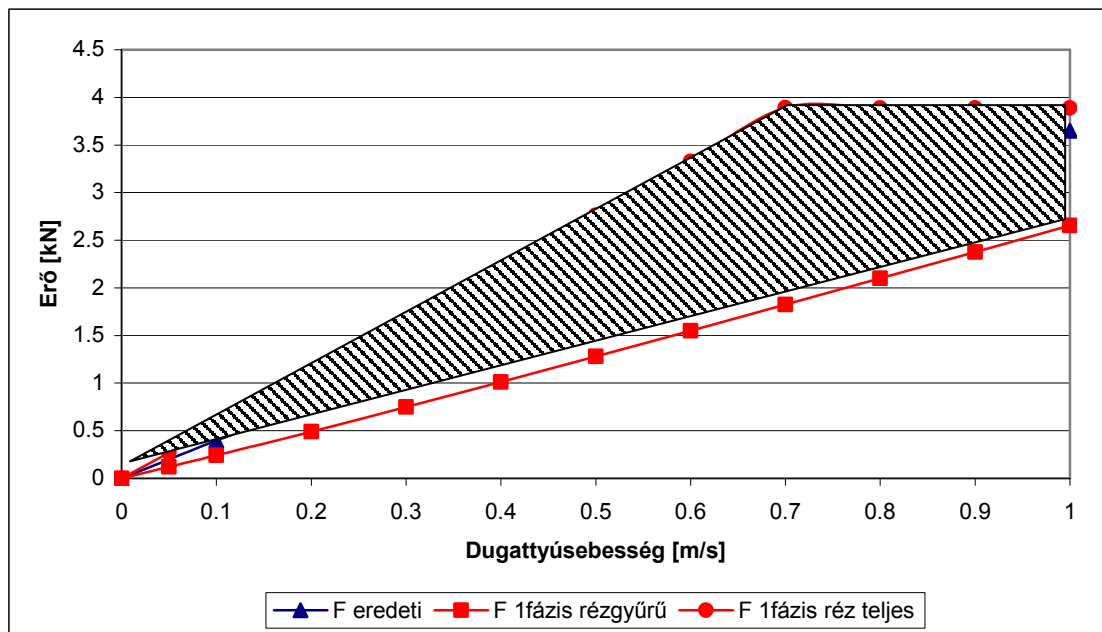
30. ábra: Rézgyűrű elhelyezési lehetőségek (a, hornyok alján; b, egyik fázisban)

5.7.5.1 Rézgyűrű a horonyban

Szimulációmban a teljes rézkitöltést modelleztem egy fázisban. Ebben az esetben a következő paramétereket kellett megváltoztatnom:

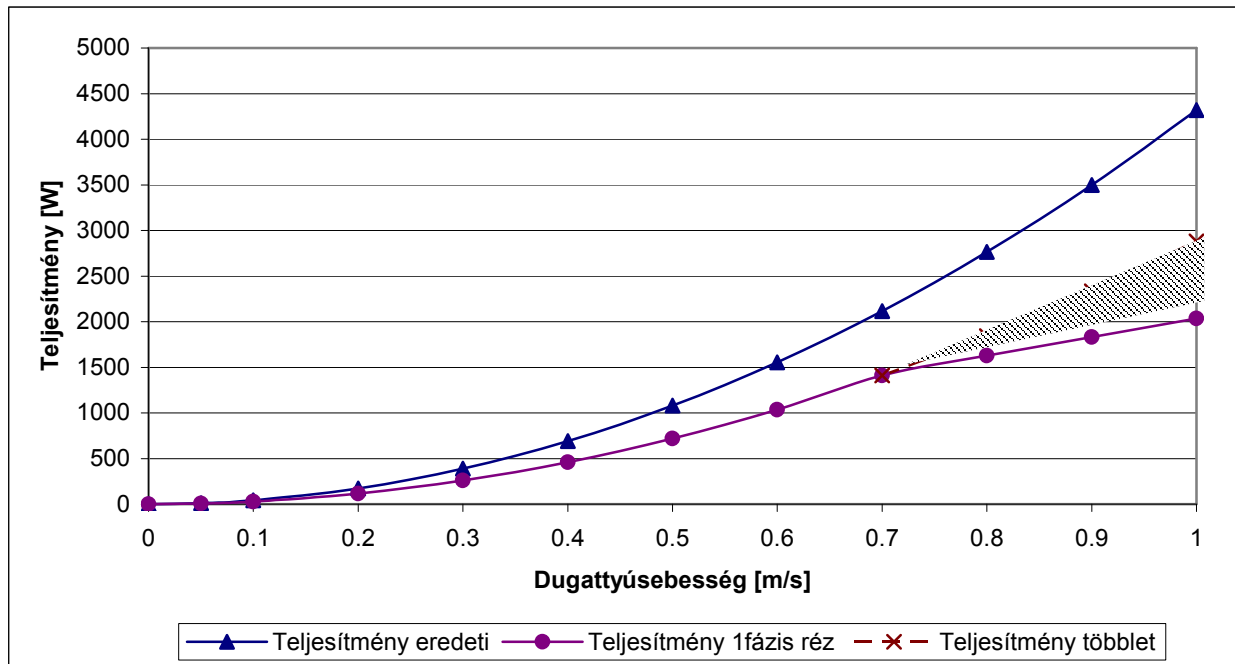
- A rézgyűrű fázisának ellenállása;
- A rézgyűrű ellenállásának meghatározása, hogy maximális (1 m/s) dugattyúsebességen, a másik két fázis szakadása esetén se mágneseződjenek le a mozgórész állandó mágnesei (armatúra reakció).

Rézgyűrűk alkalmazásakor is előtérbe kerül az állandó mágnesek maradólémágneseződése, amit az állórész áramok korlátozásával lehet biztosítani. Ebben az esetben a fékezőerő egy konstans értéket nem tud meghaladni (pl: 31. ábra 0.7 m/s-os dugattyúsebességnél az egy fázisban alkalmazott rézgyűrűk és a másik két fázis rövidzárásakor görbe). Ezen futtatások eredményeként a következő erő illetve teljesítmény értékeket kaptam.



31. ábra: Rézgyűrűk alkalmazása az egyik fázisban

A 31. ábrán a pontozott tartomány a vezérelhető térrész, hiszen ebben az esetben a rézgyűrűk által létrehozott erő nem szabályozható. Látható, hogy nagy erő értékeket kapunk, és a vezérelhetőség, szabályozhatóság is megmarad. Ennél a gépnél a kivethető teljesítmény lecsökken, hiszen csupán két fázisból kinyerhető teljesítmény áll rendelkezésre (32. ábra).

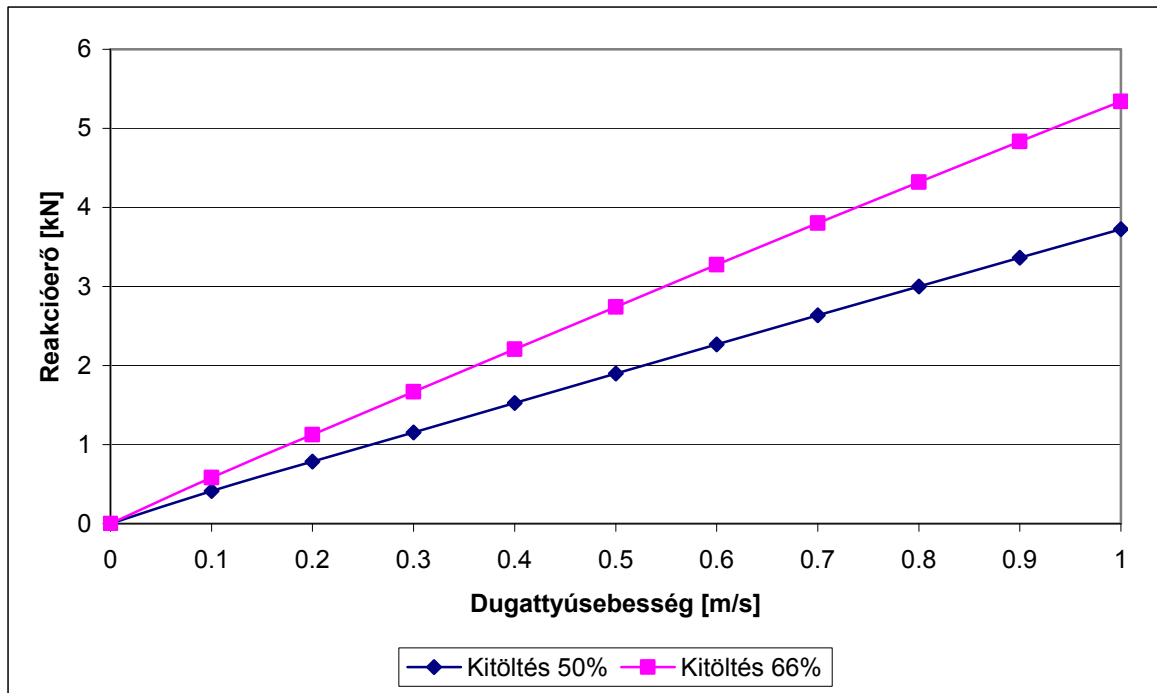


32. ábra: Rézgyűrűk alkalmazása az egyik fázisban – kivehető teljesítmény

A 32. ábrából leolvasható, hogy a kivehető teljesítmény csupán 2/3-a az eredeti teljesítménynek, azonban 0.7 m/s-os dugattyúsebesség felett a lemágneseződés miatt a 28. ábrán vonalkázással jelölt teljesítmény többletet feltétlenül el kell vezetni a csómotorról, hiszen ebben az esetben a 3 fázis együttes gerjesztése lemágnesezhetné a mozgórész mágneseit. [Zado7c]

5.7.5.2 Rézkitöltés növelése hornyonként

Amennyiben a rézkitöltést minden hornyban szeretnénk megvalósítani a huzal keresztmetszeti méretét kell optimálisan megválasztani. Jelenleg a hornyok 50%-ában van réz. Ha ezt az értéket növeljük, esetlegesen a menetszámot azonos értéken tartva, a tekercsek ellenállása lecsökken, hiszen így a huzalkeresztmetszet növekedni fog. Ha négyzet keresztmetszetű huzallal a kitöltést 100%-ra tudnánk növelni elméletileg, akkor kétszer nagyobb huzalkeresztmetszet miatt felére csökkenne az ellenállás. Ennek köszönhetően kétszer nagyobb rövidzárási áram indulhatna meg azonos indukált feszültségeken. A 33. ábra is ezt szemlélteti, melynél a kitöltést 50-ről 66 %-ra növeltem.



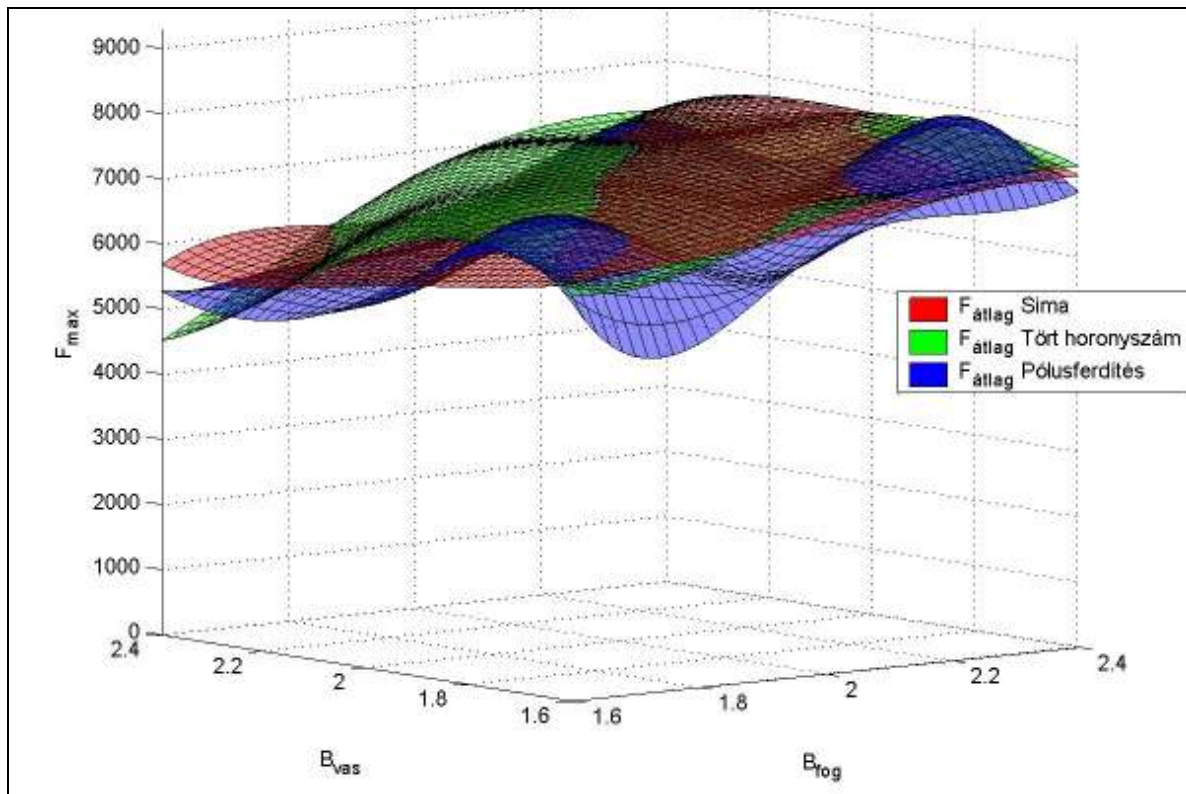
33. ábra: Rézkitöltés javítása huzalkeresztmetszettel

5.7.6 A fognyomaték csökkentése

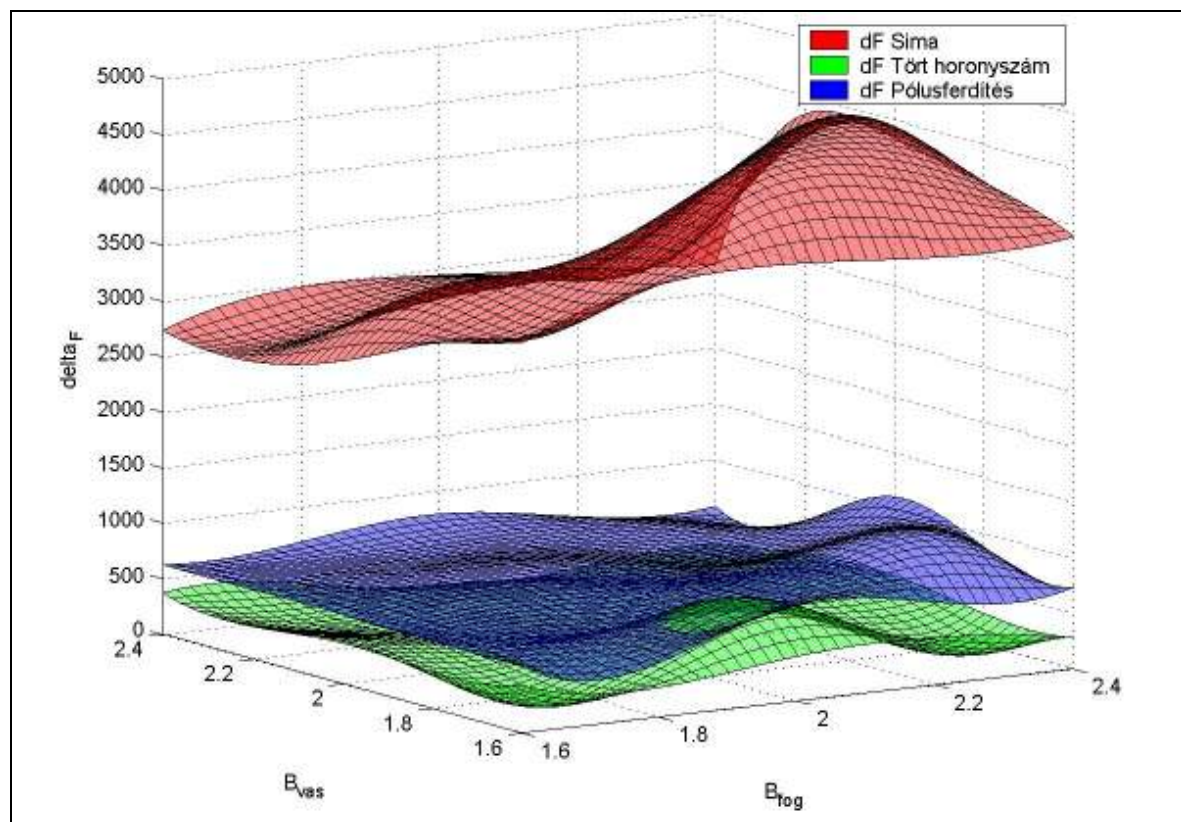
A lengéscsillapítók mindig együtt működnek (sorban vagy párhuzamosan) a rugóval, ezért a szerkezet esetleges fognyomatéka bizonyos mértékig csillapítva lesz. Ennek ellenére megvizsgáltam a forgógépeknél alkalmazott ilyen eljárásokat. A légmagos rendszerek fognyomatéka lényegesen kisebb, mint a lágyvasmagosaké, de kisebb teljesítményűek is. Éppen ezért vizsgálataimban a ferromágneses állandó mágneses szinkron csőgenerátorok fognyomaték csökkentő módszereit vizsgáltam. [Has01] A 34.-35. ábrán látható, hogy a tört horonyszám és a pólusferdítés lineáris motoroknál is működik.

Ezeknél a rendszereknél a tört horonyszám azt jelenti, hogy a horonyosztást (a horony és a fog szélességének összege) elosztjuk a mozgórész pólusszám harmadával (esetünkben 3 fázisú tekercselés), és ezzel az értékkel megnöveljük a hornyok, a fogak vagy az érték felével mindkettő szélességét.

A horonyferdítés, a mozgórész horonyosztás felével való megnövelését jelenti a mozgórész közepén, hogy a mozgórész pólusainak fele „fogak mellett”, másik fele „hornyok mellett” helyezkedjen el. Azonos méretek mellett az ezen technikákkal elérhető eredményeket a 34. – 35. ábrák szemléltetik.



34. ábra: Az erők átlagértéke különböző fognyomaték csökkentési eljárásokkal

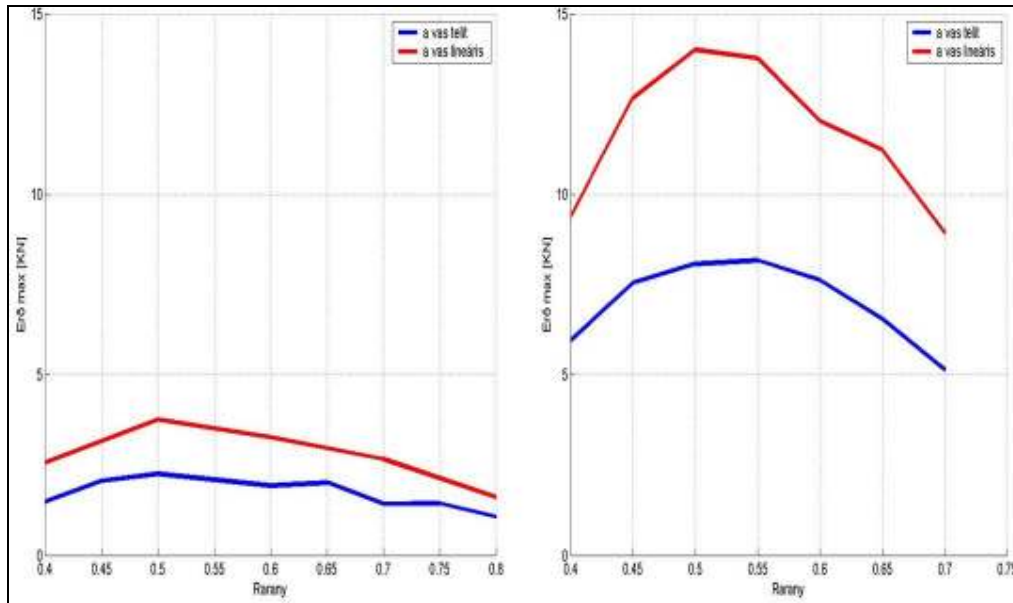


35. ábra: A fékezőerő lüktetése ($\Delta F = F_{max} - F_{min}$)

Az ábrákon látható, hogy a különböző eljárások nagyban csökkentik a fognyomatékot (pozíciófüggő erőlködés), de az erő átlagértéke nem változik lényegesen.

5.7.7 Sugár irányú optimalizálás

Modellezés szintjén, hogy a generátor fékezőereje miként változik a gép állórész és mozgórész sugárirányú méreteinek arányával (36. ábra).

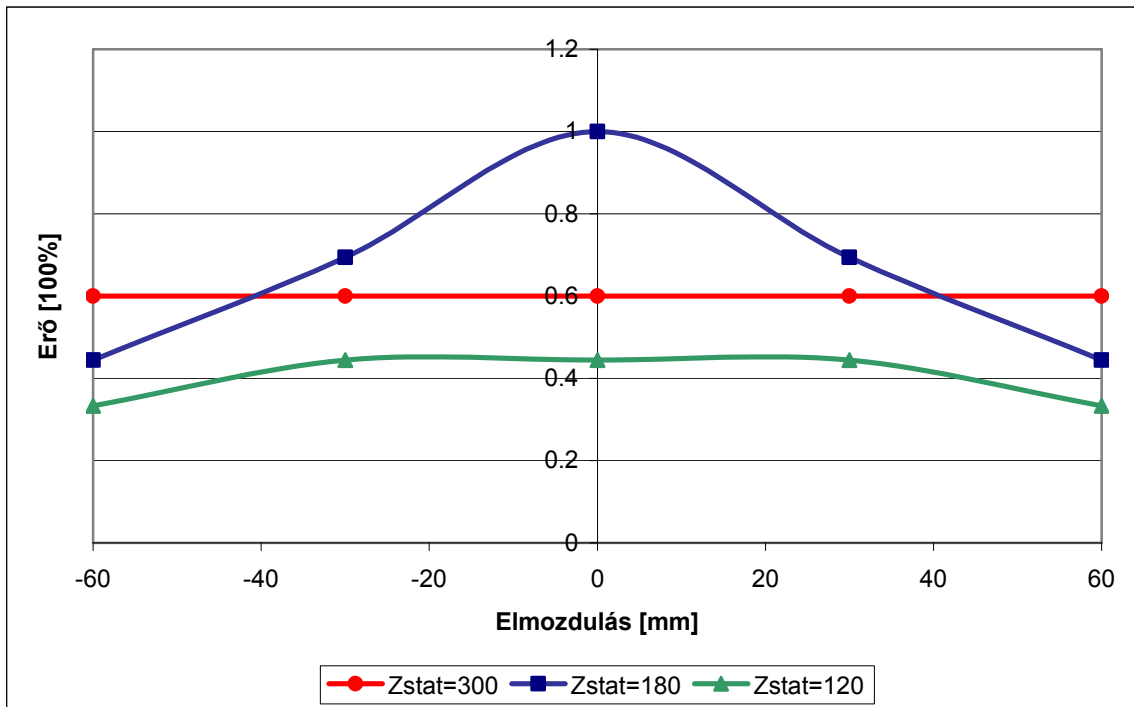


36. ábra: A gép sugárirányú mozgó- és állórész aránya a reakcióerőre

Az ábrákból látható, hogy az ábrázolt két elrendezésnél is (Mágnes gyűrűk és mágnes tárcsák alkalmazása), az arány minden esetben 50%-hoz közeli megosztásnál volt a legkedvezőbb, azaz a legmagasabb fékezőerőt ezen aránynál kaptam. A gép teljes átmérője tehát pontosan a kétszerese kell, hogy legyen a mozgórész átmérőjének, hogy a legnagyobb fékezőerőt kapjuk. [Zado8]

5.7.8 Hosszirányú optimalizálás

Már az első prototípus tervezésének fázisában felmerült a kérdés, hogy vajon milyen hosszú álló- és mozgórész az optimális. Az állórész tekercselésnél ugyanis csupán a mozgórész melletti tekercsekben indukálódik feszültség. Ha fázisba kötött rendszerről beszélünk, a feszültség által a rövidre zárt körben meginduló áram átfolyik a többi tekercsen is. Ezek a tekercsek, azonban csupán ellenállásként viselkednek, tehát csökkentik a fázisban folyó áramot, ami létrehozza a fékezőerőt. A lengéscsillapítónak +/- 60 mm elmozdulás szükséges, tehát a mozgórész hossza is (állórész maximum 300 mm) korlátozott. Ennek megfelelően készítettem el az állórész hosszának optimalizálását minden egyéb paraméter megtartása mellett. A 37. ábra különböző állórész hosszokhoz tartozó fékezőerőket ábrázol a dugattyú pozíciójának függvényében. Látható módon, ha a rotor hosszát 180 mm-re választom, hogy a 300 mm-be a 60 mm-es amplitúdó beleférjen, ebben az esetben kapom a legnagyobb fékező erőt.

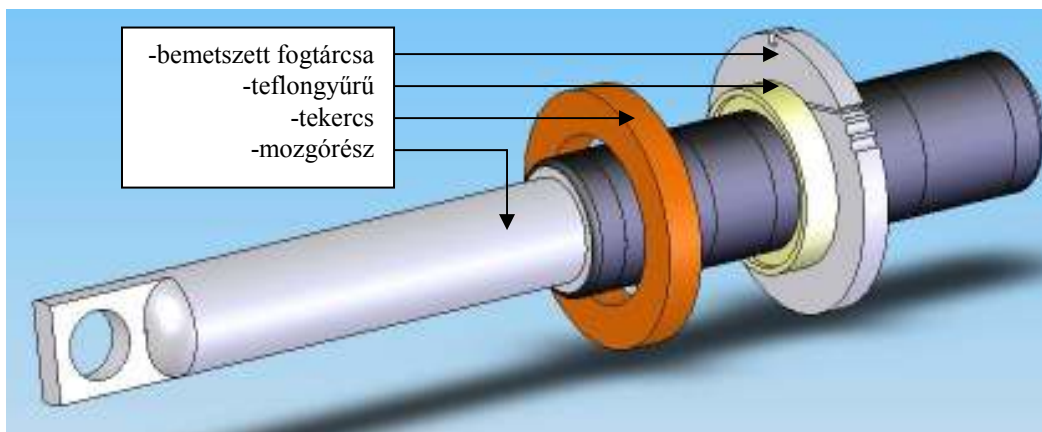


37. ábra: Állórész hosszának befolyása a fázisáramra

A 37. ábrán látható, hogy miként változik a fékezőerő az állórész hosszának változásával amennyiben 3 fázisú tekercselést alkalmazunk. Ha végig egyenes fékezőerőt szeretnénk kapni és a vezérlésnél is probléma, hogy a pozíciótól függően változik az erő, akkor 300 mm hosszú állórészt kell alkalmazni. Látható tehát hogy alkalmazás specifikus paraméter az állórész hosszának megadása. [Zado6], [Zado7b]

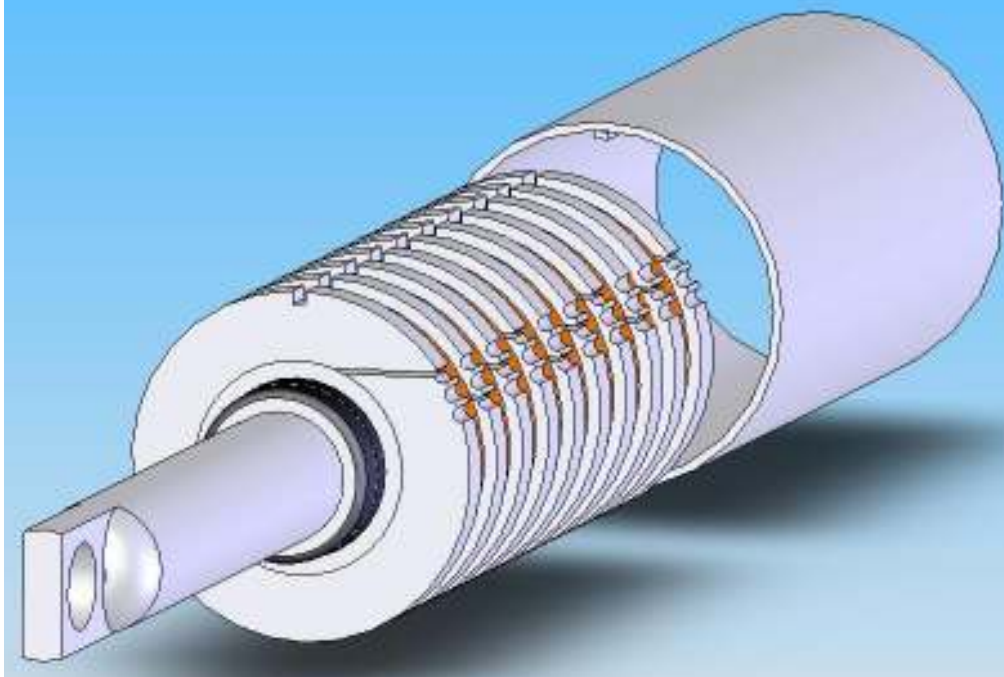
5.7.9 Megvezetés optimalizálása

A mérések után az optimalizálási munkámban főként a technológiai kivitelezhetőségére, és a kis légrést is elviselő megvezetésre összpontosítottam. Megvalósult a fázisok könnyű szerelhetősége és a hosszirányú optimalizált geometria beépítése is. A bemetszett fogtárcsák belső átmérőjénél foglalnak helyet a távtartó (légrés) teflon gyűrűk, amelyek a tekercsek belsejében helyezkednek el.



38. ábra: A mozgórész és az állórész kapcsolata

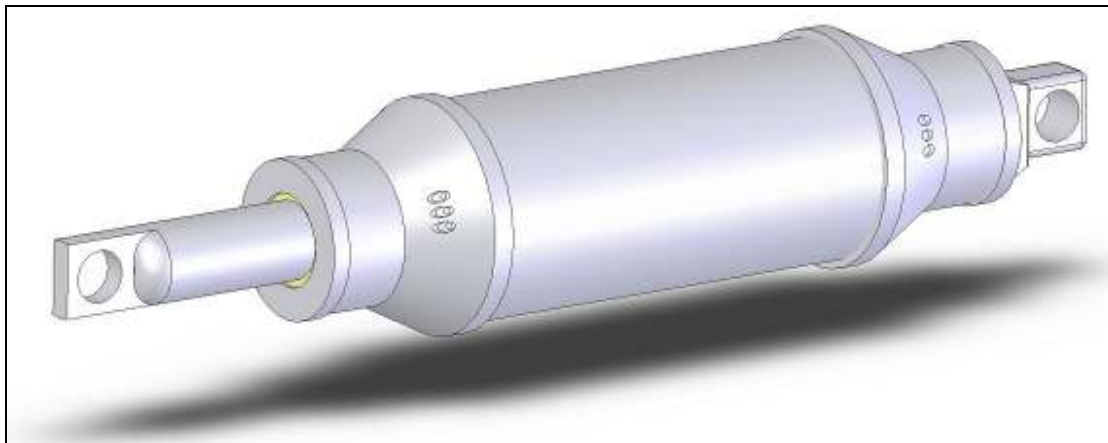
A 38. ábrán az látható, hogy a mozgórész kialakításakor nyers (nem nikkelezett) neodímium mágneseket és a lágyvas gyűrűket a felhelyezés után esztergálva munkáljuk azonos átmérőjűre. Ezután nikkelfürdőben kapja meg az egész egység az egységes síkfelületű nikkel, króm bevonatot. Az állórészen a tekercsek belsejében teflon gyűrűk helyezkednek el, amik illeszkednek a fogak fogfej kialakításához. Ezen gyűrűk nyúlnak be a légrésbe, és ezek vezetik meg a mozgórészt. A fogakon a bemetszés, a központosító horony és a 3 fázis elhelyezésére szolgáló horony is kialakításra került (39. ábra).



39. ábra: Állórész és a koszorú

Az állórészen minden harmadik fog azonos kialakítású, hiszen az azok melletti tekercsek tartoznak azonos fázishoz. Ennek megfelelően fut a három fázis az egymás mellett kialakított hornyokban, tengelyirányban.

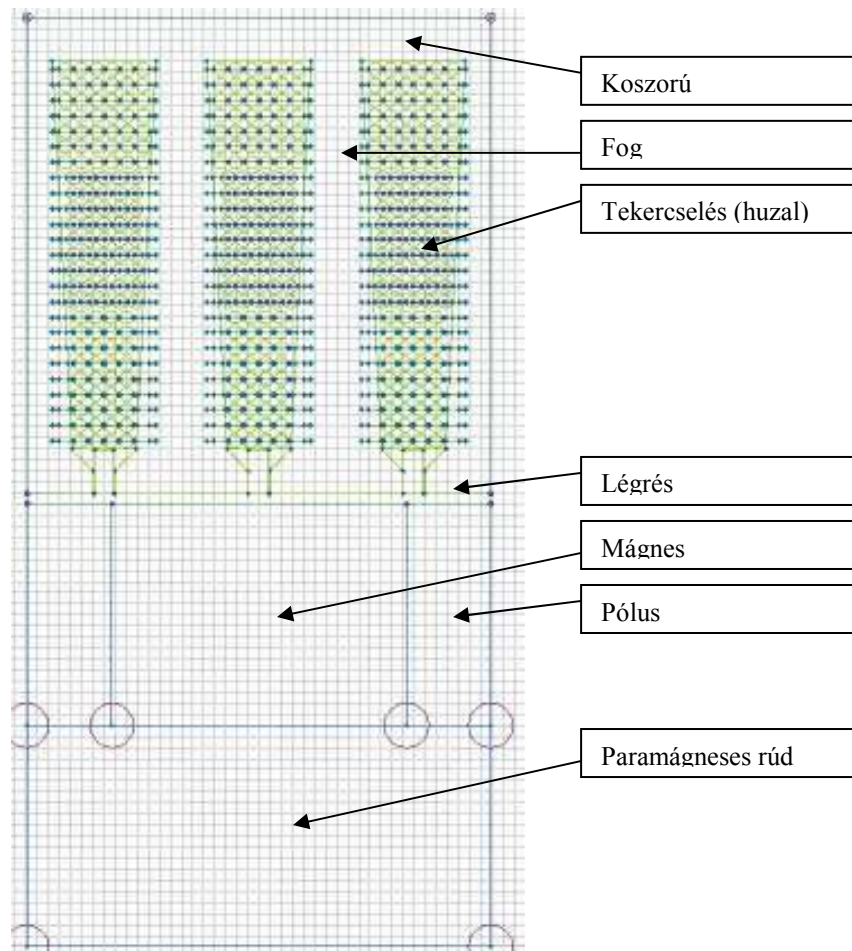
Ezen technológiával megoldott a mozgórész tökéletes megvezetése, és az állórészen elhelyezett fogak központosítása. Ha a hosszirányú optimalizálás eredményét is felhasználjuk, akkor a 40. ábrán látható „termék” kapjuk.



40. ábra: Elektromágneses lengéscsillapító

5.8 Melegedés számítás (analitikus és végeelemes)

A második prototípus megépítése előtt a kereskedelemben is kapható QuickField 5.2 végeelem számító program hő transziens moduljával szimulációkat végeztem a rendszer melegedésére. A hő bevitel legnagyobb részét a tekercsek ohmos ellenállásából adódó fűtés teszi ki, ezért a szimulációmban a mozgórész súrlódásából adódó melegedéstől eltekintettem. A szimulációban a 41. ábrán látható módon egy pólusosztásnyi egységet modelleztem, ahol az állórészen a háromfázisú tekercsek, a fogak vékonyítva, fogfej kialakítással, a mozgórészen pedig a mágnesek a légrés másik felén helyezkednek el.



41. ábra: A végeelem modell felépítése

A modellben a következő paramétereket használtam:

- $I_{\text{fázis_eff}} = 3 \text{ A}$
- $R_{\text{o_réz}} = 1.78 \cdot 10^{-8} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$
- $D_{\text{huzal}} = 0.6 \text{ mm}$
- $D_{\text{huzal+szig}} = 0.674 \text{ mm}$

Hőátadási tényezők:

- $\lambda_{\text{koszorú}} = 275 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ (Motor palástfelületén)

- $\epsilon_{\text{légrés}}=10 \text{ W/K}^*\text{m}^2$ (Átszellőztetés a mozgó dugattyú miatt)

Az anyagparamétereket az 2. táblázat tartalmazza:

Anyag	Hővezetés λ [W/Km]	Fajhő c [J/kgK]	Sűrűség ρ [kg/m ³]
Gyanta	0,25	100	700
Levegő	0,026	0	1,26
Mágnes	20	400	7500
Réz	385	385	8960
Vas	38	456	7860

2. táblázat: Anyagparaméterek melegedés számításához

A QuickField szoftver bemenő adataihoz, a melegedés számításához szükséges megadni a különböző veszteségeket, ezért a réz és vasvesztesség számítása szükséges.

5.8.1 Rézvesztesség

A tekercseken folyó áram következtében történő veszteséget a következő képlettel számoltam:

$$Q_{\text{réz}} = J^2 * \rho_{\text{réz}} \quad [27]$$

Ahol \mathbf{J} az áramsűrűség és $\rho_{\text{réz}}$ a réz fajlagos ellenállása, melyhez az értékeket a sebesség függvényében a 3. táblázat tartalmazza.

$\rho_{\text{réz}}$ [Ohm m]=	1.78E-08				
r_{vez} [m]=	0.0003				
A_{vez} [m ²]=	2.826E-07				
v [m/s]=	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
I_{vez} [A]=	1	2	3	4	5
I_{eff} [A]=	0.70710678	1.414214	2.121320344	2.828427125	3.53553391
J_{vez} [A/m ²]=	2502147.14	5004294	7506441.414	10008588.55	12510735.7
Q [W/m ³]=	111441	445765	1002971	1783059	2786029

3. táblázat: Rézvesztesség sebesség függő értékei

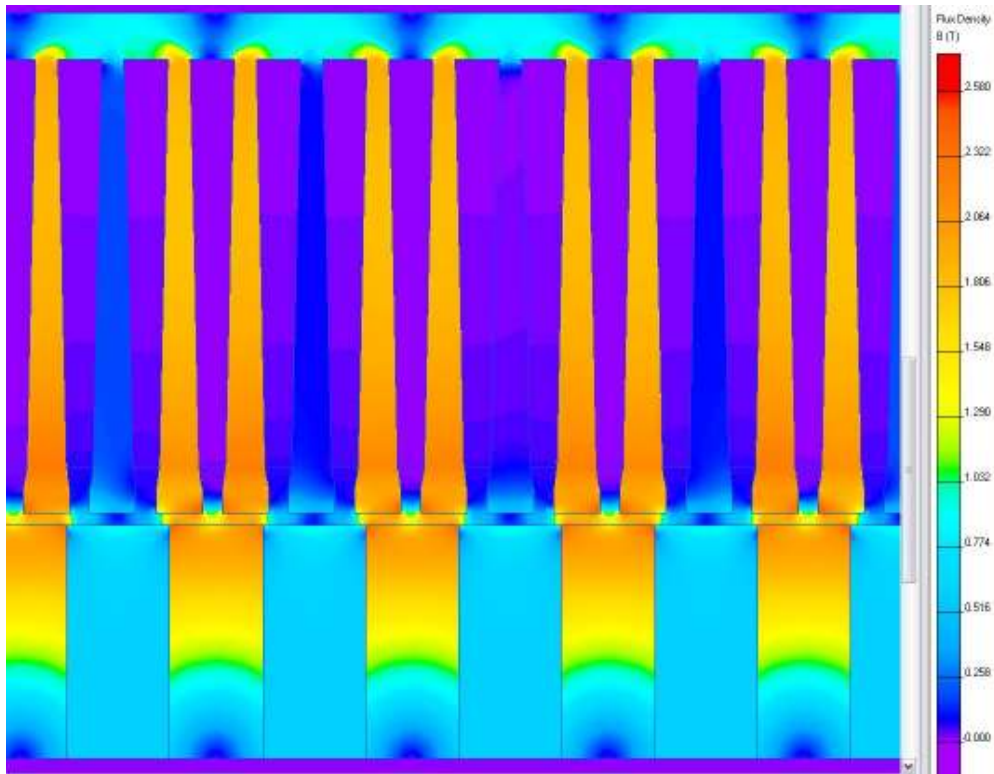
5.8.2 Vasvesztesség

A vasvesztesség a gép lágvas anyagaiban a lüktető tér következménye, ami a mágneses tér nagyságától illetve a lüktetés frekvenciájától függ. Az alkalmazott képlet a következő:

$$Q_{\text{vas}} = p_0 * \frac{B^2}{B_0^2} * \frac{f^{1.5}}{f_0^{1.5}} * \rho_{\text{Fe}} \quad [28]$$

Az általam alkalmazott lágvas anyag sűrűsége (σ_{Fe}) 7850 [kg/m³] veszteségi száma (p_0) 6.2 [W/kg] ($B_0=1 \text{ T}$; $f_0=50 \text{ Hz}$), ami abból következik, hogy nem lemezelt, hanem tömbi anyagból készült, és széles a mágnesezési görbéje. [Lis60]

A szerkezet indukció eloszlási képéből kapjuk meg a hiányzó indukció paramétereket, melyből számolhatóak a különböző veszteségek.



42. ábra: A szerkezet mágneses indukció képe

Látható a 42. ábrán, hogy sugár irányban a fogfejben és a fogban is egyaránt konstans értékű az indukció, mivel a fogvékonyítást alkalmaztam. Ennek köszönhetően a számításhoz szükséges értékek, melyek alapján a melegedés szimulálható, a következő képen alakulnak (4. – 5. táblázat):

Po [W/kg]=	6.2				
Bo [T] =	1				
f0 [Hz] =	50				
σ_{Fe} [kg/m ³] =	7860				
Tau_p [m] =	0.0211				
B fog [T] =	2				
B koszorú [T] =	0.5				
V [m/s] =	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
f fog [Hz] =	4.7	9.5	14.2	19.0	23.7
f koszorú [Hz] =	4.7	9.5	14.2	19.0	23.7
Q_fog [W/m ³] =	5688.47086	16089.43	29558.16162	45507.76685	63599.0376
Q_koszorú [W/m ³] =	355.529429	1005.589	1847.385101	2844.235428	3974.93985

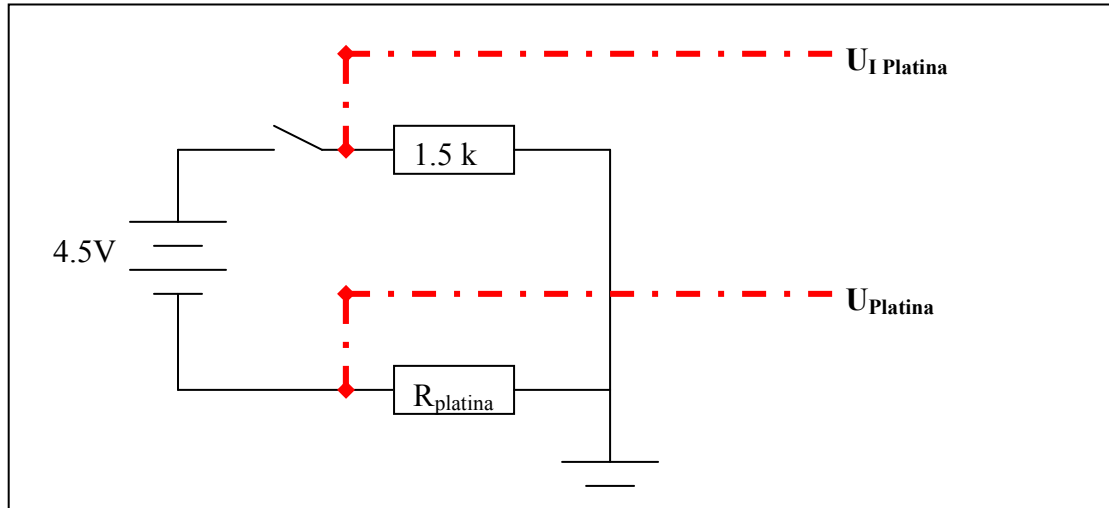
4. táblázat: Vasveszteség számítás értékei (v=0.1 – 0.5)

V [m/s] =	0.6	0.7	0.8	0.9	1
f fog [Hz] =	28.436019	33.17536	37.91469194	42.65402844	47.3933649
f koszorú [Hz] =	28.436019	33.17536	37.91469194	42.65402844	47.3933649
Q_fog [W/m ³] =	83603.1061	105352	128715.4021	153588.7131	179885.243
Q_koszorú [W/m ³] =	5225.19413	6584.497	8044.712634	9599.29457	11242.8277

5. táblázat: Vasveszteség számítás értékei (v=0.6 – 1)

5.8.3 Prototípus melegedés mérése (validáció)

A második prototípus egyik állórész tekercsére elhelyezésre került egy platina ellenállás (hőmérő) a tekercselés alsó 1/3 részére, ahol a számítások alapján leginkább fog melegedni a rendszer. A platina hőmérő ellenállás változásának méréséhez a következő mérő áramkört készítettem (43. ábra):



43. ábra: Pt 100 mérési áramkör

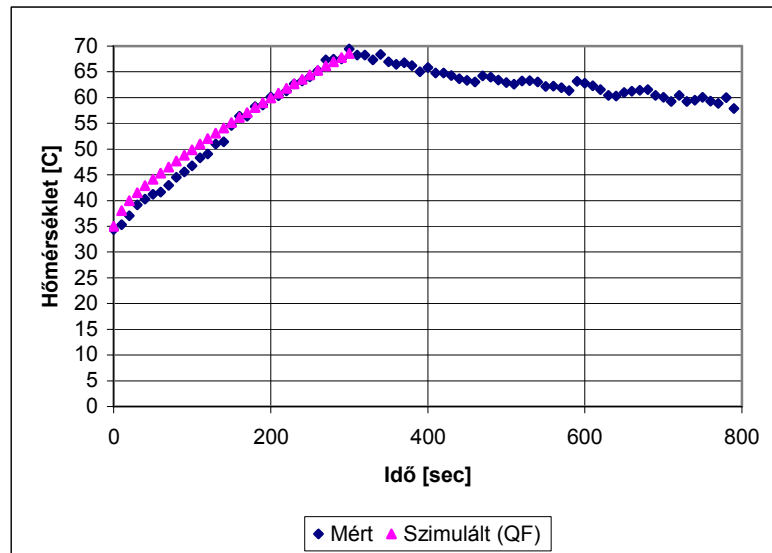
A mért feszültségekből a következő egyenletekkel kapjuk meg a platina hőmérő ellenállás értékét:

$$I_{Pt} = U_{IPt} / 1,5 \cdot 10^3 \quad [29]$$

$$R_{Pt} = U_{Pt} / I_{Pt} \quad [30]$$

Ahol U_{IPt} az 1,5 kOhm-os ellenálláson eső feszültség, I_{Pt} a körben folyó áram, U_{Pt} a platina ellenálláson eső feszültség és R_{Pt} a platina hőmérő ellenállása.

A mérés során a fázisokat rövidre zárva 5 percig 0,5 m/s dugattyúsebességnél majd álló helyzetben (visszahúlás) mértem az adott tekercs hőmérsékletét. Az eredmény a szimulált értékekkel együtt a 44. ábrán látható.

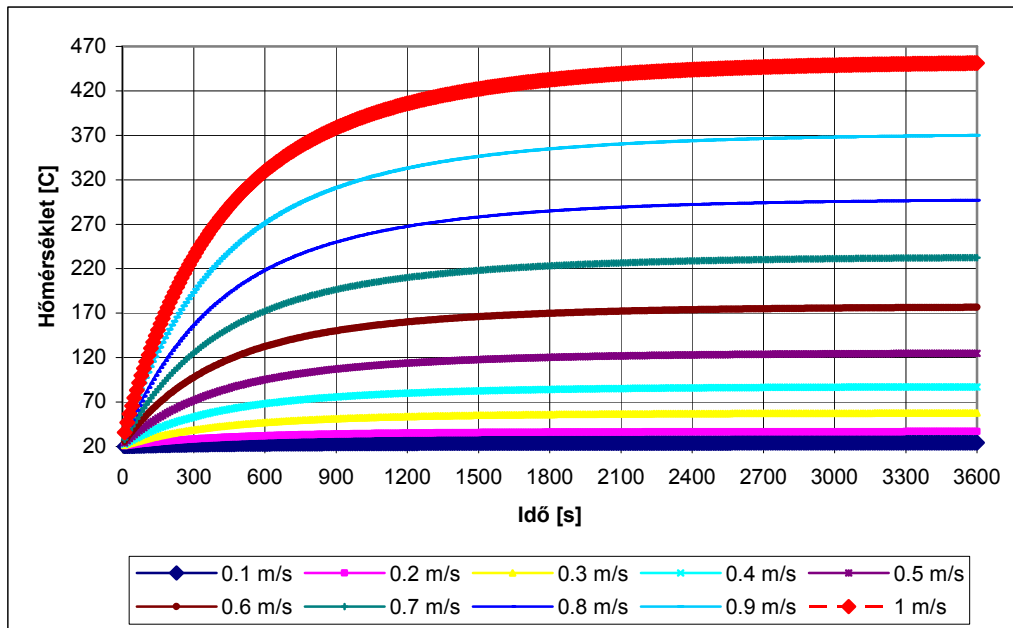


44. ábra: Melegedés mért és szimulált értékei

A szimulációkor használt paraméterek megfelelőek voltak, hiszen az eredmények összevágának, így alkalmazható a modell, a hőterhelések, üzemidők meghatározására.

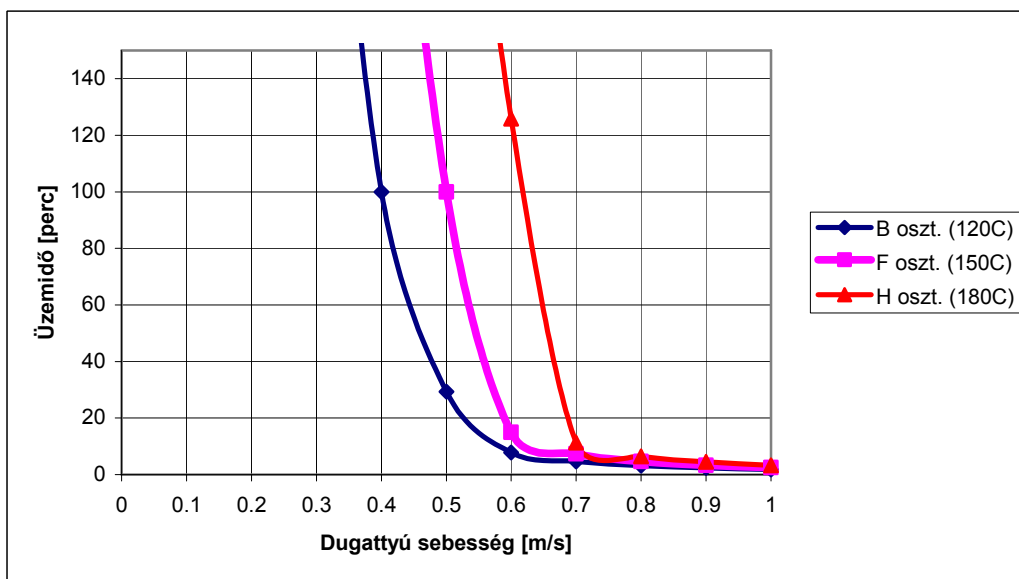
5.8.4 Melegedés

A modell validációja után szimulációkat készítettem különböző lengéscsillapító dugattyúsebességeken, hogy meghatározzam a megengedhető maximális üzemidőket. A melegedés a réz és a vasvesztéséből adódott össze, amelyek hőterhelési jelentőségét a QuickField nevű programmal szimuláltam. A korábbiakban látható volt, hogy a vasvesztés 0.5 m/s-os dugattyúsebesség alatt, ahol kicsi a frekvencia, elhanyagolható, ezért ezt csupán 0.6 m/s feletti sebességen vettem figyelembe. A különböző időtartamú üzemekben jelentkező melegedést a 45. ábra mutatja be. Az alkalmazott mágnesek szempontjából a 120 °C a kritikus hőmérsékleti határ, melyen a mágnesek jellemzői már komolyan változhatnak akár maradandóan is.



45. ábra: Melegedés mértéke különböző dugattyúsebességeken

A 45. ábra alapján tehát szemléltethető a különböző dugattyúsebességeken megengedhető üzemidő. A kritériumot csupán az állórészen elhelyezett vezeték szigetelési osztálya (B, F, H) illetve az állandó mágnesek Curie pontja szabja meg.

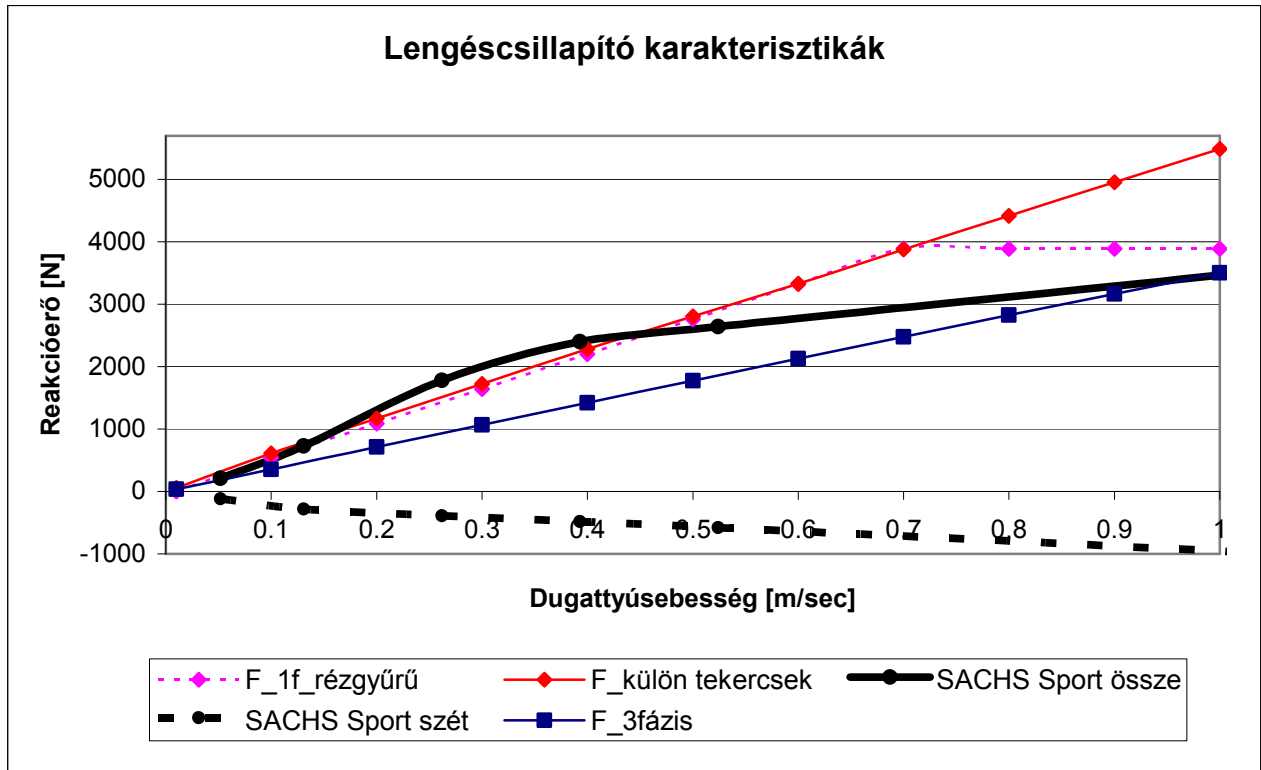


46. ábra: Megengedett üzemidők alakulása különböző hő-osztályú szigetelések alkalmazásakor

A 46. ábrán látható, hogy 0.5 m/s-os dugattyúsebességig nincs szükség szabályozásra, hiszen ezen sebességeken a rendszer csupán huzamosabb (30 perc) terhelésnél melegszik veszélyes mértékben (120 °C).

5.9 Eredmények

Az elmondottak alapján elkészült a koncepcionális terve egy olyan állandó mágneses szinkron cső motor/generátornak, melynek állórészének teljes hossza 300 mm hasznos (tekercselt) hossza 180 mm, mozgórészének átmérője 40 mm, és állandó mágneses neodímium gyűrűk helyezkednek el rajta. Az egység alkalmas személygépjárművek futóművében a lengéscsillapító funkció betöltésére mind aktív mind fél-aktív módon. Szabályozható csillapító erejének maximumát a 47. ábra mutatja.



47. ábra: Megvalósítható csillapító erő-karakterisztika (F_1f_rézyűrű: 1 fázisban rézyűrű alkalmazása; F_külön tekercsek: külön rövidre zárt tekercselés; SACHS: hagyományos legkeményebb lengéscsillapító karakterisztikák; F_3fázis: fázisban rövidre zárt tekercselés)

Látható, hogy a rendszer 3 fázisú és külön vezérelt tekercsrendszerrel eltérő reakcióerőt produkál. Ez annak köszönhető, hogy a fázisokban nem aktív (olyan tekercs, amelyben nem indukálódik feszültség) tekercsek is vannak kapcsolva. A lengéscsillapítók jelenlegi, rendelkezésre álló geometriájával megvalósítható maximális reakció-erő csupán külön vezérelve felel meg a hagyományos lengéscsillapítók karakterisztikájának, vagy ha az egyik fázisban rézyűrűket használunk.

5.10 Összefoglalás

Ebben a fejezetben tájékoztatást adtam a villamos gépek nagy vonalakban áttekintett felépítéséről és működési elvéről, azon belül is az állandó mágneses

szinkron cső generátorokról részletesebben. Bemutattam a gépekben használt anyagok jellemzőit, és működésükhöz szükséges fontos paramétereket. Bemutattam az általam készített modelleket a gép tervezéséhez, optimalizálásához. Ismertettem az első prototípus készítését majd az azt követő mérést, amely validálta a modelleket. Optimalizálások eredményeinek sora után megvalósult a második prototípus, melynek mérésekor a melegedéssel, mint fontos paraméterrel külön foglalkoztam. A végső optimalizálást követően, amely már gyártási szempontokat is figyelembe vesz, ismertettem az ilyen eszközzel elérhető maximális csillapító erőkarakterisztikát és teljesítményt.

5.11 Új tudományos eredmények az állandómágneses lengéscsillapító témakörében

1. tézis

Mérésekkel alátámasztott modellekkel igazoltam, hogy azonos befoglaló méretű, konstrukciós kialakítású és azonos légrés indukciójú szinkron csőmotor/generátorral az elérhető maximális teljesítményt akkor kapjuk, ha a mozgórészen elhelyezett, egymással szembe fordított állandó mágnesek a maximális energiáiszorzatú munkaponton üzemelnek.

A mágnesek munkapontját a körülötte elhelyezkedő mágnes-kör ellenállása szabja meg. Vizsgálataimban kitértem a munkapont reakcióerőre gyakorolt hatásának elemzésére. Összehasonlításom alapja az azonos térfogatból elérhető fékezőerő volt. Mivel kontra-polár elrendezésű mágnes-rendszert alkalmaztam a mozgórészen, belátható, hogy a mágnes munkapontjából következő felületi indukcióértéktől és a mágnesek között elhelyezkedő lágyvas korong vagy gyűrű (pólus) méreteitől függ a pólusfluxus. Figyelembe véve az alkalmazott lágyvasak B-H görbéjét, a kötött méretű mozgórészen elhelyezhető pólusok mennyiségét, az állórészen elhelyezett tekercsek és fogak méreteit, számos összefüggés figyelhető meg. Ezen összefüggéseket vizsgáltam, és a reakcióerő szempontjából optimalizáltam is. Az összefüggések modellezésekor prototípuson végzett mérésekkel igazoltam a szimulációk helyességét. Fontos szempont a mágnesek (NdBFe) összes térfogata is az ár szempontjából, hiszen a szerkezetnek ez a legjelentősebb anyagi erőforrást igénylő eleme.

Publikációk

Zádor István– Dr. Vajda István, „Állandó mágneses illetve szupravezetős fél-aktív lengéscsillapító tervezési lépései”, *Tavaszi Szél konferenciakiadvány, 147-152 old., Budapest, 2007*

2. tézis:

Matematikai összefüggést állítottam fel az állandó mágneses csőmotorok generátoros üzemben kialakuló fékezőereje és geometriai illetve aktív-anyag paraméterei között, a lengéscsillapítókénti alkalmazhatóság lehetőségeinek feltárására. Az általam felállított matematikai modellel végzett számítások alapján bebizonyítottam és kísérleti prototípuson végzett mérésekkel támasztottam alá, hogy a személygépjárműben lengéscsillapítóként alkalmazott hornyolt, 3 fázisú N35 típusú állandó mágneses csőmotorral, melynek maximális befoglaló méretei 80 mm átmérő és 300 mm hossz, amplitúdója +/- 60 mm, optimalizálások eredményeként az elérhető maximális fékezőerőt generátoros üzemben az ehhez a tézishoz tartozó altézisekben részletezett esetekben kapjuk.

Először analitikus modellt készítettem a mágneskör-modell segítségével. A modell bemenő paraméterei az elrendezés (gyűrű, tárcsa, vagy sugárirányban mágnesezett mágnesek), befoglaló méretek, alkalmazott légrés, mozgó- és állórész

sugárirányú megosztása, fázisszám, a lágyvas anyagminősége (B-H görbe) és az állandó mágnes választott munkapontja. Utóbbi az alkalmazott mágnes szobahőmérsékleten ismert karakterisztikájából meghatározott maximális energiasűrűségű pont, neodímium mágnes esetén 0.6 T. Analitikus számításaimat a QuickField (FEM) programmal ellenőriztem. A modell eredményül a gép olyan geometriai méreteit adja meg, amelynél az állandó mágnesek az előre definiált munkapontban működnek és a lágyvas anyagok még éppen nem mennek telítődésbe. Az analitikus számításból megkapott geometriát felhasználva, MatLab 6.5 program alkalmazásával véges elemes (FEM) modellt készítettem. A modell célja az volt, hogy egy adott sebességen mozgó dugattyúra ható reakcióerőt kiszámolja, és így lehetővé tegye a különböző geometriák összehasonlítását. Az optimalizáláshoz meg kellett adni a lágyvas anyag jellemzőit (B-H görbe), a csőmotor felépítését (gyűrű vagy tárcsa mágnesek), az állórész tekercsek rövidzárását (fázisban, vagy külön), fognyomaték csökkentő metódust (pólusferdítés, horonyferdítés), horonyzáró ék anyagát, mozgórész sebességét (lengéscsillapítóknál maximum 1 m/s) és a csőmotor hosszirányú maximális méreteit (mozgó és állórész). A modell statikus diszkrét állapotok sorozatából (mozgó rész elmozdítása) számol dinamikusan létrejövő hatásokat. Eredményül megkapjuk több más paraméter mellett az állórészben folyó rövidzárási áramokat, üresjárású indukált feszültségeket, induktivitásokat és a szerkezet indukció eloszlását. Ezen értékekből a Maxwell Stress Tenzor segítségével számolható a mozgó részre ható fékező erő.

2.1:

A 2. tézis alapján a maximális fékezőerőt akkor kapjuk, ha állórészének a hossza megegyezik a mozgórész hosszával, a fázisellenállás és az indukált feszültség által eredményezett rövidzárási áram és a kapcsolódó pólusok felülete miatt.

Publikációk:

Istvan Zador – Daniel Horvath – Dr. Istvan Vajda, „PM Tube machine designed for a controlled vehicle shock-absorber suited for energy recuperative operation”, XVIIth International Conference on Electrical Machines Conference (CD) Chania, 2006.

Istvan Zador – Dr. Istvan Vajda, „Development of a permanent magnetic semi-active shock-absorber”, International Review of Electrical Engineering, Vol. 2 N. 4, pp. 579-586, Italy, July-August 2007

Már az első prototípus tervezésének fázisában felmerült a kérdés, hogy vajon milyen hosszú álló- és mozgórész lesz optimális. Az állórész tekercselésnél ugyanis vannak olyan a mozgórész pólusaitól távol eső tekercsek, melyek az indukált feszültség képzésben nem vesznek részt. Ezek a tekercsek a fázisok rövidzárási áramát, tehát a létrehozott fékezőerőt is csökkentik. A lengéscsillapítónak +/- 6 cm elmozdulás szükséges, tehát a mozgórész hossza is (állórész maximum 300 mm) korlátozott. Ennek megfelelően készítettem el az állórész hosszának optimalizálását, ha a rotor hosszát 180 mm-re választom, hogy a 300 mm-be a 60 mm-es amplitúdó beleférjen.

2.2

A 2. tézis alapján és a szimulációk eredményeit figyelembe véve, akkor kapjuk a maximális fékezőerőt, ha a gép mozgórészének átmérője fele a teljes motor átmérőjének.

Publikációk:

Istvan Zador - Daniel Horvath - Dr Istvan Vajda „PM synchronous tube machine optimization for vehicle shock-absorber”, 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation Conference Proceeding (CD), Athen, Greece, 2008.May.

Megvizsgáltam, hogy a generátor fékezőereje miként változik a gép állórész és mozgórész sugárirányú méreteinek arányával adott maximális méret mellett. A szimulációs eredményekből látható, hogy bármilyen elrendezést is vizsgáltam, az arány minden esetben 50%-hoz közeli megosztásnál volt a legkedvezőbb, azaz a legnagyobb fékezőerőt ezen aránynál kaptam.

2.3

A csőgenerátorok fékező ereje gyártástechnológiai többletköltségek árán 40%-al növelhető, ha a geometriai paramétereket megtartva csupán az állórészen kialakított fogak hosszirányú méreteit (eddig párhuzamos lapú gyűrű) sugárirányban kifelé folyamatosan csökkentjük olyan mértékben, hogy a fogakban az indukció értéke sugárirányban kifelé mindenhol azonos értékű legyen.

Publikációk:

Istvan Zador –Dr. Istvan Vajda, „Development of a permanent magnetic semi-active shock-absorber”, International Review of Electrical Engineering, Vol. 2 N. 4, pp. 579-586, Italy, July-August 2007

Istvan Zador – Bence Falvy – László Dr. Palkovics, „Electro-mechanical suspension actuator with energy recuperative feature”, World Automotive Congress (CD), Yokohama, 2006.

A gép teljesítményének szempontjából fontos, hogy az állórész hornyokat minél jobban kitöltsék a rézvezetők, illetve, hogy minél nagyobb térfogatúak legyenek. Az állórészen elhelyezhető tekercs térfogatát növelhetjük, ha a fogak vastagságát az állórészen sugárirányban kifelé csökkentjük úgy, hogy a fogak metszterülete ne változzon. Mivel a lengéscsillapítónk hengeres, a fogakban az indukció értéke konstans értéken fog maradni a teljes hosszon, ha a szórást is figyelembe vesszük. Ebben az esetben tehát a hornyok térfogata megnő, így növelhető bennük az elhelyezhető tekercstérfogat, ami teljesítménynövekedést eredményez.

2.4

Az általam alkalmazott csőgenerátor geometriai paramétereit megtartva és az egyik fázist tömör rézgyűrűk alkalmazásával rövidre zárva (az armatúra visszahatás figyelembevételével), a fékezőerő ~50 %-kal növelhető.

Publikációk:

Istvan Zador - Thomas Naber, „Elektromagnetische Komponente für Federung und Dämpfung im Fahrzeug”, Fahrwerk vertikaldynamik (CD), Deutschland, 2007.

Közismert hogy a gép teljesítménye növelhető, ha a hornyokban növeljük a réz kitöltést. Ennek megfelelően ha a fékezőerő még mindig nem elegendő, akkor lengéscsillapító specifikus megoldás lehet a tömör rézgyűrűk alkalmazása. Ebben az esetben a rézgyűrűk egy konstans dugattyúsebességtől függő értékkel megnövelik a csillapítóerőt, a közel 100%-os rézkitöltés miatt. Ebben az esetben azonban a konstrukciós kialakításkor figyelembe kell venni az állandó mágnesek irreverzibilis lemágneseződését. A rézgyűrűk mennyiségét és helyzetét különböző képen alkalmazhatjuk a gép építéskor. Lehetőség van többrétegű tekercselést alkalmazva az egyik réteget rézgyűrűkkel megvalósítani, vagy az egyik fázishoz tartozó minden tekercsét rézgyűrűre cserélni. A szerkezettel így nagyobb reakcióerő érhető el, azonban a tekercsek mennyiségének csökkenése miatt a vezérelhető tartomány lecsökken.

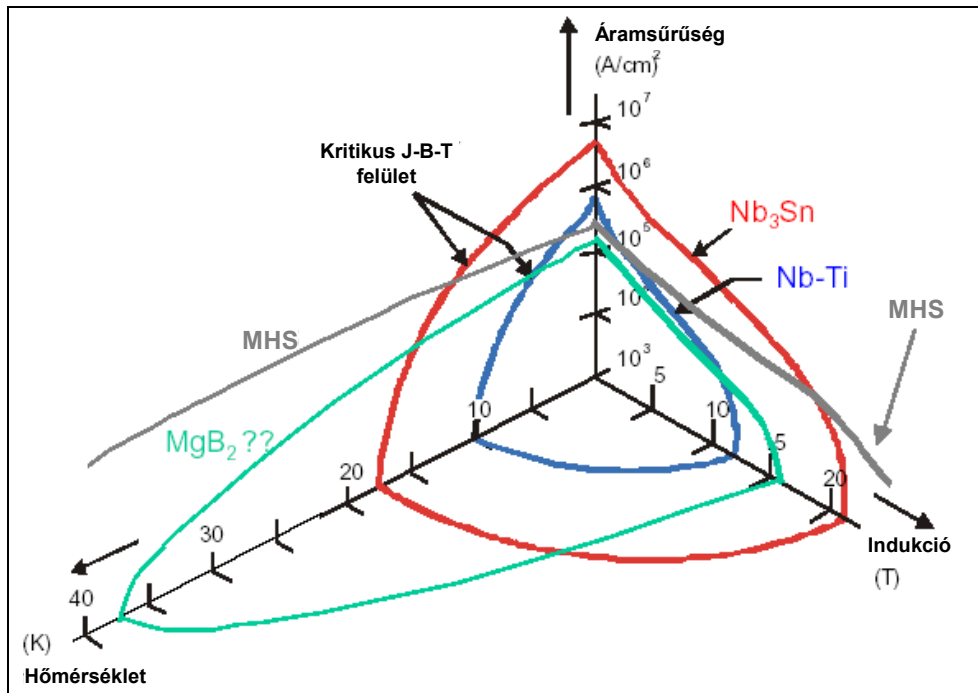
6 IRODALMI ÁTTEKINTÉS – MAGAS HŐMÉRSÉKLETŰ SZUPRAVEZETŐK (MHS)

6.1 Magas hőmérsékletű szupravezetők (MHS)

A magas hőmérsékletű szupravezető anyagok olyan porkohászati úton készült kerámiák, melyek átmeneti hőmérséklete megközelítőleg a folyékony nitrogén forráspontja, azaz 77 K felett van. Ezen hőmérséklet alatt az anyag képes a felmágnesezése utáni teret megtartani, és az állandó mágneshez hasonlóan viselkedni. A szupravezetés jelenségét H. K. Onnes az alacsony hőmérsékletű anyagok villamos vezető tulajdonságának vizsgálatakor fedezte fel. Azt tapasztalta, hogy a higany ellenállása, az úgynevezett kritikus hőmérsékleten (T_c), a mérés érzékenységi küszöb alá csökkent. Lényeges áttörés az ittrium-alapú szupravezetők felfedezésével 1987 januárjában következett be. Ezzel megjelentek azok a szupravezető anyagok, melyeknek átmeneti kritikus hőmérséklete a nitrogén forráspontja (77,36 K) felett volt. A gyakorlatban alkalmazott MHS anyagok kritikus hőmérséklete tipikusan 90-110 K. Az MHS anyagok általában réz-oxid (CuO) vegyületek pl. $YBa_2Cu_3O_7$ ($T_c=92..93$ K), $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ ($T_c=115$ K), $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ ($T_c=125$ K), II. típusú szupravezetőkhez sorolhatóak. Az erősáramú alkalmazások szempontjából legkedvezőbb anyagok az ittrium- és bizmut-alapú szupravezetők, kémiai összetételüket tekintve $Y_1Ba_2Cu_3O_7$, illetve a $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_8$ és $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$. Előbbi rövid megjelölése YBCO vagy 123, utóbbié BISCO vagy Bi2223 illetve Bi2212. Az említett MHS anyagok olyan kerámiák, melyek a következő néhány fontos tulajdonsággal jellemezhetőek:

- kemények, ridegek, nehezen megmunkálhatóak;
- rosszul kontaktálhatóak;
- szupravezetési állapotban egyenáramú szempontból veszteségmentes vezetők;
- normál állapotban a vezetési tulajdonságaik rosszak (szigetelőknek tekinthetőek).

A korábban említettek szerint tehát a szupravezető anyagok tulajdonságainak leírásakor a kritikus hőmérsékleten kívül még két kritikus paraméter játszik fontos szerepet: a kritikus áramsűrűség (J_c , néha szokásos még a J_c -hez tartozó kritikus áram I_c használata is) és a kritikus indukció (B_c II. típusú szupravezető esetén alsó kritikus indukció B_{c1} és felső kritikus indukció B_{c2}). A kritikus áramsűrűség és indukció függ (csökken) a hőmérséklettől, a kritikus áramsűrűség ezenkívül erősen függ (a gyakorlati MHS anyagok esetén csökken) a külső mágneses tértől is. A szupravezetési állapot csak abban az esetben marad fenn, ha mindhárom paraméter értéke egyidejűleg kisebb, mint a kritikus értékek. Az 48. ábra néhány szupravezető anyagra jellemző T_c - B_c - J_c kritikus paraméterek által kifizített felületét mutatja, melyen belül a szupravezető anyag szupravezetési állapotban van, míg a felületen kívül normálvezetési állapot jellemzi az anyagot (pl.: az MHS huzalok kritikus (DC) áramsűrűsége 500 A/mm², míg kritikus indukciója (B_{c2}) 100 T nagyságrendet is elérhet). [See98]



48. ábra: A szupravezetők jellegzetes határfelületei

Az MHS anyagok csak akkor tekinthetők ideális vezetőknek, ha a külső mágneses tér, illetve a szupravezetőben folyó áram időben állandó. Az időben változó tér vagy áram hiszterézis veszteséget okoz a szupravezetőben. A hiszterézis veszteség keletkezésének oka, hogy a külső mágneses tér váltakozásával változik a szupravezető mágnesezettsége, emiatt az átmágnesezéshez munkát kell végezni. Számítások alapján bebizonyítható, hogy a szupravezetőben fellépő veszteségi teljesítmény arányos a frekvenciával, illetve az áram amplitúdójával és függvénye az indukciónak. Így a szupravezető nemlineáris ohmos ellenállásként képezhető le.

A magasabb hőmérséklet áttörést jelentett az alkalmazási lehetőségek terén is, ezáltal hűtése lényegesen olcsóbbá és egyszerűbbé válhatott. Ennek köszönhető, hogy felgyorsultak a felhasználásra irányuló kutatások. Erősáramú alkalmazásokban a magas hőmérsékletű II. típusú szupravezetők a leggyakoribbak, hiszen nagy térerősségűek, hűtésük is könnyen megoldható és kritikus értékeik is megfelelően magasak. [Vaj93]

Teljes körű és kielégítő elméleti magyarázata azonban máig sincs a szupravezetés jelenségének, hiszen a szupravezetés tulajdonságai rendkívül összetettek. Az anyagok és jelenségek átfogó elméletének kidolgozása jelenleg is a kutatások fókuszában van. Ezt bizonyítja az is, hogy a 2003. évi Nobel-díjat a szupravezető kutatás nagyjai Alekszej A. Abrikosov és Vitalij L. Ginzburg kapták a szupravezetés elméleti alapjainak évtizedekkel korábbi kidolgozásáért. A dolgozatomban további részében csak II. típusú tehát MHS kerámia szupravezetőkkel fogok foglalkozni.

6.2 Tömbi magas hőmérsékletű szupravezetők (MHS), mint állandó mágnesek

II. típusú szupravezető esetén, ha a külső mágneses teret B_{c1} érték felé növeljük, az anyag nem veszti el szupravezető tulajdonságát, szemben az I. típusú szupravezetőkkel: a mágneses tér behatol a szupravezetőbe, amely úgynevezett kevert állapotba kerül.

A kevert állapotú anyagokban ($B_{c1} < B < B_{c2}$) a mágneses fluxus normál állapotú, hengeres nyalábok, úgynevezett fluxusörvények (fluxoidok, fluxusszálak) formájában hatol be a szupravezetőbe. Minden fluxusörvény egyenlő fluxust tartalmaz, amely a Φ_0 fluxuskvantummal egyezik meg:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2 \cdot e} \cong 2 \cdot 10^{-15} \text{Vs} \quad [31]$$

Ahol h a Planck-állandó, e az elektron töltése. Az örvényeket szupravezetési köráramok fogják körül. Az örvények egy háromszögács csúcspontjaiban helyezkednek el. A Φ_0 mágneses fluxus a normál állapotú örvénymagon keresztül hatol be a mintadarabba; az örvénymag az örvény közepén helyezkedik el. A mágneses tér értéke maximális az örvénymag középvonalában, innen mérve exponenciálisan csökken az úgynevezett London-féle behatolási mélység értékével meghatározottan. A London-féle behatolási mélység 100 nm nagyságrendű. Minden egyes fluxus-szálát közelítőleg úgy tekinthetünk, mint egy kisméretű normál állapotú magot, amely a mágneses teret tartalmazza, és amelyet a szupravezetőben folyó szupravezetési köráramok fognak körül. A fluxusörvény-rendszer ideális II. típusú szupravezetőben rendezett, szabályos struktúrájú fluxusszál-rácsot képez; a fluxusszálak mintegy átszűrják, átjárják a mintadarabot. [See98]

$$n = \frac{B}{\Phi_0} \quad [32]$$

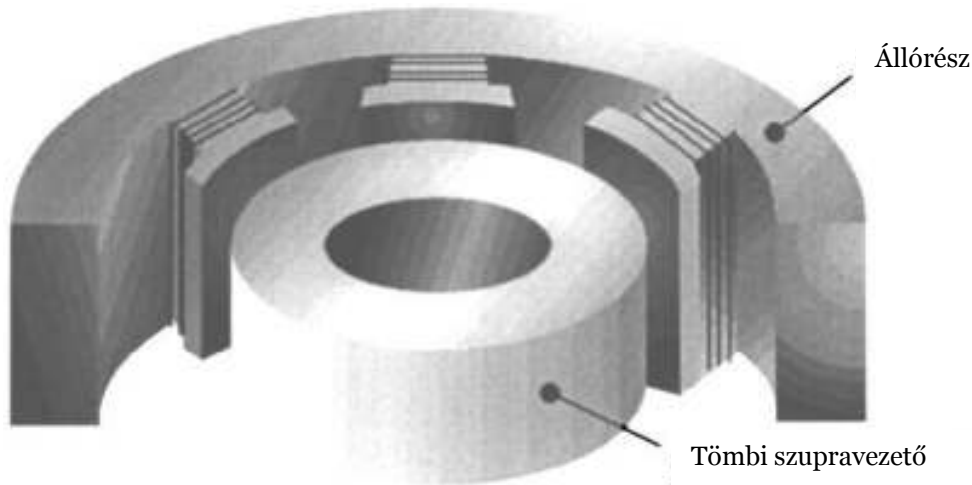
Az örvények sűrűsége, n , a mágneses tér helyi (lokális) értékétől (B) függ. Az örvénymag sugara az úgynevezett ξ koherencia-hossz nagyságrendjébe esik, amely közelítőleg 10 nm. Ez az úgynevezett kevert állapot mindaddig fennmarad a szupravezetőben, amíg a mágneses tér értéke el nem éri a B_{c2} felső kritikus indukció értékét, ami MHS-anyagokra rendkívül nagy érték (több 100 T is lehet a $T=0$ K hőmérsékleten) A szupravezetőben a befogott mágneses tér értékét a következő egyenlet adja meg:

$$B_{\text{befogott}} = A \cdot I_c \cdot r \quad [33]$$

Ahol A egy felületi állandó ami a szupravezető felületének alakjától függ, I_c a szupravezető kritikus áramsűrűsége az adott környezeti feltételekre (B , T), r pedig a szupravezető mintadarab sugara. [Vaj93]

6.3 MHS villamos gépek

Magas hőmérsékletű szupravezetőket már régóta alkalmaznak forgógépekben. A leginkább használt konstrukciók azok, amelyeknél a forgórész egy szupravezető gyűrűből áll, és a forgórészt nem mágnesezik fel lehűtésekor. Ezután az állórész 3 fázisú forgó mágneses tere hozza létre a forgató nyomatékot. Ilyen elrendezésnél a szinkron és az aszinkron működés is lehetséges (49. ábra). A mérések és vizsgálatok biztatóak, de további kutatások szükségesek az optimalizáláshoz, fejlesztéshez. [Hiro1]



49. ábra: MHS forgórészű gép

Egyes esetekben az állórész tekercselésével mágnesezik fel a szupravezető tömböt a rotor oldalon, és szinkron motorként működtetik a gépet. A világirodalom szerint ennek sincsen akadálya. [Hiro3]

Lineáris légmagos MHS szinkrongépet is készítettek Japánban, mindkét oldalon elhelyezett armatúratekercseléssel. A kutatáskor végeselemes szimulációt használtak, melyet mérésekkel validáltak. Eredményül a légrés, illetve az armatúra áram nagyságát emelték ki, ami komolyan befolyásolja a kifejthető fékezőerőt. Későbbiekben tervezik a rendszer kombinálását egy önlebegtető és önvezető rendszerrel. [Yos02]

A szupravezetőket alkalmazó forgógépeknél a felmágnesezést esetenként szintén meg kell oldani. Ebben az irányban is folynak kutatások, amelyek fókuszában különböző, költség is térfogat szempontok szerinti optimalizálás áll. Ezekre egy tökéletes példa egy igen speciális tekercselrendezést alkalmazó mágnesező tekercskialakítás, melyet a Tokiói és a Fukui egyetem professzorai alkottak meg. [Mor06, Mako7]

Ausztráliai kutatóintézet készített MHS alkalmazásával egy nagy teljesítményű teljesítmény elektronikai áramkört, melynek kimenetén képes lényegesen nagyobb feszültséget szolgáltatni, mint a bemeneti feszültség. A teszt berendezés például 12 V dc bemenettel 1.2 kV kimenetet képes előállítani MHS induktor segítségével. [Jino0]

Speciális eljárással készítenek MHS anyagokból (BSCCO) porkohászati eljárással motor forgórészeket orosz kutatóintézetekben. Ezek a vékony filmként felvitt rétegek a kialakult forgórészen három féle motorban képesek működni: reluktancia, hiszterézis, és szinkron motorokban. A prototípusok méréseinek (folyékony nitrogén alatt) következtetése az volt, hogy lényegesen nagyobb nyomaték érhető el ilyen réteges film technológiával mint MHS lemezek alkalmazásával. [Kov02]

A moszkvai műszaki egyetem Német kutatóintézetekkel együtt fejlesztett egy magas hőmérsékletű szupravezető forgórészű villamos gépet. Ezen mozgórészt különböző típusú motorokban alkalmazták, úgy mint hiszterézis, reluktancia és MHS mágneses (felmágnesezett MHS) konstrukciók. Kétdimenziós matematikai modellezést használtak, és 1 – 37 kW-os, 50 - 400 Hz frekvenciájú gépeket terveztek vele. Eredményként azt kapták, hogy folyékony nitrogénes hűtésnél a kimeneti teljesítmény 4-5 ször nagyobb mint hagyományos gépnél. Ezen gépek 200kW és a fölötti teljesítmények elérésére alkalmasak. A cikk ezen kívül előrevetíti ilyen gépek jövőbeni alkalmazási lehetőségeit is. [Kov01]

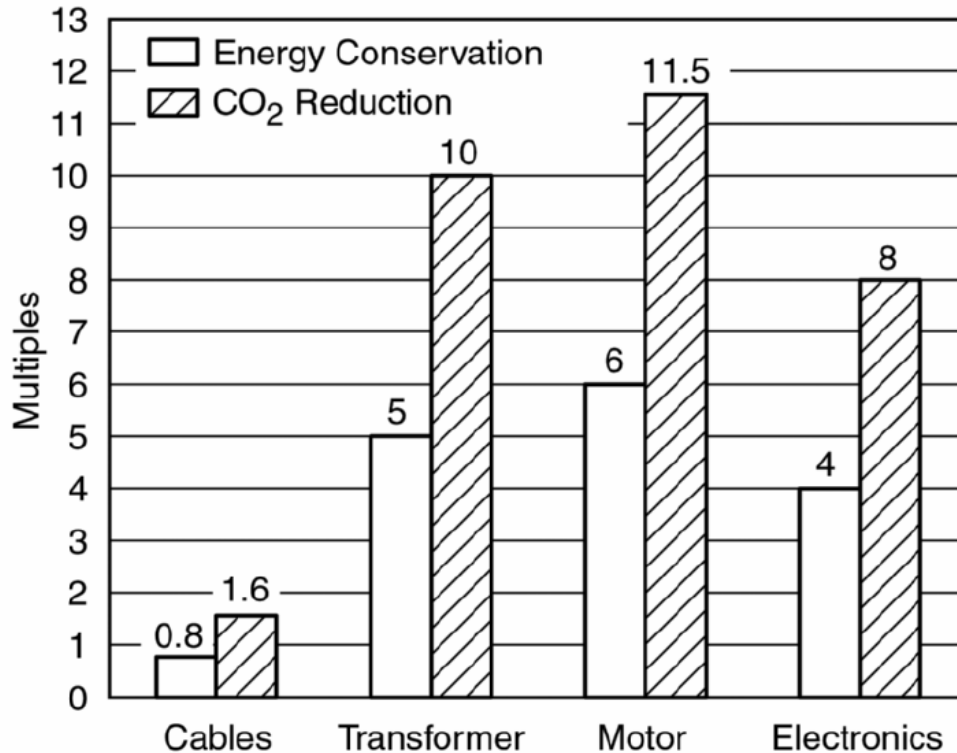
A Siemens cég Németországban készített egy MHS mozgórészű, légréstekercselt kivitelű, vasmentes konstrukciójú szinkron forgógépet. Súlya körülbelül fele a hagyományos gépének, míg teljesítménye meghaladja azt. Az elkészült szinkrongép 400 kW-os, mely 3 évig működött folyamatosan meghibásodás nélkül. Egy 4 MVA-es konstrukció fejlesztését tervezik hajóhajtás megvalósítására. [Kum05]

A kínai műszaki egyetemen vizsgálták az állandó mágnesek és az MHS mágnesek között kialakuló erőhatásokat. Különböző elméleti modelleket készítettek az effektus leírására, melynek a J_c -B kapcsolat volt az alapja. [Jia07]

Szinkronmotor forgórészén elhelyezett MHS alkalmazását vizsgálták Németországban. Komoly kihívást jelentett a hűtőrendszer megvalósítása. [Nico2]

Dél-koreai kutató intézetben vizsgáltak különféle hűtési metódusokat hőcserélők segítségével az MHS szinkronmotor üzemi hőmérsékletének megteremtése érdekében. A fejlesztés lényege speciális kialakítású hőcserélő csövek alkalmazása a folyékony hélium jobb hűtési teljesítményének elérése érdekében. [You02]

Amerikai és Japán kutató intézetek közösen készítettek egy tanulmányt a világon alkalmazható MHS alkalmazások előnyeiről és következményeiről. Vizsgálták a MHS alkalmazásának következményeit nagyfeszültségű kábelek alkalmazásánál, transzformátorokban, motorokban és különböző elektronikai eszközökben. Az alábbi diagram a CO₂ redukálás és az energia megtakarítás mértékét mutatja. (50. ábra)



50. ábra: MHS alkalmazásának előnyei különböző területeken (CO₂ kibocsátás csökkentés, energia tárolás) [Robo5]

A dokumentum tehát tényszerű adatokkal támasztja alá és összegzi az MHS alkalmazásának következményeit ezen területeken és előre vetít egy olyan jövőben elterjedő iparágat mely nagyban hozzájárulhatna korunk problémáinak kezeléséhez, és a fenntartható fejlődés megvalósításához. [Robo5]

6.4 Szupravezető és állandó mágneses rendszerek

MHS mágnes és állandó mágnes között kialakuló erőt vizsgálta egy Dél-Koreai egyetemi kutató csoport. Az MHS-t kritikus állapot modell szerint három dimenziós tengelyszimmetrikus végeselemes szimulációval vizsgálták. Az erőket Lorenz erők illetve Maxwell egyenleteivel számolták. Az eredményeket tapasztalati adatokkal vetik össze. Eredményként a Lorenz erő alkalmazását állapítják meg, mint a leginkább megfelelő számítási módszert. [Yono2]

Japán kutató intézetben vizsgálták a magas hőmérsékletű szupravezető mágnesek és az állandó mágnesek között kialakuló erő alakulását, melyet az árnyékoló köráram és befagyott tér modellezésével közelítettek. Ezen konstrukcióval megvalósítható a stabil lebegtetés, mely segítségével realizálható a mágneses rugózás. Vizsgálatokat végeztek különböző elrendezésekkel elérhető erőkarakterisztikákra. [Mas01]

Japán kutatócsoportok a Keioi műszaki egyetemmel közösen vizsgálták az állandó mágnes – MHS rendszereket. A méréseknél 60 mm átmérőjű és 20 mm magas mintákat vizsgáltak. Megállapításuk szerint a mágneses tér sugárirányú gradiensétől függ leginkább a lebegtető erő. Ezzel együtt azt kapták eredményül, hogy

ezen komponens növelése (külső mágneses tér) a szupravezető relaxációjának csökkenését is eredményezi. [Suzo8]

A Kínai műszaki egyetemen MHS lebegtetett rendszer három dimenziós erőhatásait és stabilitását vizsgálták. Állandó mágnes és szupravezető mágnes közötti erőket, lebegtetési stabilitást vizsgálták háromdimenziós erőmérőn végzett mérésekkel. [Xino7]

6.5 Összegzés

Ebben a fejezetben összefoglaltam a szupravezetők felfedezését, rövid történetét. Bemutattam az eddigi fontosabb kutatásokat és törekvéseket. Összegeztem a magas hőmérsékletű szupravezetők tulajdonságait, és villamos gépekben történő alkalmazási lehetőségeiket. Bemutattam a világban folyó kutatási és fejlesztési irányokat, és kitekintést adtam a szupravezetők jövőjét illetően is.

7 MHS ALKALMAZÁSA SZEMÉLYGÉPJÁRMŰ LENGÉSCSILLAPÍTÓBAN

Az MHS mágnesek alkalmazhatóságának feltétele, hogy a szupravezető állandó mágnesek felmágnesezése után az üzemi hőmérsékleten és a teljes üzemidőben legalább akkora mágneses tér legyen jelen (adott geometria és környezeti hőmérséklet esetén), mint normál állandó mágnesek alkalmazása esetén. Ebből következik, hogy az energiasűrűséget növelni kell. Az energiasűrűség növelése miatt könnyen előfordulhat, hogy az állórész vasmagja a telítési munkapont fölé kerül, ezért a szupravezetős állandó mágnesek alkalmazásának szimulálásakor egy vasmag nélküli szimuláció vizsgálata is szükséges volt. Az irodalomban még nem jelent meg MHS csőmotor tervezése modellezése, de a mozgórészen elhelyezett MHS rendszer (kontrapolár) relaxációs és átmágnesezési vizsgálatai is egyedülállónak számítanak.

A lehetséges energiasűrűség növekedése mellett – általánosságban elmondható, hogy szupravezető állandó mágnesekkel nagyobb energiasűrűség érhető el, mint a normál állandó mágnesekkel – a szupravezetők alkalmazásának másik járulékos előnye a hűtéshez szükséges közeg hatása, általában folyékony nitrogén (forráspontja 77 K), amely lehűti az állórész réz tekercselését is, melynek így ellenállás értéke lecsökken. Ezen tulajdonságok együttesen lényegesen nagyobb áramot tesznek lehetővé az állórészen, ami nagyobb reakcióerőt fog produkálni. Nem feledkezhetünk meg azonban a folyamatos hűtés biztosításának problematikájáról sem, ami körülményessé teszi a rendszer alkalmazhatóságát, emeli az üzemeltetési költséget. Az effektust egy olyan modell segítségével vizsgálok, melynél egy ugyanolyan geometriájú állandó mágnes és szupravezetős állandó mágnes hatását hasonlítom össze azonos állórészben. Elsőként azonban a szupravezető mágnesek felmágnesezési módjaival és lemágneseződését vizsgáltam meg, ami befolyásolhatja az anyag alkalmazhatóságát a lengéscsillapítóban.

7.1 Szupravezető felmágnesezése

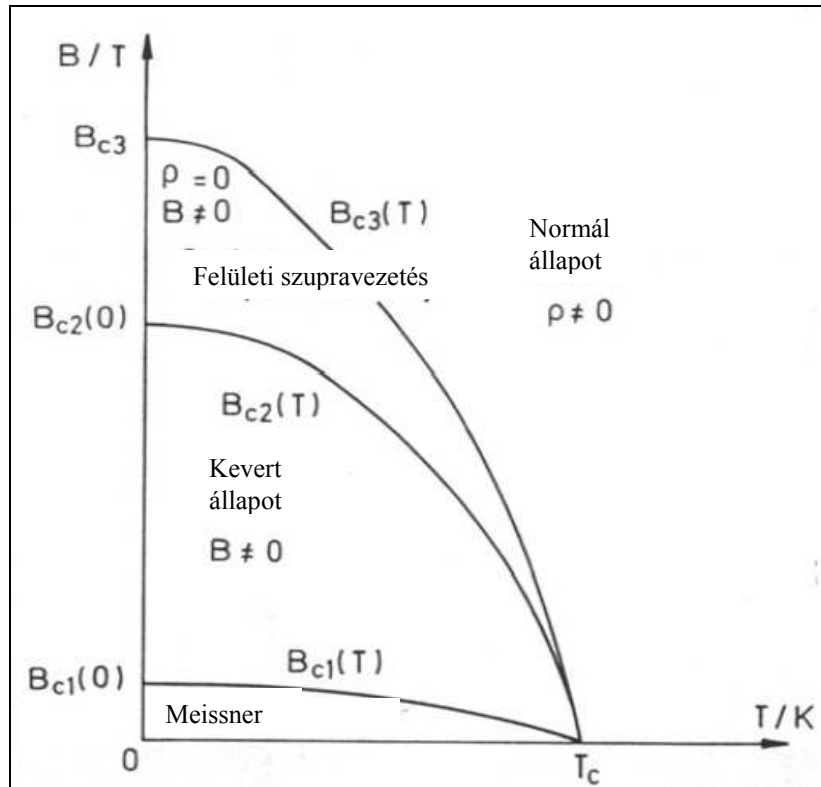
A szupravezető tömbök csupán felmágnesezés után tekinthetők mágnesnek. Ez a folyamat éppen ezért nagyon fontos, hiszen ez szabja meg a szupravezető állandó mágnesünk minőségét. Alapvetően kétféle felmágnesezési metódus ismert, melyeknek természetesen speciális altípusai is ismertek. Ezek a térben mágnesezés (Field Cooling) és a mágneses tértől független hűtés (Zero Field Cooling).

7.1.1 *Mágneses tértől mentes lehűtést (Zero Field Cooling) követő impulzusmágnesezés*

Ezen méréseket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszékének Powertech laboratóriumában végeztem el.

Zero Field Cooled (ZFC) majd azt követő impulzus felmágnesezésről akkor beszélünk, ha a szupravezető lehűtésekor a T_c kritikus hőmérséklet elérésekor nincs jelen mágneses tér, így a szupravezetés elérésekor a szupravezetőben nincs beragadt fluxus (trapped flux). Ezután a szupravezető tömböt gerjesztett elektromágnesbe helyeztem, melyre áramimpulzust kapcsoltam. Ez az áram erős mágneses impulzussal ($B_{imp} > B_{c1}$) mágnesezi fel a szupravezetőt. Így a szupravezetőbe a fluxusszálak

beragadnak és a mágnesező impulzus megszűnése után a szupravezető mágnesesen gerjesztett marad (kevert állapot) (51. ábra).



51. ábra: Az MHS szupravezetők fáziskarakterisztikája

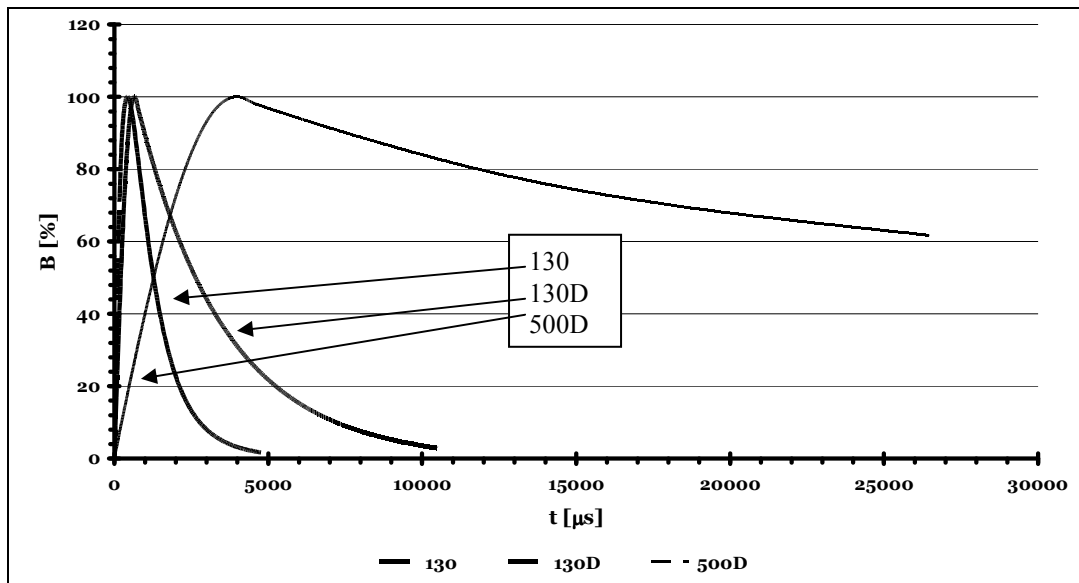
A maradó mágneses tér nagysága függ a szupravezető kritikus paramétereitől (T_c , B_{c1} , I_c), a környezeti hőmérséklettől, a mágnesező impulzus nagyságától és a mágnesező impulzus jelalakjától.

Mindegyik szupravezető mintadarab, amiket a mérésekhez használtam henger formájú volt, melyek fizikai paramétereit az 6. táblázatba foglaltam össze.

Minta neve	Átmérő [mm]	Magasság [mm]
HG3	30.5	11.6
HG8	30.5	19.4
HG9	28.5	18.6
Mo11	30.6	17

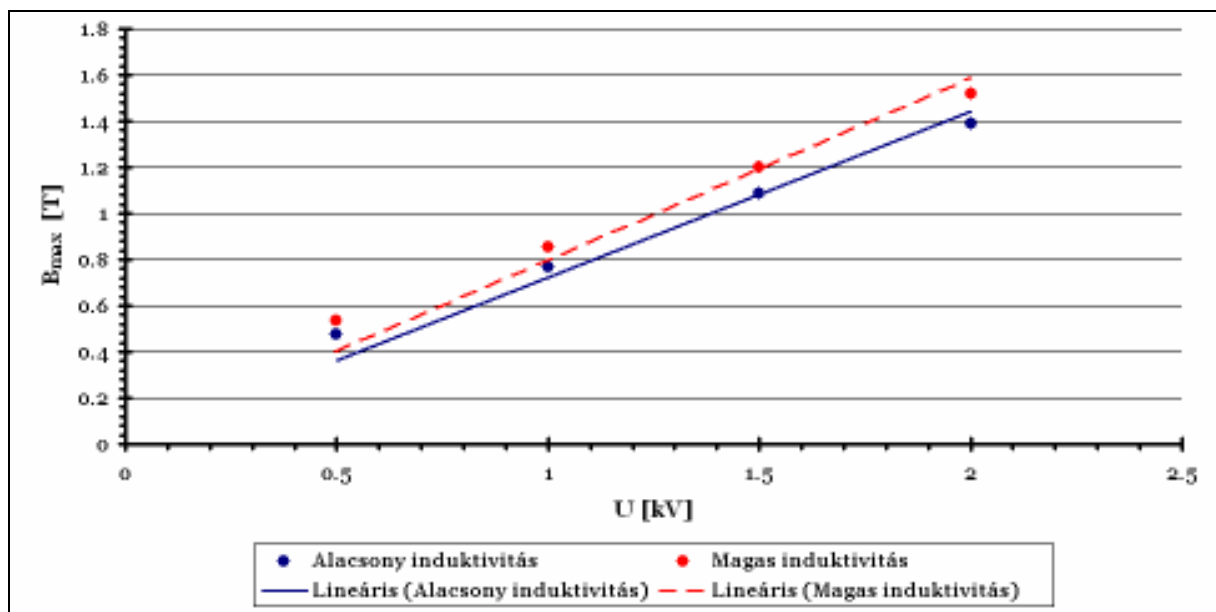
6. táblázat: MHS mintadarabok méretei

A mágnesező berendezésben nagy kapacitású kondenzátorokat feltöltésük után a mágnesező tekercsen keresztül lehet kisütetni, ami a kívánt mágneses teret létrehozza. Maximálisan 9 kV feszültséget képes a mágnesező tekercsre kapcsolni, ami így 7.2 T maximális értékű teret hoz létre.



52. ábra: Az impulzus mágnesező gép jelalakja

Az 52. ábrán láthatók a BME VET tanszékén levő impulzuselemző gép különböző mágnesező jelalakjai. A mágnesező gép jelalakját diódák, ellenállások beiktatásával lehet változtatni. Én az 500D-s beállítást használtam a szupravezetők felmágnesezéséhez, ez azt jelenti, hogy az RC körbe a mágnesező tekercsen történő kisütésekor egy dióda és egy ellenállás is be van iktatva az áramkörbe, így a dióda megakadályozza, hogy az áram a másik irányba is folyjon. Ennek megfelelően a létrehozott mágneses impulzus egyirányú lesz, tehát nem mágnesezi le a mintadarabot, az ellenállás nagysága pedig egy viszonylag hosszú idejű mágneses impulzust biztosít. Az ábrán látható két másik görbe (130 és 130D jelű), másik mágnesező tekercsre vonatkozik, mint amit alkalmaztam. A mágneses impulzus nagysága a töltőfeszültség függvényében lineárisan nő. A töltőfeszültség (kV-ban) 0,8 szorososa a létrehozott mágneses tér maximuma (T-ban). A töltőfeszültség és a létrehozott mágneses tér közötti kapcsolatot az 53. ábra mutatja be.

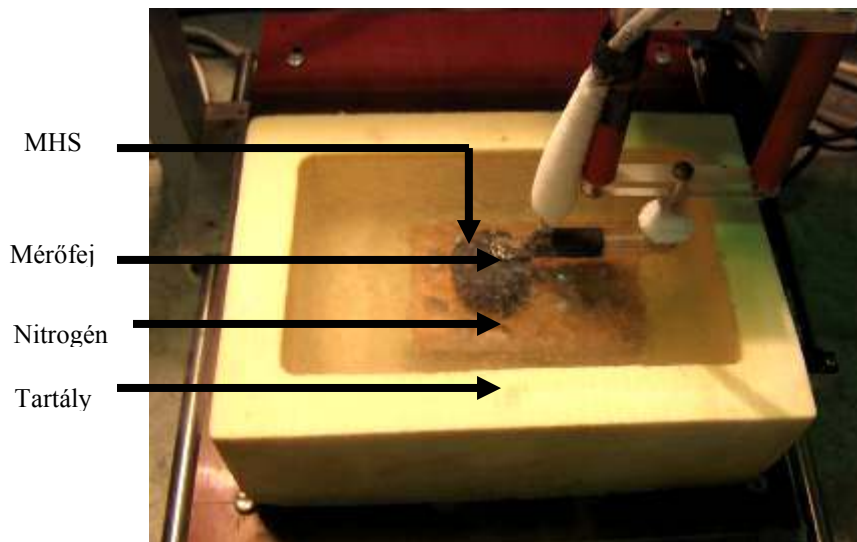


53. ábra: Mágneses indukció a töltőfeszültség függvényében

Mivel az impulzuselemű mágnesező gépnek a maximális töltőfeszültsége 9 kV, így ezzel maximum 7,2 T nagyságú mágneses teret tudunk létrehozni. A mérések célja az volt, hogy megvizsgáljam a mágnesezés folyamatát és a szupravezető befogott terének viselkedését.

7.1.1.1 Mérési összeállítás ZFC méréseknél

A szupravezető mintákat az impulzuselemű mágnesező géppel felmágneseztem (54. ábra), majd megmértem a befogott mágneses tér nagyságát egy robotkarral mozgatott 3d-s Hall elemmel. A szonda jeleit egy LabView mérőkártyával gyűjtöttem be és a megfelelő szoftver segítségével rögzítettem, illetve dolgoztam fel azokat.

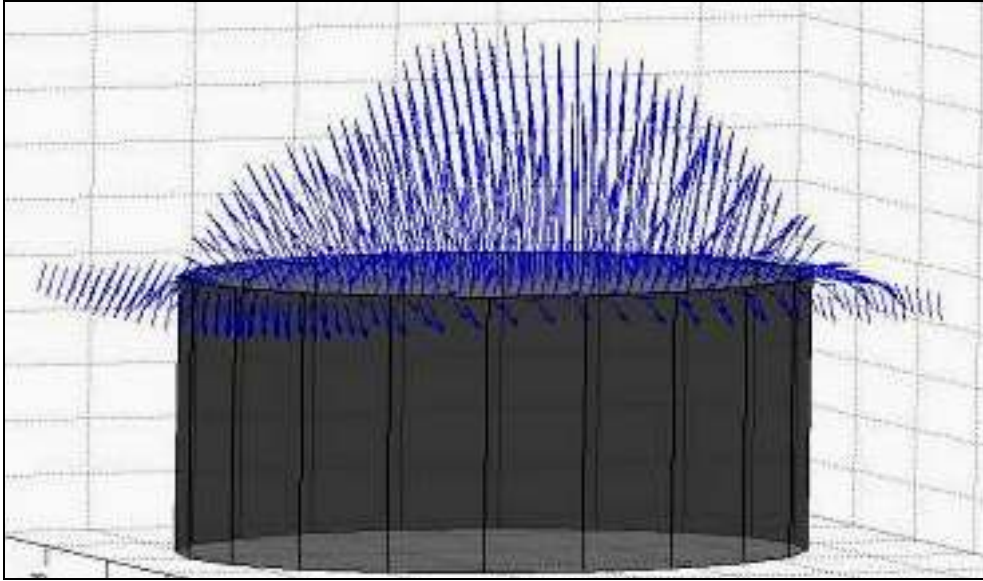


54. ábra: Felmágnesezett szupravezető mérése

Az impulzus felmágnesezés után 5 perccel kezdtem el a méréseket minden esetben, hogy a szupravezetők relaxációja ne befolyásolja a méréseket lényegesen. Mivel a relaxáció mértéke az első 5 percben a legnagyobb így eltekinthetünk a mérés közbeni relaxációtól. [Benoo]

A szupravezető felületén 3 darab 1 dimenziós Hall elemet tartalmazó mérőfejet mozgatva, 1 mm-es rácspontokban 20x20 mm-es térrészben, megmértem a mágneses tér nagyságát. A szupravezető felületén a mozgatást egy 3 dimenziós mozgásra képes robotkar végezte. Így a mérési eredményként egy olyan 3 dimenziós vektorteret kaptam, melynek rácspontjai 1 mm-re helyezkednek el egymástól. Az impulzuselemű mágnesezést több különböző töltőfeszültségre és több szupravezető mintára is elvégeztem, mindegyik esetben az impulzuselemű mágnesező gép jelalakja azonos volt, csak a töltőfeszültségben, és így a létrehozott mágneses tér nagyságában volt különbség.

A szupravezető állandó mágnes 4,5 kV-os töltőfeszültség (3,6 T) esetén a mágneses tér 3 dimenziós vektorterét a szupravezető felületén a 55. ábra szemlélteti.



55. ábra: HG8 befogott mágneses vektortere 4,5 kV (3,6T) impulzus esetén

7.1.1.2 Következtetések mérési eredmények alapján, összegzés

Mindegyik mérést folyékony nitrogénes hűtéssel végeztem, tehát a minta hőmérséklete a relaxációnál, a felmágnesezésnél és a befagyott tér feltérképezésénél (3 dimenziós mágneses vektortér készítésnél (field map)) is 77 K volt. A felmágnesező mérések során a következő eredményekre jutottam:

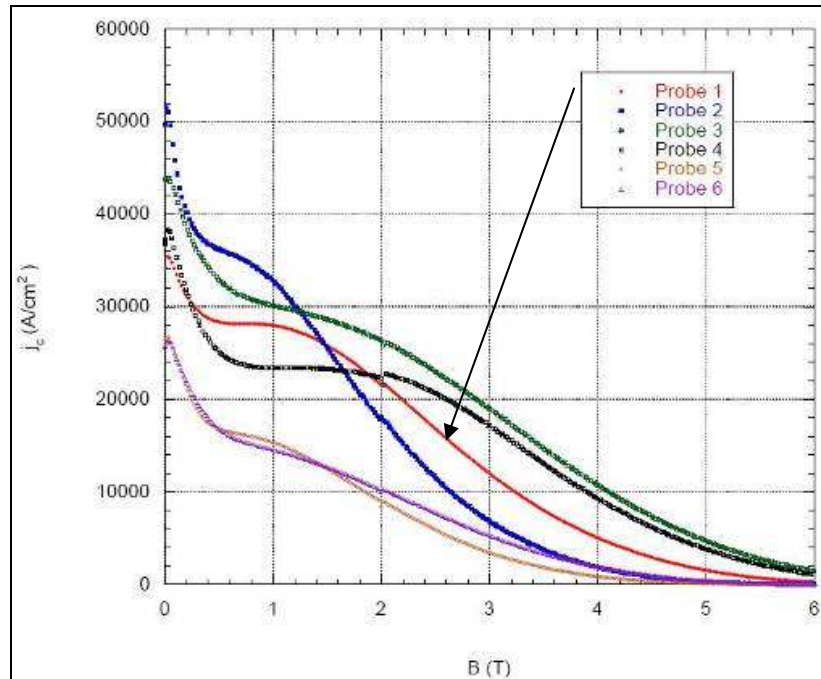
- A ZFC hűtés után impulzussal felmágnesezett szupravezetőkben befogott mágneses tér alakja nem függ a szupravezető hűtése előtti hőmérséklettől, csak a gerjesztő mágneses tér megszűnésekor, az aktuális hőmérsékleten érvényes J_c értéktől függ.
- Impulzus felmágnesezés során $B_{kritikus1} \ll B_{gerj}$ a befogott mágneses tér értéke csökken.
- A védő viaszréteg (vagy parafin) hatására impulzusfelmágnesezésnél a befogott mágneses tér nagysága csökken az anyag rossz hővezetési és hőkapacitási tulajdonságai miatt.
- Nincsen kimutatható különbség a több egymást követő impulzusfelmágnesezés (2 T, 1 T, 0.5 T) és az egy impulzusfelmágnesezés (2 T) után visszamaradó mágneses tér alakjában és nagyságában, ha a hőmérséklet azonos marad.

A befogott mágneses tér csökkenése miatt a szinkron csőmotorban a szupravezetők felületi védelmére nem viaszt kell alkalmazni, amennyiben impulzusmágnesezést szeretnénk üzemszerűen alkalmazni. Amennyiben ez nem megoldható más módon, olyan anyaggal kell biztosítani a vízzáró szigetelést, melynek jó a hővezető képessége. Ha a szinkron csőmotorban nem lesz folyamatos üzemi ideje, a szerkezetnek nagy és gyakori hőmérséklet változást kell kibírnia, ebben az esetben a védőréteg alkalmazása szükséges, hogy elkerülhető legyen az idő előtti károsodás.

7.1.2 *Mágneses térben hűtés (Field Cooling), mágnesezés*

A fejezet bevezetőjében tárgyaltak alapján Field Cooled (FC) felmágnesezés alatt azt értjük, amikor a szupravezető T_c kritikus hőmérsékletének elérésekor erős

mágneses tér van jelen, és ekkor „ragadnak” be a fluxusok a szupravezetőbe. Ez akkor következik be, amikor a szupravezető hűtésekor egy $B (>B_{c1})$ mágneses tér van jelen. Ebben az esetben a szupravezetési állapot elérésekor a szupravezető mintadarabból nem szorulnak ki a mágneses fluxusok hanem „befagynak”, ha B értéke nem haladja meg B_{c2} értékét. Mivel anyagszerkezeti szempontból a mérésekben használt minták azonosak, YBCO (Ittrium Bárium Réz Oxid) szupravezetők, így ezeknek a mintáknak a kritikus árama mágneses tér függvényében a gyártó (IPHT Jéna) mérési adatai alapján a 56. ábrán látható Probe1 nevű görbe szerint alakulnak.



56. ábra: Kritikus áramsűrűség a mágneses tér függvényében [Ipho7]

A továbbiakban a modellezésnél ezen görbe adatai lesznek mértékadóak.

Az FC méréseket a Németországi Jenában található IPHT Kutatóintézet, szupravezető laboratóriumában végeztem el, ahol a méréshez használt szupravezető kerámiákat gyártották.

7.1.2.1 Mérési összeállítás FC méréseknél

Mindegyik szupravezető mintát erős ($>1T$) mágneses térbe helyeztem, majd lehűtöttem. (57. ábra) A mágneses teret egy szupravezető elektromágnes állította elő, amelynek hibrid, folyékony héliumos és nitrogénes hűtése van. A mágnesező teret egy erre a célra fejlesztett vezérlő elektronika állította elő. Miután a szupravezető elérte a T_c hőmérsékletet, a mágneses teret $0,5 T/perc$ -es sebességgel csökkentettem $0 T$ értékig (hogy a minta kivehető legyen).



57. ábra: FC felmágnesezés Jenában, mágnesező tekerecs, hűtőtégely MHS-el

Ezután a szupravezető felületére merőleges irányban, a felületen megmértem a mágneses tér értékét, az erre a célra épített 3 dimenziós szerkezettel. A kar mozgását egy számítógép vezérelte, míg a mérőfej értékeit szintén ez gyűjtötte és rögzítette. A mérési elrendezést a 58. ábra szemlélteti.



58. ábra: Mágneses tér mérése Jénában

A mérés során alkalmazott robotkar és érzékelő kialakítása olyan volt, hogy nem lehetett megoldani 3 dimenziós mágneses tér mérését, csak a szupravezető felületére merőleges komponensét. A mért értékek mindig a szupravezető felületére vonatkoznak, mert a robotkar az érzékelőt rányomta a mintadarab felületére.

7.1.2.2 Mérési eredmények alapján következtetések, összegzés

Méréseim alapján FC mágnesezéssel jóval nagyobb (~40-50%-al) befogott mágneses tér érhető el, de megvalósítása csőmotorban sokkal körülményesebb, mint az impulzusfelmágnesezés. A mérések alapján levont következtetéseim a következők:

- FC felmágnesezés esetén nem módosítja a mérési eredményeket a szupravezetőn elhelyezett védő parafinréteg, tehát a szupravezetők védelmére tetszőleges (mágneses teret nem befolyásoló) védőréteg alkalmazható.
- Nagyobb befogott mágneses tér érhető el, mint ZFC utáni impulzusfelmágnesezéssel.

- Nagyobb mágnesező tér esetén nem csökken a befogott mágneses tér, hanem közel azonos szinten marad.

7.1.2.3 ZFC és FC mérési eredmények összehasonlítása

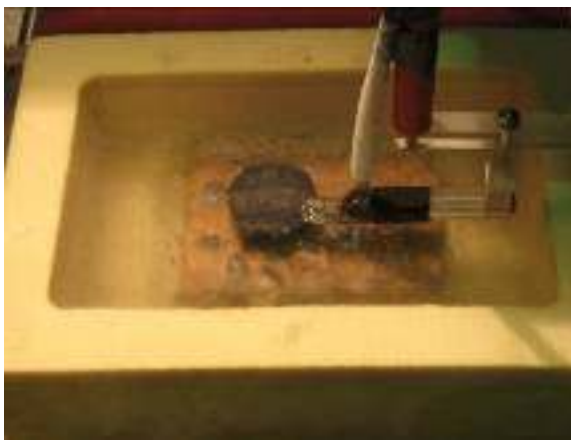
Általánosságban elmondható, hogy FC felmágnesezéssel jelenleg ~30-50%-kal nagyobb mágneses tér befogása érhető el, mint ZFC hűtést követő impulzusmágnesezéssel. Ez főleg a dinamikus kialakuló áramok következményeként fellépő hőképződés következménye, mely korlátozza a kialakuló áramok értékét. Az FC és ZFC felmágnesezés során befogott mágneses tér térbeli alakja között eltérést nem tapasztaltam.

7.2 Szupravezető lemágnesződésének (relaxáció) mérése

A szinkron csőmotor konstrukciójához szükséges tudnunk azt is, hogy ha állandó mágnesek helyett szupravezető állandó mágneseket használunk, az idő előrehaladtával, milyen befogott mágneses térrel, így a gépben mekkora légrésindukcióval számolhatunk. Szupravezető mágnesek használata esetén ez meghatározhatja a gép üzemidejét, illetve, hogy mikor szükséges a szupravezető mágnesek újbóli felmágnesezése. A tömbi szupravezetők befogott mágneses terének időbeli változását (relaxáció) FC és impulzusmágnesezés (ZFC) esetén is megmértem, hogy az esetleges relaxációbeli különbségeket ki tudjam mutatni.

7.2.1 Mérési elrendezés a relaxáció méréseknél

A relaxáció mérésnél a szupravezető minták felmágnesezése után több módon is mértem a szupravezető által befogott mágneses teret. A szupravezető felületére helyeztem a mérőfejet, majd eleinte 10 másodpercenként, később 1 percenként, végül 10 percenként megmértem a mágneses tér nagyságát a mérőfejhez csatlakoztatott számítógépes LabView kártya segítségével. Ez alatt a szupravezető minta végig folyékony nitrogénben volt. A hosszú idejű relaxáció méréshez elkészítettem egy nagyobb térfogatú mérőedényt és egy új mérőfejet. A hosszú idejű relaxáció mérés hasonlított az első módszerhez, azzal a különbséggel, hogy a szupravezető minta alatt helyezkedett el a mérőfej az esetleges felülethez közelebbi, így pontosabb, értékek mérése miatt (59. ábra).



a



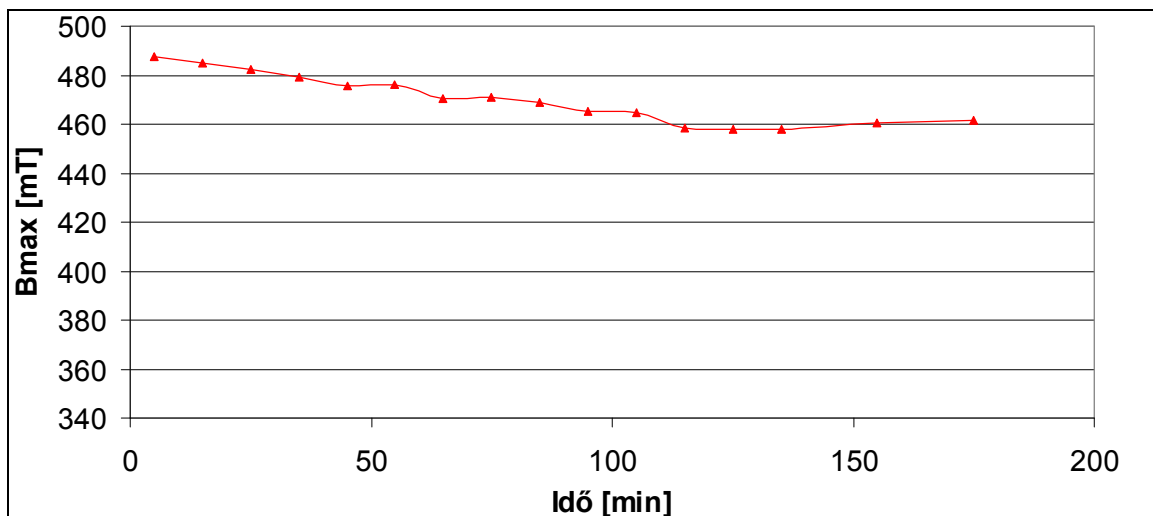
b

59. ábra: Mérési elrendezés (a: mérőfej a minta felett, b: mérőfej a minta alatt)

A mérésekkor gyakori hibát eredményezett a tartály peremén képződő fagyott pára. Méretének növekedése közben a folyékony nitrogénbe esett és a folyamatos forrás következtében kialakuló áramlások miatt mozgásban volt. A mérővezetékeket éppen ezért el kellett szigetelni ezektől a vezető „szennyeződésektől” a mérési hibákat elkerülendő.

7.2.2 Szupravezető mágnesek relaxációja

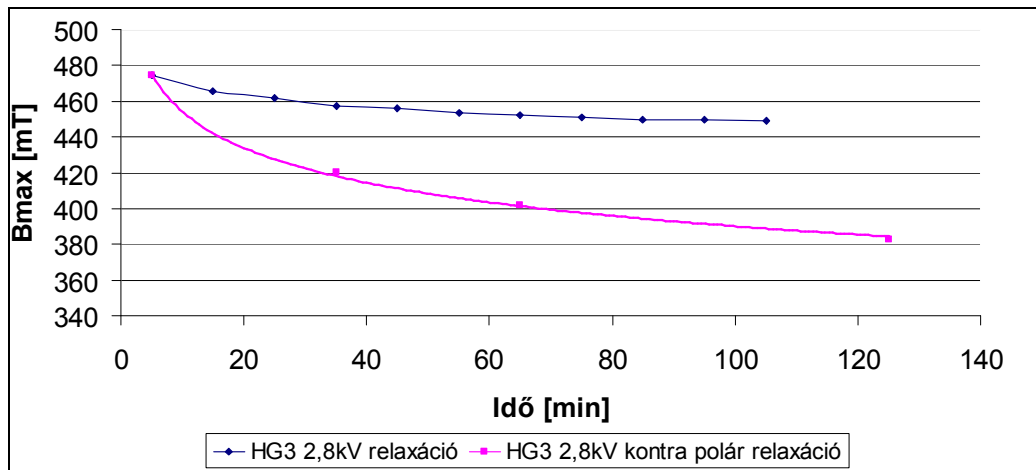
Elsőként a HG8-as mintán végeztem mérést. Relaxációjának mérésekor, a szupravezetőt ZFC hűtés után impulzussal mágneseztem fel, majd adott időközönként megmértem a szupravezető felületén a befogott mágneses tér nagyságát. A méréseket a felmágnesezés utáni 2. percben kezdtem el, és 10 percenként ismételttem meg. A relaxációnál a felületi mágneses térkép (field map) maximumpontját ábrázoltam 60. ábra).



60. ábra: HG8 2,8 T mágnesező impulzus utáni relaxációjának időbeni lefolyása

A mérés 3 órán át tartott, mely után a mágneses tér értéke 93,8 %-ra esett vissza a kezdeti értékhez képest. Ahogy az 60. ábrán látható a különböző mérési hibák jelentősen befolyásolhatják a méréseinket (a mért görbe pontjainak szóródása), melyek főként a nitrogén utántöltésből adódnak.

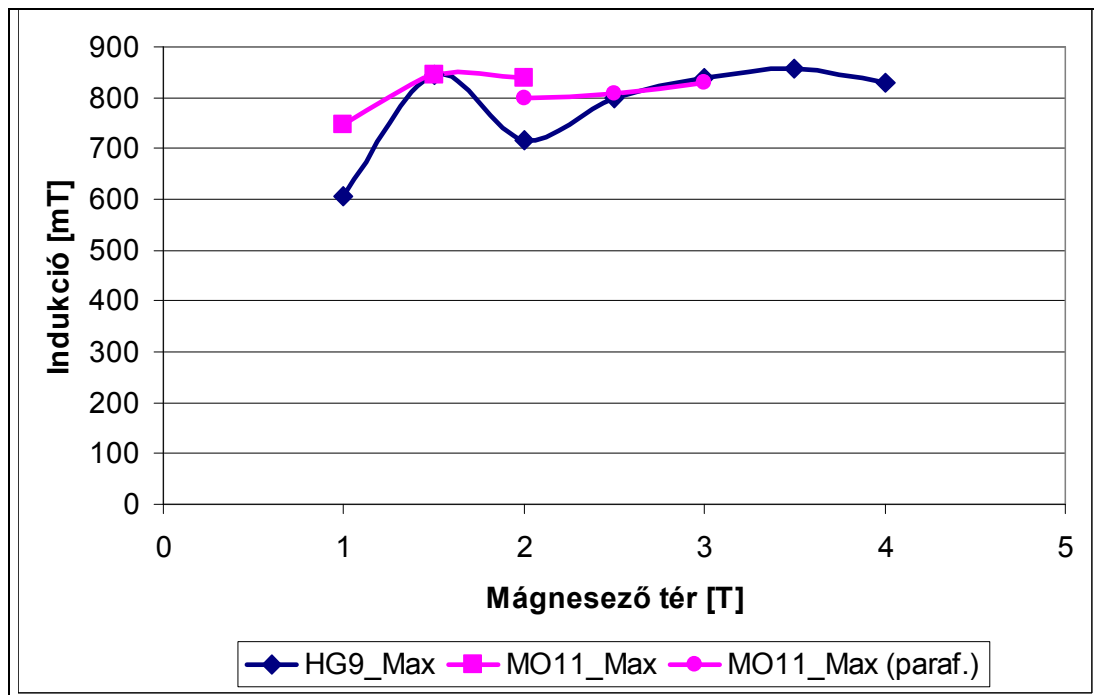
Ezután a HG3-as mintán végeztem mérést. A mérések során ZFC utáni impulzusfelmágnesezést alkalmaztam, mind a sima, mind a kontra-polár relaxációnál. A sima relaxáció mérést az előzőekben vázolt módon végeztem el, tehát ZFC impulzusfelmágnesezés után 2 perc késleltetéssel 10 percenként field map-et készítettem a minta felületén. A kontra-polár (azonos pólusaikkal szembefordított mágnesek) relaxációt úgy mértem, hogy a HG3-as és a HG8-as szupravezető mintát is felmágneseztem (impulzusmágnesezés), majd összeszorítottam őket kontra-polár elrendezésben úgy, hogy a két mintadarab közti távolság 10 mm legyen. Ezt tartottam 30, 60 majd 120 percig és az összeszorítás után megmértem a mintadarabban visszamaradt mágneses tér eloszlását (field map-jét). Mind az eredeti relaxáció, mind pedig a kontra-polár relaxáció mérésénél a robotkar ugyanolyan magasságra volt beállítva, tehát a mérőfej mindkét esetben a szupravezető minták felületén helyezkedett el. A field map-ek maximális indukcióértékeit a 61. ábra mutatja.



61. ábra: HG3 szupravezető minta relaxációja

A mérési eredményekből kiderül, hogy kontra-polár elrendezésben a szupravezetők relaxációja fokozódik. 94,6 % helyett 80,7%-ra relaxált a szupravezető állandó mágnes. Ez a két szupravezető átmágnesezésének következménye. Ez a folyamat is fokozatos, időben változó, amit a 61. ábra alsó görbéje tökéletesen szemléltet.

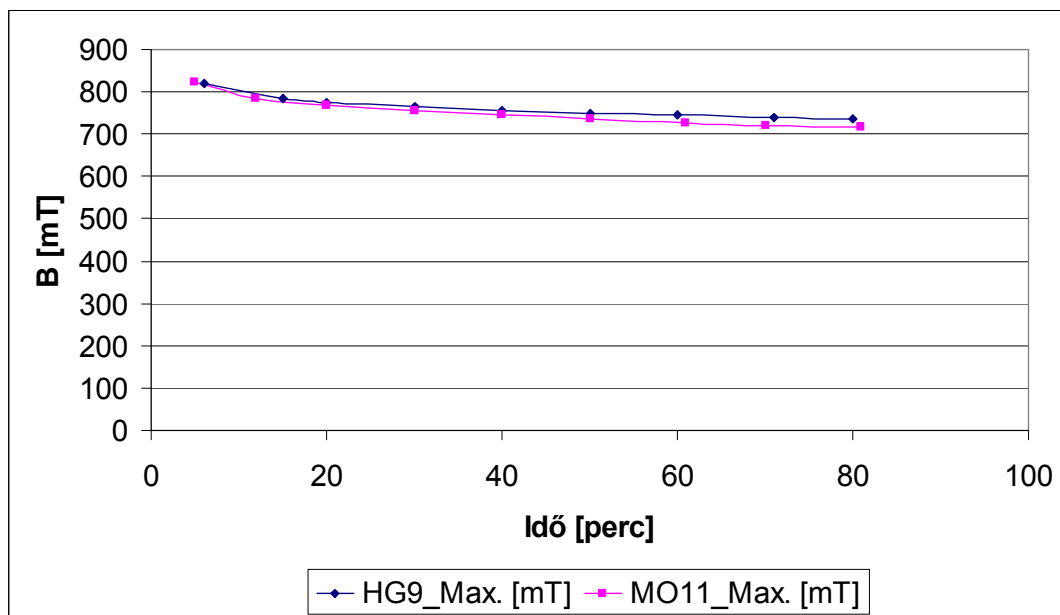
Ezután következett az Mo11-es minta (mely anyagában és méreteiben is megegyezik a HG9-es mintával) mérése. A különböző mágneses térben történő lehűtéseket (FC) ábrázoltam, és összevettem a HG9 mágnes befogott tér értékeivel. A 62. diagramról leolvasható a különböző mágnesező terek hatása, illetve az a mágnesező tér érték, melynél mindkét anyag azonosan viselkedik.



62. ábra: HG9 és MO11 FC felmágnesezése

Látható, hogy 1,5 T mágnesező tér nagyság esetén mindkét szupravezetőben ugyanakkora mágneses tér marad (844,09 mT). Ezen a felmágnesezési értéken mértem a szupravezetők relaxációját. A 63. ábrán látható, hogy a két szupravezető

mintadarab relaxációjában a különbség a mérési hibahatáron belül van. Ez a két minta tehát 1,5 T mágnesező térrel való felmágneseződését követően alkalmas lesz a kontra-polár elrendezésnél bekövetkező relaxáció mérésére.

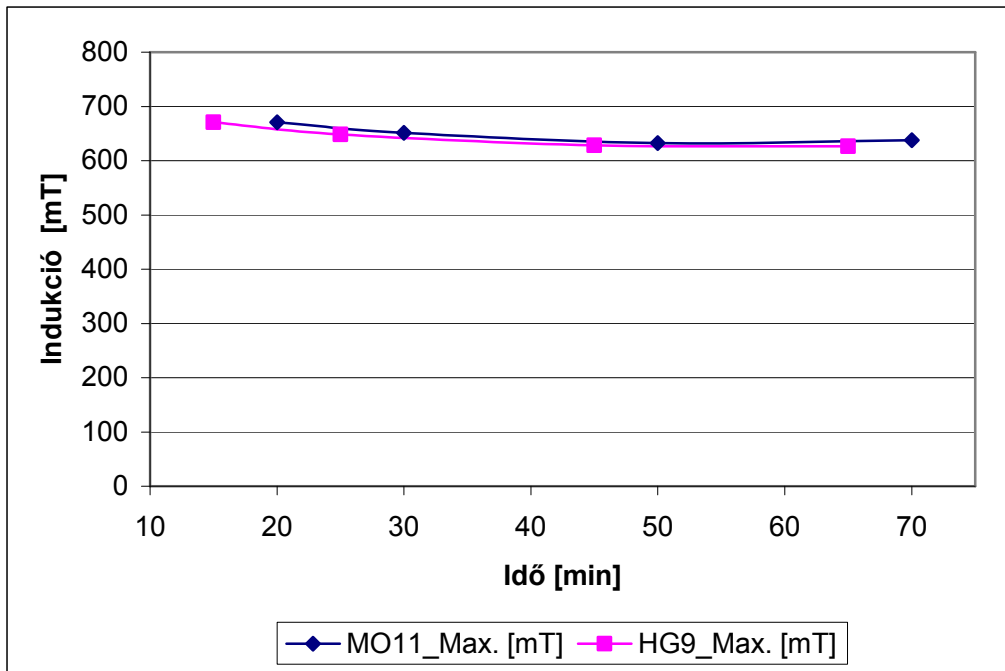


63. ábra: Mo11 és HG9 (FC mágnesezett) relaxációja

1,5 T nagyságú mágneses tér esetén 80 perc eltelte után a HG9-es szupravezető felületén a kezdeti mágneses tér 89,78%-a van jelen míg az MO11-es szupravezető felületén 87,19%-a (61. ábra).

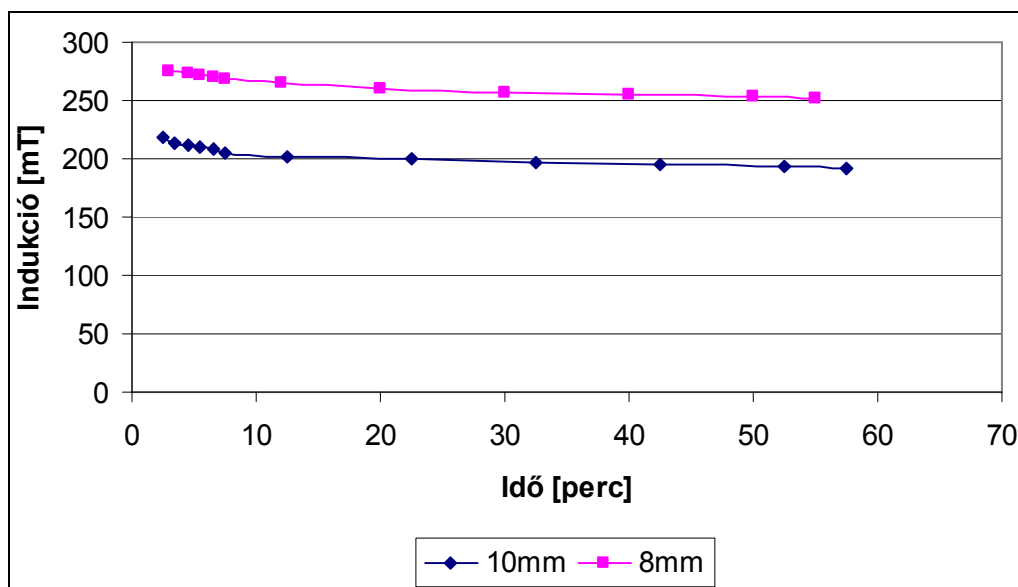
7.2.3 Relaxáció mérés kontra-polár elrendezésben

Az előzőleg bemutatott mérésen kívül több méréssel is vizsgáltam a szupravezető állandó mágnesek relaxációját kontra-polár elrendezésben, azaz amikor a felmágnesezett szupravezetők azonos pólusaikkal egymással szembe vannak fordítva. Bizonyos idő elteltével szétcsúsztam az elrendezést és megmértem a mágnesek felületén a már megváltozott teret. A következő ábrán látható az összeszorított (10 mm távolság) szupravezetők maradó indukció értéke különböző idők után. A két minta (HG9, Mo11) teljesen azonosan reagál az összeszorításra, azonos mértékben mágnesezik át egymást (64. ábra).



64. ábra: Kontra-polár relaxáció Mo11-HG9 (10 mm), FC mágnesezés (1,5 T)

Mértem a két szupravezető mágnes között (kontra-polár elrendezésben) kialakuló indukciót a köztük lévő hengeres térrész palástfelületén. A szupravezetőket ebben az esetben is ZFC után impulzusfelmágnesezéssel mágneseztem fel. Palástfelületen mért mágneses tér alakulását kontra-polár összeszorítás közben, 10 és 8 mm-es összeszorítás esetére a 65. ábra mutatja.

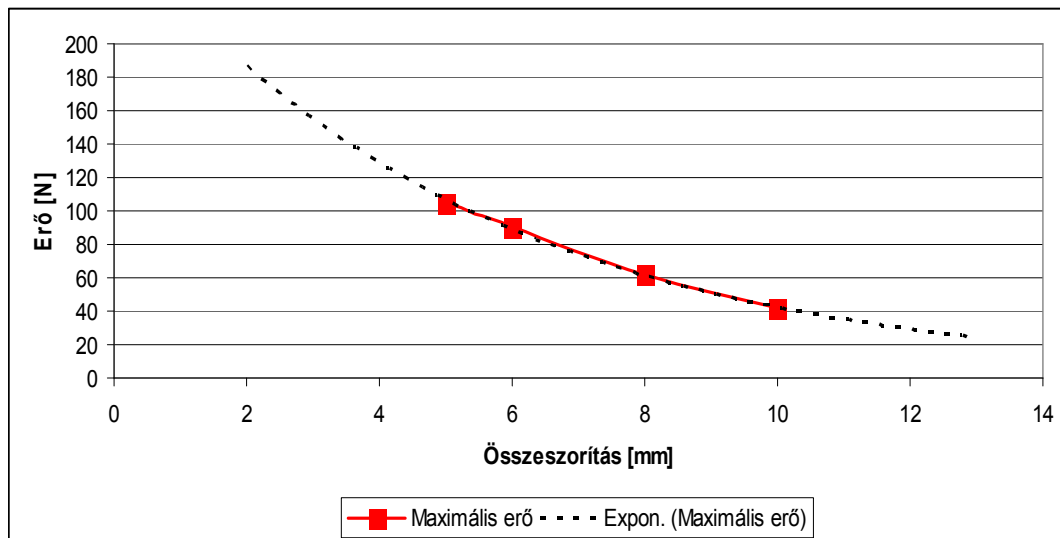


65. ábra: Palástfelületen mért mágneses tér

Ez a mérés azt sejteti, hogy nincsen relaxációbeli különbség a különböző mértékben összeszorított MHS mágnesek között. A szupravezetőben a relaxáció után megmaradt mágneses tér 10 mm-es összeszorítás esetén az összeszorítás előtti érték 87,64 százaléka a mérés 57,5. percében, míg 8 mm-es összeszorítás esetén 91,27% a mérés 55. percében.

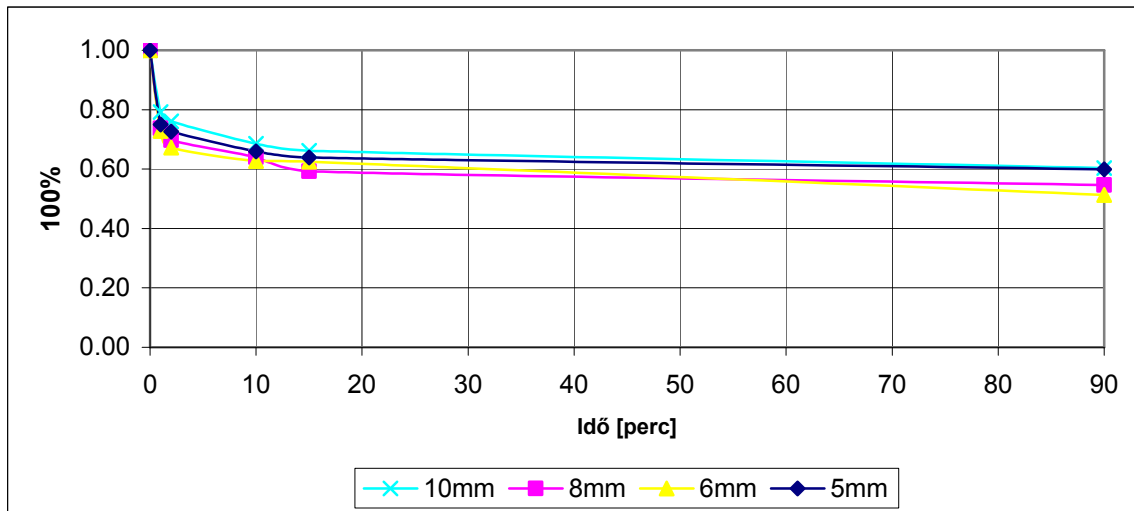
7.2.4 Relaxáció a kontra-polár mágnesek taszítóerejében

Ezeket a méréseket szintén a Németországi Jénában található IPHT Kutatóintézet, Szupravezető laboratóriumában végeztem el. A szupravezetőket (HG9 - Mo11) FC módon mágneseztem fel (1,5 T mágnesező tér), majd kontra-polár elrendezésben mértem az egymásra ható taszítóerőt. A taszítóerő mértékét egy fix pozícióba állított robotkarral szerelt nyúlásmérő bélyeges erőmérő szenzor szolgáltatta. A mért adatokat itt is számítógép rögzítette előre beállított időlépésenként. A taszítóerő csökkenésének egyik oka a szupravezetők relaxációja, mely az MHS anyagoknál magukban egyedül állva is köráram, ennek megfelelően felületi indukció csökkenést eredményez az anyagban lejátszódó folyamatok következtében. Ezen kívül ennél az elrendezésnél számolnunk kell az átmágnesezés következtében kialakuló relaxációval is. Ezt a mérést ugyanakkora mágneses térrel (1,5 T) történő FC felmágnesezéssel és különböző szupravezetők közti távolsággal végeztem el. A szupravezetőkre ható taszító erő nagysága a távolság csökkentésével exponenciálisan nő. 10 mm -en 41,96 N, 8 mm-en 62,14 N, 6mm-en 90,42 N és 4mm-en 105,14 N volt a mérések kezdetén. Ezek az értékek a 66. ábrán láthatók.



66. ábra: Erő értéke az összeszorítás függvényében

A szupravezetőket 1 óra hosszan szorítottam össze (5400 s), statikusan azonos pozícióban. A szupravezetők dinamikus igénybevételét jelenleg csak állandó mágnes és MHS között fellépő erők kapcsolatában vizsgálták. [Benoo] A mérési eredményeket kiértékelve egy érdekes jelenséget sikerült megfigyelni. Ha a szupravezetők közötti taszítóerő relaxációját százalékosan kifejezve ábrázoljuk, levonhatjuk azt a következtetést, hogy ezen geometriájú szupravezetők közötti taszítóerő relaxáció mértéke a távolságtól (10 és 5 mm között) független. A mérési eredményeket a 67. ábra szemlélteti.



67. ábra: Erő relaxáció százalékos

A 67. ábrán látható eltérések mérési hibahatáron belül vannak, hiszen kisebb távolságú összeszorításkor (5 mm) kisebb mértékű relaxáció volt tapasztalható, mint például 8 mm-es összeszorításkor, ami nem feltétlenül tűnik reálisnak. A tendencia (százalékos értékekre) azonban tökéletesen látható, tehát ezen értékhatárok között általánosíthatunk az összeszorításkor kalkulálható relaxációt illetően. [Zado8b]

7.2.5 Összegzés

Az eddig elvégzett FC, ZFC mágnesezés és az ebben a fejezetben bemutatott relaxációs mérések alapján az alábbi következtetéseket állapítom meg:

- Az FC és ZFC impulzusfelmágnesezéssel felmágnesezett szupravezető állandó mágnesek relaxációjának mértéke között nincs különbség.
- Egyforma fizikai méretű, azonos anyagú és ugyanúgy felmágnesezett szupravezető állandó mágnesek (általában használt geometria) kontra-polár elrendezésénél a relaxáció mértéke nem függ attól, hogy 10 és 5 mm között milyen távolságra vannak egymástól a szupravezető állandó mágnesek.
- Szupravezető állandó mágnesek relaxációjának százalékos mértéke a felületük minden pontján azonos, emiatt a további relaxáció méréseknél nem szükséges kitüntetett mérési pont meghatározása.

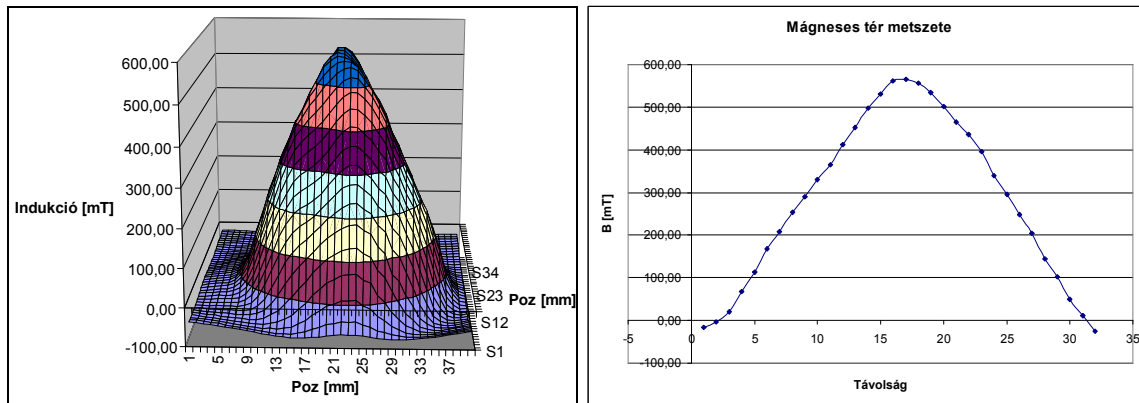
Ezen adatok alapján a szupravezetők üzemideje és a modellben használt indukció értékek alakulása a modellben alkalmazható, felhasználható.

7.3 Szupravezető állandó mágnes tartalmazó csőmotor

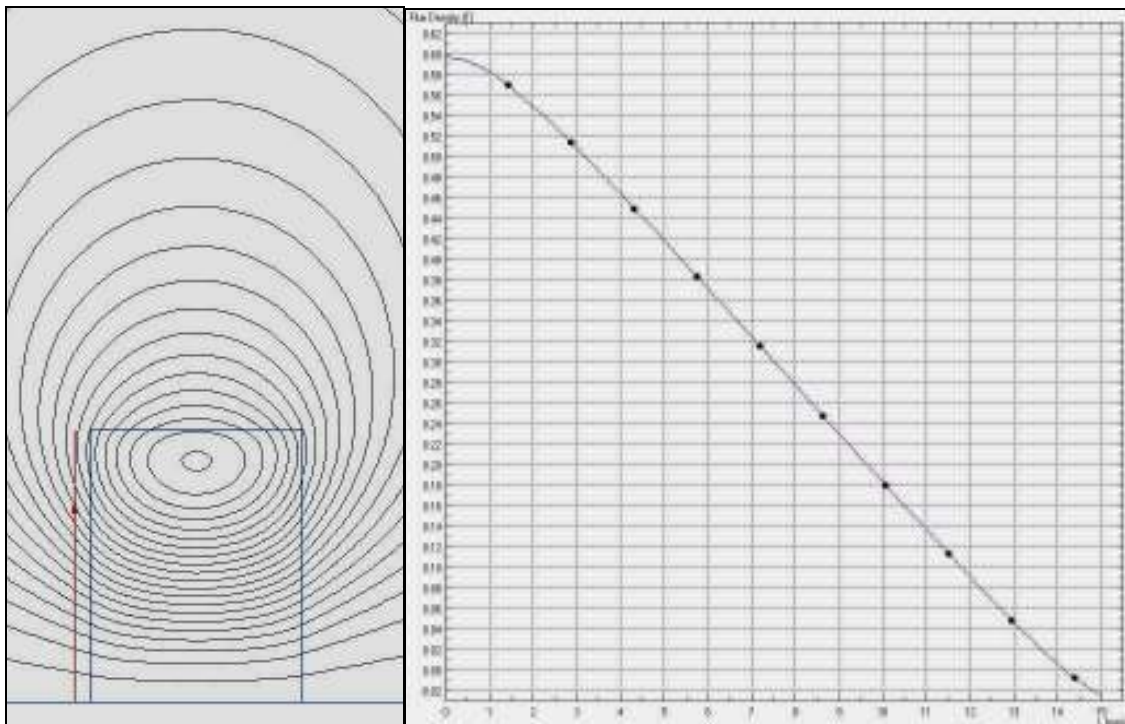
A magas hőmérsékletű szupravezető és az állandó mágnes alkalmazása közötti legnagyobb különbség, hogy a szupravezetők tulajdonsága a bennük kialakuló árnyékoló köráramokkal írható le. Ennek következménye hogy csőmotor konstrukciójukban a legnagyobb eltérést a mozgórészen elhelyezett gyűrűk közepén elhelyezett rúd anyaga fogja mutatni, mivel MHS anyagok alkalmazásakor ferromágneses rudat célszerű használni a mágnes-kör ellenállásának csökkentése miatt.

7.3.1 MHS Modellezés

Modellemben tehát az árnyékoló köráramokból indultam ki. A 68. ábrán a mért, majd modellezett paraméterek láthatók, melyek egyezése ennek megfelelően lehetővé teszi a szupravezetők elektromágneshez hasonló modellezését. A szupravezető modellezésekor $J_c = 1 \cdot 10^8$ A/m² áramsűrűség értéket használtam a gyártó adatai alapján (Iph07), illetve mindkét esetben 30 mm átmérőjű korong MHS-t alkalmaztam. Az eredmények látható módon egyezést mutatnak a mért adatokkal.



68. ábra: A mért mágneses tér



69. ábra: A szimulált értékek

ZFC hűtés utáni impulzuselemzéskor 580 mT mágneses teret fogott be a szupravezető, míg a végeselemes szimuláció (QuickField) esetén 595mT-t eredményezett. A 69. ábra tartalmazza a mágneses tér értékét az MHS felületén a különböző pontokban. A képet körszimmetrikus modellel készítettem, emiatt van a diagrammon 0-15 mm-es távolság ahol a 0 mm-nál levő érték a szupravezető közepére, a 15 mm-nél levő érték pedig a szupravezető peremére vonatkozik. Látható

hogyan alakja mindkét esetben azonos. A 68. – 69. ábrákon a szupravezető pereme utáni térrészben mind a mért, mind pedig a szimulált esetben is ugyanakkora ellentétes (negatív) nagyságú mágneses teret kaptunk. Látható tehát, hogy a mért és szimulált értékek azonosak, így a későbbiekben alkalmazott modell validálható a végelelem szimulációval.

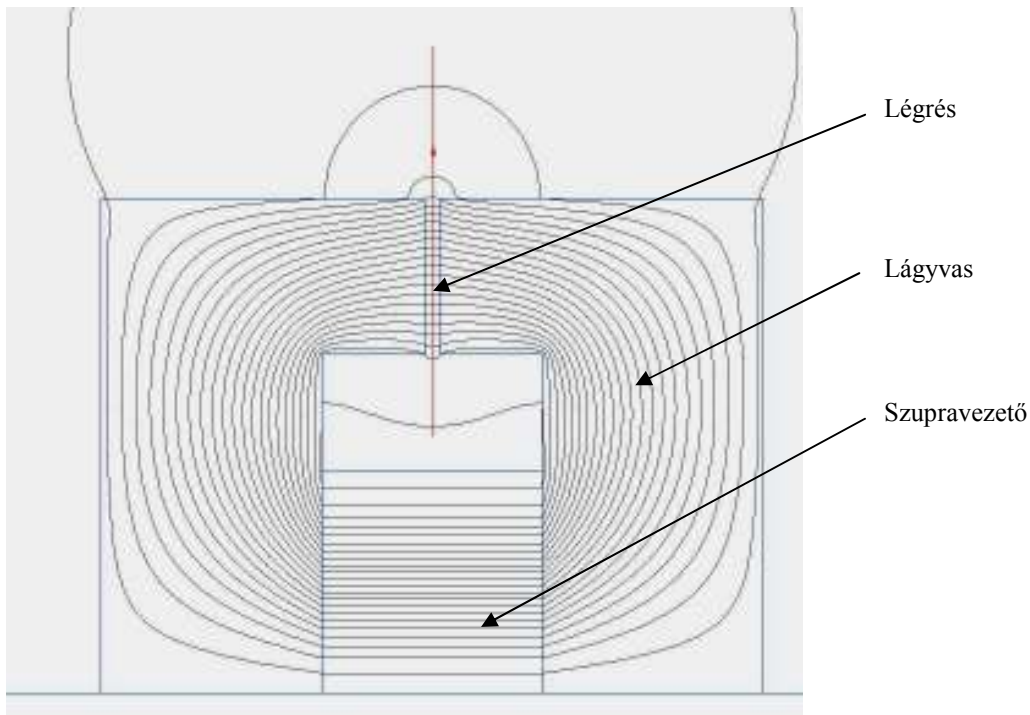
7.3.2 *Mágnes-kör modell (Maple 9.5)*

A 5.3.1 fejezetben tárgyalt mágnes-kör modell átalakításakor a következő fő paramétereket változtattam meg, hogy alkalmazható legyen szupravezetők modellezésére:

- A mágnes gerjesztését nem az állandó mágneseknél szokásos módon ($H_{\text{mágnes}} * L_{\text{mágnes}}$), hanem a szupravezető áramsűrűségéből, és az áramvezető keresztmetszetéből számoltam ($A_{\text{MHS}} * J_{\text{MHS}}$).
- A szupravezető felületén a fluxus nem konstans értékű.
- A szupravezető gyűrű „közepében” is van fluxus.
- A szupravezető gyűrűk ferromágneses rúdra vannak felhúzva.

7.3.2.1 A szupravezető gerjesztése

Mielőtt az említetteket alkalmaztam volna a geometria meghatározására, ellenőrzésképpen végelelem szoftverben (QuickField) is elkészítettem egy teszt elrendezést (70. ábra), melyből könnyen számolhatóak a gerjesztési paraméterek.



70. ábra: Végelelemes szupravezető mágnes-kör ellenőrző modell

A modellnél az ábrán látható mágnes-kör ellenállásait állítottam szembe az MHS gerjesztésével. Az analitikus számításhoz a következő képleteket használtam:

$$R_{lég} = \frac{L_{lég}}{\mu_0 \cdot A_{lég}} \quad [35]$$

$$R_{szup} = \frac{L_{szup}}{\mu_0 \cdot A_{szup}} \quad [36]$$

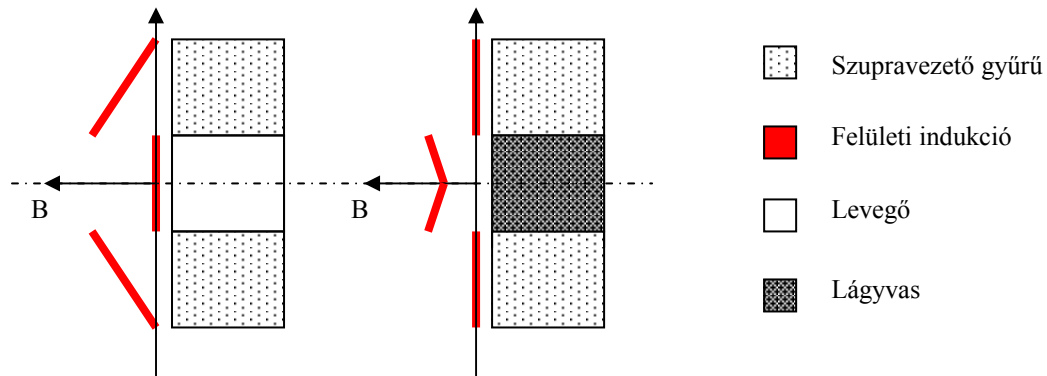
$$U_{szup} = A_{szup} \cdot J_{szup} \quad [37]$$

$$I = \frac{U_{szup}}{R_{eredő}} \quad [38]$$

Ahol \mathbf{R} az adott elem mágneses ellenállása, \mathbf{L} az erővonalak hossza az adott elemben, \mathbf{A} az elem keresztmetszeti felülete, \mathbf{J} az MHS áramsűrűsége, \mathbf{U} a gerjesztés, \mathbf{I} a fluxus, és $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$. Ezen képletek alapján a szupravezető gerjesztése és a mágnes-kör fluxusa analitikusan is számolható, és ezt a vége-selelemes modell (QuickField) segítségével is bizonyítottam, mely 10 %-nál csekélyebb eltérést mutat.

7.3.2.2A szupravezető fluxusa

A szupravezető gyűrű áramsűrűségéből, mint egy egymenetes tekercsből számolható a gerjesztés, melyből a mágnes-kör mágneses ellenállásainak tudatában kapjuk a felületi fluxust. A gyűrűnek, amennyiben légmagos, csupán a felületén lesz fluxusa, mivel az állórész lágyvas részei „elhúzzák” az erővonalakt. Azonban ha ferromágneses rudat helyezünk bele a gerjesztés következményeként létrejövő erővonalak abban fognak záródni. Ennek okán csupán a gyűrű belsejében lesz fluxus (71. ábra).



71. ábra: Szupravezető gyűrű felületi indukció eloszlása vasmaggal és légmaggal

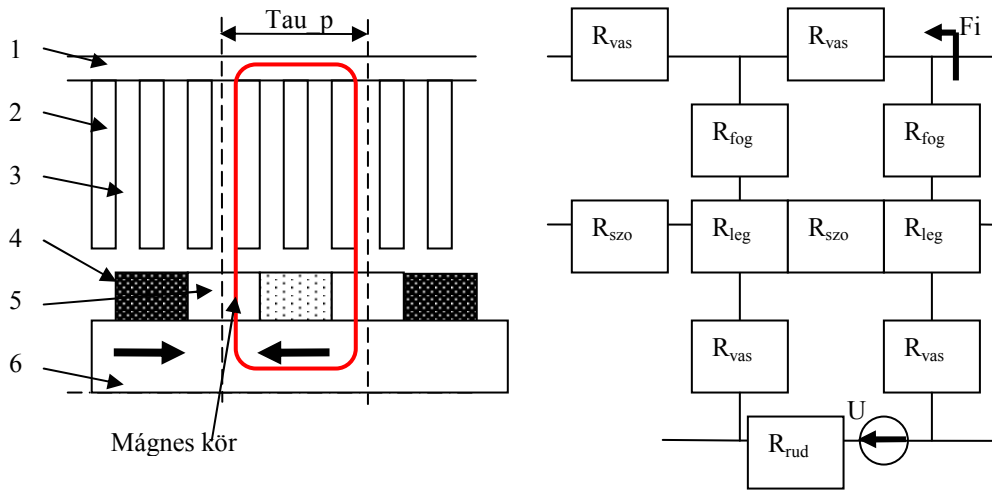
Ennek megfelelően a fluxus megmaradás szerint kell az 5.3.1 fejezetben részletezettek szerint a különböző mágnes-köri elemekben az indukciót, fluxust számolni. Ez az összehasonlítás is bizonyítja a csőmotorban alkalmazott MHS gyűrűk vasmagjának szükségességét.

7.3.2.3A modell felépítése

Az állandó mágneses modell felépítése (5.3.1 fejezet) lényegesen változik, amennyiben szupravezető gyűrűt szeretnénk alkalmazni. Az első bemenő paraméter a benne folyó áram maximális értéke. Ezeknél az anyagú MHS gyűrűknél ezt az értéket

a világirodalomban 10^5 A/cm²-ben maximálják, mely szerint 10^9 A/m²-es áramsűrűség realizálható. [Ipho7]

Ebben az esetben a benne elhelyezett ferromágneses anyag, még armco vas alkalmazásakor is ($B_{telítési}=2.1T$) könnyen betelíthet, tehát a szupravezető mágnes sugárirányú paraméterét kell elsősorban meghatározni. Így csupán a sugárirányú paramétertől fog függeni a mágnes-kör ellenállása, gerjesztési egyensúlya, illetve a MHS gyűrű belsejében a rúd telítése.



72. ábra: Mágnes-kör modell MHS alkalmazásakor (1:koszorú; 2: fog; 3:horony; 4: MHS gyűrű; 5: lágyvas gyűrű; 6: lágyvas rúd)

A 72. ábrán látható módon épül fel a mágnes-kör. Ennek megfelelően a modellben az MHS sugárirányú méretén, és a vas (pólus) tengelyirányú méretén kívül minden paraméter állandó. A vas mérete a fluxus megmaradás törvénye alapján a következő képlet alapján számolható.

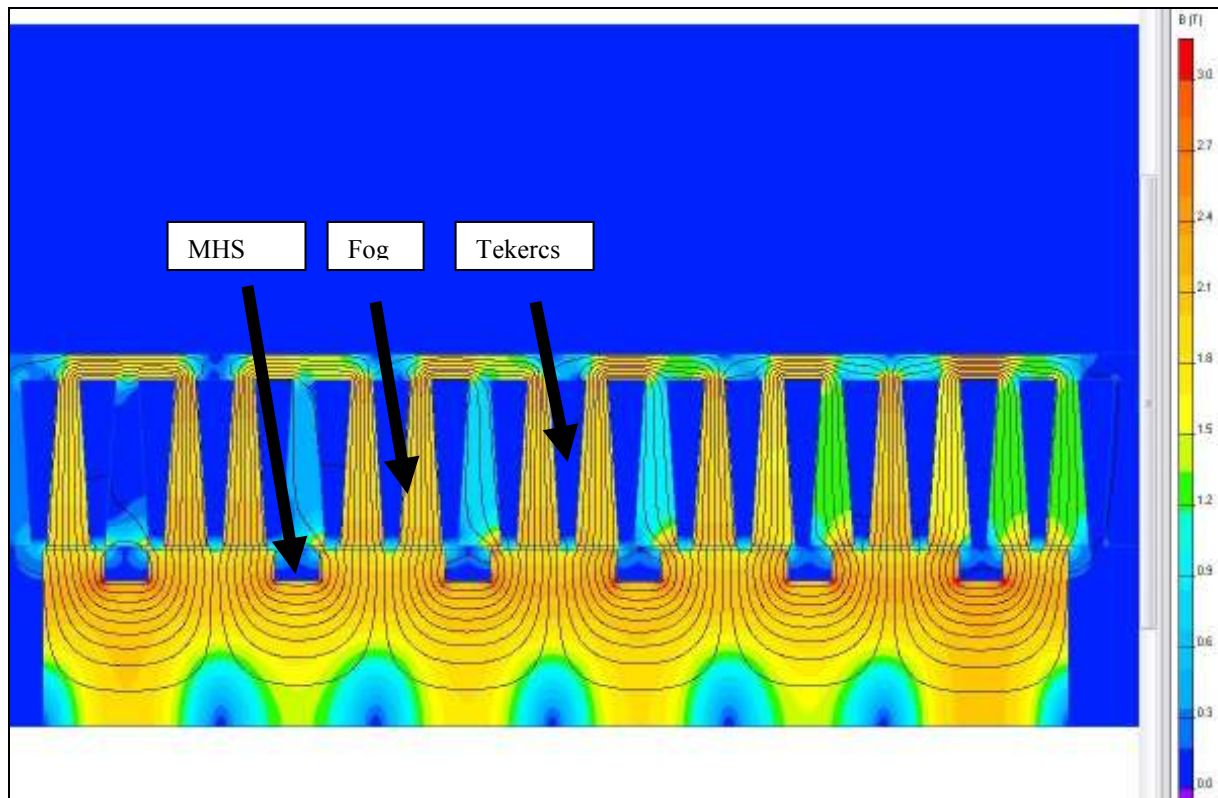
$$F_i = B_{szupra} \cdot A_{szupra} = B_{vas_pólus} \cdot A_{vas_pólus} \quad [39]$$

Ahol F_i a fluxus, B az indukció és A a felület. A lágyvas gyűrű felületének számítási képletéből (palást felület) kapjuk meg a vas (pólus) tengelyirányú méretét (gyűrű magassága).

A szupravezető mérete azonban a teljes mágnes-kör mágneses ellenállása és a szupravezető gerjesztése, létrehozott fluxusa alapján számolható a következő képlet alapján:

$$R_{eredő} \cdot F_i = A_{szupra} \cdot J_{szupra} \quad [40]$$

Ahol R a mágnes-kör eredő ellenállása, F_i a fluxus, A a szupravezető áramjárta felülete, és J az áramsűrűsége. Ebben a képletben az MHS sugárirányú mérete az ellenállás, a fluxus és a felület számítási képletében is benne van, mely egyenletrendszerből megkapjuk a pontos geometriai adatokat a véges elemes modell számára (5.4.1 fejezet). Az adatokat statikus tengelyszimmetrikus modellen a QuickField program segítségével ellenőriztem, mely tökéletes egyezést mutatott. A 71. ábra igen jól szemlélteti a méretezés következtében megvalósított 2T nagyságú teret a ferromágneses elemekben, amelyek így még éppen nem telítenek be.



73. ábra: MHS csőmotor mágneses erővonal és indukció térképe.

A 73. ábrán látható pontos geometria így már megfelelő, hogy a végeselemes modellel további számításokat végezzünk vele.

7.3.3 Végeselem modell (MatLab 7.1)

A végeselem modellben az MHS alkalmazásának következtében a következő változtatásokat kellett végrehajtani:

- A szupravezető áramsűrűsége lesz mértékadó a korábbi, állandó mágnesek mágnesezettsége helyett.
- Az alkalmazott anyagok mágneses tulajdonságai a szupravezetők hűtéséhez elengedhetetlen folyékony nitrogén jelenléte miatt jelentősen javulnak, mivel hőmérsékletük $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (77 K) lesz.

7.3.3.1 A szupravezetős csőmotor tekercseinek ellenállása

Szupravezető mágnes alkalmazásakor a folyamatos hűtésről gondoskodni kell. Ehhez esetünkben is folyékony nitrogént használunk, melynek hőmérséklete $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os (77 K). Ezen hőmérsékleten az állórész tekercsek ellenállása jelentősen lecsökken. A réz fajlagos ellenállási tényezője ($\alpha=4.33 \cdot 10^{-3}$), melyből a következő képlet alapján az ellenállás változás számolható:

$$R(t) = R(t_0) \cdot (1 + \alpha \cdot Dt) \quad [41]$$

Ebből következően a réztekercsek fajlagos ellenállása $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on (77 K) 0.0474 -szeresére csökken, ami jelentősen növelni fogja a szerkezet rövidzárási áramát, amely

így a fékezőerőt is nagymértékben befolyásolni fogja. A lemágneseződést azonban itt fokozottan figyelembe kell venni.

7.3.3.2 MHS gerjesztése

Az állandó mágnesektől eltérően a szupravezető mágnesek gerjesztését másképpen kell számolni. Ebben az esetben a pontos paramétereket a 7. táblázat foglalja össze.

Állandó mágnes		Szupravezető	
$U = H_{\text{mágnes}} \cdot L_{\text{mágnes}}$		$U = A_{\text{szupravezető}} \cdot J_{\text{szupravezető}}$	
$H_{\text{mágnes}}$	419 000 A/m	$A_{\text{szupravezető}}$	17 mm ²
$L_{\text{mágnes}}$	0.0044mm	$J_{\text{szupravezető}}$	10 ⁸ A/m ²
U	1843.6 A	U	1702 A
V	4144.8 mm ³	V	1958.91 mm ³

7. táblázat: MHS és ritkaföldfém mágnesek összehasonlítása

A 7. táblázatból látható, hogy a ferromágneses anyag alkalmazása miatt a gerjesztést (U) nem lehet növelni a telítés miatt. A szupravezetős gép állórészén az MHS gyűrű azonban fele olyan nagy térfogatból (V) megvalósítja az állandó mágnes gerjesztését, tehát energia sűrűsége kétszer olyan nagy.

A modellben a szupravezető áramsűrűségét 10⁸ A/m² re választottam a korábban említett világirodalomban elterjedt maximális 10⁹ A/m² helyett, hogy a relaxáció, az átmágnesezés, a technológia és a lemágneseződés hatásait együttesen így vegyem figyelembe. A paramétereket megváltoztatva és a szimulációt elvégezve a modellünk alkalmas a magas hőmérsékletű szupravezető mágneses mozgórészű csőgenerátor modellezésére.

7.4 Szupravezetős (MHS) csőmotor lehetőségek

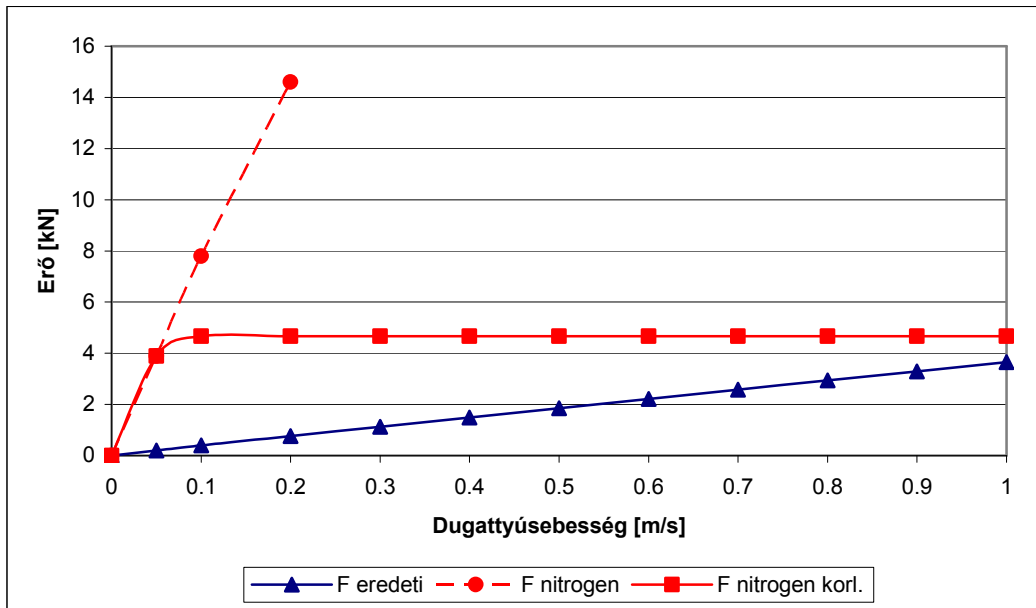
A mérési és modellezési vizsgálatok alapján különféle elrendezések, összeállítások valósíthatók meg. Minden összeállítást azonos maximális térfogatban készítettem el, ugyanis a hűtéshez szükséges térfogatot, illetve a felmágnesezéshez szükséges változtatásokat nem vettem figyelembe. Ennek megfelelően az összehasonlításom alapja az azonos befoglaló méretek feltételezése. A maximális térfogat egy 80 mm átmérőjű 300 mm hosszú henger, mely rendszer amplitúdója +/- 60 mm. Az elrendezéseket a teljesítmény, megépíthetőség, és a felmágnesezés szempontjaiból hasonlítom össze.

7.4.1 Nitrogénnel hűtött ritkaföldfém mágneses csőmotor

Elsőként a korábbi állandó mágneses csőmotort helyezem modell szinten folyékony nitrogénbe. Vizsgálataimban a dilatáció következtében bekövetkező feszültségektől eltekintek. A lágvas illetve a mágnesek tulajdonságainak változása (javulás) azonban fontos szerepet játszik a modellezésben. [Tak64]

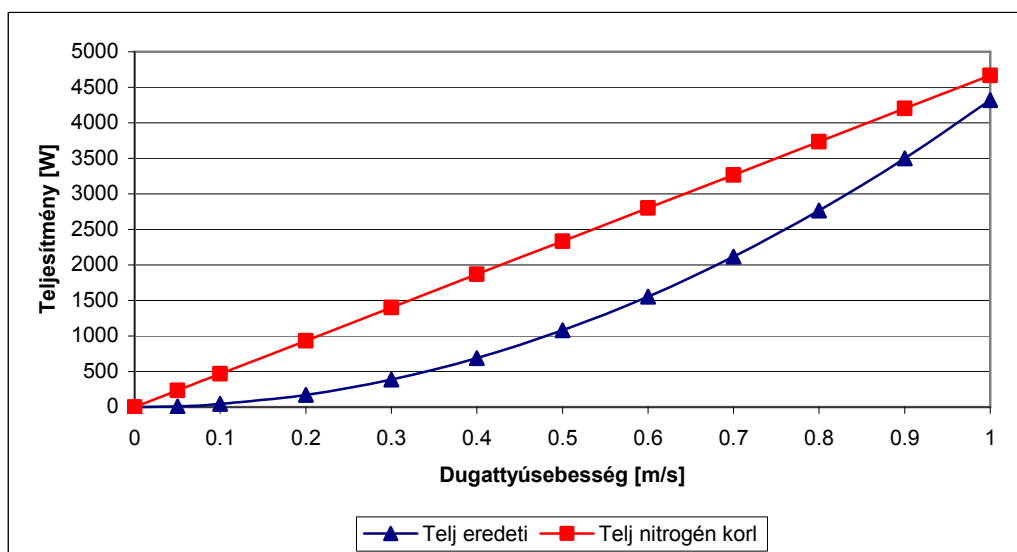
A modell futtatása után látható volt, hogy a folyékony nitrogén közeg következtében kialakuló alacsony hőmérséklet okán az állórész tekercsek ellenállása lecsökken, és emiatt nagy rövidzárási áramok fognak folyni. Ezen áramok mágneses tere lemágnesezheti az állandó mágnesünket, ezért az áramértéket a vezérlő elektronikával folyamatosan a maximálisan megengedhető érték alatt kell tartani.

Esetünkben a maximálisan megengedett áram 20 A, amelynek következtében a teljesítmény és a fékezőerő a 74. ábrán látható módon változik.



74. ábra: Folyékony nitrogénnel hűtött állandó mágneses csőmotor reakcióerejének alakulása

Látható, hogy a reakcióerő a rövidzárási áram korlátozásának következményeként nem megy egy bizonyos érték fölé. Ennek megfelelően a nem kívánatos teljesítményt el kell vezetni a csőmotor állórészéről. A 74. ábrán látható így kialakuló teljesítmény görbe a csőmotor állórész tekercsein megengedett maximális áram következtében kialakuló maximálisan megengedett teljesítmény, mely nem lehet ennél nagyobb. A megtermelt „felesleget” valamilyen módon kezelni kell. Mivel igen nagy teljesítményről beszélünk a feladat komoly nehézségeket vetít előre a kábelcsatlakozások vagy a vezetők árnyékolásának témakörében.



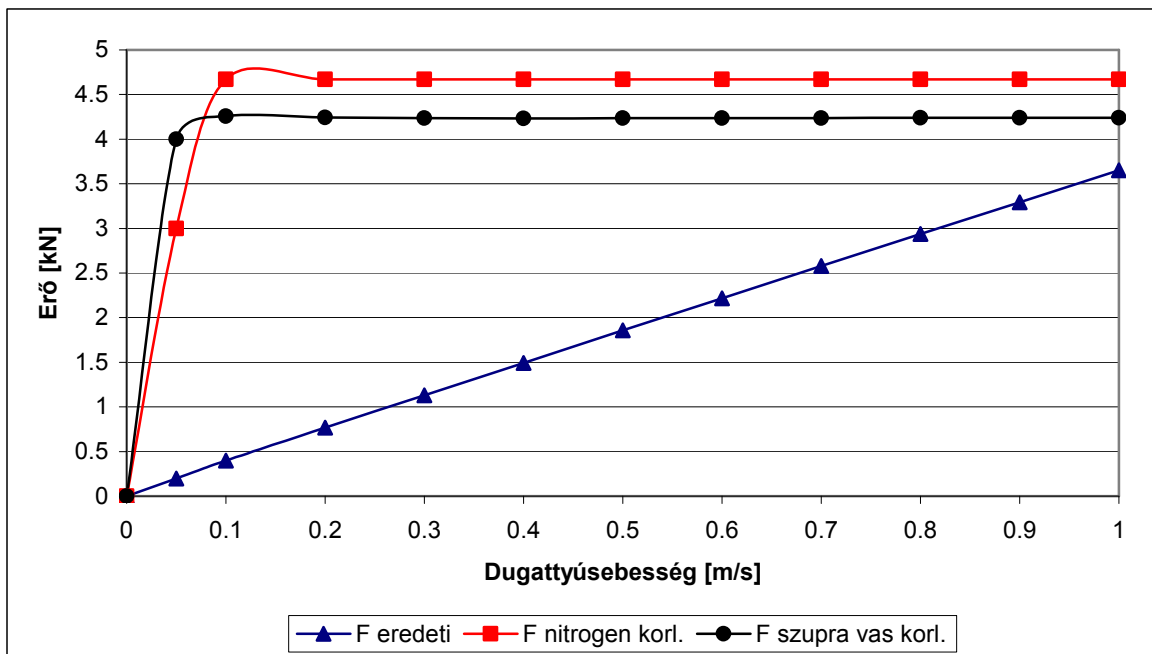
75. ábra: Folyékony nitrogénnel hűtött állandó mágneses csőmotoron megengedett maximális teljesítmény értéke

A 75. ábrán látható, hogy az állórészen kialakuló teljesítmény alakulása ebben az esetben lineáris, hiszen a lemágneseződés miatt az áram a dugattyúsebesség függvényében nem változik. A hűtéshez szükséges berendezést, illetve a folyékony nitrogén utánpótlására szolgáló egységeket be kell építeni a rendszerbe, melyeknek helyszükséglete a hőszigetelő elemek vastagságától, korszerűségétől függ.

7.4.2 Ferromágneses MHS csőmotor

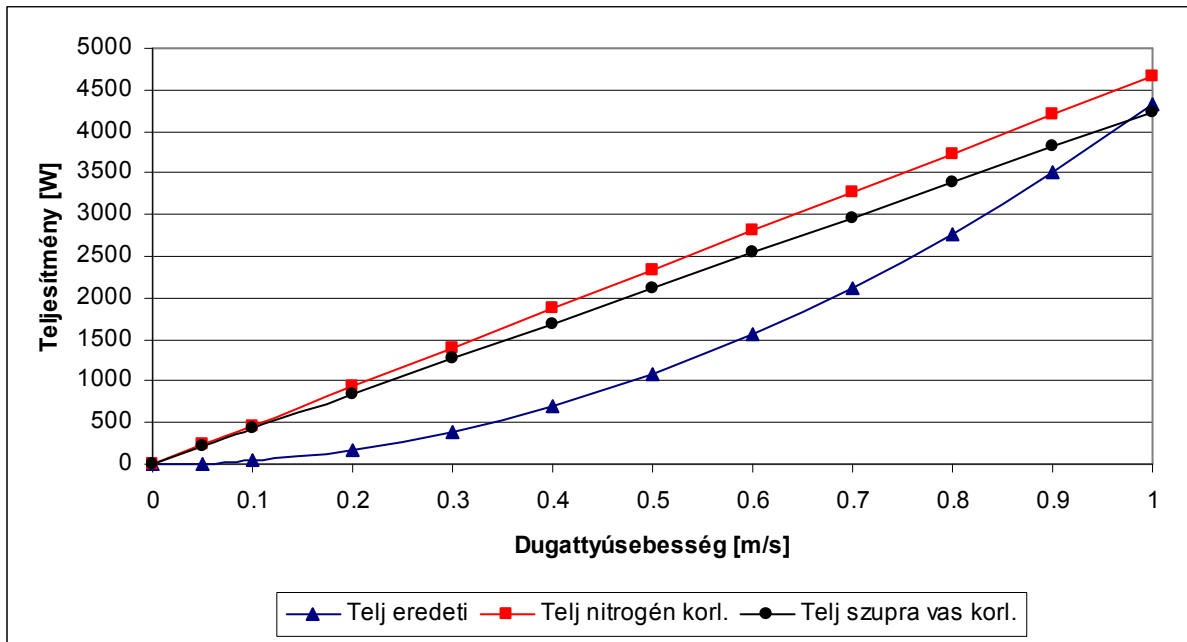
Ennél a szerkezetnél már szupravezető gyűrűket alkalmazok a modellben a csőmotor mozgórészén. Az MHS maximális áramsűrűség értékét tehát a korábbiakban említettek szerint 10^8 A/m² értékre választottam. A szimulációhoz használt modell felépítését a 5.3.1. fejezetben tárgyaltam, ezért itt csupán a végeredményt mutatom be. A 76. - 77. ábrákon szintén a reakcióerő és a teljesítmény alakulása látható.

A gép a vasmag anyagon kívüli eltéréseket is mutat az állandó mágneses szerkezettől. A ferromágneses anyagok telítődése miatt a szupravezető gyűrűk között lévő ferromágnes gyűrűk tengelyirányú mérete lényegesen megnövekedett, melynek következtében a pólusosztás 8.4 mm-ről 19.2 mm-re nőtt. A pólusosztás mérete miatt a fogak tengelyirányú mérete nem, azonban a hornyok mérete jelentősen megnőtt, tehát a hornyok menetszáma 40-ről 96-ra módosult. Ez a paraméter a megengedhető rövidzárási áram maximális értékét fogja befolyásolni.



76. ábra: MHS ferromágneses csőmotorral elérhető maximális csillapító erő

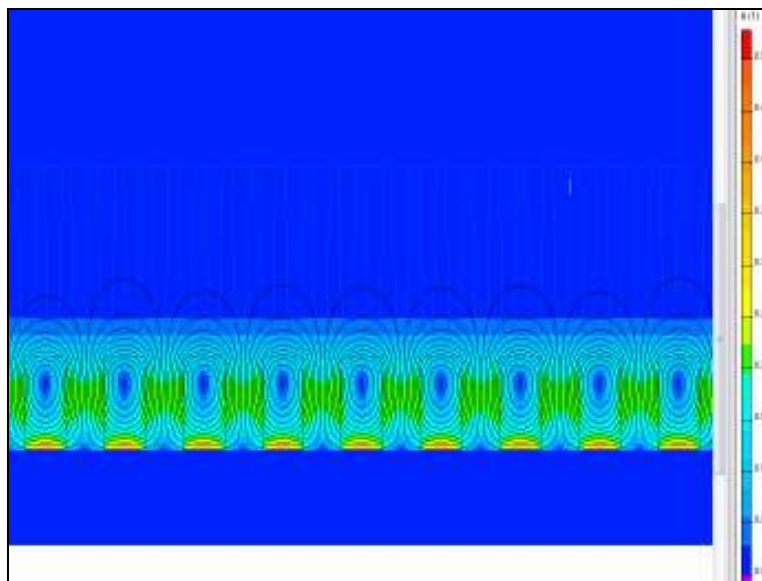
A 76. ábrából látható, hogy mivel a szupravezető mágnes gerjesztése csekély mértékben ugyan, de kisebb az állandó mágnes gerjesztésénél, a lemágneseződés miatt a fázisáramokat alacsonyabb értékre kell korlátozni. Az MHS csőmotor teljesítményével szintén az a probléma, hogy a lemágneseződés korlátozása miatt nem kívánatos teljesítményt valamilyen módon el kell vezetni a gép állórész tekercseiről. Ez a művelet komoly nehézségekbe ütközhet, hiszen az előző fejezetben is tárgyalt, hatalmas teljesítményekről lehet szó (77. ábra). [Zado5], [Zado8b]



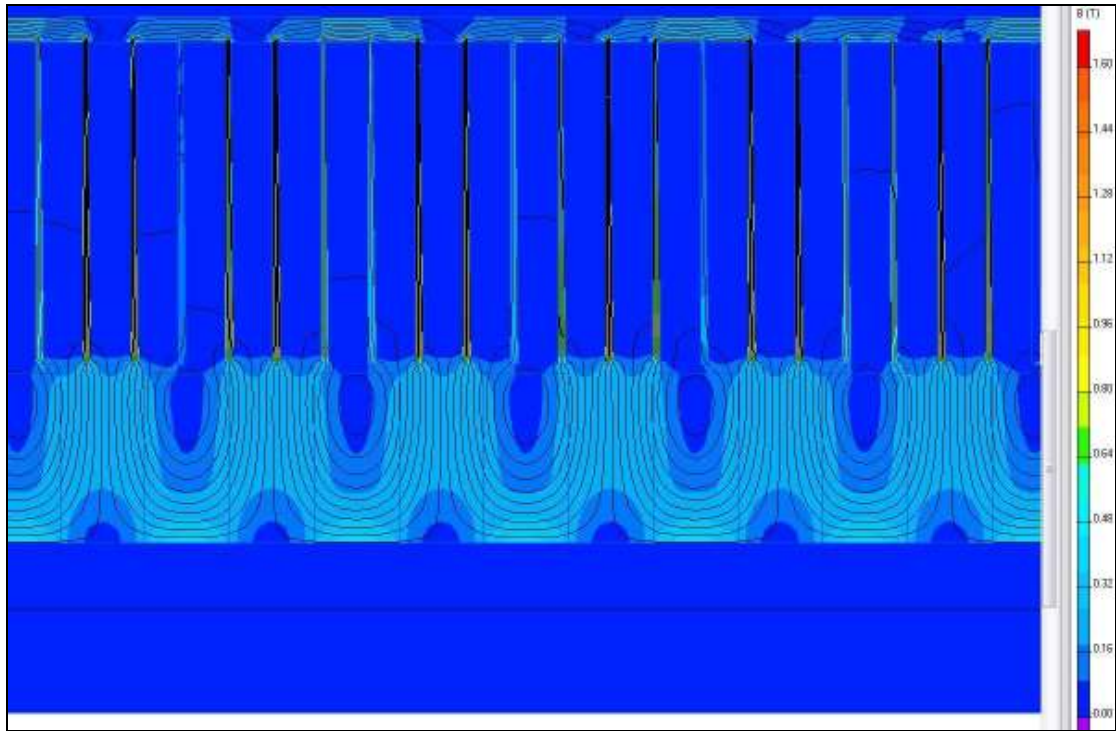
77. ábra: MHS csőmotor maximális teljesítményének alakulása

7.4.3 Paramágneses MHS csőmotor

Ebben a fejezetben a szupravezető gyűrűket paramágneses anyagokkal építem össze (pólusgyűrűk, fogak), tehát nem szükséges a vasak telítődésére méretezni a csőmotor teljes geometriáját, csupán a koszorút. Ebben az esetben a mozgórész teljesen azonos méretű, mint az állandó mágneses rotor, az állórészen azonban a fogak méreteit, amelyek ebben az esetben nem mágneses vezetők, lényegesen lecsökkentettem. Ekkor a szupravezető gyűrű lényegesen nagyobb mágneses ellenállású körben helyezkedik el. A 78. ábra szemlélteti, hogy mennyire elenyésző mértékben mágnesezi át az MHS gyűrű a levegőt.

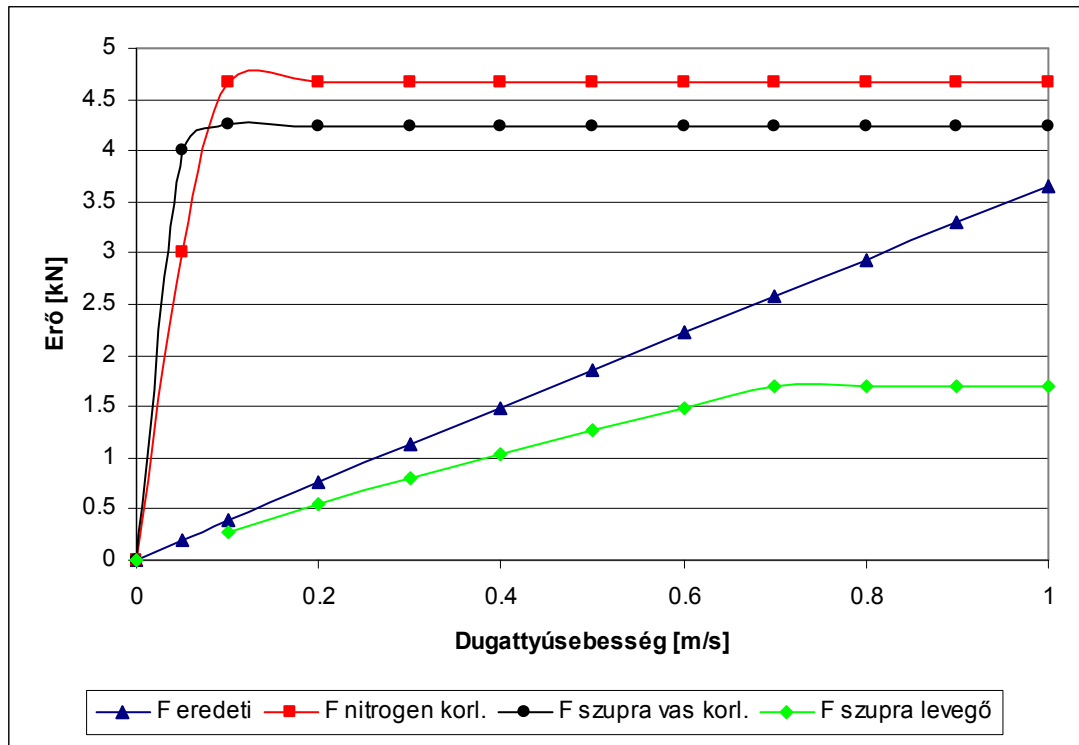
78. ábra: Paramágneses anyagú MHS gyűrűs csőmotor erővonal és indukció eloszlási térképe ($B_{\text{légrés}}$: 0.15 T)

A 78. ábrából látható, hogy ennél a megoldásnál az indukció eloszlása nagyon csekély, tehát az indukált feszültség is kis értékű lesz, éppen ezért optimalizálást követően olyan konstrukciót és geometriát alkalmaztam, amelynél az állórész ferromágneses anyagból van. Ez azért fontos, hogy a lágyvas telítődéséig a mágneskör ellenállását csökkentse. Ebben az esetben a 79. ábrához hasonló erővonalképet és indukció eloszlási térképet kapunk.



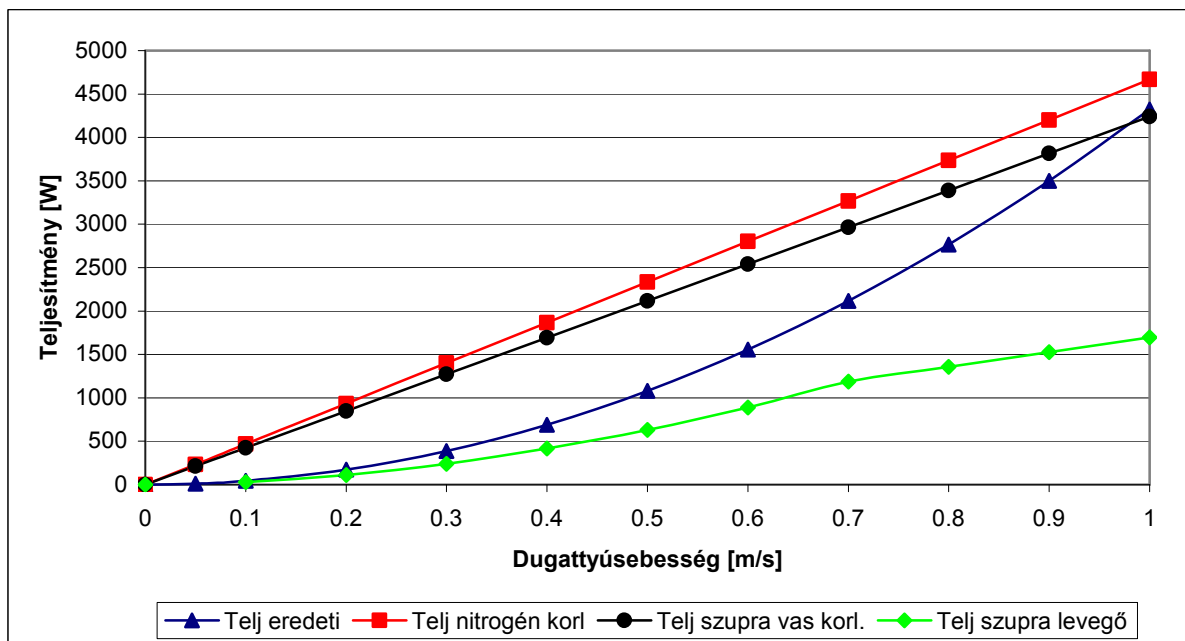
79. ábra: Ferromágneses állórészű és paramágneses mozgórészű MHS gyűrűs csőmotor erővonal és indukció eloszlási térképe

Látható, hogy ebben az esetben a mozgórész mozgásának következtében a tekercsekben nagyobb feszültség fog indukálódni, és a mozgórész mágneses tere is nagyobb, amiknek együttes következményeként várhatóan egy értékelhető fékezőerőt fogunk kapni, melyet a 80. ábra szemléltet.



80. ábra: Paramágneses MHS csőmotor reakcióerejének alakulása

A 80. ábrából jól látható (F szupra levegő - világos görbe), hogy ennél a típusnál a reakcióerő nem közelíti meg a hagyományos gép erejét sem, ugyanakkor a lemágneseződés miatt is csökkenteni kell a fázisáramokat. Ennek megfelelően a teljesítményviszonyok is kedvezőtlenebbek, mint a többi vizsgált gépnél, melyet a 81. ábra is szemléltet.



81. ábra: Paramágneses csőmotor maximális teljesítményének alakulása

Az eredmények alapján ilyen térfogatból és elrendezés alkalmazásakor nem érdemes légmagos, paramágneses csőmotort alkalmazni, mivel reakcióerejében nem tükröződik az MHS anyagok nagy energiasűrűsége. Az anyag előnyeinek kihasználásához ettől lényegesen eltérő geometriára és további jelentős optimalizálásokra van szükség.

7.5 Összefoglalás

Az MHS csőmotoroknál két alapvető felépítésű gépet modelleztem. A ferromágneses és a paramágneses elemekből állót. Ezen gépek reakció erejét (rövidzárásban) hasonlítottam a hagyományos (szobahőmérsékletű), illetve a folyékony nitrogénnel hűtött (77 K) állandó mágneses gépek reakció erejéhez. A ferromágneses MHS gépnél a telítési indukció korlátjai miatt a szupravezető gyűrű térfogatát kell csökkenteni, hogy a gép pólusindukció értékei ne legyenek nagyobbak mint az alkalmazott lágyvas telítési értéke, ami az állandó mágneses csőmotor indukció értékével egyezik meg. Felépítésükben a legnagyobb különbség a mozgórész dugattyúrúdjának anyaga, amelyet MHS gépnél ferromágneses anyagból célszerű kialakítani, hogy a mágnes-kör mágneses ellenállása csökkenjen. Egy ilyen gépnél az MHS mágnes térfogata fele az állandó mágneses gép mágnes-gyűrű térfogatának azonos pólusindukció eléréséhez. A „hasonló” mágnes-kör átmágnesezéséből következik, hogy a gerjesztésük közel azonos, tehát a lemágneseződés veszélye következtében a fázisáram korlátozása is azonos mértékű. Ennek köszönhetően ezen alapparaméterek mellett a reakcióerők alakulása a hűtött állandó mágneses illetve a szupravezetős gépnél közel azonosak. A lemágnesezés veszélye miatti fázisáram korlátozáskor nagyon komoly problémát okozhat.

A paramágneses elemekből felépített MHS csőmotor reakció ereje nem éri el a hagyományos gép reakcióerejét sem, ezért ilyen eszköz alkalmazása csupán optimalizálások után eltérő geometria alkalmazásával érdemes használni, ahol az energiasűrűségét és egyéb előnyeit is ki tudjuk használni.

7.6 Új tudományos eredmények az MHS csőmotor témakörében

3. tézis:

Analitikus és végeselemes modellekkel végzett számítások alapján bebizonyítottam és mérésekkel támasztottam alá, hogy a személygépjárműben lengéscsillapítóként alkalmazott fogazott 3 fázisú és 77 K hőmérsékletre hűtött csőgenerátor mozgórészén alkalmazott Jc-B görbével jellemzett magashőmérsékletű YBCO szupravezető (MHS) gyűrűs mozgórészű, egyforma befoglaló méretekkkel rendelkező géppel azonos fékezőerő érhető el, mint az ezen a hőmérsékleten működő N35 típusú állandó mágneses (B-H görbével jellemzett) géppel.

Publikációk:

Zádor István– Dr. Vajda István, „Állandó mágneses illetve szupravezetős fél-aktív lengéscsillapító tervezési lépései”, Tavasz Szél konferenciakiadvány, old. 147-152, Budapest, 2007

Istvan Zador - Denes Kiraly - Dr Istvan Vajda, „Synchronous tube machine optimization for vehicle shock absorber using permanent or superconducting magnets”, Applied Superconductivity Conference proceeding (CD), USA, 2008.

A jelenlegi tipikus adatokkal egyszerűsített modellt készítettem a már általam korábban megalkotott modellek alapján, mely így lehetővé teszi adott térfogatból

megvalósítható MHS mozgórészű csőmotor csillapító erejének számítását. Lehetőség van vasmagos és vas mentes (légrés tekercselt) kivitelű gépet is modellezni. Az MHS anyag adott hőmérsékleten a J_c -B görbéjével van jellemezve és mérések alapján készült eljárás szerint van figyelembe véve a technikai szempontból összetett relaxációja. Ezen gépeket hasonlítottam össze a hagyományos, illetve a folyékony nitrogénnel hűtött állandó mágneses gépekhez. Összehasonlításom alapja az azonos befoglaló méret volt. Felépítésükben a legnagyobb különbség hogy az MHS az árnyékoló köráramokkal jellemezhető Ennek megfelelően fő különbség a szerkezetekben a mozgórész dugattyúrúdjának anyaga, amelyet szupravezetőknél ferromágneses anyagból célszerű kialakítani, hogy a mágnes-kör ellenállása kisebb legyen. A közel azonos mágnes-kör méretezésből következik, hogy a gerjesztésük hasonló, tehát az irreverzibilis lemágneseződés veszélye következtében a fázisáram korlátozása is azonos mértékű. Ennek köszönhetően, és ezen feltételek mellett, a reakcióerők alakulása a hűtött állandómágneses illetve a szupravezető gépnél közel azonosak.

3.1

Mérésekkel igazoltam, hogy az MHS csőmotor mozgórészén alkalmazott ~ 1 T maximális mágneses térre felmágnesezett és azonos pólusokkal egymással szembefordított (30 mm átmérőjű és 10 mm magas YBCO) szupravezető mágnes korongok közötti statikus taszító erő 10 és 5 mm közötti összeszorításkor az időben százalékosan azonos mértékben csökken.

Publikációk:

Istvan Zador - Denes Kiraly - Dr Istvan Vajda, „Synchronous tube machine optimization for vehicle shock absorber using permanent or superconducting magnets”, Applied Superconductivity Conference proceeding (CD), USA, 2008.

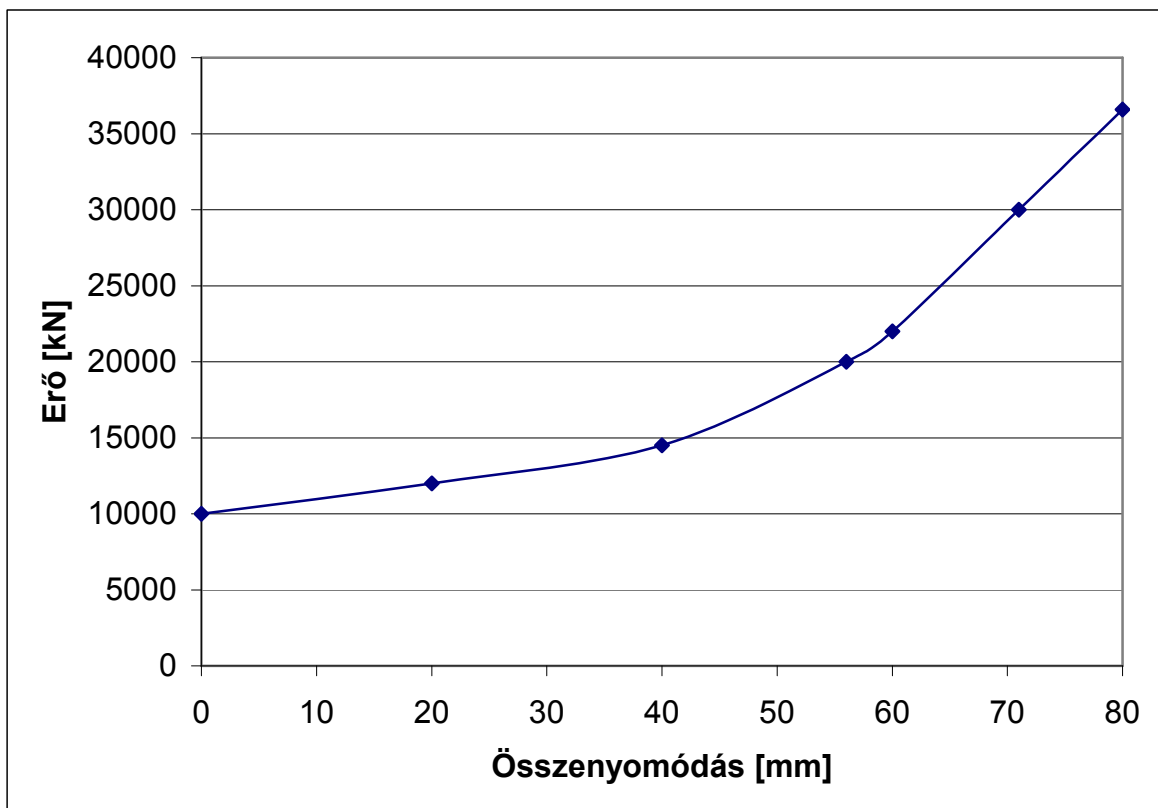
Ezeket a méréseket a Németországi Jénában lévő IPHT Kutatóintézet, szupravezető laboratóriumában végeztem el. A szupravezetőket (HG9 - Mo11) FC módon mágneseztem fel ($\sim 1,5$ T mágnesező tér), majd kontra-polár elrendezésben (azonos pólusaikkal szembe fordított) mértem az egymásra ható taszítóerőt. A taszítóerő mértékét egy fix pozícióba állított robotkarra szerelt nyúlásmérő bélyeges erőmérő szenzor mérte. Az adatokat számítógép rögzítette előre beállított időlépésenként. Mérésem célja a kontra-polár elrendezésű szupravezetők viselkedésének megismerése volt. A szakirodalom csupán egyetlen magában álló MHS relaxációjának alakulását tárgyalja de nem tér ki ilyen elrendezésű (kontra-polár) MHS mágnesek átmágneseződésének alakulására. A taszítóerő csökkenéséből lehet következtetni az MHS mágnesek felületi indukció értékük változására, melynek oka a szupravezetők relaxációja és az ezen elrendezés következtében kialakuló átmágneseződés.

8 ÁLLANDÓ MÁGNESEK MINT RUGÓK, A FELFÜGGESZTÉSBEN

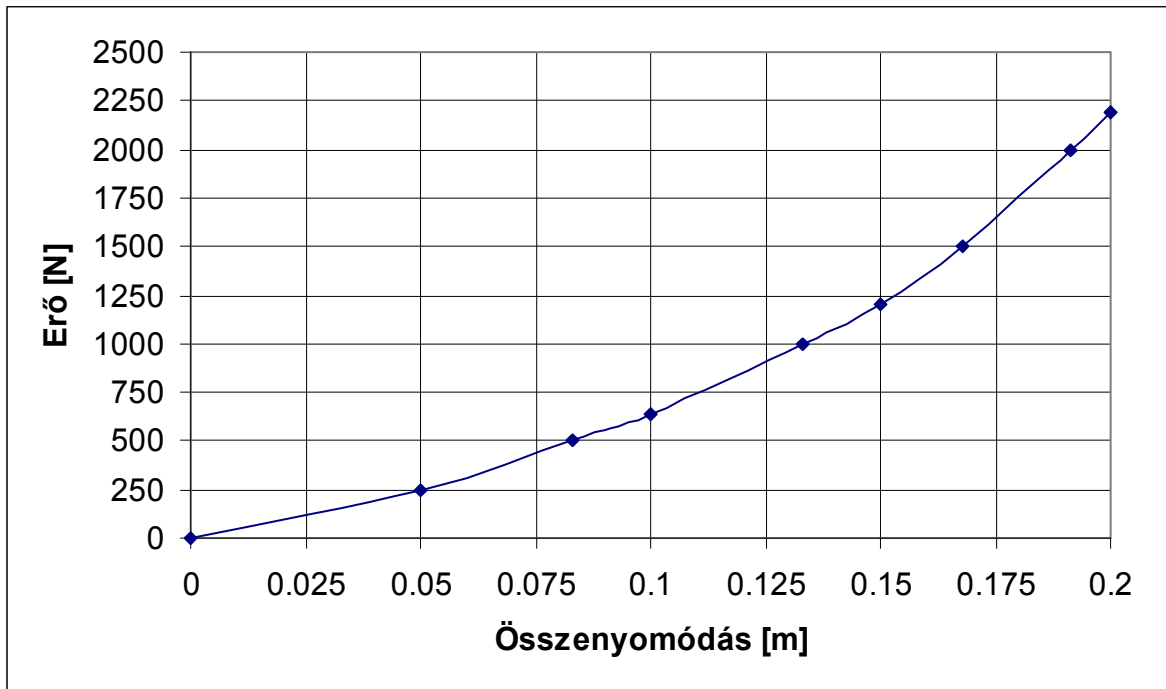
8.1 Irodalmi áttekintés

8.1.1 Hagyományos rugók a felfüggesztésben

Személygépjárműveknél különböző anyagú spirálrugókat alkalmaznak a gépjármű rugózásának biztosítására. Teherautóknál inkább légrugókat illetve laprugókat használnak. A laprugó pusztán karakterisztikájában tér el a spirálrugótól, azonban a légrugó lényegesen több funkció megvalósítására képes. A benne kialakult légnnyomással a jármű tengelymozgatására, azaz szintváltoztatásra is képes, ami fontos lehet buszoknál, mint utaskényelmi szempont (kocsiszekrény billentés felszálláskor), vagy nyerges vontatóknál az utánfutó felvételekor. Elsődleges feladatuk azonban, hogy a bennük tárolt energia segítségével biztosítsák a kerék és az útfelület folyamatos tapadását, érintkezését. Ez nagyon fontos a menetstabilitás és a biztonság szempontjaiból. [Lév78] Ilyen karakterisztikák a 82.-83. ábrákon láthatók.



82. ábra: Taurus TI-130-00 Tehergépjármű légrugó karakterisztika



83. ábra: Gépjármű rugókarakterisztikája

Céлом az volt, hogy bizonyítsam az állandó mágnesek rugókénti alkalmazhatóságát gépjárművekben. A felhasználás előnye lehet, a hosszú élettartam, az esetleges vezérelhető keménység, illetve a mágneses lengéscsillapítóval való kombinálás, mely eredményezheti a tisztán mágneses felfüggesztést.

8.1.2 Állandó mágneses lebegtetés

Pusztán állandó mágnesekkel stabil lebegtetés nem érhető el. Japánban, egy kutatási központban készítettek, egy olyan mágnesesen lebegő lábakon álló asztalt, mely közepén foglal helyet egy lineáris motor, mellyel a négy lebegő láb segítségével egyensúlyban tartják, és esetenként mozgatják az asztalt. A rendszer azért lehet fontos, mert az asztal teljesen elszeparált légkörben is mozoghat, hiszen a helység falát elkészíthetjük a lebegési légrétegben, amennyiben nem zavarja a mágneses környezetet. [Kee03]

MHS mágnes és állandó mágnes között kialakuló erőt vizsgálja egy Dél-Koreai egyetemi kutató csoport. Az MHS-t kritikus állapot modell szerint három dimenziós tengelyszimmetrikus végeselemes szimulációval vizsgálják. Az erőket Lorenz erők illetve Maxwell egyenleteivel számolják. Az eredményeket tapasztalati adatokkal vetik össze. Eredményként a Lorenz erő alkalmazását állapítják meg, mint a leginkább megfelelő számítási módszert. [Yon02]

A tengelyirányú és a transversális erőket vizsgálja egy Portugál kutató csoport a rugókban, mely állandó mágneseket tartalmaz. A szerkezet kétrétegű sík lineáris motorhoz hasonlít, melyek egyik végén helyezkedik el a szolenoid tekercs, mely a szabályozást végzi. Eredményként, tehát elkészült egy mágneses rugó, mely analitikus számításokkal számolható reakció erőt produkál. A számításokat mérésekkel validálták. [Lop06]

A Japánban lévő mágnesvasút lebegéséről a szerelvényen lévő nagyon erős rövidrezárt HTS elektromágnesek gondoskodnak. Ezen mező a pályán elhelyezett tekercsekben feszültséget indukál és az elektrodinamikus lebegtetés elvén megemeli a szerelvényt. Ezen eljáráshoz készült egy tanulmány melyben a fedélzeti HTS tekercsüket váltották fel speciális Halbach kialakítású mágnesekre és egy 1,5 m átmérőjű tesztkeréken végzett mérések alapján összehasonlították az effektusokat. A szimulációs eredmények nem vágtak össze teljes mértékben ezért további vizsgálatok szükségesek. [Huno8]

Japán kutatóintézetben vizsgálták a magas hőmérsékletű szupravezető mágnesek és az állandó mágnesek között kialakuló erő alakulását, melyet az árnyékoló köráram és befagyott tér modellezésével közelítettek. Ezen konstrukcióval megvalósítható a stabil lebegtetés, mely segítségével realizálható a mágneses rugózás. Vizsgálatokat végeztek különböző elrendezésekkel elérhető erőkarakterisztikákra. [Mas01]

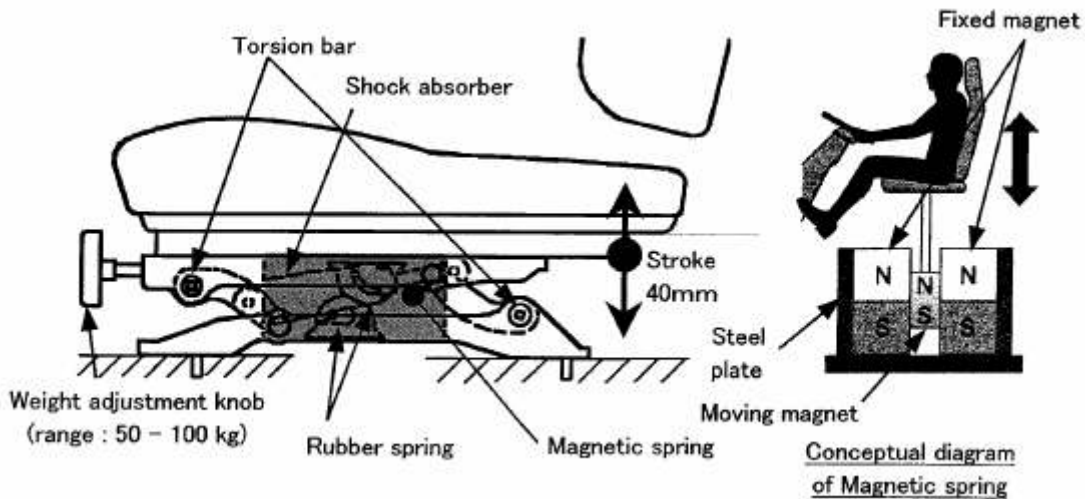
Japán kutatócsoportok a Keioi műszaki egyetemmel közösen vizsgálták az állandó mágnes – MHS rendszereket. A méréseknél 60 mm átmérőjű és 20 mm magas mintákat vizsgáltak. Megállapításuk szerint a mágneses tér sugárirányú gradiensétől függ leginkább a lebegtető erő. Ezzel együtt azt kapták eredményül, hogy ezen komponens növelése (külső mágneses tér) a szupravezető relaxációjának csökkenését is eredményezi. [Suzo8]

Ipari lineáris motorokat, megvezetőket, szervomotorokat, és mágneses rugókat (termékként) is forgalmaznak különféle alkalmazásokra a világon. Az Amerikai LinMot cég például fejlesztéseket is végez Svájci üzemében az egyedi alkalmazások kielégítésére. [Web06]

Kínai kutató intézetben végeztek méréseket mágneses rugókkal, melynél különböző méretű mágnes gyűrűket használtak. Azt tapasztalták, hogy a mágnesek közti taszító erő hasonló a spirálrugókéhoz, és értéke a mágnesek súlyának közel 100 szorosa. Ezen tengelyszimmetrikus összeállítás alkalmas csapágyak készítésére is amennyiben az egyik mágnes gyűrű forog. [Kun03]

Az Adelaide (Ausztrália) egyetemen végzett kísérletek horizontális és vertikális állandó mágneses rendszereket mutatnak be melyekkel megvalósíthatóak különböző rugóerő karakterisztikák. Eredményként a mágnesek passzív megvezetési vagy aktív vezérlési szükségletét vonják le következtetésként a szabadsági fokok megszüntetése miatt. Nagyon sokféle mágnes konstrukciót vizsgálnak és bemutatnak mágnes csapágy lehetőségeket is. [Wil05]

Japán kutatók vizsgálják mágneses rugók alkalmazását teherautók ülésénél. Ezen üléseknél meglehetősen kevés hely adódik a csillapítás megoldására, ezért vetették fel a mágneses rugó alkalmazásának lehetőségét. Az általuk kínált lehetőség lényegesen kisebb helyet és magasabb utazási komfortot kínál. A cikk ezen új kialakítású ülés „felfüggesztést” mutatja be (84. ábra).



84. ábra: Kialakítások [Sato3]

Az elkészült fejlesztés bekerült egy Mitsubishi teherautóba amit teszteltek is és igazolták a modelleken elért eredményeket. [Sato3]

Kanadai kutató intézetben készítettek szimulációs és analízáló modellt a mágneses rugó és lengéscsillapító fejlesztéshez. A rendszer két állandó mágnesből és a megvezetésre és a csillapításra szolgáló alumínium csőből áll. A mozgó mágnes sebességével arányos az alumínium csőben folyó örvényáramok mágneses terének csillapítása (lineáris), míg a mágnesek mérete, típusa szabja meg a passzív rugóerő karakterisztikát. Egy ilyen elemmel megvalósítható a passzív felfüggesztés. A modell elkészülte után prototípuson végzett mérésekkel igazolták a feltevéseiket. [Babo8]

8.2 Mágneses rugó kialakítása

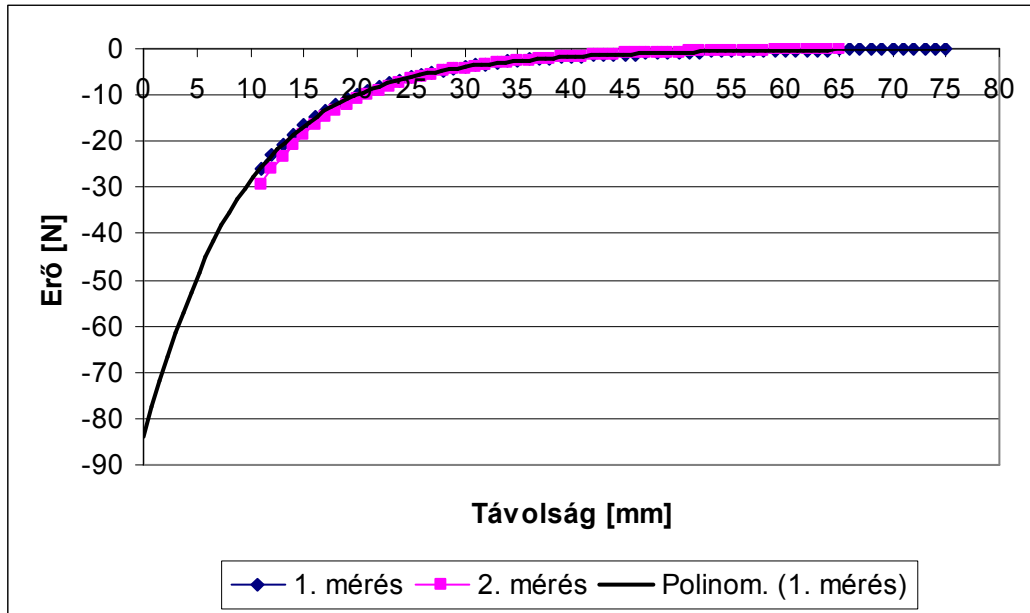
Mágneses rugót úgy készíthetünk, hogy az állandó mágneseket azonos pólusaikkal szembefordítjuk. Ez nem eredményez stabil lebegtetést, a mágneseket meg kell támasztani. Ha mozgatni is szeretnénk a rendszert akkor a megvezetésről is gondoskodni kell. Erre a célra általában egy paramágneses csövet használnak. Elektromágnesek nem jöhetnek szóba, hiszen akkor vagy lengőkábelek, vagy csúszó érintkezőket kellene alkalmazni, és folyamatos energia befektetés lenne szükséges a „lebegtetés” fenntartásához.

Munkám célja az volt, hogy összefüggést állítsak fel az alkalmazott állandó mágnesek paramétereit, méreteit és ferromágneses környezetük mágneses ellenállásának mértéke és a mágnesekkel megvalósítható rugóerő között. Ezek alapján az összefüggések és a modellek segítségével tetszőleges rugóerő karakterisztika megvalósítható megvezetett állandó mágnesek alkalmazásával.

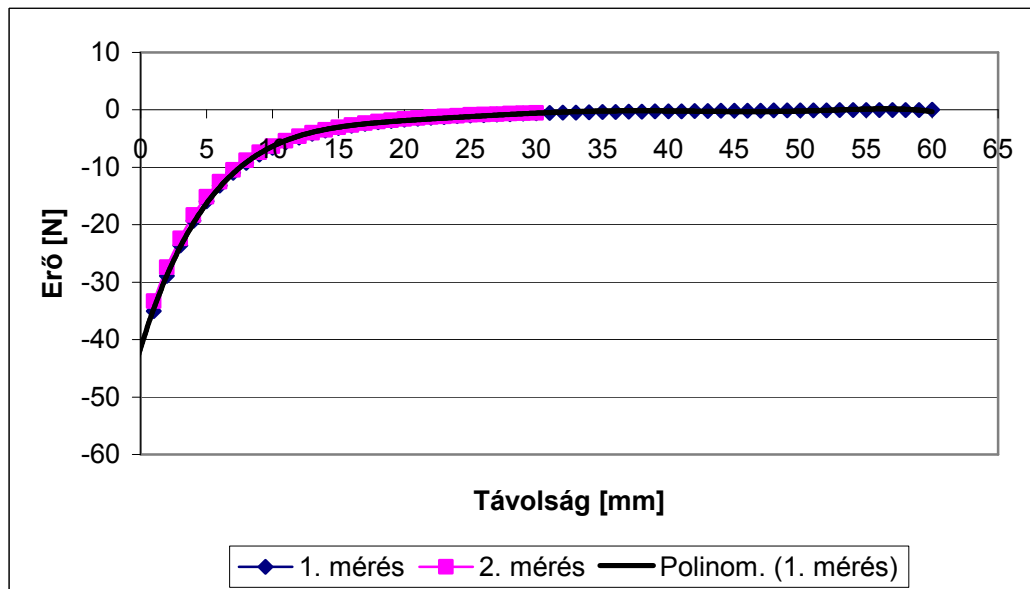
Kutatásaimhoz, a már korábban említett, neodímium ritkaföldfém állandó mágneseket használtam. A két mágnes között kialakuló taszítóerő meghatározására mérést, illetve analitikus és véges elemes (FEM) modellezést is végeztem. Az eredmények összehasonlítását követően optimalizáltam a rendszert és összefüggéseket tártam fel a mágnes paraméterek illetve az elért rugó karakterisztika jellege között.

8.2.1 Mágnesek közti taszító erő mérése

Az állandó mágnesek között kialakuló taszító erőt méréseken keresztül is vizsgáltam. Az erőmérő eszköz (nyúlásmérő bélyeges) erőmérési korlátai miatt a $d=25$ mm-es korong mágnes mérésekor az eszköz kiakadt, ahogy azt a 85. ábrán lehet látni, ezért kisebb, 10×15 mm felületű mágneseket használtam. (86. ábra) A görbékre 6-od fokú egyenletet illesztve, közelítettem a karakterisztikát.



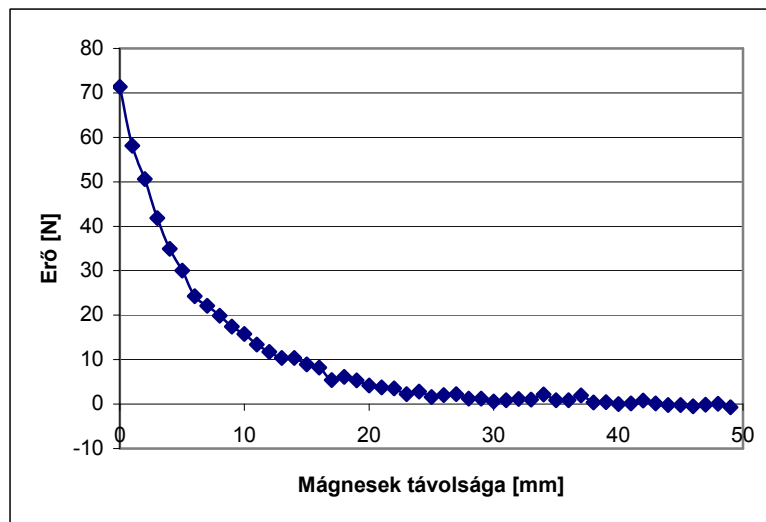
85. ábra: 25 mm átmérőjű mágnesek összeszorításakor fellépő erő



86. ábra: 10×15 mm mágnesek összeszorításakor fellépő erő

8.2.2 Végeselem modell (QuickField)

Az egymással szembefordított állandó mágnesek méretarányos elrendezését tengelyszimmetrikus ábrázolásban elkészítettem a QuickField nevű programban (25 mm átmérő és 5 mm magas mágnesek), mely segítségével a mágnesek között kialakuló reakcióerő kiszámítható. A program a 87. ábrán bemutatott eredményt adta a korong mágnesek között fellépő erő számításakor. Látható, hogy a mágnesek közelítésekor a taszító erő egyre nagyobb mértékben nő.



87. ábra: Két darab 25 mm átmérőjű korong mágnes között kialakuló taszító erő (71.367 N)

8.2.3 Analitikus számítás

A következő képletből kapjuk meg az adott felületű mágnesek (2 db) teljes összeszorításakor (0,1 mm) keletkező erőt.

$$P = 0,5 \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \quad [42]$$

$$A = \frac{F}{P} \quad [43]$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \quad [44]$$

Ahol $B=0.6$ [T], $\mu_0=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [Vs/Am], P a nyomás [Pa], A a mágnesek felülete, d az átmérője, míg F a köztük fellépő erő. Ezen értékek alapján a 8. táblázatban a következő eredményeket kaptam:

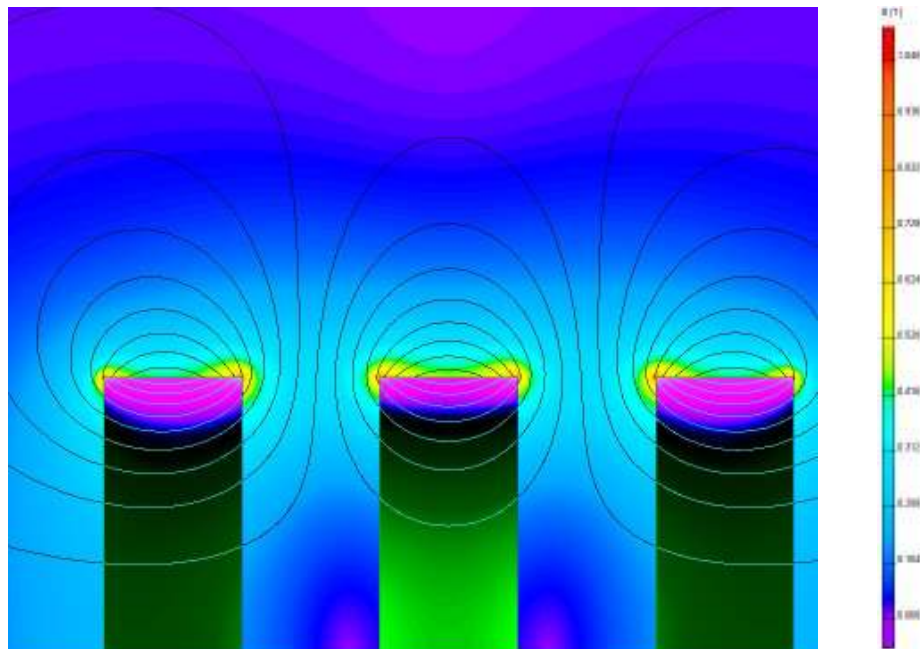
$F = 786,82$	$d = 83 \text{ mm } (\approx 90 \text{ mm})$
$F = 587,5$	$d = 72,2 \text{ mm } (\approx 70 \text{ mm})$
$F = 70,31$	$d = 25 \text{ mm } (25 \text{ mm})$
$F = 35$	$10 * 15 \text{ mm} = 150 \text{ mm}^2$
$F = 10.000$	$d = 300 \text{ mm}$
$F = 2500$	$d = 150 \text{ mm}$

8. táblázat: Adott geometriájú mágnesek analitikusan számított tasztító erői

8.3 Mágneses rugó optimalizálása

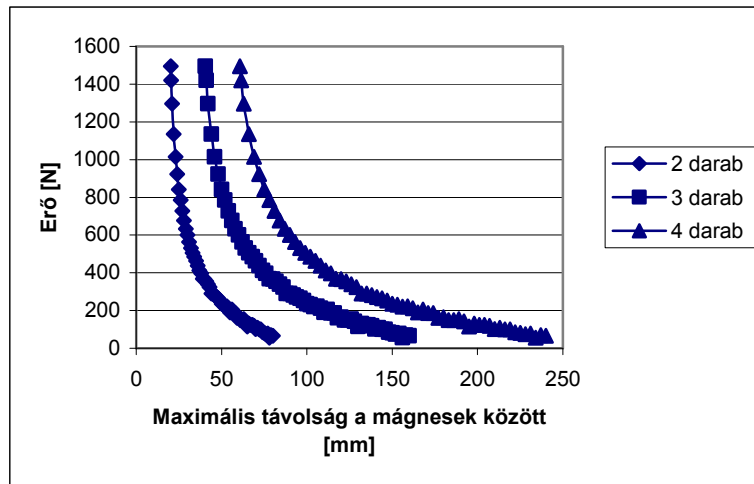
A 85. és a 86. ábrán illetve a 8. táblázatban látható tehát, hogy a mérések igazolták az analitikus és a véges elemes számítást is. 25 mm-es mágnesek között ~ 70 N, míg 10*15 mm-es hasáb mágnesek között ~ 38 N tasztító erő alakul ki. Ennek megfelelően bármelyik alkalmas a későbbi számításokhoz.

A továbbiakban csupán a FEM modellezést használtam a vizsgálatokhoz QuickField 5.2 szoftveren, hiszen ez szolgáltatja a leggyorsabb és pontos eredményt. A modellezéskor minden esetben statikus pozíciókat feltételezek, és a légsúrlódást elhanyagolom. A mágnesekben keletkező örvényáram veszteséget (csillapítás) azonban vizsgálni fogom. Elsőként különböző rugókarakterisztikák megvalósítását szerettem volna megvalósítani, melyhez több 10 mm magas és 300 mm átmérőjű mágnes korongot alkalmaztam. Modellezéskor a mágnesek távolságát változtattam több lépésben 0.25 mm-ig (88. ábra).



88. ábra: Három darab szembefordított mágnes erővonal képe

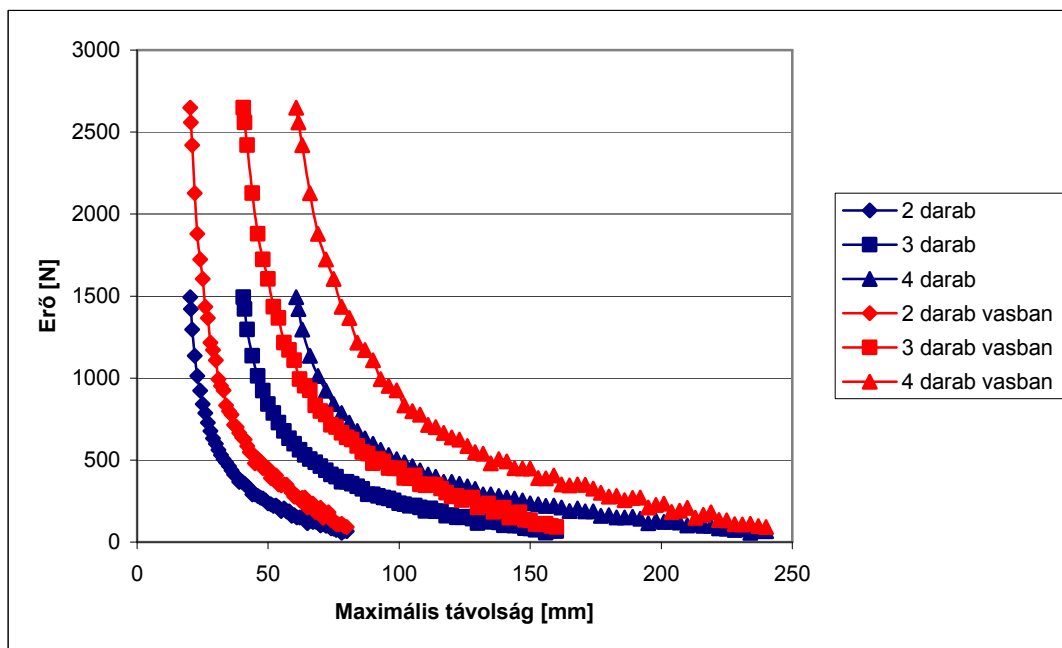
Ebben az esetben a rugóerő két mágnes között nem változik, de a több mágnes alkalmazása miatt a rugózó úthossz megnő (89. ábra).



89. ábra: Mágnesek darabszámának hatása az erőkarakterisztikára

8.3.1 Csőmotor állórészének alkalmazása

A karakterisztika tovább változik, amennyiben a mágnesek ferromágneses anyagú csőben vagy állórész tekercselésben mozognak. Ekkor ugyanis a mágnes-kör ellenállása, ami eddig levegőben nagy volt, komolyan lecsökken és így a mágnes felületi indukciója megnő, amely ebben az esetben taszító erőnövekedést fog eredményezni.



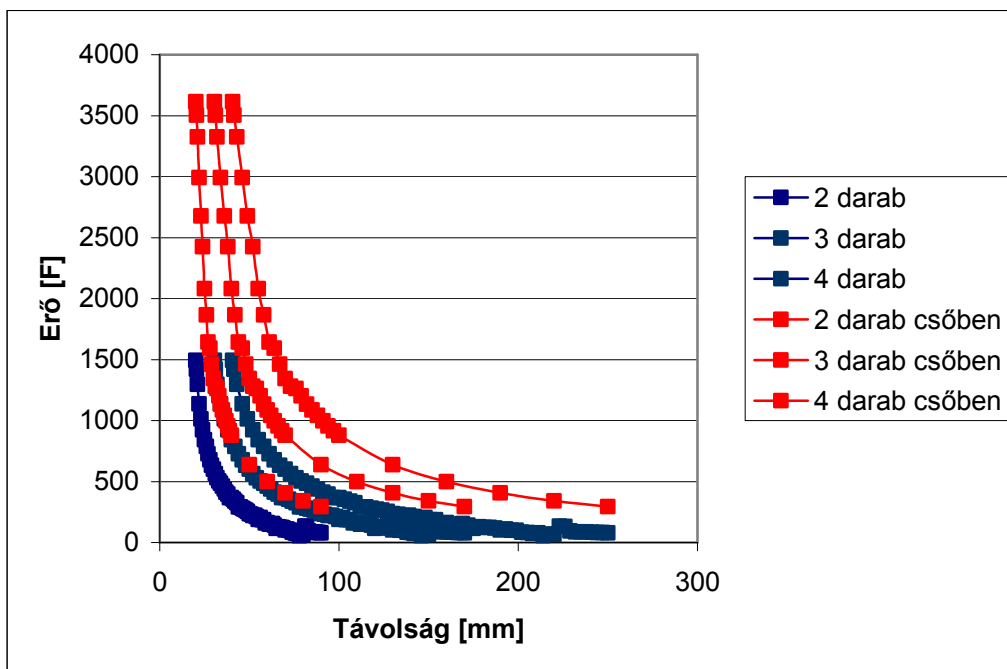
90. ábra: 2, 3, 4 darab ($D=300$ mm) mágnes között kialakuló taszítóerő levegőben és ferromágneses környezetben

A 90. ábrán látható, hogy igen sokféle karakterisztika megvalósítható. A világos karakterisztikák mutatják különböző darabszámú mágnesnél a lágyvas környezet hatását, mely a mágnes munkapontját megváltoztatva a mágnesek felületi indukció értékét megnöveli. Ennek okán növeli a mágnesek között fellépő erőt a levegőn

működő rendszerhez képest maximálisan 0.25 mm-es összenyomódást feltételezve ~40%-al. Ennél a rendszernél opcionálisan lehetőség van az állórészen elhelyezett tekercseket lengéscsillapítóként is használni a csőgenerátoroknál bemutatottak szerint, azaz vezérléssel együtt visszanyerni a lengési energia egy részét.

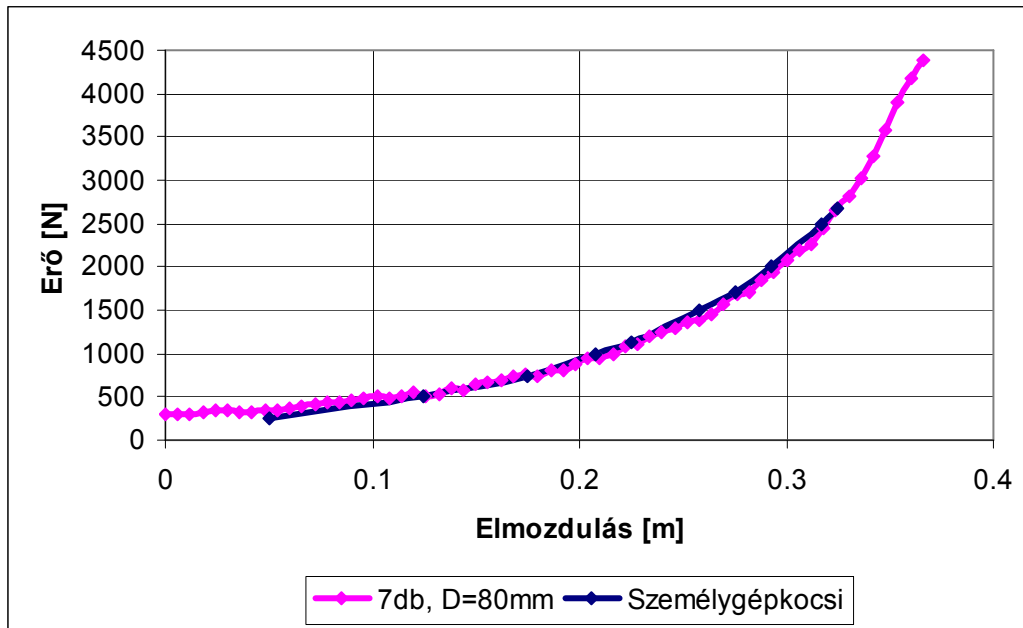
8.3.2 Ferromágneses cső alkalmazása

Ferromágneses csőbe helyezett mágnes-rendszerben (megvezetett mágnesek) kialakuló taszítóerő tovább növelhető, hiszen megfelelő falvastagságot választva a mágnes-körök ellenállása tovább csökken, ami a mágnesek felületén indukciönövekedést eredményez. Ennek köszönhetően a taszítóerő a mágnesek közti 0.25 mm-es maximális összeszorítást feltételezve további ~40%-al növelhető (91. ábra). Ebben az esetben azonban nincs lehetőség a vezérlésre illetve a lengési energia kinyerésére, hiszen nincs az állórészen elhelyezett tekercs.



91. ábra: 2, 3, 4 darab ($D=300$ mm) mágnes között kialakuló taszítóerő levegőben és ferromágneses csőben

Eredményként a 92. ábrán látható, hogy 7 db 80 mm átmérőjű neodímium mágnes koronggal megvalósítható egy átlagos személygépjármű rugóerő karakterisztikája. [Zado7c]



92. ábra: Mágnesekkel megvalósított személygépjármű rugóerő karakterisztika

8.3.3 Mágnesekben keletkező veszteségek

A mágnesekben kialakuló veszteségeket a 5.8 fejezetben tárgyaltak szerint réz és vasvesztéségeként számoltam. A paramétereket a legnagyobb dugattyúsebességre (1 m/s), a legkisebb távolságra (0.25 mm távolság) számoltam. A megváltozott anyagparamétereket a 9. táblázat tartalmazza.

Jel [mértékegység]	Érték	Magyarázat
Ro_réz [Ohm m]=	6.43E-07	fajlagos ellenállás
r_vez [m]=	0.075	a mágnes tárcsa sugara
A_vez [m ²]=	0.00075	a mágnes tárcsa keresztmetszete
Bo [T]=	0.1	legnagyobb indukció változás
fo [Hz]=	50	változás frekvenciája
σFe [kg/m ³]=	7000	a mágnes sűrűsége

9. táblázat: Mágnesekben keletkező veszteségek

A változók behelyettesítése után a egyik elrendezésnél sem tudtam lényeges veszteségeket kimutatni, azaz a veszteségek minden esetben 100 W/m³ alatt maradtak. Ennek megfelelően a mágneseket személygépjármű rugójaként alkalmazva vasmentes környezetet feltételezve a vas és rézvesztéségek nem fognak lényeges csillapítást előidézni.

8.4 Összefoglalás

Az állandó mágnesek alkalmazása, tehát lehetőséget nyújt hagyományos spirálrugók kiváltására. Jelenleg ezek a mágnesek még nem megfelelően erősek, ezért meglehetősen nagy felületeket kell létrehozni a hagyományos karakterisztikák megvalósításához. Az állandó mágnesek, esetünkben neodímium mágnesek (ritkaföldfém) még igen drágák, és a szembefordított elrendezésű működéshez

megvezetésről is gondoskodni kell, hiszen a rendszer nem stabil. Mindezek figyelembevételével az állandó mágnesekkel megvalósított rugóerő ugyan lehetőséget biztosít a személygépjármű felfüggesztésében való alkalmazásra, de a méret és kialakításbeli problémák illetve a mágnesek ára miatt még nem egyértelmű az alkalmazhatóságuk. Az egyszerűen gyártható és olcsó spirálrugók szerepét nagy valószínűséggel még egy ideig nem fogja felváltani.

8.5 Új tudományos eredmények az állandó mágnesek mint rugók témakörében

4. tézis:

Az állandó mágnesek méretével, darabszámával és lágyvas környezetük megfelelő megváltoztatásával tetszőleges rugóerő karakterisztika megvalósítható.

Publikációk:

Istvan Zador - Thomas Naber, „Elektromagnetische Komponente für Federung und Dämpfung im Fahrzeug”, Fahrwerk vertikaldynamik (CD), Deutschland, 2007.

Mágneses rugót úgy készíthetünk, hogy az állandó mágneseket azonos pólusaikkal szembefordítjuk. Ez általában nem eredményez stabil lebegtetést, ezért a mágneseket minden esetben meg kell vezetni, például egy csőben. A mágnesek közelítésekor azokban veszteségek alakulnak ki, melyek a lengést csillapító tényezőként jelentkeznek. Kutatásaimhoz a kereskedelmi forgalomban kapható, neodímium állandó mágneseket használtam. A két mágnes között kialakuló taszítóerő meghatározására mérést, illetve analitikus és végeselemes (FEM) modellezést is végeztem. Elsőként különböző rugókarakterisztikákat valósítottam meg modell szinten, melyhez több darab mágneskorongot alkalmaztam. Ebben az esetben a rugóerő adott távolságú két mágnes között nem változik, de a több mágnes alkalmazása miatt a rugózó úthossz megnő. A karakterisztika tovább változik, amennyiben a mágnesek ferromágneses anyagú csőmotor állórészében mozognak. Ekkor ugyanis a mágnes-kör ellenállása, ami eddig levegőben nagy volt, komolyan lecsökken, mely a mágnes munkapontját megváltoztatva a mágnesek felületi indukció értékét megnöveli. Ennek okán növeli a mágnesek között fellépő erőt a levegőn működő rendszerhez képest például 0.25 mm-es összenyomódáskor ~40%-al. Ennél a rendszernél opcionálisan lehetőség van az állórészen elhelyezett tekercsüket a csőgenerátoroknál bemutatottak szerint a lengési energia egy részének kinyerésére is használni. Ferromágneses hengergyűrűbe helyezett mágnes-rendszerben kialakuló taszítóerő tovább növelhető, hiszen megfelelő falvastagságot választva a mágnes-körök ellenállása tovább csökken, ami a mágnesek felületén további indukciónövekedést eredményez. Ennek köszönhetően a taszítóerő a mágnesek közti 0.25mm-es maximális összeszorítást feltételezve további ~40%-al növelhető. Ebben az esetben azonban nincs lehetőség a lengési energia részbeni kinyerésére.

9 KONKLÚZIÓ

Értekezésemben a gépjárművek futóművének elemeihez kapcsolódó kutatási irányokat három témakörben végzett munkámon keresztül mutatom be.

Elsőként megvizsgáltam a gépjárművek futóművében állandó mágneses szinkron csőmotorok alkalmazhatóságának lehetőségeit. Modellezési és mérési folyamatokon keresztül optimalizálom a szerkezetet, hogy alkalmazhatóságának lengéscsillapító specifikus feltételei teljesüljenek. Vizsgálom a mágneses, villamos, mechanikus és hőmérsékleti igénybevételeket, illetve a különböző alkalmazások, változatok teljesítményre gyakorolt hatását. Ezen munka eredményeképpen bebizonyítom, hogy a hagyományos lengéscsillapítók geometriájával megegyező szinkron csőmotor rendszerrel a kívánt lengéscsillapító karakterisztika megvalósítható a fékezőerő villamos vezérlésével és a lengési energia visszatáplálásával kiegészítve. Munkám eredménye továbbá, hogy tetszőlegesen rendelkezésre álló térfogathból eredményként a legnagyobb teljesítményt szolgáltató geometriájú gépet szolgáltatja.

Megvizsgáltam továbbá korunk egyik nagyon kiemelkedő és távolba mutató kutatások középpontjában lévő anyagának, a szupravezető kerámiának (MHS), csőmotorban mágnesként alkalmazhatóságának lehetőségét. Méréseken keresztül vizsgáltam a szupravezetők viselkedését, fizikáját, és mágnesezési lehetőségeit. Az elméleti háttér megismerése után modellt készítettem, és vizsgáltam a csőmotor mozgórészén való alkalmazás lehetőségét. Különböző típusú MHS motorok modellezését követően bebizonyítottam, hogy a hűtési folyamatok megvalósítása után nem szükséges szupravezetőket alkalmazni a mozgórészen, hiszen ezen a hőmérsékleten az állandómágneses csőmotor paraméterei is közel azonos teljesítményt eredményeznek. Modellemmel számolható az MHS csőmotorok/generátorok teljesítménye, reakcióereje.

Vizsgálataimban kitértem az állandó mágneses lebegtetés témakörére, melynél analitikus és végeselemes modellezésen illetve méréseken keresztül ismertem meg az effektust. Bebizonyítottam, hogy megfelelő méretű és darabszámú mágnesek segítségével megvalósíthatóak különböző jármű rugóerő-karakterisztikák, melyek tovább erősíthetőek a megfelelő ferromágneses környezet alkalmazásával. Ennek megfelelően alkalmazhatóak állandó mágnesek járművek felfüggesztésében, mely állórész tekercsrendszerrel kombinálva alkalmazható a jármű lengésének vezérelhető csillapításán túl a lengési energia visszatáplálására is. Ennek eredménye a tisztán mágneses elvű járműfelfüggesztés.

Szemléltetem tehát, hogy a jelenleg járműfelfüggesztésekben alkalmazott rendszerekben alkalmazhatóak állandó mágnesek, melyek pontos geometriája az igényeknek megfelelő paraméterekkel modelleimből számolható. Ezen rendszerek számos funkcióval segítik a járműdinamikai, utas kényelmi és biztonsági paraméterek javulását. Egyszeri beruházást követően működésük lényegében meghibásodás mentes és nem igényelnek folyamatos külső energia betáplálást sem.

10 IRODALOMJEGYZÉK

- [Ahm06] Ahmad M. Eid, Hyun-Woo Lee, Mutsuo Nakaoka, Cogging force minimization of linear Engine-coupled tubular permanent magnet linear AC synchronous Generator, 2006 Korea
- [Bab08] Babak Ebrahimia, Mir Behrad Khamesee, M. Farid Golnaraghi, Design and modeling of a magnetic shock absorber based on eddy current damping effect, Journal of Sound and Vibration 315, old. 875-889, 2008.
- [Ben00] T. Benkő: Relakszáció a szupravezetőknél, Sydkraft beszámoló, 2000
- [Bes07] Dr. M. Best, Linear electromagnetic actuation system for active vehicle suspension, EP/E005144/1, Aeronautical and Automotive Engineering, Loughborough University, 2007. 03.
- [Eid06] Eid, A.M. Ki-Young Suh Kwang-Ju Choi Ho-Dong Han Hyun-Woo Lee Nakaoka, M., A Unique Starting Scheme of Linear-Engine Tubular PM Linear Generator System Using Position Feedback Controlled PWM Inverter, Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE, 1-5 old. 2006
- [Fra99] Francis B. Hoogterp, Joseph H. Beno, Damon A. Weeks , An Energy Efficient Electromagnetic Active Suspension System, Electronic Steering and Suspensions Systems, 1999
- [Fra07] Francois, P.; Burrell, I.G.; Ben Ahmed, H.; Prevond, L.; Multon, B., 3D Analytical Model for a Tubular Linear Induction Generator in a Stirling cogeneration system, Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC apos;07. IEEE International Volume 1, 392 – 397 old.,2007
- [Golo1] R. B. Goldner, P. Zerigian, A preliminary study of energy recovery in vehicles by using regenerative magnetic shock absorbers, SAE Technical paper series, Washington DC. 2001
- [Gyu01] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, A novel design o fan air-core type permanent magnet linear brushless motor by space harmonics field analysis, IEEE transaction on magnetics, vol. 37, 2001 (3732-3736)
- [Has01] Aarsh Hassanpour Isfahani, Sadegh Vaez-Zadeh, Design optimization of a linear permanent magnet synchronous motor for extra low force pulsations, 2001
- [Hiro01] Hiroyuki Ohsaki*, Yuichi Tsuboi, Study on electric motors with bulk superconductors in the rotor, Journal of Materials Processing Technology 108 (2001) 148-151
- [Hiro03] M. Hirakawa, S. Inadama, K. Kikukawa, E. Suzuki, H. Nakasima, Developments of superconducting motor with YBCO bulk magnets, Physica C 392–396 (2003) 773–776

[Hun08] Hungje Cho, Duck Kweon Bae, Ho-Kyung Sung, and Jongmin Lee, experimental Study on the Electrodynamics Suspension System With HTSC and PM Halbach Array Magnets, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, 2008. 06.

[Iph07] IPHT kutatóintézet közzétett mérési adatai, mérés Jc 2007

[Ism06] Ismenio Martins, Jorge Esteves, Gil D. Marques, Fernando Pina da Silva, Permanent-Magnets Linear Actuators Applicability in Automobile Active Suspensions, IEEE Transaction on vehicular technology, Vol. 55, No. 1. 2006. 01.

[Jia99] Jiabin Wang, Geraint W. Jewell, David Howe, A general framework for the analysis and design of tubular linear permanent magnet machines, IEEE transaction on magnetics, vol. 35, 1999, (1986-2000)

[Jia03] Jiabin Wang, David Howe, Geraint W. Jewell, Fringing in Tubular permanent-magnet machines, IEEE transaction on magnetics, vol. 39, 2003 (3507-3522)

[Jia04] Jiabin Wang, David Howe, Geraint W. Jewell, A General Framework for the Analysis and Design of Tubular Linear Permanent Magnet Machines, IEEE transaction on energy conversion, vol. 19, 2004, (289-295)

[Jia05] Jiabin Wang, David Howe, Design optimization of radially magnetized, iron-cored, tubular permanent magnet machines and driver systems, IEEE transactions on magnetics, vol 40. 2004, (3262-3277 old.)

[Jia07] Jian X. Jin, Lu H. Zheng, Verification of levitation force between an HTS levitator and a permanent magnet, Physica C 460–462, old. 1457–1458, 2007.

[Jia08] J. Wang, W. Wang, K. Atallah, and D. Howe, Demagnetization Assessment for Three-Phase Tubular brushless Permanent-Magnet Machines, IEEE Transaction on Magnetics, Vol 44. No 9. 2008. 09.

[Jin00] J.X. Jin, S.X. Dou, F. Darmann, M. Apperley, T. Beales, Development of an HTS inductor for an electronic highvoltage generator, Physica C 341-348, old. 1601-1602, 2000

[Jör83] Jörnßen Reimpell, Fahrwerktechnik: Stossdämpfer, Vogel-Buchverlag, Würzburg, 1983

[Kee03] Kee-Bong Choi, Young Geun Cho, Tadahiko Shinshi, Akira Shimokohbe, Stabilization of one degree-of-freedom control type levitation table with permanent magnet repulsive forces, Mechatronics 13, old 587-613, 2003

[Kje01], Kjellqvist, P.; Sadarangani, C.; Ostlund, S, Design of a permanent magnet synchronous machine for an electromechanical active suspension actuator, Electric Machines and Drives Conference, IEEE International Volume Issue, 534-541 old., 2001

- [Kno06] Knorr-Bremse autóipari kutatás fejlesztési központ Budapest, megbeszélés 2006
- [Kov01] L.K. Kovalev, K.V. Ilushin, V.T. Penkin, K.L. Kovalev, Electrical machines with bulk HTS elements (The achieved results and future development), *Physica C* 357-360, old. 860-865, 2001.
- [Kov02] L.K. Kovalev, K.V. Ilushin, V.T. Penkin, K.L. Kovalev, S.M.-A. Koneev, K.A. Modestov, S.A. Larionoff, I.I. Akimov, D. Dew-Hughes, HTS electrical machines with BSCCO/Ag composite plate-shaped rotor elements, *Physica C* 372-376, old. 1524-1527, 2002
- [Kum05] P. Kummeth, M. Frank, W. Nick, G. Nerowski, H.-W. Neumueller, Development of synchronous machines with HTS rotor, *Physica C* 426-431, old. 1358-1364, 2005.
- [Kun03] Kun-Xi Qian, Pei Zeng, Wei-Min Ru, and Hai-Yu Yuan, Novel Magnetic Spring and Magnetic Bearing, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 39, No. 1, 2003. 01.
- [Kyu05] Kyushik Park, Dongshin Kim: A Study on the Dynamic Characteristics of the Continuously Variable Shock Absorber for Semi-Active Damping Control System, Detroit, 2005 11.
- [Lato4] Lattanzi Mario, progettazione e realizzazione di una macchina a campo assiale a cave frazionarie con materiali innovativi università degli studi di cassino facultá di ingegneria corso di laurea in ingegneria elettrica, Corso di Macchine Elettriche II , 2004
- [Lév78] Dr. Lévai Zoltán, Gépjárművek szerkeztana, Tankönyvkiadó Budapest 1978, (50-52)
- [Lis60] Liska József, Villamos gépek III, Tankönyvkiadó, Budapest, 1960
- [Lop06] A. Lopes Ribeiro, Axial and transverse forces in an axisymmetric suspension using permanent magnets, *Physica B* 384, 256-258 old., 2006
- [Loro6] LORD corporation, MR Damper, RD-1005-3 Product Bulletin, USA, 2006
- [Mah08] Mahdi Ashabani, Jafar Milimonfared, J. Shokrollahi-Moghani, S. Taghipour, M. Aghashadani, Mitigation of Cogging Force in Axially Magnetized Tubular Permanent-Magnet Machines Using Iron Pole-Piece Slotting, *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 44 No. 9. 2008 09.
- [Mak07] Makoto Kobayashi, Mochimitsu Komori, A superconducting stepping motor with pulsed-field magnetization for a pump, *Cryogenics* 47 (2007) 101–106
- [Mas01] Masanori Tsuchimoto, Shielding current model and frozen @eld model in analysis of magnetic force between a bulk HTS and a magnet, *Journal of Materials Processing Technology* 108, old. 188-192, 2001

- [Més07] I. Mészáros: Development of a novel vibrating sample magnetometer, *Materials Science Forum Vols. 537-538 (2007)*, 413-417. old.
- [Moo06] Moon G. Lee, Young-Man Choi, Sung Q. Lee, Dae-cheol Lim, Dae-Gab Gweon, Design of high precision linear stage with double-sided multi-segmented trapezoidal magnet array and its compensations for force ripples, *Mechatronics* 16, old. 331-340, 2006.
- [Mor06] E. Morita¹, H. Matsuzaki¹, Y. Kimura¹, Single pulsed-field magnetization on Gd-Ba-Cu-O Bulk HTS assembled for axial-gap type rotating machines, *Journal of Physics: Conference Series* 43 (2006) 796–799 7th European Conference on Applied Superconductivity
- [Nas94] S.A.Nasar, G.Y.Xiong, Z.X.Fu, Eddy-current losses in a tubular linear induction motor, *IEEE Transaction on magnetics*, vol. 30., 1994, (1437-1445)
- [Nico0] Nicola Bianchi, Analytical field computation of a tubular permanent-magnet linear motor, *IEEE transaction on magnetics*, vol. 36, 2000 (3798-3801)
- [Nico2] W. Nick a,* ,G. Nerowski b,H.-W. Neumüller a,M. Frank a,P. van Hasselt a, J. Frauenhofer c,F. Steinmeyer d, 380 kW synchronous machine with HTS rotor windings—development at Siemens and first test results, *Physica C* 372-376, old. 1506-1512, 2002
- [Nico3] Nicola Bianchi, Dario Dalla Corte, Francesco Tonel, Tubular Linear Permanent Magnet Motors: An Overall Comparison, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 39., No. 2., 2003 03.
- [Nico6] Nicola Amatio, Aldo Canova, Fabio Cavalli, Electromagnetic shock absorber for automotive suspension: electromechanical design, *ESDA2006, 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2006, Torino, Italy
- [Nilo6] K. Nilsson, O. Danielsson, M. Leijon: Electromagnetic forces in the air gap of a permanent magnet linear generator at no load, *Journal of Applied Physics*, 2006
- [Nor04] Nor, K.M.; Arof, H.; Wijono, Design of a 5 kW tubular permanent magnet linear generator, *39th International Universities Power Engineering Conference*, , Volume 2, Issue , 6-8, 528-532 old., 2004.
- [Oly04] Oly. D. Paz, Design and performance of electric shock absorber, A Thesis in Louisiana State University, Department of Electrical and Computer Engineering, 2004
- [Osko3] Oskar Danielsson, Design of a Linear Generator for Wave Energy Plant, 2003 Januar,
- [Pino6] Ping Zheng, Anyuan Chen, Peter Thelin, Waqas M. Arshad, Chandur Sadarangani: Research on a Tubular Longitudinal Flux PM Linear Generator Used for Free-Piston Energy Converter, *Journal of Applied Physics*, 2006

- [Ret76] Dr. Retter Gyula, Az egységes villamos gép elmélet, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1976
- [Rob05] ROBERT A. HAWSEY, SATOSHI MOROZUMI, THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL BENEFITS OF SUPERCONDUCTING POWER PRODUCTS, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, old. 279-306, 2005.
- [Sae94] S\ærgio Nelo Vannucci, Semi-Active Suspension With Multiple Damping and Leveling Curves, SAE Brazil, 1994. 11.
- [Sato3] Satoshi KAWAZOE Akio YASUDA Shinji YAMAGUCHI, Development of Magnet Compound Type Seat-Suspension, Technical Review No. 15, 2003
- [See98] B. Seeber: Handbook of Applied Superconductivity, Inst. of Physics Pub. Inc., 1998.
- [Semo4] Semperger Sándor: Magas hőmérsékletű szupravezető gyűrű állapotátmenetének felhasználása újszerű, induktív csatolású eszköz megvalósítására, doktori értekezés, 2004
- [Seo04] Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Analysis and experimental verification of moving magnet linear actuator with cylindrical halbach array, IEEE transaction on magnetics, vol. 40, 2004, (2068-2070)
- [Stro7] Stribrsky, A. Hyniova, K. Honcu, J. Kruczek, A, Energy recuperation in automotive active suspension systems with linear electric motor, Control & Automation, 2007. MED '07. Mediterranean Conference, 2007. 06.
- [Suz08] T. Suzuki S. Araki, K. Koibuchi, K. Ogawa, K. Sawa, K. Takeuchi, M. Murakami, K. Nagashima, H. Seino, Y. Miyazaki, N. Sakai, I. Hirabayashi, Y. Iwasa, A study on levitation force and its time relaxation behavior for a bulk superconductor-magnet system, Physica C 468 old. 1461–1464, 2008.
- [Sza82] Szabadalom, Hydraulische Einrohr-Stosssdaempfer mit Daempfangsregelung, DE 3215614 A1, Németország, 1982
- [Sza83] Orosz szabadalom, Linear Electromagnetic Motor, WO 82/02628, 1982
- [Sza01] Bell, Dale K., Ortonville, Mich., US; Kramer, Dennis A., Troy, Mich., US, Regenerative Stosssdaempfer, DE 10233390 A1, 2001. 09.08.
- [Sza03] Szabadalom, Meritor Heavy Vehicle Technology, Die folgende Angaben sind den vom Anmelder eingerichten Unterlagen entnommen, DE 10233390, USA, 2003
- [Sza04] Szabadalom, Bose corporation, Active vehicle suspension system, EP 1 440 826 A2, Európa, 2004
- [Sza05] Ronald B. Goldner, Peter Zerigian, Electromagnetic linear generator and shock-absorber, US 6952060 B2, 2005. 10. 04.

[Szab07] David Dong Kim, Sam Young Kim, Shock Absorber Generator, United States Patent, US2007/0175716 A1, 2007. 08.

[Tak64] Takács Ferenc: Mágneses anyagok, Tankönyvkiadó, Budapest, 1964

[Tob06] Mr. Tobias Niemz, Prof. Dr. Hermann Winner: Reduction of Braking Distance by Control of Active Dampers, FISITA konferencia, 2006

[Tom07] B. Tomczuk, G. Schröder, A. Waindok, Finite-Element Analysis of the Magnetic Field and Electromechanical Parameters Calculation for a Slotted Permanent-Magnet Tubular Linear Motor, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 43. No. 7., 2007 07.

[Xin07] Xing-Yi Zhang, You-He Zhou, Jun Zhou, Three-dimensional measurements of forces between magnet and superconductor in a levitation system, Physica C 467, old. 125-129, 2007.

[Yio7] Yi-Hua Fan Kuan-Yu Chen Cheng-Ju Wu Po-Chao Lee, PWM Current Driver Design and Implement for Electric Magnet of Magnetic Suspension System, Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE, 1262-1267 old., 2007

[Yono2] You-Do Chun, Ju Lee, Comparison of magnetic levitation force between a permanent magnet and a high temperature superconductor using different force calculation methods, Physica C, old. 372-376, 2002

[You02] Young-Sik Jo, Young-Kil Kwon, Myung-Hwan Sohn, Kang-Sik Ryu, Jung-Pyo Hong, Ju Lee, Temperature characteristic of rotor of HTS synchronous rotating machine cooled by solid nitrogen, Physica C 372-376, old. 1535-1538, 2002.

[Yoso2] K. Yoshida *, H. Matsumoto, Design and simulation of HTS bulk linear synchronous motor, Physica (2002) 833–837

[Vaj93] Vajda István: Közvetlen energia átalakítók, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1993.

[Web00] http://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/federung/cdc_continuous_damping_control.htm

[Web01] http://www.bose.com/learning/project_sound/bose_suspension.jsp

[Web02] www.euromagnet.hu

[Web03] <http://superconductors.org>

[Web04] <http://www.lord.com/tabid/3318/Default.aspx>

[Web05] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_field

[Web06] http://www.linmot.com/lm_typo/index.php

[Webo8] http://video.google.com/videosearch?hl=hu&q=active+suspension&um=1&ie=UTF-8&sa=X&oi=video_result_group&resnum=5&ct=title#

[Wil05] Will Robertson, Ben Cazzolato, and Anthony Zander, A Multipole Array Magnetic Spring, 2005

[Wil03] Will Robertson, Design of a non-contact magnetic spring for vibration isolation, research proposal, Department of Mechanical Engineering, University of Adelaide, Ausztralia, 2003. 11.

[Zado5] Zádor István – Falvy Bence: Linear Synchron Rohr Motor als kontinuierlich gesteuerte Stossdämpfer, 17. Frühlingsakademie und Experttagungen, Balatonfüred 2005.05.04-08, 145-148 old., ISBN 963 86697 3X

[Zado7] Zádor István– Dr. Vajda István, „Állandó mágneses illetve szupravezetős fél-aktív lengéscsillapító tervezési lépései”, Tavaszi Szél konferenciakiadvány, old. 147-152, Budapest, 2007

[Zado6] Istvan Zador – Daniel Horvath – Dr. Istvan Vajda, „PM Tube machine designed for a controlled vehicle shock-absorber suited for energy recuperative operation”, XVIIth International Conference on Electrical Machines Conference (CEC) Chania, 2006.

[Zado7b] Istvan Zador –Dr. Istvan Vajda, „Development of a permanent magnetic semi-active shock-absorber”, International Review of Electrical Engineering, Vol. 2 N. 4, pp. 579-586, Italy, July-August 2007b

[Zado8] Istvan Zador - Daniel Horvath - Dr Istvan Vajda „PM synchronous tube machine optimization for vehicle shock-absorber”, 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation Conference Proceeding (CEFC), Athen, Greece, 2008.May.

[Zado6b] Istvan Zador – Bence Falvy – László Dr. Palkovics, „Electro-mechanical suspension actuator with energy recuperative feature”, World Automotive Congress (WAC), Yokohama, 2006b.

[Zado7c] Istvan Zador - Thomas Naber, „Elektromagnetische Komponente für Federung und Dämpfung im Fahrzeug”, Fahrwerk vertikaldynamik (CD), Deutschland, 2007c.

[Zado8b] Istvan Zador - Denes Kiraly - Dr Istvan Vajda, „Synchronous tube machine optimization for vehicle shock absorber using permanent or superconducting magnets”, Applied Superconductivity Conference proceeding (ASCC), USA, 2008b.

[ZF07] ZF Friedrichshafen AG, ZF Damping Systems: Comfort for the City Bus, Presseinformation Zentrale Öffentlichkeitsarbeit Corporate Public Relations Németország, 2007

[Zhu97] Z. Q. Zhu, P. J. Hor, D. Howe, J. Rees-Joses, Calculation of cogging force in a novel slotted linear tubular brushless permanent magnet motor, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 33., No. 5. 1997 09.

11 MELLÉKLETEK

11.1 I. Melléklet – Tézisek összefoglalása

1. tézis

Mérésekkel alátámasztott modellekkel igazoltam, hogy azonos befoglaló méretű, konstrukciós kialakítású és azonos légrés indukciójú szinkron csőmotor/generátorral az elérhető maximális teljesítményt akkor kapjuk, ha a mozgórészen elhelyezett, egymással szembe fordított állandó mágnesek a maximális energiaszorzatú munkaponton üzemelnek.

A mágnesek munkapontját a körülötte elhelyezkedő mágnes-kör ellenállása szabja meg. Vizsgálataimban kitértem a munkapont reakcióerőre gyakorolt hatásának elemzésére. Összehasonlításom alapja az azonos térfogatból elérhető fékezőerő volt. Mivel kontra-polár elrendezésű mágnes-rendszert alkalmaztam a mozgórészen, belátható, hogy a mágnes munkapontjából következő felületi indukcióértéktől és a mágnesek között elhelyezkedő lágyvas korong vagy gyűrű (pólus) méreteitől függ a pólusfluxus. Figyelembe véve az alkalmazott lágyvasak B-H görbét, a kötött méretű mozgórészen elhelyezhető pólusok mennyiségét, az állórészen elhelyezett tekercsek és fogak méreteit, számos összefüggés figyelhető meg. Ezen összefüggéseket vizsgáltam, és a reakcióerő szempontjából optimalizáltam is. Az összefüggések modellezésekor prototípuson végzett mérésekkel igazoltam a szimulációk helyességét. Fontos szempont a mágnesek (NdBFe) összes térfogata is az ár szempontjából, hiszen a szerkezetnek ez a legjelentősebb anyagi erőforrást igénylő eleme.

2. tézis:

Matematikai összefüggést állítottam fel az állandó mágneses csőmotorok generátoros üzemen kialakuló fékezőereje és geometriai illetve aktív-anyag paraméterei között, a lengéscsillapítókénti alkalmazhatóság lehetőségeinek feltárására. Az általam felállított matematikai modellel végzett számítások alapján bebizonyítottam és kísérleti prototípuson végzett mérésekkel támasztottam alá, hogy a személygépjárműben lengéscsillapítóként alkalmazott hornyolt, 3 fázisú N35 típusú állandó mágneses csőmotorral, melynek maximális befoglaló méretei 80 mm átmérő és 300 mm hossz, amplitúdója +/- 60 mm, optimalizálás eredményeként az elérhető maximális fékezőerőt generátoros üzemen az ehhez a tézishoz tartozó altézisekben részletezett esetekben kapjuk.

Először analitikus modellt készítettem a mágneskör-modell segítségével. A modell bemenő paraméterei az elrendezés (gyűrű, tárcsa, vagy sugárirányban mágnesezett mágnesek), befoglaló méretek, alkalmazott légrés, mozgó- és állórész sugárirányú megosztása, fázisszám, a lágyvas anyagminősége (B-H görbe) és az állandó mágnes választott munkapontja. Utóbbi az alkalmazott mágnes szobahőmérsékleten ismert karakterisztikájából meghatározott maximális energiasűrűségű pont, neodímium mágnes esetén 0.6 T. Analitikus számításaimat a QuickField (FEM) programmal ellenőriztem. A modell eredményül a gép olyan geometriai méreteit adja meg, amelynél az állandó mágnesek az előre definiált munkapontban működnek és a lágyvas anyagok a telítési indukció értékükig vannak igénybe véve. Az analitikus számításból megkapott geometriát felhasználva, MatLab 6.5 program alkalmazásával véges elemes (FEM) modellt készítettem. A modell célja az volt, hogy egy adott sebességen mozgó dugattyúra ható reakcióerőt kiszámolja, és így lehetővé tegye a különböző geometriák összehasonlítását. Az optimalizáláshoz meg kellett adni a lágyvas anyag jellemzőit (B-H görbe), a csőmotor felépítését (gyűrű vagy tárcsa mágnesek), az állórész tekercsek rövidzárását (fázisban, vagy külön), fognyomaték csökkentő metódust (pólusferdítés, horonyferdítés), horonyzáró ék anyagát, mozgórész sebességét (lengéscsillapítóknál maximum 1 m/s) és a csőmotor hosszirányú maximális méreteit (mozgó és állórész). A modell statikus diszkrét állapotok sorozatából (mozgó rész elmozdítása) számol dinamikusan létrejövő hatásokat. Eredményül megkapjuk több más paraméter mellett az állórészben folyó rövidzárási áramokat, üresjárású indukált feszültségeket, induktivitásokat és a szerkezet indukció eloszlását. Ezen értékekből a Maxwell Stress Tenzor segítségével számolható a mozgó részre ható fékező erő.

2.1 A 2. tézis alapján a maximális fékezőerőt akkor kapjuk, ha állórészének a hossza megegyezik a mozgórész hosszával, a fázisellenállás és az indukált feszültség által eredményezett rövidzárási áram és a kapcsolódó pólusok felülete miatt.

Már az első prototípus tervezésének fázisában felmerült a kérdés, hogy vajon milyen hosszú álló- és mozgórész lesz az optimális. Az állórész tekercselésnél ugyanis vannak olyan a mozgórész pólusaitól távol eső tekercsek, melyek az indukált feszültség képzésben nem vesznek részt. Ezek a tekercsek a fázisok rövidzárási áramát csökkentik, tehát a létrehozott fékezőerőt is. A lengéscsillapítónak +/- 6 cm elmozdulás szükséges, tehát a mozgórész hossza is (állórész maximum 300 mm) korlátozott. Ennek megfelelően készítettem el az állórész hosszának optimalizálását, ha a rotor hosszát 180 mm-re választom, hogy a 300 mm-be a 60 mm-es amplitúdó beférjen.

2.2 A 2. tézis alapján és a szimulációk eredményeit figyelembe véve, akkor kapjuk a maximális fékezőerőt, ha a gép mozgórészének átmérője körülbelül fele a teljes motor átmérőjének.

Megvizsgáltam, hogy a generátor fékezőereje miként változik a gép állórész és mozgórész sugárirányú méreteinek arányával adott maximális méret mellett. A szimulációs eredményekből látható, hogy bármilyen elrendezést is vizsgáltam, az arány minden esetben ~50%-hoz közeli megosztásnál volt a legkedvezőbb, azaz a legnagyobb fékezőerőt ezen aránynál kaptam.

2.3 A csőgenerátorok fékező ereje gyártástechnológiai többletköltségek árán 40%-al növelhető, ha a geometriai paramétereket megtartva csupán az állórészen kialakított fogak hosszirányú méreteit (eddig párhuzamos lapú gyűrű) sugárirányban kifelé folyamatosan csökkentjük olyan mértékben, hogy a fogakban az indukció értéke sugárirányban kifelé mindenhol azonos értékű legyen.

A gép teljesítményének szempontjából fontos, hogy az állórész hornyokat minél jobban kitöltsék a rézvezetők, illetve, hogy minél nagyobb térfogatúak legyenek. Az állórészen elhelyezhető tekercs térfogatát növelhetjük, ha a fogak vastagságát az állórészen sugárirányban kifelé csökkentjük, úgy, hogy a fogak metszettelülete ne változzon. Mivel a lengéscsillapítónk hengeres, a fogakban az indukció értéke konstans értéken fog maradni a teljes hosszban, ha a szórást is figyelembe vesszük. Ebben az esetben tehát a hornyok térfogata megnő, így növelhető bennük az elhelyezhető tekercstérfogat, ami teljesítménynövekedést eredményez.

2.4 Az általam alkalmazott csőgenerátor geometriai paramétereit megtartva és az egyik fázist tömör rézgyűrűk alkalmazásával rövidre zárva (az armatúra visszahatás figyelembevételével), a fékezőerő ~50 %-kal növelhető.

Közismert hogy a gép teljesítménye növelhető, ha a hornyokban növeljük a réz kitöltést. Ennek megfelelően ha a fékezőerő nem elegendő, akkor lengéscsillapító specifikus megoldás lehet a tömör rézgyűrűk alkalmazása. Ebben az esetben a rézgyűrűk egy konstans dugattyúsebességtől függő értékkel megnövelik a csillapítóerőt, a közel 100%-os rézkitöltés miatt. Ebben az esetben azonban a konstrukciós kialakításkor figyelembe kell venni az állandó mágnesek irreverzibilis lemágneseződését. A rézgyűrűk mennyiségét és helyzetét különböző képen alkalmazhatjuk a gép építéskor. Lehetőség van többrétegű tekercselést alkalmazva az egyik réteget rézgyűrűkkel megvalósítani, vagy az egyik fázishoz tartozó minden tekercsét rézgyűrűre cserélni. A szerkezettel így nagyobb reakcióerő érhető el, azonban a tekercsek mennyiségének csökkenése miatt a vezérelhető tartomány lecsökken.

3. tézis:

Analitikus és végeselemes modellekkel végzett számítások alapján bebizonyítottam és mérésekkel támasztottam alá, hogy a személygépjárműben lengéscsillapítóként alkalmazott fogazott 3 fázisú és 77 K hőmérsékletre hűtött csőgenerátor mozgórészén alkalmazott Jc-B görbével jellemzett magashőmérsékletű YBCO szupravezető (MHS) gyűrűs mozgórészű géppel azonos fékezőerő érhető el, mint az ezen a hőmérsékleten működő N35 típusú állandó mágneses (B-H görbével jellemzett) géppel.

A jelenlegi tipikus adatokkal egyszerűsített modellt készítettem a már általam korábban megalkotott modellek alapján, mely így lehetővé teszi adott térfogathoz megvalósítható MHS mozgórészű csőmotor csillapító erejének számítását. Lehetőség van vasmasos és vas mentes (légrés tekercselt) kivitelű gépet is modellezni. Az

MHS anyag adott hőmérsékleten a Jc-B görbéjével van jellemezve és mérések alapján készült eljárás szerint van figyelembe véve a technikai szempontból összetett relaxációja. Ezen gépeket hasonlítottam össze a hagyományos, illetve a folyékony nitrogénnel hűtött állandó mágneses gépekhez. Összehasonlításom alapja az azonos befoglaló méret volt. Felépítésükben a legnagyobb különbség hogy az MHS az árnyékoló köráramokkal jellemezhető Ennek megfelelően fő különbség a szerkezetekben a mozgórész dugattyúrúdjának anyaga, amelyet szupravezetőknél ferromágneses anyagból célszerű kialakítani, hogy a mágnes-kör ellenállása kisebb legyen. A közel azonos mágnes-kör méretezésből következik, hogy a gerjesztésük hasonló, tehát az irreverzibilis lemágneseződés veszélye következtében a fázisáram korlátozása is azonos mértékű. Ennek köszönhetően, és ezen feltételek mellett, a reakcióerők alakulása a hűtött állandómágneses illetve a szupravezetős gépnél közel azonosak.

3.1 Mérésekkel igazoltam, hogy az MHS csómotor mozgórészén alkalmazott ~1 T maximális mágneses térre felmágnesezett és azonos pólusokkal egymással szembefordított (30 mm átmérőjű és 10 mm magas YBCO) szupravezető mágnes korongok közötti statikus taszító erő 10 és 5 mm közötti összeszorításkor az időben százalékosan azonos mértékben csökken.

Ezeket a méréseket a Németországi Jénában lévő IPHT Kutatóintézet, szupravezető laboratóriumában végeztem el. A szupravezetőket (HG9 - Mo11) FC felmágnesezéssel felmágneseztem (~1,5 T mágnesező tér), majd kontra-polár elrendezésben (azonos pólusaikkal szembe fordított) mértem az egymásra ható taszítóerőt. A taszítóerő mértékét egy fix pozícióba állított robotkarra szerelt nyúlásmérő bélyeges erőmérő szenzor mérte. Az adatokat számítógép rögzítette előre beállított időlépésenként. Mérésem célja a kontra-polár elrendezésű szupravezetők viselkedésének megismerése volt. A szakirodalom csupán egyetlen magában álló MHS relaxációjának alakulását tárgyalja de nem tér ki ilyen elrendezésű (kontra-polár) MHS mágnesek átmágneseződésének alakulására. A taszítóerő csökkenéséből lehet következtetni az MHS mágnesek felületi indukció értékük változására, melynek oka a szupravezetők relaxációja és az ezen elrendezés következtében kialakuló átmágneseződés.

4. tézis:

Az állandó mágnesek méretével, darabszámával és lágyvas környezetük megfelelő megváltoztatásával tetszőleges rugóerő karakterisztika megvalósítható.

Mágneses rugót úgy készíthetünk, hogy az állandó mágneseket azonos pólusaikkal szembefordítjuk. Ez általában nem eredményez stabil lebegtetést, ezért a mágneseket minden esetben meg kell vezetni, például egy csőben. A mágnesek közelítésekor azokban veszteségek alakulnak ki, melyek a lengést csillapító tényezőként jelentkeznek. Kutatásaimhoz a kereskedelmi forgalomban kapható, neodimium állandó mágneseket használtam. A két mágnes között kialakuló taszítóerő meghatározására mérést, illetve analitikus és végeselemes (FEM) modellezést is végeztem. Elsőként különböző rugókarakterisztikákat valósítottam meg modell szinten, melyhez több darab mágneskorongot alkalmaztam. Ebben az esetben a rugóerő adott távolságú két mágnes között nem változik, de a több mágnes alkalmazása miatt a rugózó úthossz megnő. A karakterisztika tovább változik, amennyiben a mágnesek ferromágneses anyagú csómotor állórészében mozognak. Ekkor ugyanis a mágnes-kör ellenállása, ami eddig levegőben nagy volt, komolyan lecsökken, mely a mágnes munkapontját megváltoztatva a mágnesek felületi indukció értékét megnöveli. Ennek okán növeli a mágnesek között fellépő erőt a levegőn működő rendszerhez képest például 0.25 mm-es összenyomódáskor ~40%-al. Ennél a rendszernél opcionálisan lehetőség van az állórészen elhelyezett tekercseket a csőgenerátoroknál bemutatottak szerint a lengési energia egy részének kinyerésére is használni. Ferromágneses hengergyűrűbe helyezett mágnes-rendszerben kialakuló taszítóerő tovább növelhető, hiszen megfelelő falvastagságot választva a mágnes-körök ellenállása tovább csökken, ami a mágnesek felületén további indukciónövekedést eredményez. Ennek köszönhetően a taszítóerő a mágnesek közti 0.25 mm-es maximális összeszorítást feltételezve további ~40%-al növelhető. Ebben az esetben azonban nincs lehetőség a lengési energia részbeni kinyerésére.

11.2 II. Melléklet – Jelmagyarázat

FC	Field Cooled (Térben hűtött)
FEM	Finite Element Method (Végeselem szimuláció)
MHS	Magas hőmérsékletű szupravezető
NbFeB	Neodímium Vas Bór mágnes
PM	Állandó mágnes
YBCO	Ítrium Bárium Réz Oxid
ZFC	Zero Field Cooled (Nem térben hűtött)

11.3 III. Melléklet - A szupravezetés rövid története és fizikai alapjai

Heike Kamerlingh-Onnes 1911-ben fedezte fel a szupravezetést. E felfedezés által új jelenségekkel, és az anyagok addig még fel nem fedezett tulajdonságaival lett gazdagabb a világ. A felfedezés 75. évfordulójának évében, 1986 kora tavaszán Bednorz és Müller újabb váratlan felfedezést tett. A réz-oxid alapú kerámiákban ((La,Ba)₂CaCu₄O_{4-x}) is kimutatták a szupravezetés jelenségét, melynek kritikus hőmérséklete 35 K körüli volt. Az igazi áttörést azonban az ittrium alapú (YBa₂Cu₃O_{7-δ}) réz-oxid kerámiák jelentették, melynek kritikus hőmérséklete már a folyékony nitrogén forráspontja (77,36 K) felett volt. Ez a felfedezés előrevetítette egy újabb „ipari forradalom” képét, a szobahőmérsékletű szupravezető „eljövetelét”, melynek hatására beköszönt a szupravezetők kora. [Semo4] A szupravezetés megreformálhatja a villamos ipart is; a villamos energia termelését, felhasználását, tárolását és más villamos alkalmazásokat. A szobahőmérsékletű szupravezető mindezidáig csak lehetőség maradt, az alacsony- és magas hőmérsékletű szupravezetők gyakorlati használata, azonban már számos területen elterjedt (pl.: orvosi diagnosztikai célú MRI-mágnesek, SMES, stb.). Mindennapos használatuk azonban várat magára, amelynek lényeges okai közül az alábbiakat emelem ki:

- a szupravezető állapot csak alacsony hőmérsékleten jön létre (a szupravezetők hűtése jelenleg folyékony héliummal vagy folyékony nitrogénnel történik), ami hűtési igényhez vezet;
- a szupravezető anyag előállításának magas ára.

Mindezen hátrányok ellenére a szupravezetős eszközök kutatása, fejlesztése tendenciájában töretlen szerte a világon. Ha az előzőleg említett két nagy problémát a tudósoknak, mérnököknek sikerül kiküszöbölniük, akkor a felhalmozott tapasztalatok és kutatási eredmények birtokában ezek az eszközök rövid idő alatt átültethetőek lesznek a mindennapos alkalmazások területére, ezzel megreformálva az eddigi megvalósításokat. [Vaj93]

11.3.1.1 A szupravezetés fizikai alapjai

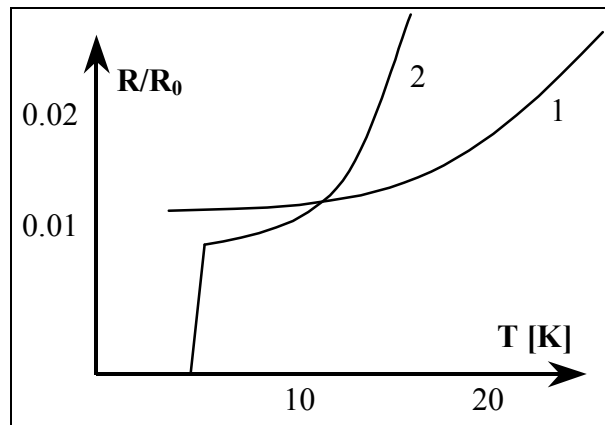
A szupravezetésnek két típusát ismerjük, így a szupravezetőket az I. és II. típusba sorolták. A továbbiakban azokat a jelenségeket és tulajdonságokat ismertetem, amelyek az erősáramú illetve mágneses alkalmazások szempontjából szükségesek, s amelyek lényegében a mágneses viselkedésükben térnek el egymástól.

A szupravezető képességet két alapvető tulajdonság alapján határozzák meg. Az egyik a diamágneses tulajdonság, az úgynevezett Meissner-effektus, a másik az

ellenállásmentes áramvezető képesség. Alkalmazásokban a szupravezetők mindkét alapvető tulajdonságát kihasználjuk.

11.3.1.2 Az I. típusú szupravezetés

H. Kamerlingh-Onnes holland fizikusnak 1908-ban sikerült cseppfolyósítani a héliumot, amely nagy szerepet játszik a hűtési megoldásokban. A továbbiakban az anyagok villamos vezetőképességének változását vizsgálta az igen kis hőmérsékletek tartományában. Platinával végzett kísérletei azt mutatták, hogy a hőmérséklet csökkentve az ellenállás adott maradék ellenállásértékig monoton csökken (44 ábra, 1 görbe). A higannyal végzett mérései azonban meglepő eredménnyel jártak: azt találta, hogy a fém egy adott (kritikus) hőmérsékleten elveszti ellenállását (93. ábra, 2. görbe).



93. ábra: H. Kammerlingh-Onnes kísérleteinek eredménye (1 - platina, 2 – higany)

Az átmeneti hőmérsékleti tartomány kb. 3 - 10 K. Onnes ezt az állapotot szupravezetési állapotnak, a higanyhoz hasonló tulajdonságot mutató anyagokat szupravezetőnek nevezte el.

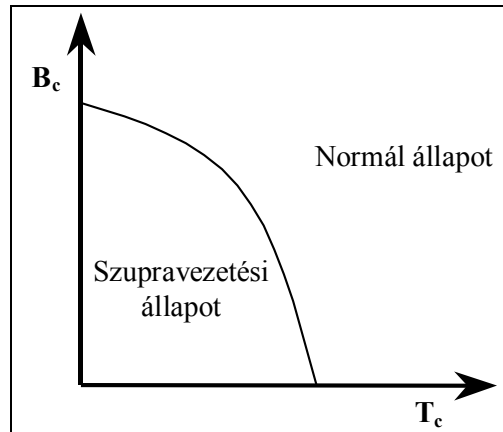
Nagypontosságú méréseket végezve kimutatták, hogy pl. az ólom fajlagos ellenállása szupravezető állapotban:

$$\rho = 4 \cdot 10^{-25} \Omega m \quad [45]$$

Ahol ρ a fajlagos ellenállás. Olyan elektromágnesek készítése során, amelyek nagy mágneses indukció gerjesztésére alkalmasak, kiderült, hogy amennyiben a külső mágneses indukció vagy az áramerősség egy kritikus értéket meghalad, a vizsgált anyag elveszti szupravezető tulajdonságát. [Vaj93]

A szupravezető állapot, tehát döntően három jellemző teljesülése esetén áll fenn. Ezek a kritikus paraméterek: T_c , I_c , B_c . (Hőmérséklet, Áram, Indukció) A szupravezetők egyúttal ideális diamágneses anyagok is: $B < B_c$ esetén a szupravezetőben az indukció zérussal egyenlő, függetlenül attól a módtól, ahogyan az adott anyag szupravezető állapotba kerül, ezt Meissner és Ochsenfeld mérésekkel bizonyították. [Vaj93] Az I. típusú szupravezetők ideális vezetőképességének és ideális diamágnesességének elektrodinamikai leírására F. és H. London felállítottak egy szupravezető modellt, amely London-elmélet néven ismeretes. E modellek olyan

elemi szupravezetők, melyek kritikus hőmérséklete 4-5 K, kritikus mágneses indukciójuk maximum 10^{-2} T nagyságrendű. Az anyagokra a 94. ábra jellemző

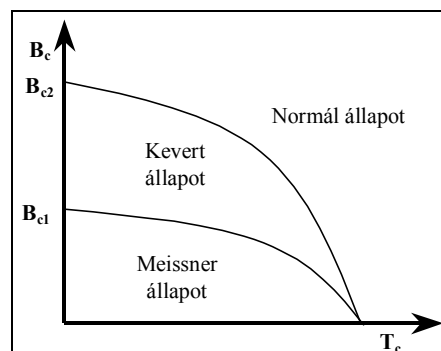


94. ábra: I. típusú szupravezetők $B_c(T_c)$ függvénye

A szupravezető állapot akkor lép fel, ha az anyag hőmérséklete és az indukció értéke által meghatározott pont a görbén belül van, ellenkező esetben az anyag normál állapotba kerül. Bardeen, Cooper és Schrieffer nevéhez fűződő, úgynevezett BCS-elmélet ma a szupravezetés legkorszerűbb elméletének tekinthető, amely mikrofizikai alapokon magyarázza a jelenségeket. Az elmélet szerint a szupravezető elektronok úgynevezett Cooper-párokba rendeződnek. A BCS-elmélet alapján valószínűsített legnagyobb kritikus hőmérséklet kb. 40 K, míg konkrét szupravezető anyagra a ma ismert legnagyobb érték $T_c=23,2$ K. A szupravezetők nagymértékű alkalmazhatóságának az egyik alapfeltétele, a megfelelően magas kritikus hőmérséklet, ezért kritikus hőmérséklet növelésére – végső célként szobahőmérsékletig – széles körű kutatások folynak világszerte [Vaj93].

11.3.1.3 A II. típusú szupravezetés

Az utóbbi évtizedekben számos olyan szupravezető elemet, ötvözetet és vegyületet fedeztek fel, amelyek az I. típusú szupravezetők néhány tulajdonságától eltértek. Ezek a különbségek, főleg a mágneses tulajdonságukban fedezhetők fel, amelyet jelleggörbéjük is mutat. Ezért ezeket az anyagokat II. típusú szupravezetőnek nevezték el (95. ábra). Létezésük már 1937-ben elméletileg kimutatták. Az elemek közül II. típusú szupravezető tulajdonságokkal a vanádium és nióbbium rendelkezik. A II. típusú szupravezetés elméletének megalapozása V. L. Ginzburg és L. D. Landau nevéhez fűződik.



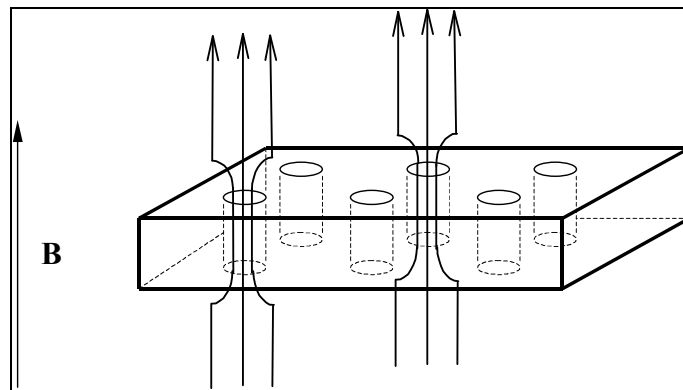
95. ábra: II. típusú szupravezetők $B_c(T_c)$ függvénye

Az I. és a II. típusú szupravezetők közötti különbség a mágneses tulajdonságokban mutatkozik meg oly módon, hogy valamely B_{c1} (alsó kritikus indukció) értékig a II. típusúak is diamágnesek és érvényes rájuk a Meissner-effektus, tehát a B_{c1} -nél kisebb indukciójú tér kiszorul a szupravezetőből. (46. ábra) Valójában a szupravezetőbe is behatol a mágneses tér, de a felülettől mért távolság függvényében exponenciálisan csökken, és így egy vékony (tiszta szupravezetőkben néhány nm mélységű) felületi rétegtől eltekintve a vezetők belüli tér gyakorlatilag zérus, tehát a szupravezető árama is csupán ebben a vékony felületi rétegben fog folyni. [Vaj93] A külső mágneses teret tovább növelve azonban, az anyag nem veszi el szupravezető tulajdonságát. A mágneses tér behatol a szupravezetőbe, amely úgynevezett kevert állapotba kerül. A kevert állapotú anyagokban ($B_{c1} < B < B_{c2}$) a mágneses fluxus normál állapotú, hengeres nyalábok, úgynevezett fluxus örvények (fluxoidok, fluxusszálak) formájában hatol be a szupravezetőbe. Minden fluxus örvény egyenlő fluxust tartalmaz, amely a Φ_0 fluxus kvantummal egyezik meg:

$$\Phi_0 = 2 \cdot eV \cong 2 \cdot 10^{-15} Vs \quad [46]$$

Az örvényeket szupravezetési köráramok fogják körül. Az örvények egy háromszögrács csúcspontjaiban helyezkednek el. A szupravezető belsejében kialakuló fluxus örvény rácsot a 96. ábra szemlélteti.

A II. típusú szupravezetők kritikus áramerősségét $B < B_{c1}$ indukciójú mágneses térben a Silesbee-szabály felhasználásával számíthatjuk ki. [Web03]



96. ábra: Kevert állapotú II. típusú szupravezető fluxusörvény rácsa

A szupravezető tehát a fluxusok körüli közvetlen térrészben (közelítőleg) normál, azon kívül pedig szupravezető állapotban lesz, mely utóbbi tartományok Meissner-állapotúak. Ez az állapot mindaddig fennmarad, amíg a mágneses indukció el nem éri a B_{c2} -vel jelölt (felső kritikus indukció) értékét, ahol a szupravezető normál vezetési állapotba megy át. [Semo4]