

FELADATKIÍRÁS

Napjainkban az autóipar egyik fontos célja a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése. Ennek érdekében egyre több cég foglalkozik villamos hajtásláncjal felszerelt villamos autók gyártásával, hiszen ezek közvetlenül nem bocsátanak ki szén-dioxidot, és tölthetők megújuló energiaforrások felhasználásával. A villamos hajtáslánc egyik központi eleme a villamos gép.

A villamos hajtásláncban alkalmazott villamos géptől nagy teljesítmény- és nyomatéksűrűséget, valamint magas hatásfokot és megbízható szigetüzemű működést várunk el. Ezen feltételek kielégítésére kézenfekvő választás a hairpin tekercseléssel ellátott állandómágneses szinkrongép (PMSM) alkalmazása, mivel négyszög keresztmetszetű vezetői nagy áramsűrűséggel terhelhetők és jól kihasználják a hornyokban rendelkezésre álló helyet. Ezen gépek további előnye, hogy tömeggyártásuk minden lépése könnyen kivitelezhető automatizált gyártósorokkal.

A villamos gépek optimalizálásához elengedhetetlen az elektromágneses paraméterek és karakterisztikák meghatározása végeselemes szimulációk segítségével. A hairpin tekercselésű gépek esetében a vezetőkben fellépő örvényáramok okozta veszteségeket is meg kell határozni, mivel ezek értéke négyszög keresztmetszetű vezetőkben nem elhanyagolható a gép melegedése szempontjából.

A hallgató feladatának a következőkre kell kiterjednie:

- Mutassa be a hairpin tekercselés különböző fajtait és elemezze a sajátosságait!
- Mutassa be a tradicionális (nem folytonos) hairpin tekercselés sémájának szerkesztésénél figyelembe vett alapelveket!
- Mutassa be egy hairpin tekercseléssel ellátott villamos gép paramétereinek meghatározásánál felhasznált eljárásokat!
- Készítse el egy hairpin tekercselésű villamos gép modelljét végeselemes szoftverben és határozza meg a gép elektromágneses paramétereit!
- Készítsen eljárást végeselemes szoftver felhasználásával, mellyel a gép hornyáiban elhelyezkedő vezetőkben keletkező örvényáram veszteségek meghatározhatók!
- Elemezze a számított örvényáram veszteségek hatását a gép működésére!



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Miskolczy Miksa József

**HAIRPIN TEKERCSELÉSŰ PMSM
TERVEZÉSE ÉS SZIMULÁCIÓS
VIZSGÁLATA VÉGESELEMES
SZOFTVERREL**

KONZULENSEK

Hadur András, Király István

BUDAPEST, 2025

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	6
Abstract.....	7
1 Az állandó mágneses szinkrongép (PMSM)	8
1.1 Felépítése és építőelemei	8
1.1.1 Lemezcsomag	9
1.1.2 Állandó mágnesek jellemzése.....	10
1.1.3 Vezető anyagok.....	12
1.1.4 Tekercselések.....	12
1.2 A PMSM elméleti háttere	14
1.2.1 Működés.....	14
1.2.2 D-Q koordinátarendszer.....	14
1.2.3 D-Q feszültségegyenletek	15
2 Hairpin tekercselés	16
2.1 A hairpin tekercselés bemutatása.....	16
2.1.1 Mi az a hairpin tekercselés?.....	16
2.1.2 Összehasonlítás a huzalos tekercseléssel	16
2.1.3 A hairpin tekercselés fajtái	18
2.2 A tradicionális hairpin tekercselés gyártási folyamata	20
2.2.1 Lépések	21
2.3 Egy adott tekercselési séma megvalósítása	24
2.3.1 A bemutatandó tekercselés paraméterei	24
2.3.2 Az elkészített tekercselési séma.....	25
2.3.3 A háromdimenziós FreeCAD modell	26
3 Örvényáramok	28
3.1 Az örvényáramok kialakulása.....	28
3.1.1 A Faraday-féle indukciós törvény és a Lenz-törvény	28
3.2 Örvényáramok hairpin tekercselésben	29
3.3 Miért hátrányos, ha örvényáramok alakulnak ki villamos gépek vezetőiben?	31
3.4 Örvényáram-csökkentési módszerek	32
3.4.1 Hosszúság csökkentése – rétegszám növelése.....	33
3.4.2 Szélesség növelése – szélesebb hornyok	34

4 Hairpin tekercselésű PMSM az autóiparban	37
4.1 Előnyök és hátrányok villamos autókban való alkalmazás szempontjából	37
4.2 Jellemző paraméterek	38
5 A modell felépítése	40
5.1 A vizsgált villamos gép.....	40
5.2 A FEMM modell felépítése	41
5.3 A kód.....	42
6 A villamos motor paramétereinek meghatározására szolgáló program.....	43
6.1 A kód.....	43
6.1.1 Áram pillanatértékeinek meghatározása.....	43
6.1.2 Forgórész forgatás.....	43
6.1.3 Örvényáramok számítása.....	44
6.1.4 Forgórészeltolás figyelembevétele	44
6.2 Optimalizálás	44
6.3 A számított értékek	45
7 Végeleemes módszer az örvényáramok számítására	46
7.1 A módszer működésének bemutatása egy vezetőn.....	46
7.2 A módszer megvalósítása – az iterációk pontos lépései	49
7.3 Helyes működés bizonyítása.....	49
8 Szimulációs eredmények feldolgozása	53
8.1 Feszültség.....	53
8.1.1 Üresjárási feszültség	53
8.1.2 Vonali feszültség.....	54
8.1.3 Felharmonikus-tartalom.....	54
8.2 Nyomaték.....	55
8.3 Örvényáramok	57
8.4 Teljesítmény és hatásfok.....	62
9 Konklúzió.....	65
Irodalomjegyzék.....	66

HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

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

Kelt: Budapest, 2025. 03. 08.

.....
Miskolczy Miksa József

Összefoglaló

Napjainkban számos autóipari cég gyárt villamos autókat, melyek hajtásláncába hairpin tekercselésű villamos gép van építve. Az ilyen gépek jellemzően nagy teljesítménysűrűséggel és hatékonysággal rendelkeznek, emellett megbízhatóan működnek szigetüzemben. Egyik gyakran alkalmazott fajtájuk a hairpin tekercselésű állandó mágneses szinkrongép (hairpin PMSM).

A szakdolgozat keretében a hairpin tekercselésű állandó mágneses szinkrongép kerül bemutatásra. A vizsgálathoz egy Finite Element Method Magnetics (FEMM) szoftveren alapuló végeleemes eszköz lett elkészítve.

A hairpin tekercselésű állandó mágneses szinkrongép bemutatása annak működésével és felépítésével kezdődik. Az elméleti alapok ismertetése után a hairpin tekercselés fajtái, azok felépítése és jellemzői kerülnek áttekintésre, majd a tekercselés összehasonlításra kerül a kör keresztmetszetű vezetőkkel kialakított huzalos tekercseléssel. Az összehasonlítás választ ad arra, hogy miért választja sok autógyártó a hairpin tekercselésű villamos gépeket.

A vizsgálathoz fejlesztett végeleemes eszköz FEMM szoftverrel kommunikáló MATLAB-kódok, egyéb számításokért felelős MATLAB-kódok és adatok feldolgozására szolgáló Excel táblázatok összessége. A felhasználó megadja a vizsgálni kívánt állandó mágneses villamos gép fizikai paramtereit az eszköz számára, és annak segítségével kialakítja a gép 2D-s modelljét. Ezt követően különböző szimulációkat futtat tetszőleges üzemállapotokban, melyek meghatározzák a gép különböző elektromágneses paramtereit és jelleggörbéit. Az eszköz képes a hairpin vezetőkben kialakuló örvényáramok és azok okozta veszteségek számítására is, mely megvalósításához egy végeleemes iterációs módszer lett kifejlesztve és implementálva.

Az eszköz működésének bemutatásához egy BMW xDrive 5-ödik generációs motor paraméterein alapuló villamos gép került modellezésre. A különböző üzemállapotok szimulációs eredményei tudomást adnak a gép feszültségéről, nyomatékáról, teljesítményéről és a keletkező örvényáramokról, illetve az azok által okozott veszteségekről.

Abstract

Today, many players in the automotive industry manufacture electric cars that are equipped with hairpin wound machines as part of their drive units. These machines are typically machines with great performance density, high efficiency and high reliability. One of the commonly used versions of these machines is the hairpin wound permanent magnet synchronous machine (hairpin PMSM).

In this thesis, the hairpin wound synchronous machine is studied and analysed. The analysis is done using a Finite Element Method Magnetics (FEMM)-based finite element tool developed specifically for this purpose during the duration of the previous two semesters.

The introduction of the hairpin wound PMSM starts by analysing how it works and how different materials and components come together to create its structure. After introducing the fundamentals, the different kinds of hairpin windings are studied with special attention to their structure and unique attributes. The hairpin winding is then compared with the round wire winding. The comparison gives reasons to why the hairpin PMSM is a popular choice for a drive unit among auto makers.

The tool developed for the analysis of PMSMs is a collection of MATLAB scripts that communicate with FEMM, other MATLAB scripts that execute all sorts of calculations, and Excel spreadsheets that help make sense of the calculated results. The user defines the physical parameters of the analysed machine and creates a 2D model with the help of the tool. After modelling, the user runs a number of different simulations in different operating states of the machine. After proper interpretation, the results of these simulations give the user the electromagnetic parameters and characteristics of the analysed machine. The tool is also capable of calculating eddy currents and AC losses in the conductors of the rotating machine. For this purpose, a finite element eddy current calculation method is proposed and implemented.

To demonstrate how the complete tool works, a machine based on the parameters of the BMW xDrive 5th generation motor is modelled and analysed. The results of the simulations of different operating states give crucial information about the machine, such as voltage and torque characteristics, the performance and efficiency of the machine, and the eddy currents that flow in the conductors during operation.

1 Az állandó mágneses szinkrongép (PMSM)

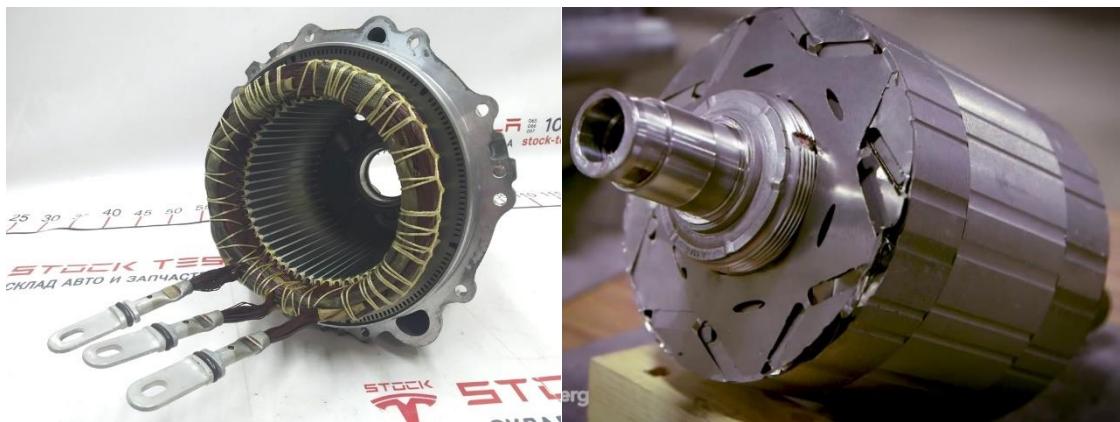
Ebben a fejezetben az állandó mágneses szinkrongép (PMSM) felépítése, építőelemei, működése és elméleti háttere kerülnek bemutatásra.

1.1 Felépítése és építőelemei

Az állandó mágneses szinkrongép állórészét lemezcsomag alkotja, melynek hornyaiban háromfázisú tekercsrendszer van. A lemezekben a hornyokon kívül a hűtést biztosító olajnak is rések vannak kialakítva. A lemezcsomag egy hűtőbordákkal ellátott házba van építve, ami az egész szerkezetet összetartja [1].

A PMSM forgórészében a tengelyen kívül rögzített állandó mágnesek találhatók. A mágnes körüli levegővel kitöltött szekcióknak szerepe lehet a lemágneseződés meggyötörésében, illetve a reluktancianyomaték növelésében. A tengelyhez közelebbi levegővel kitöltött szekciók szerepe lehet többek közt a reluktancianyomaték növelése és a forgórész tömegének csökkentése[2][3]. A forgórész külsején általában bemélyedések találhatók a nyomatéklüktetés csökkentése érdekében.

Az állórész háromfázisú tekercselése és a forgórész mágnesei közösen állítják elő a szinkron fordulatszámmal forgó főmezőt. A forgórész és állórész póluspárainak száma megegyező, felépítésük az alábbi ábrán látható [35].



1.1 ábra: Tesla 3D6 motor állórész [5] és forgórész [6]

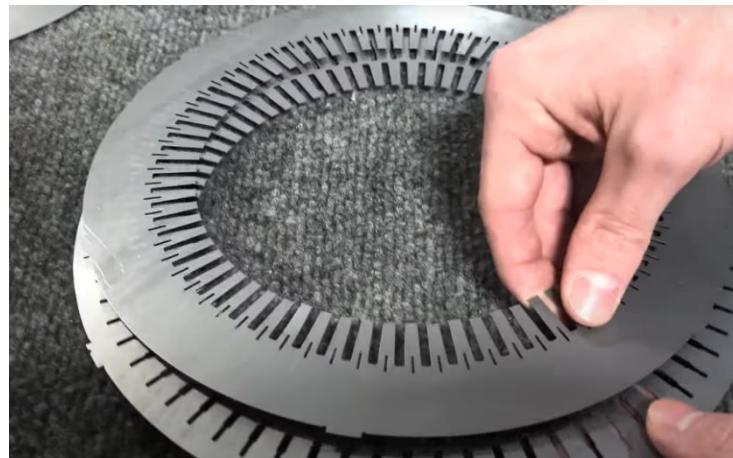
A forgórész és az állórész fontos jellemzője a póluspárszám, amely kapcsolatot teremt a villamos és mechanikai fordulatszámok között [35].

$$n_{1m} = \frac{n_1}{p} = \frac{f_1 * 60}{p} \quad (1.2)$$

f_1 – tápfrekvencia, n_{1m} – mechanikai szinkron fordulatszám, n_1 – villamos szinkron fordulatszám, p – póluspárszám.

1.1.1 Lemezcsomag

A szinkrongépek állórésze vékony lemezek egymáshoz rögzítésével készül, ezt nevezzük állórész lemezcsomagnak. A lemezelt felépítésű állórészeken kisebb veszteség keletkezik, mint a tömör állórészeken. A különálló lemezek miatt a lemezcsomag elektromos és mágneses vezetőképessége tengelyirányban kisebb, mint a keresztmetszet síkjában. Ennek köszönhetően a motor hosszanti irányában folyó, nagy veszteségeket okozó örvényáramok sokkal kisebb értékűek lesznek, és kevesebb veszteséget okoznak az állórész lemezcsomagban [7].



1.3 ábra: Lucid Air motor állórész lemezei [1]

A lemezcsomag alakítja ki a légrés melletti szekciókat, melyeket hornyoknak nevezünk. A hornyokban helyezkedik el a tekercsrendszer, melynek paraméterei nagyban meghatározzák a hornyok alakját. A lemezeken megtalálható többi lyuk az állórész szélén, speciális esetekben a hornyok között helyezkedik el, és a hűtőolaj szállítására szolgál [1].

A mágneses modellező szoftverekben előfordulhat, hogy az anyagok $B(H)$ jelleggörbéi nincsenek megfelelően megadva, így például a lemezcsomag alapértelmezett $B(H)$ görbüjének utolsó két megadott pontja közötti mágneses permeabilitás nagyobb, mint a levegő mágneses permeabilitása (μ_0). Ez azért okoz problémát, mert ezt a permeabilitás értéket feltételezi a program a nem megadott, telített tartományban is. Ennek következménye, hogy a modellben a mágneses permeabilitás a telítődés ellenére is nagyobb, mint vákuumban. Ez a valósánál nagyobb mágneses indukciót eredményez, mely

számítási hibához vezet. A probléma kiküszöbölése érdekében a B(H) görbe végére egy új pont (n) lett megadva úgy, hogy az alábbi egyenlet teljesüljön:

$$\frac{B_n - B_{n-1}}{H_n - H_{n-1}} = \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \quad (1.4)$$

B_n – az n-edik ponthoz tartozó mágneses indukció, H_n – az n-edik ponthoz tartozó mágneses térerősség, μ_0 – a levegő mágneses permeabilitása.

1.1.2 Állandó mágnesek jellemzése

Az állandó mágnesek jellemzéséhez többféle paraméterre és karakterisztikára is szükségünk van. A mágnesgyártók által megadott jellemzők, a B(H) karakterisztika értelmezése és a különböző mágnesek jelölései az alábbi szekcióban kerülnek bemutatásra.

1.1.2.1 B(H) görbe, releváns fogalmak és a hőmérséklet hatása

	Characteristic	Units	min.	nominal	max.
Magnetic Properties	Br , Residual Induction	Gauss	12,500	12,700	12,900
		mT	1250	1270	1290
H_{cB} , Coercivity	Oersteds	11,600	11,950	12,300	
	kA/m	923	951	979	
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	17,000			
	kA/m	1,353			
BHmax , Maximum Energy Product	MGOe	38	41	43	
	kJ/m ³	302	322	342	

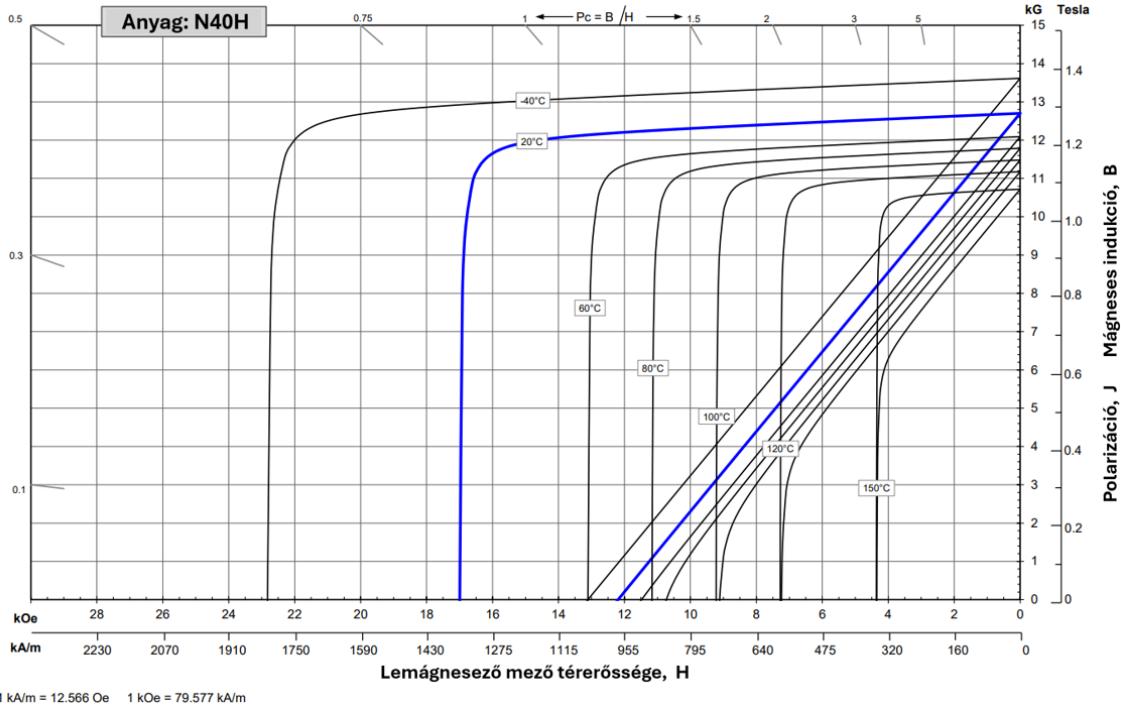
1.5 ábra: Gyártó által megadott B(H) információk az N40H mágnesről [8]

B_r, Mágneses indukció: zérus mágneses térerősség (H=0) értékhez tartozó indukció.

H_{cB}, Koercitív erő: zérus mágneses indukció (B=0) értékhez tartozó mágneses térerősség [9].

H_{cJ}, Belső koercitív erő: az a mágneses térerősségérték, melynél a mágnes visszafordíthatatlan lemagneződése kezdődik [10].

BHMax, Maximum energiasűrűség: a 2. síknegyedben levő lineáris B(H) görbe alatti maximális méretű téglalap területe. A maximum energiasűrűség valójában a mágnes erősségét jellemzi. Egyik mértékegysége MGOe, azaz MegaGauss-Oersted, a mágneseket ezzel megegyező vagy ehhez közelí értékekkel számozzák [11].



1.6 ábra: N40H mágnes B(H) és J(H) görbéje [8].

Az 1.6-os ábrán kétféle mágneses karakterisztika figyelhető meg. A lineáris karakterisztika kifejezi a mágneses indukció (B) és a mágneses térerősség (H) közötti összefüggést, a neplineáris görbe pedig kifejezi a polarizáció (J) és a mágneses térerősség (H) közötti kapcsolatot. Látható, hogy a mágneses anyagok jelleggörbái hőmérsékletfüggők, a hőmérséklet növelésével csökken a mágnes erőssége, mágneses indukciója (B_r), polarizációja (J), belső koercitív ereje (H_{cJ}) és koercitív ereje (H_{cB}) is. A reverzibilis hőmérsékleti együtthatók 1°C hőmérséklet-változás hatását fejezik ki a B_r és H_{cJ} értékeire, százalékkal.

Reverzibilis hőmérsékleti együtthatók ⁽¹⁾	(1) az együtthatók 20°C és 120°C között lettek mérve	
a mágneses indukcióra, $\alpha(B_r)$	%/ $^\circ\text{C}$	-0.12
a koercitív erőre, $\alpha(H_{cJ})$	%/ $^\circ\text{C}$	-0.57

1.7 ábra: Hőmérséklet-változás hatása az N40H mágnes B_r és H_{cJ} értékeire [8]

A görbéken jobbról balra haladva ott figyelhető meg a lemagneseződés jelenség kezdete, ahol a lineáris, μ (permeabilitás) meredekségű vonalak „letörnek”, és függőlegesen haladnak lefelé [10]. Fontos, hogy állandó mágneses forgórészbe olyan mágnes kerüljön, ami a forgórész névleges mágneses igénybevételétől nem magneseződik le. A villamos autókba szerelt gépek forgórészében elhelyezkedő mágnesek névleges működés közben

100°C körüli hőmérsékletet is elérhetnek, míg extrém esetekben ennél magasabb hőmérsékleteket is ki kell bírniuk.

1.1.2.2 Jelölések

Egy mágnes jelölésében az első betű a mágnes anyagát jelzi. Gyakran használt jelölések például az N – neodímium, SmCo – szamárium-kobalt és a C – kerámia.

A középső szám a mágnes erőssége MGoe-ben. Neodímium mágnesek jellemzően az alábbi számokat kapják értékül: 28, 30, 33, 35, 38, 40, 42, 45, 48, 50, 52, 55.

A jelölés végén egy vagy két betű található, melyek a mágnes hőmérséklet tűrését reprezentálják. Az elnevezés végén az alábbi betűk és betűkombinációk szerepelhetnek: nincs betű, M, H, SH, UH, EH, AH. A betűkhöz tartoznak hőmérséklet-értékek, melyek azt jelzik, mennyire melegedhet fel a mágnes anélkül, hogy mágnességét elveszítené [11].

1.1.3 Vezető anyagok

Az egyik legelterjedtebb villamos gépekben használt vezető anyag a réz, megmunkálhatóságának, jó villamos vezető- és hővezető-képességének, illetve jó korrozióval szembeni ellenállásának köszönhetően [12]. A réz fajlagos ellenállása (ρ) kiszámítható a réz fajlagos vezetőképességből (σ) [12]:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{5.8001 * 10^7 \frac{S}{m}} = 1.7241 * 10^{-8} \Omega m \quad (1.8)$$

A réz ellenállása hőmérsékletfüggő, hőmérsékleti együtthatója 0.0040/°C [12]. A fajlagos ellenállás ismeretében meghatározható egy vezeték ellenállása (2.9), mely ismeretében következtethetünk a villamos gép tekercselésének egyenáramú ellenállására **Error! Reference source not found..**

$$R = \frac{\rho * l}{A} \quad (1.9)$$

R – ellenállás, l – vezeték hossza, A – vezeték keresztmetszete.

1.1.4 Tekercselések

Az állórész tekercseléseket többek közt az alábbi tulajdonságaik alapján különböztetjük meg:

Koncentrált / Elosztott: koncentrált tekercselésnek azt nevezzük, amikor mindegyik tekercs külön, az állórész egy fogá köré van feltekerve. Elosztott tekercselésről akkor beszélünk, ha egy tekercs több fogat is körülvesz, ahogy körbeér [15].

Egyrétegű / Többrétegű: a tekercselési rétegek száma azt mutatja meg, hogy hány különböző tekercs helyezkedik el egy adott horonyban [15].

Hairpin / Huzalos: akkor nevezünk egy tekercselést hairpin-nek, ha a vezetők téglalap alakú keresztmetszettel rendelkeznek. A vezetékek száma jellemzően páros egy horonyban. Huzalos tekercselésről akkor beszélünk, ha a hornyot kis kör keresztmetszetű vezetékek töltik ki, akár több tucat is futhat belőlünk egy horonyban, kötegeléssel különböző tekercsek részeivé válnak.

Ha a tekercselés fent említett jellemzői ismertek, a tekercselés az alábbi paraméterekkel adható meg [15]:

a – párhuzamos ágak száma

p – póluspárszám

Z – hornyok száma

z – vezetőszám egy horonyban

m – fázisok száma

Menetszám (N):

$$N = \frac{Z * z}{2 * m * a} \quad (1.10)$$

Egy pólusban egy fázisra jutó hornyok száma (q) [15]:

$$q = \frac{Z}{2 * p * m} \quad (1.11)$$

Póluslépés (τ_p): egy pólushoz tartozó hornyok száma:

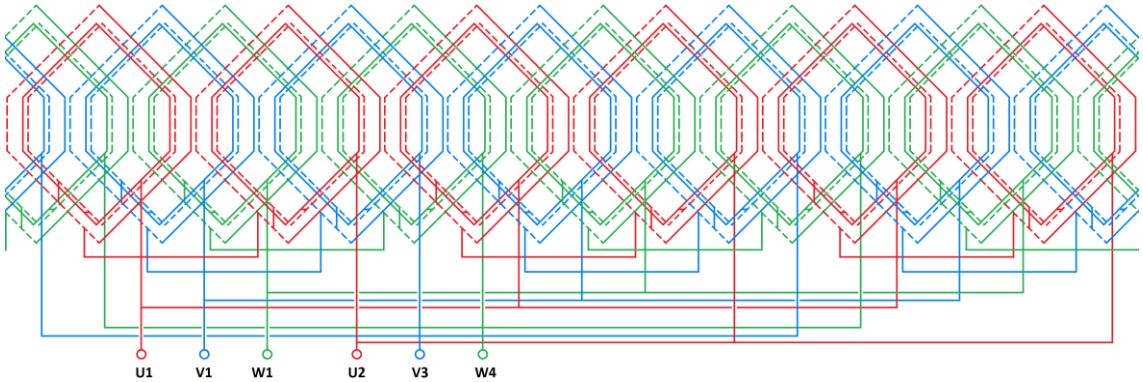
$$\tau_p = m * q \quad (1.12)$$

A póluslépés egy pólust alkotó körcikk szögeként is kifejezhető [16].

$$\tau_p = \frac{360^\circ}{2p} \quad (1.13)$$

Kitöltési tényező: az egy horonyban futó vezetők összesített keresztmetszete (a szigetelés nélkül) osztva a horony keresztmetszetével [15].

A tekercselés egyértelmű definiálásához készíthető úgynevezett tekercselési séma, mely rajzon foglalja össze a fentebb ismertetett jellemzőket.



1.14 ábra: Tesla 3D6 motor hurkos, huzalos tekercselésének sémája

A szakdolgozat keretében vizsgált villamos gép tekercselésének pontos jellemzői a modellt bemutató fejezetben vannak feltüntetve.

1.2 A PMSM elméleti háttere

1.2.1 Működés

Motor üzemben a szinkrongép állórész tekercsrendszerében folyó háromfázisú gerjesztés és a forgórész állandó mágnesei közösen forgó mágneses teret hoznak létre, mellyel együtt forog a forgórész. Az 1.2-es egyenlet a mechanikai és villamos fordulatszám közötti összefüggést tartalmazza. A terhelési szög kifejezi a forgórész mágneses pólusa és az állórész áramvektora közötti eltolást, villamos fokban [35].

1.2.2 D-Q koordinátarendszer

A d-q koordinátarendszer egy forgórészhez rögzített koordinátarendszer, melyre a forgórész mágneses aszimmetriája ($X_d \neq X_q$), vagyis a d- és q-irányban eltérő mágneses vezetőképesség miatt van szükség.

Az áram és a fluxuskapcsolódás fázisértékei az alábbi mátrixokkal $\alpha - \beta$, majd $d - q$ koordinátarendszerbe transzformálhatók [17][18]. Ha zérus sorrendű komponens nem jön

létre, az 2.15-ös kifejezés alapján végezhető el a komponensek transzformációja az állórész (alfa-béta) és a forgórész (d-q) koordinátarendszerek között.

$$\begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \\ \Psi_\gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & \sin(\vartheta) \\ -\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

1.2.3 D-Q feszültségegyenletek

A FEMM által számított értékek d-q koordinátarendszerbe transzformált változatait felhasználva a motor feszültségei tranzientekeket nem tartalmazó üzemállapotokban az alábbi összefüggésekkel határozhatók meg [17]:

$$E_{sd} = -\omega_{villamos} * \Psi_{sq} \quad (1.17)$$

$$E_{sq} = \omega_{villamos} * \Psi_{sd} \quad (1.18)$$

$$V_{md} = -\omega_{villamos} * \Psi_{sq} + I_d * R_{fázis} \quad (1.19)$$

$$V_{mq} = \omega_{villamos} * \Psi_{sd} + I_q * R_{fázis} \quad (1.20)$$

$E_{sd,q}$ – a motor indukált elektromotoros ereje d-q koordinátarendszerben, $V_{md,q}$ – a motor teljes feszültsége d-q koordinátarendszerben.

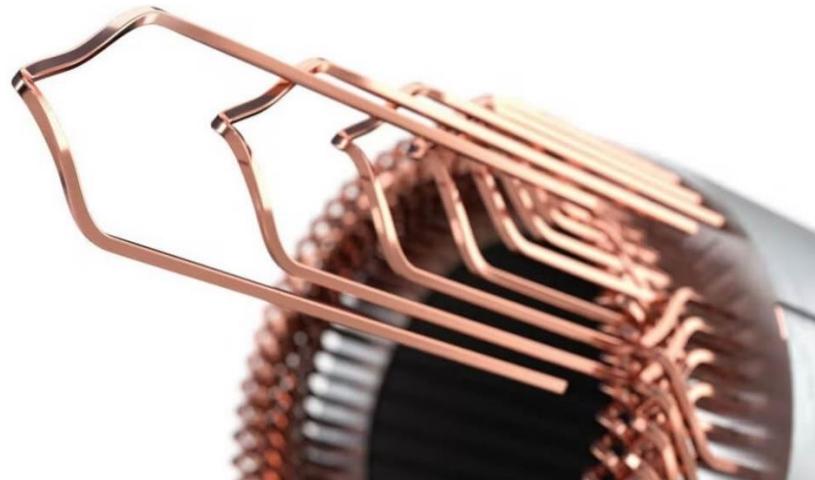
2 Hairpin tekercselés

Ebben a fejezetben a hairpin tekercselés a huzalos tekercseléssel kerül összehasonlításra. Emellett a hairpin tekercselés jellemzői, fajtái, gyártási folyamata és a tervezésekor figyelembe vett tényezők is részletes bemutatásra kerülnek.

2.1 A hairpin tekercselés bemutatása

2.1.1 Mi az a hairpin tekercselés?

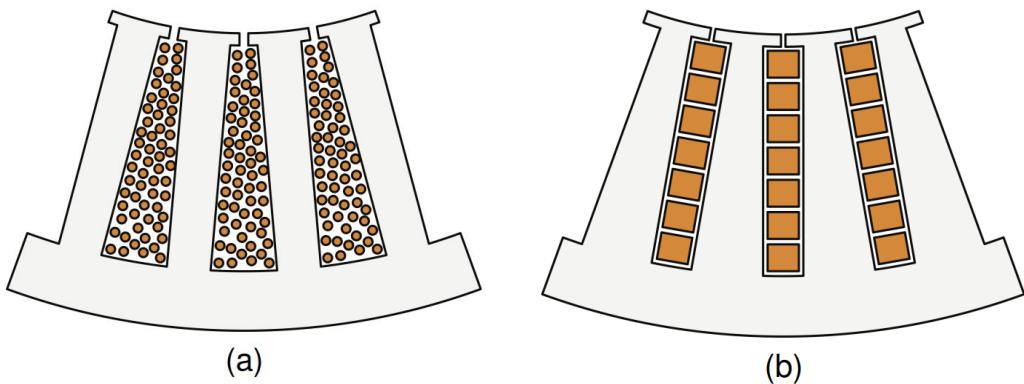
A hairpin tekercselés négyszög keresztmetszetű tömör vezető rudak (hajtűk/hairpinek) felhasználásával kialakított tekercselés. A hairpin elnevezést a kialakításához felhasznált hajlított rúd elemek alakjáról kapta, melyek hasonlítanak egy hajtű alakjához [19]. Egy adott hajtű két ága két különböző horonyban helyezkedik el. A rudak jellemzői a hairpin tekercselés gyártási folyamatának bemutatásakor részletesebb tárgyalásra kerülnek.



2.1 ábra: Hajtú/hairpin alakú réz rudak [20]

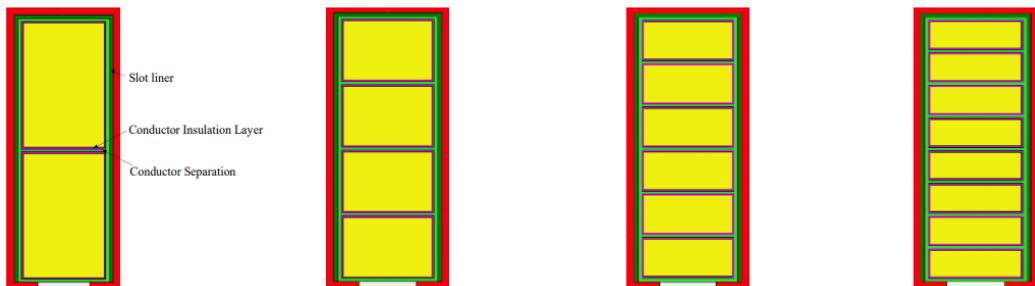
2.1.2 Összehasonlítás a huzalos tekercseléssel

A rudak jellemzően négyszög alakú hornyokban helyezkednek el, egymástól egyenlő távolságra [21]. A négyszög alakú horony a középponttól távolodva növekvő szélességű fogakat eredményez, ellenben a huzalos tekercselésekkel, melyek hornyait kialakító fogai állandó szélességűek is lehetnek. Mindkét tekercselés esetében a horony és fog méreteket a légrés közelében rendelkezésre álló hely határozza meg, figyelembe véve más tényezőket is, mint például az állórész telítődése [19].



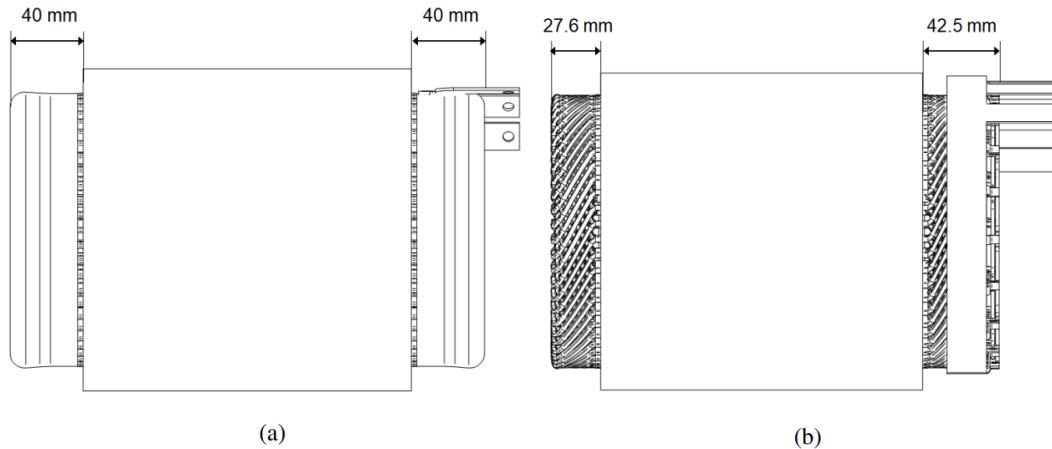
2.2 ábra: A huzalos tekercselés (a) és a hairpin tekercselés (b) geometriai különbségeinek szemléltetése három horonnyal [19].

A hairpin tekercselés általában többrétegű, jellemzően páros számú rétegből áll. Egy adott horonyban mindegyik rúd el van szigetelve az összes többi, azonos horonyban található rúdtól. A rétegszám növelésével csökken a kitöltési tényező és az örvényáramok okozta veszteség [22]. A későbbiekben ismertetett hagyományos hairpin tekercselés rétegeinek növelésével növekszik a gyártás során szükséges lézerrel végzett hegesztések száma is.



2.3 ábra: Két-, négy-, hat- és nyolcrétegű hairpin tekercselésekhez tartozó horonykeresztmetszetek ábrázolása a közöttük lévő szigetelésekkel együtt [22].

A két ismertetett tekercselési séma tekercsfejméretben is különbözik, a hairpin tekercselés tekercsfeje jellemzően rövidebb, mint a huzalos tekercselés tekercsfeje [21]. Ez különösen igaz a folytonos hairpin tekercselésre, mely a következő pontban kerül bemutatásra.



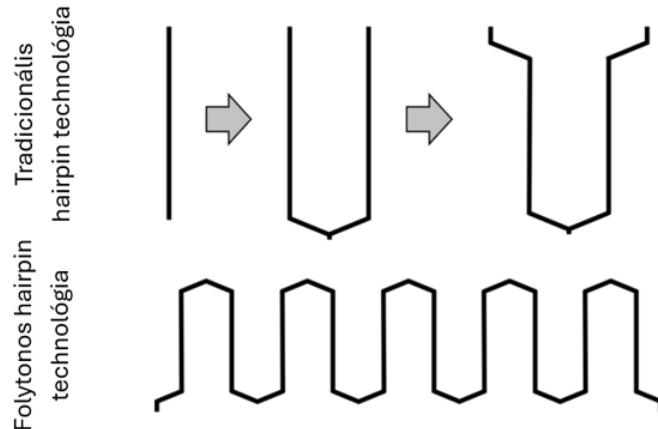
2.4 ábra: A huzalos tekercselés tekercsfejmérete (a) és a hairpin tekercselés tekercsfejmérete (b) két azonos méretű villamos gépben [21].

Ezen különbségeknek köszönhetően hairpin tekercselést alkalmazva azonos teljesítményű villamos gép kisebb méretű állórésszel és tekercsfejjel elkészíthető, mint huzalos tekercselés alkalmazásával. Ez egy kisebb méretű, kisebb tömegű és nagyobb teljesítménysűrűséggel rendelkező villamos gépet eredményez [19].

A hairpin tekercselések egyik legnagyobb hátránya, a nagy örvényáram okozta veszteségek, a következő fejezetben kerül ismertetésre.

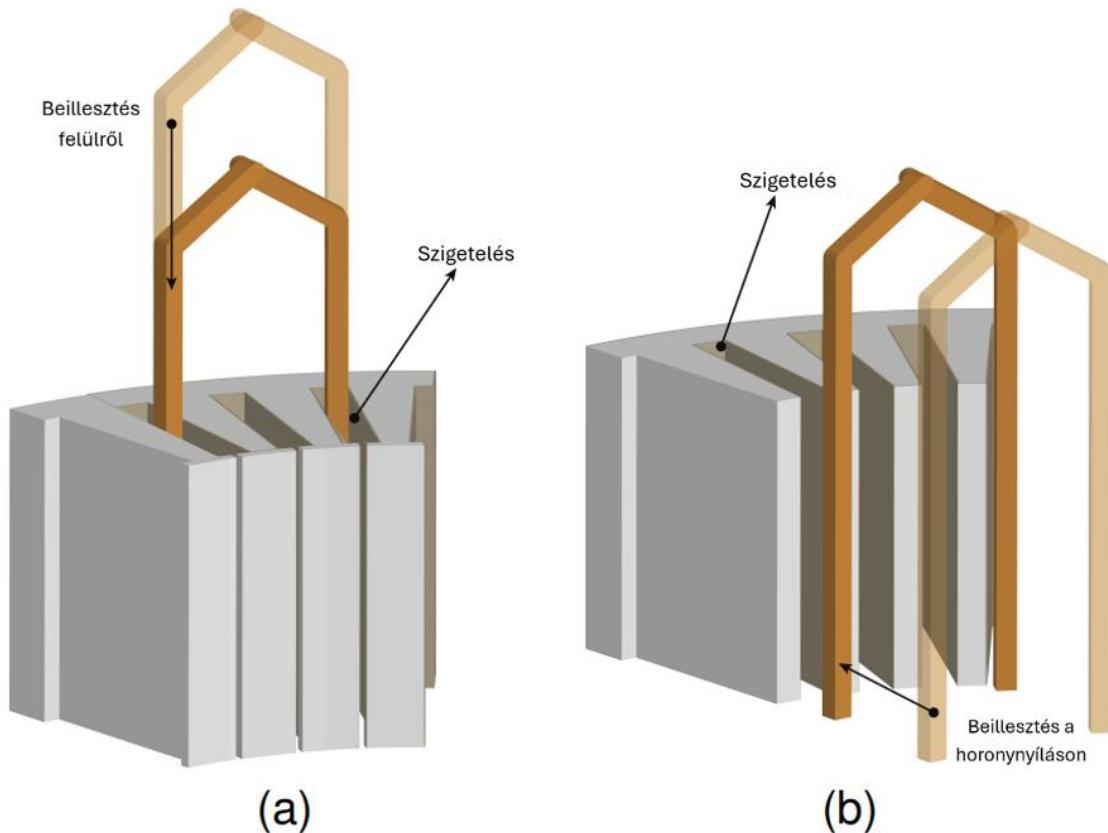
2.1.3 A hairpin tekercselés fajtái

A hairpin tekercselés két legelterjedtebb fajtája a folytonos és a tradicionális hairpin tekercselés. A két séma azonosan tölti ki a hornytot és azonos előnyei vannak a huzalos tekercseléssel szemben, de lényeges különbségek is megtalálhatók közöttük.



2.5 ábra: Tradicionális és folytonos hairpin tekercselés kialakításához szükséges rudak alakja az állórészbe történő illesztést megelőzően [23]

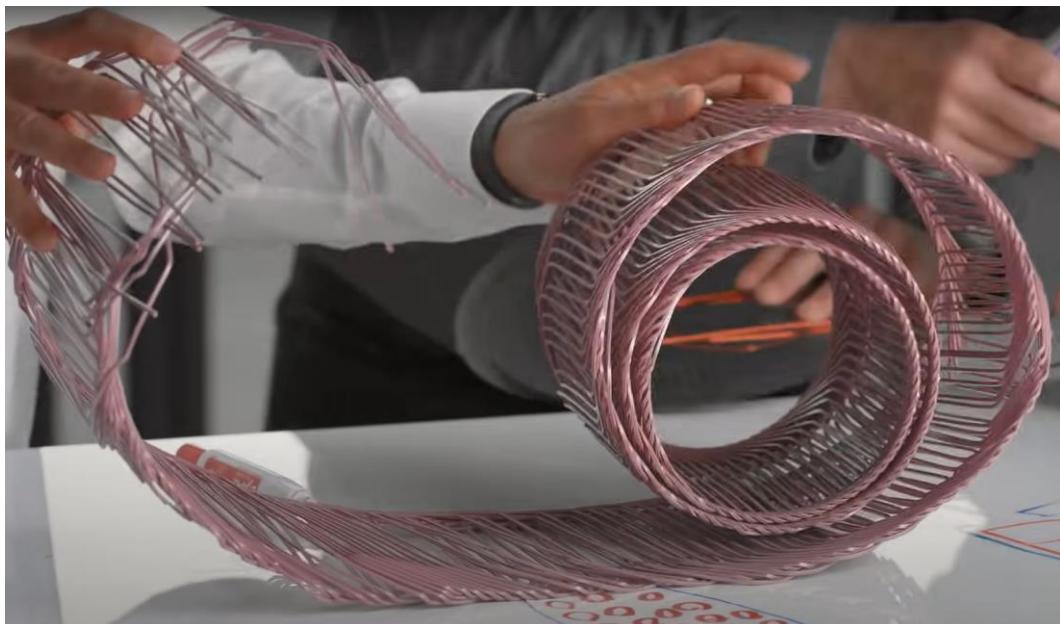
A kétféle tekercselés kialakításához különböző állórészre és gyártási folyamatra van szükség. A folytonos hairpin tekercselés teljesen kialakításra kerül a beültetés előtt, amely sugárirányban történő beültetést követel meg. Ezen technológia alkalmazásakor nyitott horonytípusokat kell alkalmazni. A beillesztés úgy történik, hogy a teljes kialakított tekercselés kissé összetömörítve úgy van betéve a forgórész helyére, hogy a vezetők a hornyok mellé kerüljenek. A következő lépésben egy gép középről, sugárirányba szétfeszíti a folytonos tekercselést, beillesztve azt a nyitott hornyú állórészbe [24]. A folyamat a 2.6-os ábra b) részén van szemléltetve a folytonos hairpin tekercselés egyetlen hairpin rúdnyi szekcióján. A tradicionális hairpin tekercselés elemei felülről kerülnek a hornyokba, ennek köszönhetően részlegesen zárt hornyú állórész alkalmazása is lehetséges. Az összeköttetéseket egy későbbi lépésben, hegesztéssel alakítják ki [25].



2.6 ábra: Tradicionális (a) és folytonos (b) hairpin tekercselések elemeinek horonyba illesztési iránya [19]

Mint említésre került, a folytonos és tradicionális hairpin tekercselés azonosan tölti ki a hornyot, mégis saját előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek. A folytonos hairpin tekercselés egyik fő előnye, hogy tekercsfeje rövidebb, mert jobb helykihasználással elkészíthető, mint a tradicionálisé [21]. Ez legfőképp annak köszönhető, hogy

kialakításához nincs szükség hegesztések alkalmazására. A hegesztés kihagyása azért is előnyös választás, mert pontos lézeres hegesztések készítéséhez összetett technológiai folyamatra van szükség. A tradicionális hairpin tekercselés egyik fő előnye, hogy állórészében részlegesen zárt hornyok alkalmazhatók. A részlegesen zárt hornyok több helyet biztosítanak a mágneses fluxus áramlásához, mint a nyitott hornyok. A fluxus zavartalan áramlásának köszönhetően az adott gép simább, kevésbé lüktető működésre képes [15]. Egy másik fő előnye a tradicionális tekercselésnek az, hogy gyártási folyamata könnyebben megvalósítható automatizált gyártósorokkal. A folytonos hairpin tekercselés kialakításához bonyolultabb, speciális gépekre van szükség, míg a tradicionális hairpin tekercselés kialakításakor a legnagyobb kihívás a hegesztések végrehajtása.



2.7 ábra: A Lucid motor folytonos hairpin tekercselése [24]

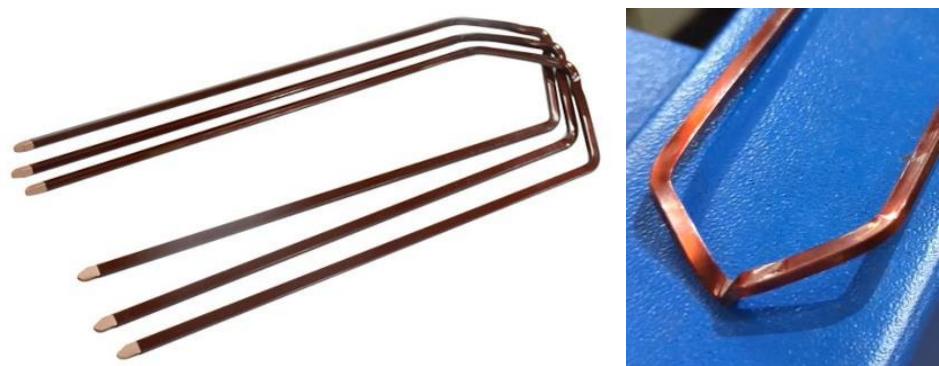
2.2 A tradicionális hairpin tekercselés gyártási folyamata

A tradicionális hairpin tekercselések gyártása teljes mértékben kivitelezhető automatizált gyártósorokkal. A tekercselés gyártási folyamata a hosszú, szigetelt, négyzetű keresztmetszetű réz vezetőtől egészen a kivezetésekkel ellátott tekercselt állórészig kerül áttekintésre. Az állórész lemezcsomag elkészítése nem része az áttekintett folyamatnak. A lépések sorrendje az egyik létező általános folyamatra jellemző, léteznek gyártósorok, melyek néhány feladatot más sorrendben hajtanak végre.

2.2.1 Lépések

I. Rudak hairpin formájúra hajlítása és levágása a rúd többi részéről

Ahhoz, hogy a réz rudak elnyerjék a kívánt formájukat, háromdimenziós hajlítást kell végezni rajtuk. Először úgy kell hármat hajlítani a rúd közepén, hogy annak hairpin alakja legyen, majd az asztalon fekvő hairpin darab síkjára merőleges irányban is szükséges hajlítást végezni. Ezzel a hajlítással érjük el, hogy a hairpin darab két vége az állórészbe történő illesztéskor automatikusan két különböző rétegben foglalja el a haipinnek szánt helyet. Ez a rétegugrás elengedhetetlen a jó helykihasználtsággal rendelkező hairpin tekercselés kialakításához.



2.8 ábra: I. lépés eredménye [26][27]

Közvetlenül a rudak formázása után a kész hairpin elem leválasztásra kerül a hosszú vezetőről.



2.9 ábra: I. lépés [28]

II. Szigetelés eltávolítása a hairpin elemek felületeiről

A szigetelés egy precíz lézer által a hairpin rudak minden két végéről eltávolításra kerül. Ezek a szigetelés nélküli végek kerülnek majd a tekercselés azon végére, ahol a hegesztést

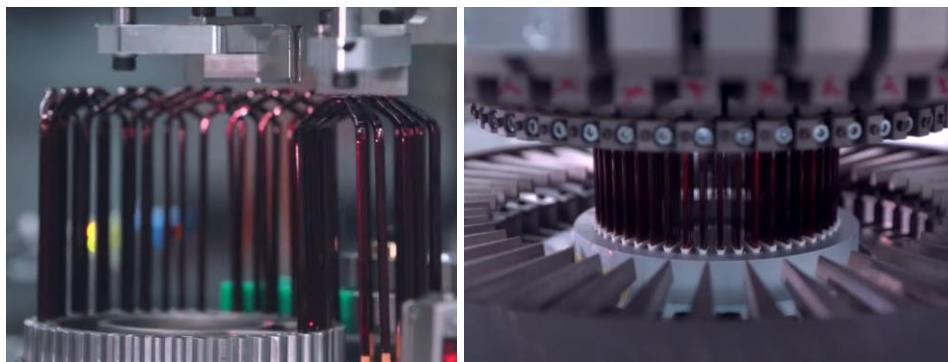
végzik. Az elvárt tökéletes hegesztés kivitelezése érdekében a vezető végeket nem takarhatja el szigetelő anyag a folyamat közben.



2.10 ábra: II. lépés [28]

III. Hairpin elemek körbe rendezése és állórészbe illesztése

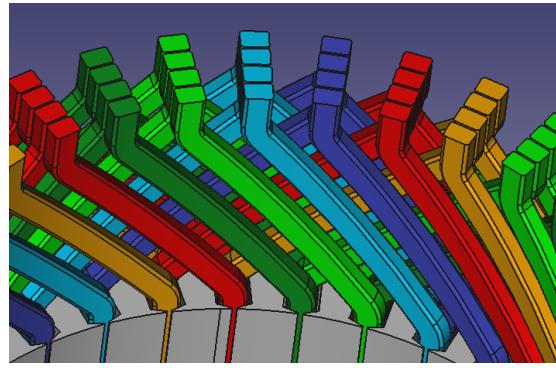
A hairpin elemeket egyesével egy forgó formában helyezik el úgy, hogy azok kialakítsák a többrétegű tekercseléshez szükséges elrendezést. A forma pontosan olyan alakba rendezi a hairpin elemeket, amilyen az állórészbe illik. Az elemek összességét egy robotkar az állórész szigetelt hornyáiba nyomja.



2.11 ábra: III. lépés [28]

IV. Hairpin elemek végeinek meghajlítása

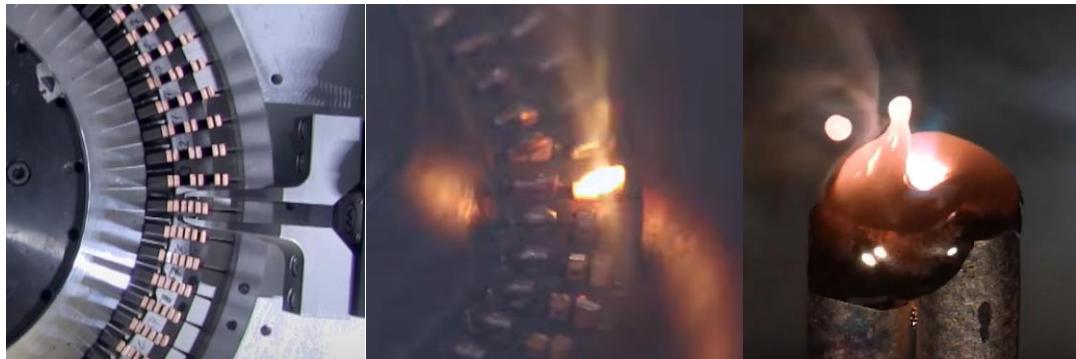
A hairpin elemek egyenes végeit forgó, préselő mozdulattal hegesztéshez alkalmas pozícióba hajlítják. Ennek úgy kell történnie, hogy minden réteg összes vezetője a réteg mellett levő rétegek vezetőivel ellentétes irányba hajoljon el, hogy a gépben körbefonódó ágak kialakíthatóak legyenek. minden réteg vezetőinek azonos irányba történő hajlítása esetén a vezetők végei csak a saját hornyuk többi vezetőjével érintkeznének.



2.12 ábra: IV. lépés eredménye – saját készítésű háromdimenziós hairpin tekercselés modell

V. Hairpin elemek végeinek párokba rendezése és hegesztése

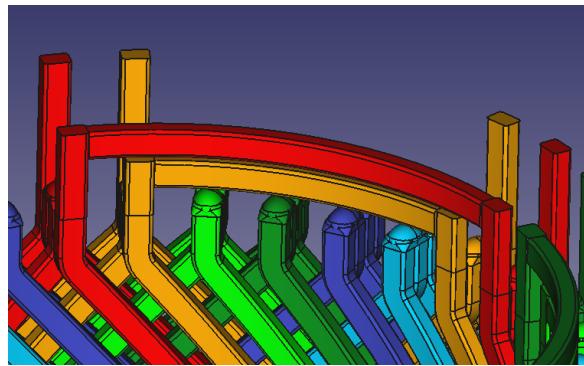
A hairpin elemek csupasz végeit úgy különítik el, hogy egy adott vezető darab csak egyetlen másik szomszédos vezetővel érintkezzen. Az elkülönítés után a vezetőpárokon lézeres hegesztést végeznek, ami minden vezető végét megolvasztja úgy, hogy azok közösen olvadjanak össze [28]. Az elkülönítés és a hegesztés nem minden horony esetében történik a felvázolt módon, a többi eset a hairpin tekercselés különlegességeinél lesz tárgyalva.



2.13 ábra: V. lépés [28][29]

VI. A szükséges ugrások és kivezetések elkészítése

Ahhoz, hogy a hairpin elemek valóban egy hat kivezetéssel rendelkező háromfázisú tekercsrendszert alkossanak, azok végeit ennek megfelelő módon kell csatlakoztatni. Két olyan összekötendő vezető között, melyek között nem lehet forrasztani, ugrást alakítanak ki az összeköttetés létrehozására. Az ugrások és a kivezetések az alábbi ábrán láthatók.



2.14 ábra: VI. lépés eredménye

2.3 Egy adott tekercselési séma megvalósítása

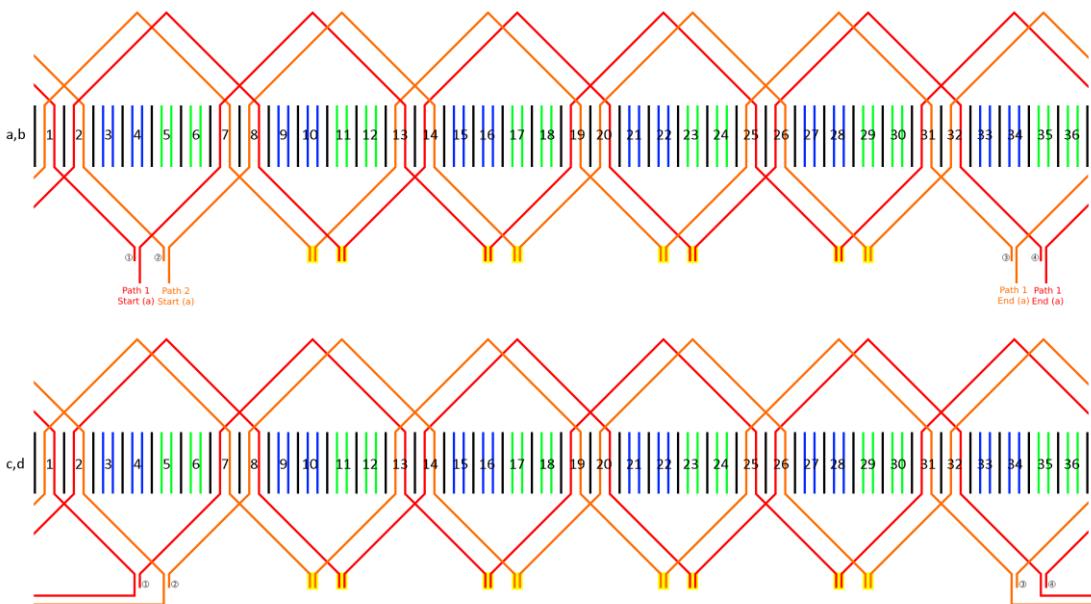
A létrehozni kívánt tekercsrendszer meghatározza, hogy milyen módon kerülnek kialakításra a tradicionális hairpin tekercselés összeköttetései (ugrások és forrasztások). Egy rövid esettanulmányon keresztül a tradicionális hairpin tekercselés leegyszerűsített tervezési folyamata kerül bemutatásra, a paraméterektől a hat kivezetéssel rendelkező háromdimenziós modellig. A modell illusztrálja, hogyan lehet a definiált paraméterekkel rendelkező tekercselést létrehozni hegesztések és ugrások kialakításával.

2.3.1 A bemutatandó tekercselés paraméterei

A modell célja egy háromfázisú ($m=3$), hatpólusú ($p=3$), négyrétegű (a,b,c,d) hairpin tekercselés bemutatása, mely két párhuzamos ággal rendelkezik ($a=2$). A pólusonkénti fázisonkénti hornyok száma kettő ($q=2$).

2.3.2 Az elkészített tekercselési séma

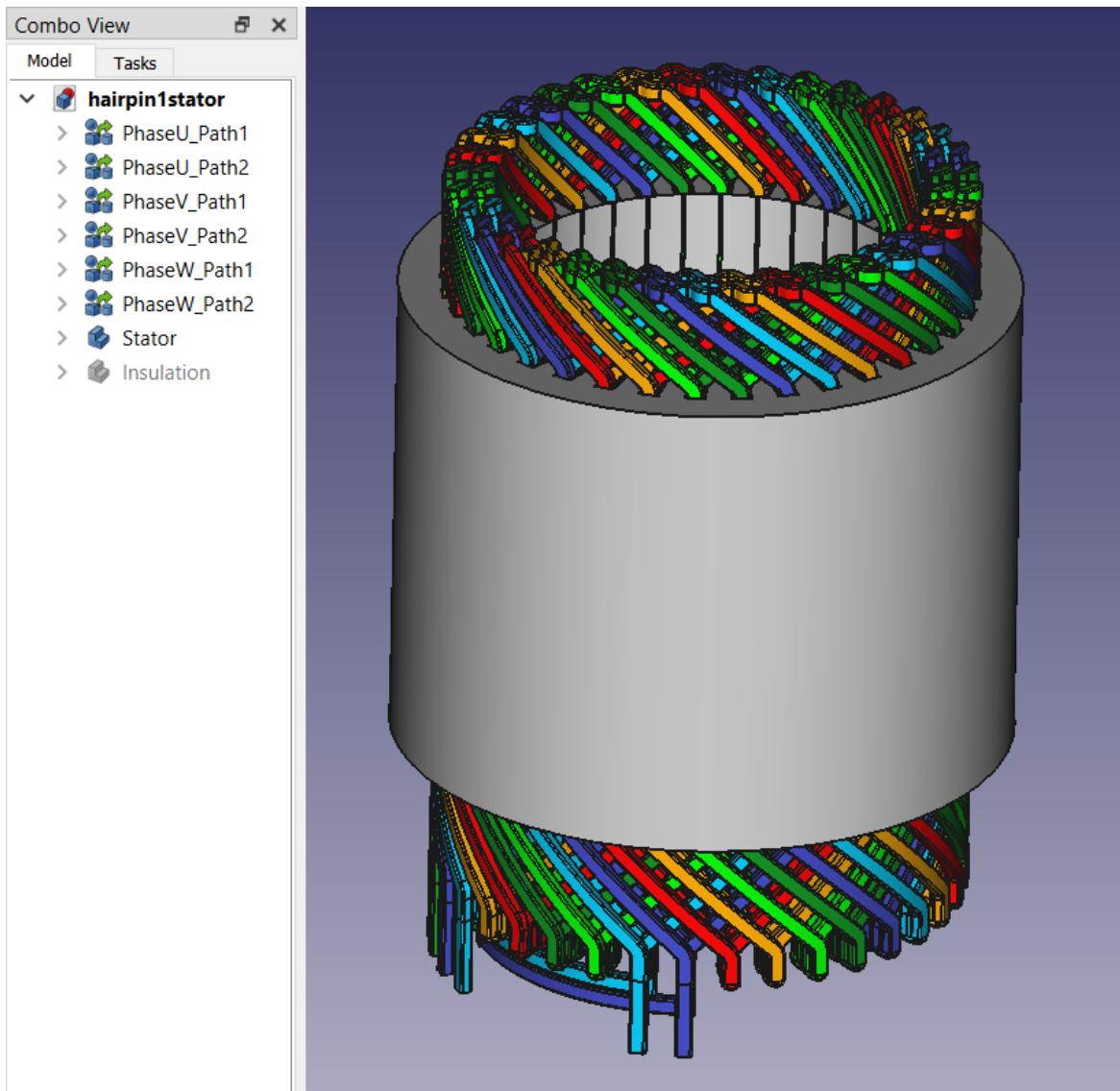
$p=3, q=2, a=2, m=3$



2.15 ábra: Négyrétegű hullámos hairpin tekercselés egy fázisának tekercselési sémája

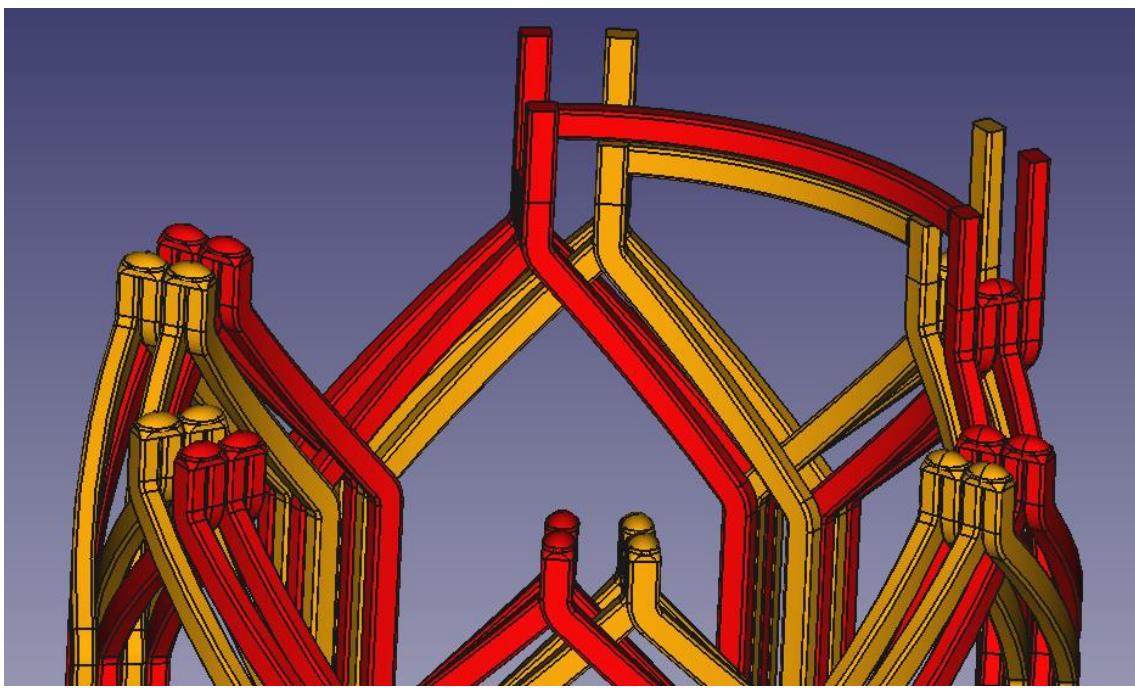
A sémán egy fázishoz tartozó hairpin elemek vannak felrajzolva, amelyek két párhuzamos ágat alkotnak. Ezek az ágak enyhén különböző színekkel vannak jelölve. A négyrétegű tekercselés két-két réteg külön ábrázolásával van feltüntetve. A légréshez legközelebbi réteg a „d”, a legtávolabbi az „a”. Az ábrán a hegesztések citromsárga téglalappal, illetve számozással vannak jelölve. A kivezetések a felső ábra alsó részén vannak feltüntetve, míg az azonos rétegbe történő ugrások az alsó ábra alsó részén. A sémából látható, hogy a definiált tekercselés kialakításához a tipikus páros hegesztés helyett fázisonként négy helyen is egyetlen hegesztés megvalósítására van szükség. Ennek oka, hogy kialakítható legyen az „a-b” rétegek és a „c-d” rétegek közötti összeköttetés a „b” és „c” rétegek közötti hegesztéssel. A kivezetések és ugrások az „a” és „d” rétegek vezetőinél kerülnek kialakításra.

2.3.3 A háromdimenziós FreeCAD modell



2.16 ábra: Négyrétegű hairpin tekercselés háromdimenziós modellje ($p=3$, $q=2$, $a=2$, $m=3$)

A modell elemei áganként külön csoportokba vannak rendezve, így azok megjelenítésével és eltüntetésével jobban megvizsgálható a hairpin tekercselés kialakítása. Az alábbi ábrán a tekercselési sémán bemutatott párhuzamos ágak háromdimenziós kialakítása van megjelenítve. Latható, hogy ebben a fázisban valóban négy helyen van szükség b-c rétegek közötti hegesztésre, hogy az ugrások és kivezetések helyet kapjanak.



2.17 ábra: Hairpin tekercselés hegesztései, ugrásai és kivezetései egy fázisban

3 Örvényáramok

A hairpin tekercselés egyik legnagyobb hátránya a huzalos tekercseléssel szemben, hogy vezetőinek nagy keresztmetszete miatt jelentős örvényáramok keletkeznek benne, különösen nagy fordulatszámú, azaz nagy frekvenciájú üzemállapotok közben. Minél nagyobb örvényáramok alakulnak ki a vezetők belsejében, annál nagyobb veszteség, tehát melegedés keletkezik a gépben. Míg a keletkező veszteségeket huzalos tekercseléssel ellátott villamos gépekben sokszor elhanyagolhatjuk a vezetők kis keresztmetszetének köszönhetően, hairpin tekercselésű gép vizsgálatakor a nagyobb vezető-keresztmetszet miatt nem tehetünk ilyen elhanyagolást [30].

3.1 Az örvényáramok kialakulása

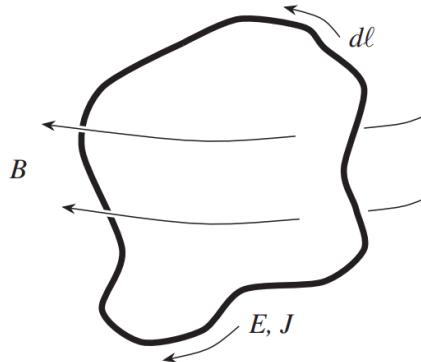
Örvényáramnak olyan áramokat nevezünk, melyek időben változó mágneses mező okozta indukció hatására jönnek létre valamilyen vezető anyag belsejében [30]. A jelenség megértéséhez ismernünk kell a Faraday-féle indukciós törvényt és a Lenz-törvényt.

3.1.1 A Faraday-féle indukciós törvény és a Lenz-törvény

A Faraday-féle indukciós törvény a Maxwell-egyenletek egyike. A törvény integrális alakban kifejezve [15]:

$$\oint_{L(S)} \vec{E} * d\vec{l} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{s} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

A törvény azt írja le, hogy a mágneses indukció változása vezető anyagban feszültséget indukál a létrejövő elektromos tér által [31]. A törvényben a negatív előjel reprezentálja Lenz törvényét, mely azt állítja, hogy a vezető anyagban olyan irányú feszültség indukálódik, melynek hatására az indukált áram a mágneses mező változását akadályozó mezőt hoz létre. A 3.2-es ábra egy egyszerű példával mutatja be a jelenséget. A vezető anyagból készült hurok által határolt felületet átdöfik a mágneses indukcióvalak, melyek a nyilak irányával megegyező irányban növekvő mágneses teret reprezentálnak. A jobbkézsabály segítségével könnyen ellenőrizhetjük, hogy a vezető hurokban folyó áram olyan mágneses mezőt hoz létre, ami a hurok által határolt felületet az eredeti mágneses mező változásával ellentétes irányú [30].

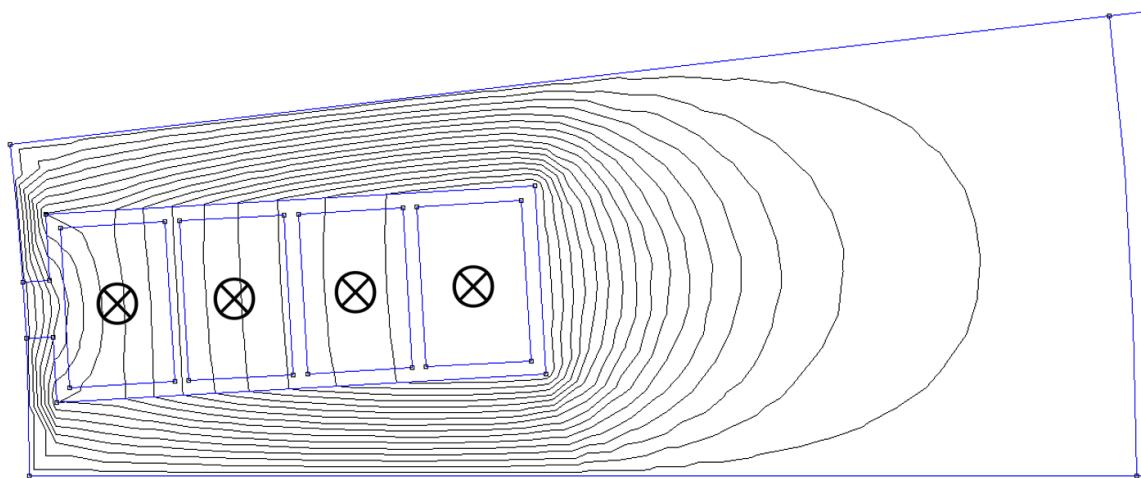


3.2 ábra: Vezető körben növekvő mágneses indukció által létrehozott áram iránya [30]

Örvényáram nem csak hurkokban tud keletkezni ennek az elvnek megfelelően. Örvényáram bármilyen vezető anyagban kialakulhat, amely kapcsolatba lép változó mágneses mezővel. Ebben a dolgozatban az örvényáram elnevezés a következő pontban áttekintett, hairpin tekercselés vezetőiben létrejövő örvényáramokra utal, ha ez nincs másképp definiálva.

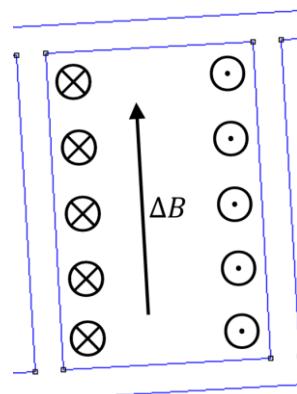
3.2 Örvényáramok hairpin tekercselésben

Vegyük egy hairpin tekercselésű villamos gép állórészének egyetlen horonyhoz tartozó keresztmetszetét. A hairpin vezetők belsejében keletkező örvényáramokhoz képest az állórész lemezcsomagban keletkező örvényáramok elhanyagolhatóan kicsik a lemezelt struktúrának köszönhetően [30].



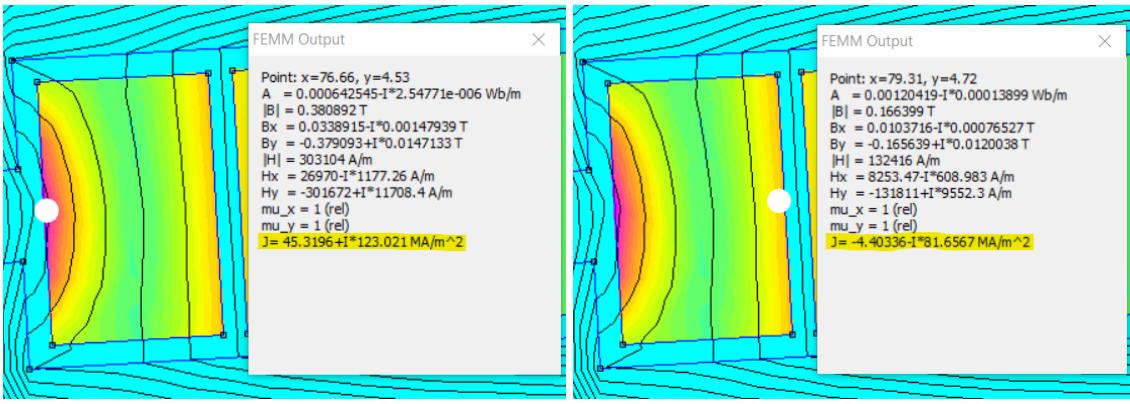
3.3 ábra: Hairpin vezetőkkel töltött horony keresztmetszete

Az ábrán be van jelölve a vezetőkben folyó áramok síkba befelé mutató iránya (\otimes). A fenti ábra egy frekvenciatartományban futtatott analízis eredménye. A vezetőkben egyenként 216,5 A nagyságú, 1kHz frekvenciájú áram folyik. Az áramok hatására létrejövő mágneses mezőt a mágneses vektorpotenciál ekvipotenciális kontúrvonalai jelenítik meg. Az áramok irányát figyelembe véve a jobbkézsabály segítségével könnyen észrevehető, hogy a megfigyelt pillanatban a mező a lap teteje felé mutató irányban (az ábrán lentről felfele) halad át a hairpin vezető darabokon. Ez alapján feltételezhetjük, hogy egy adott hairpin vezetőben kialakuló örvényáramok iránya a következő módon kell, hogy kinézzen:



3.4 ábra: Az örvényáramok iránya – síkba befelé (\otimes) és síkból kifelé (\odot)

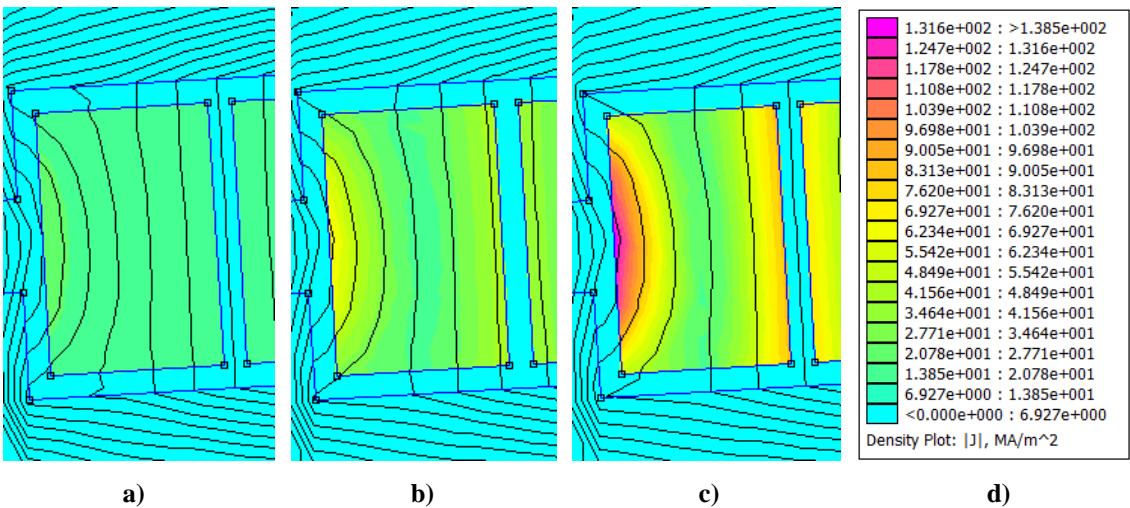
Mivel tudjuk, hogy a FEMM szoftverben a síkba befelé folyó áram pozitív értékű és a kifelé folyó áram negatív értékű, az analízis eredményei közül az áramsűrűség eloszlását megjelenítve leellenőrizhetjük, hogy az örvényáramok valóban a fenti ábrán jelzett irányval jelennek meg [31]. Fontos megjegyezni, hogy az örvényáramok nem változtatják meg a vezetőben folyó eredő áramerősséget. Amennyi áram örvényáram formájában a síkból kifelé mutató irányba folyik, ugyanannyi áram folyik a vezető másik felén a síkba befelé mutató irányba.



3.5 ábra: Az örvényáramok értékei – a bal oldali ábra a vezető bal oldalán ellenőrzi a pozitív áramsűrűséget, a jobb oldali ábra a vezető jobb oldalán ellenőrzi a negatív áramsűrűséget

3.3 Miért hátrányos, ha örvényáramok alakulnak ki villamos gépek vezetőiben?

Vizsgáljuk az áramsűrűség eloszlását 100Hz-es, 500Hz-es és 1kHz-es frekvencián az előző példában analizált horonynyílásánál elhelyezkedő vezető keresztmetszetében!



3.6 ábra: Áramsűrűség eloszlása egy hairpin vezetőben 100Hz-en (a), 500Hz-en (b) és 1kHz-en (c), jelmagyarázáttal (d)

Láthatjuk, hogy a frekvencia növelésével egyre jobban eltér az áramsűrűség maximális értéke az egyenáramú maximális értéktől, és eloszlása egyre jobban eltér az egyenletes eloszlástól. Ebben a példában 1kHz-en egy nagyságrendű különbség is keletkezhet egy vezető belséjében annak két különböző részén. Az örvényáramok okozta problémák megértéséhez meg kell vizsgálnunk, milyen összefüggés szerint számoljuk a Joule-

veszteséget, és át kell alakítanunk, hogy az áramsűrűség függvényében legyen felírva [31]:

$$P = I^2 * R = (J * A)^2 * R = J^2 * A^2 * \frac{\varrho_{réz} * l}{A} = J^2 * A * l * \varrho \quad (3.7)$$

P – Joule-veszteség, I – áramerősség, J – áramsűrűség, R – a vezető ellenállása, $\varrho_{réz}$ – a réz fajlagos ellenállása, l – a vezető darab (modell) hossza, A – a vezető keresztmetszete

Az egyenletből látszik, hogy a veszteség és az áramsűrűség között négyzetes az összefüggés. Ez azt jelenti, hogy hiába folyik 100Hz-en és 1kHz-en is a vezetőben összesen 216,5 A, ha ez egyenetlenül oszlik el a vezetőben és örvényáramok alakulnak ki, akkor a különbség a veszteségen az áramsűrűség négyzetével változik. Az egyenlet alapján a vezetőt felosztó háromszögháló egy-egy háromszögében ki lehet számolni az adott háromszögméretű vezető darab veszteségét. A szoftver ezen elv alapján megadja az a), b) illetve c) esetben a vezető veszteségeket a vizsgált vezetőre, egy villamos periódus alatt. Az eredmények az alábbi táblázatban találhatók.

f	P
100	25
500	153
1000	477
[Hz]	[mW]

3.8 ábra: Négyvezetős horony nyílásánál elhelyezkedő vezető vesztesége vezetőnként 216,5 A gerjesztés hatására

A későbbiekben vizsgált hairpin tekercselésű PMSM vezetőiben keletkező veszteségek számításához az állandó mágnesekkel felszerelt forgórész forgása miatt nem alkalmazható a frekvenciatartományban végzett vizsgálat. Ennek kiküszöbölésére egy vezetőkben jelentkező örvényáramokat meghatározó eszköz kerül kifejlesztésre, mely működése a későbbi fejezetekben kerül bemutatásra.

3.4 Örvényáram-csökkentési módszerek

A hairpin tekercselésben keletkező örvényáram-veszteségek csökkentése több módon érhető el, melyek közül két látványos eset kerül bemutatásra. A két eset a vezető sugárirányú dimenziójának (hosszúság) csökkentése, és a vezető érintőirányú dimenziójának (szélesség) növelése.

3.4.1 Hosszúság csökkentése – rétegszám növelése

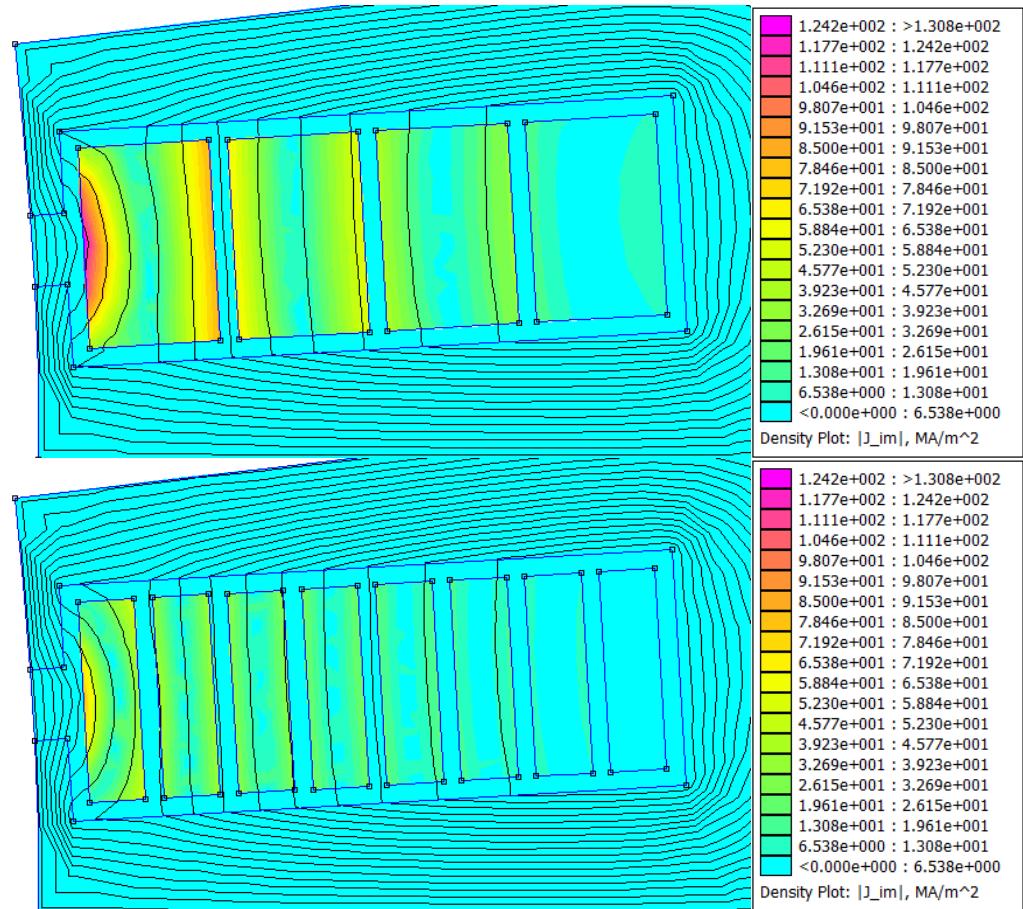
A hairpin elem sugárirányú dimenziójának csökkentése a tekercselés rétegeinek növelését eredményezi. Feltéve, hogy a horony mérete változatlan, a rétegszám növelésével minden új réteg beépítésével az egyes vezető elemek keresztmetszetének hosszúságát csökkenteni kell. A rétegek növelésével azonban csökken a horony kitöltési tényezője [22].

Az alábbi példában azonos méretű horonyban, állandó vastagságú szigetelés feltételezésével megvalósított négy- és nyolcrétegű hairpin tekercselések veszteségei vannak összehasonlítva. Több réteg kialakítása esetén a párhuzamos ágak száma is változik (négyről nyolc vezetőre váltáskor a párhuzamos ágak száma duplázódik) a horonyban lévő vezetők számával együtt, ami növeli a tekercselés komplexitását. Az eredmények frekvenciatartomány-beli szimulációk alkalmazásával lettek kiszámítva. A vezetők áramainak amplitúdója a négyrétegű modellben 216.5 A, a nyolcrétegű modellben ennek a fele, így a horony keresztmetszetén átáramló áram a két modellben megegyezik. A frekvencia 1 kHz, a horony dimenziói 13mm x 5mm. A szigetelés vastagága mindenhol 0,38mm.

Rétegszám	Kitöltési tényező	J_max_örvény	P_össz
4	0.724	130.762	118.496
8	0.625	81.433	47.666
[db]	[]	[MA/m ²]	[W]

3.9 ábra: Négy- és nyolcrétegű hairpin tekercselés paraméterei azonos méretű horonyban

Látható, hogy a rétegszám növelésével valóban csökken a veszteség és a horony kitöltési tényezője. Ez egy optimalizálási feladat a rétegek száma és a kitöltési tényező között, mely napjainkban jellemzően hat- és nyolcrétegű hairpin tekercselésű villamos gépeket eredményezett az autóiparban [19]. Az autóiparban alkalmazott hairpin tekercselésű gépek egy külön fejezetben kerülnek részletezésre.



3.10 ábra: Négy- és nyolcrétegű hairpin tekercselés árameloszlása azonos méretű hornyban

3.4.2 Szélesség növelése – szélesebb hornyok

A réz vezetők mágneses permeabilitása megegyezik a vákuum mágneses permeabilitásával, tehát $\mu_{réz} = \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{H}{m}$, vagyis minden körre $\mu_r = 1$ [32].

Ez azt jelenti, hogy az állórészben kialakuló mágneses körök egy horony szélességű μ_0 permeabilitású szakaszon keresztül záródnak. A mágneses kör a mágneses tér olyan zárt része (fluxuscsatornája), amelyben a fluxus állandónak tekinthető, belőle indukciójonalak nem lépnek ki. Lényegében minden indukciójonal egy mágneses kör [33]. Adott, kizárolag μ permeabilitású anyagban záródó mágneses kör reluktanciája az alábbi képlettel kapható meg:

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (3.11)$$

R_m – reluktancia (mágneses ellenállás), l – mágneses kör hossza, μ – mágneses permeabilitás, $\mu = \mu_0 \mu_r$, A – felület, melyen a mágneses kör fluxusa áthatol.

Többféle anyagban záródó mágneses kör reluktanciája több szakasz reluktaciának összegeként vehető figyelembe. Egy horron keresztül záródó mágneses kör esetében ez az alábbi módon nézhet ki [33]:

$$R_m = \frac{l_{acél}}{\mu_{acél} A} + \frac{l_{horony}}{\mu_0 A} \quad (3.12)$$

$l_{acél}$ – a mágneses kör állórészben lévő szakaszának hossza, l_{horony} – a mágneses kör horonyban lévő szakaszának hossza.

Az összefüggésből látszik, hogy egy adott $l = l_{acél} + l_{horony}$ hosszúságú mágneskörnek minél hosszabb szakasza záródik a horonyban, annál nagyobb lesz a mágneses kör reluktanciája. A reluktancia növekedése a fluxus csökkenésével jár, mivel azonos gerjesztés nagyobb reluktanciájú mágneses körben kisebb fluxus létrehozására képes [34]:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} \quad (3.13)$$

A Θ -val jelölt gerjesztés az Ampère-féle gerjesztési törvényből adódik [31]:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \oint_A \vec{J} d\vec{A} = \Theta \quad (3.14)$$

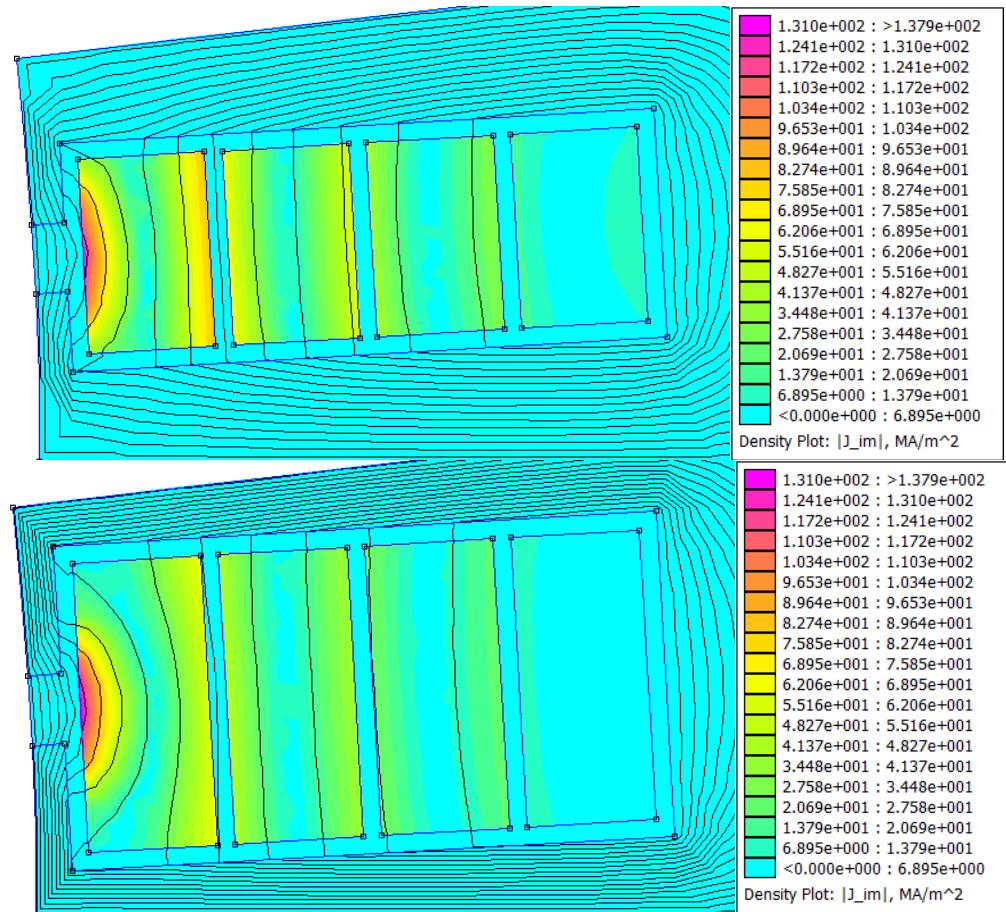
A horony és a vezetők szélességének növelésével azonban csökken az állórész fogainak szélessége is. Ez kisebb keresztmetszetet biztosít azonos mennyiségű áramló fluxusnak, mely következtében a gép állórészének légrés melletti telítődéséhez gyengébb mágneses mező is elegendő. A fog legszűkebb keresztmetszetének bizonyos határon túli csökkentése rontja a gép nyomatékát, teljesítményét, melegedését és hatékonyságát.

Az alábbi példában egy négyrétegű tekercselés és annak szélesebb horonyú változata kerülnek összehasonlításra. Az áramok amplitúdója minden vezetőben 216,5 A, a frekvencia 1 kHz. A szigetelés vastagsága mindenhol 0,38 mm. Az egyik horony mérete 13 mm x 5 mm, a szélesebbé 13 mm x 7 mm.

Rétegszám	Kitöltési tényező	J_max_örvény	P_össz
4	0.724	130.762	118.496
4 - széles	0.761	137.904	98.321
[db]	[]	[MA/m ²]	[W]

3.15 ábra: Két négyrétegű hairpin tekercselés paraméterei különböző méretű hornyokban

Látható, hogy a horony szélességének növelésével valóban csökken az örvényáramok okozta veszteség. Bár az áramszűrűség maximális értéke széles horonynál meghaladja a kevésbé széles horonyban kapott értéket, ez az ábrán látható módon a vezető kisebb részén jelenik meg, így összességében kevesebb veszteséget okoz.



3.16 ábra: Két négyrétegű hairpin tekercselés árameloszlása különböző méretű hornyokban

4 Hairpin tekercselésű PMSM az autóiparban

Napjainkban egyre népszerűbb a hairpin tekercseléssel ellátott villamos gépek alkalmazása elektromos autók hajtásláncaiban a gépek nagy teljesítmény- és nyomatéksűrűségének köszönhetően. A nyugati autóiparban szinte minden nagyobb cég már alkalmazza, vagy bejelentette, hogy alkalmazni fogja ezt a tekercselési technológiát [19]. A fejezetben bemutatásra kerülnek a tekercselés legfőbb előnyei és hátrányai, illetve az autókban használt hairpin tekercselésű gépek jellemző paraméterei.

4.1 Előnyök és hátrányok villamos autókban való alkalmazás szempontjából

Az alábbi táblázatban a hairpin tekercseléssel ellátott villamos gépek legfőbb előnyei és hátrányai vannak összefoglalva az autóiparban való alkalmazás szempontjából. Ahol összehasonlításra szolgáló jelzők szerepelnek, mint például „kisebb”, „nagyobb”, ott a táblázat a huzalos tekercseléssel történő összehasonlításra referál.

Hairpin tekercselésű villamos gép alkalmazása villamos autó hajtásláncában		
	Előnyök	Hátrányok
Tekercselésre vonatkozó tulajdonságok	Nagyobb kitöltési tényező	Örvényáram-veszteségek
	Kisebb ellenállás	Hatókonyabb hűtés szükséges
Gépre vonatkozó tulajdonságok	Nagyobb teljesítménysűrűség	Drágább gyártási folyamat
	Nagyobb nyomatéksűrűség	Bonyolultabb gyártási folyamat
	Kisebb tekercsfej	Precíz hegesztések
	Kisebb méret	Kézi gyártás nem lehetséges
	Kisebb tömeg	

4.1 ábra: Hairpin tekercselésű villamos gép előnyei és hátrányai

A nagyobb kitöltési tényező kisebb ellenállást, és nagyobb árammal való terhelhetőséget eredményez a huzalos tekercseléshez képest azonos keresztmetszetű horonyban. Ezeknek köszönhető a teljesítménysűrűségen és nyomatéksűrűségen tapasztalt növekedés, melyek eredményeképp csökkenhető a gép tömege és mérete. A kisebb tekercsfej miatt

tovább csökken a gép tengelyirányú hosszúsága [21]. A megnövekedett örvényáramveszteségek kezeléséhez hatékonyabb hűtés megtervezésére van szükség. A gyártási folyamat bonyolult lépései (folytonos hairpin tekercselés) és a szükséges precíz hegesztések (tradicionális hairpin tekercselés) megdrágítják a gép elkészítését [24]. A tekercselés kialakítása nem könnyíthető meg manuális munkaerővel, szinte minden lépéshez el kell készíteni a gyártósor.

4.2 Jellemző paraméterek

Az alábbi táblázatok összesen tíz különböző hairpin tekercselésű villamos gép paramétereit tartalmazzák, melyek gyártási időszaka 2010-től egészen napjainkig tart.

	General Motors	Toyota	General Motors	General Motors	Porsche	Volkswagen AG	Toyota
Meghajtó rendszer	Voltec G1 Motor A/Motor B	P510 Transaxle MG1/MG2	Voltec G2 Motor A/Motor B	BEV2	Porsche Taycan Front Motor/Rear Motor	MEB APP 310	P910 Transaxle MG1/MG2
Bemeneti feszültség	360 V	144 V	360 V	344 V	800 V	400 V	177.6
Maximális teljesítmény	55/110 kW	31/45 kW	48/87 kW	150 kW	190/335 kW	150 kW	59/59 kW
Maximális nyomaték	200/370 Nm	140/169 Nm	118/280 Nm	360 Nm	400/550 Nm	310 Nm	141/141 Nm
Maximális fordulatszám	6000/9500 r/min	10000/13500 r/min	10000/11000 r/min	8810 r/min	16000 r/min	16000 r/min	17876 r/min
Rétegszám	4	12	4	6	4	6	8
Pólusok száma	12	8	12	8	8	8	8
Hornyok száma	72	48	72	72	72	48	48
Gyártási időszak	2010 - 2015	2011 - 2017	2016 - 2019	2016 - 2021	2018 - present	2019 - present	2019 - to present
Autók	Chevy Volt 2010-2015 Cadillac ELR Opel/Vauxhall Ampera	Toyota Aqua, Corolla Prius C, Yaris Hybrid	Chevy Volt 2015-2019 Chevy Malibu Hybrid Cadillac CT6 PHEV	Chevy Bolt, Bolt EUV Buick Velite 7 Opel Ampera-e	Taycan 4, 4s, Turbo, Cross Turismo, Cross Sport	ID.3, ID.4/5, ID.6 ID.Buzz, Audi Q4, Q5 Skoda Enyaq IV	Yaris Hybrid 2020

4.2 ábra: Hybrid és akkumulátoros villamos autók hairpin motorjai I. [19]

	BMW	Hyundai Motor Group	BorgWarner	Lucid Motors	General Motors	Bosch Mobility	Magneti Marelli
Meghajtó rendszer	xDrive 5th Gen.	E-GMP Front Motor/Rear Motor	Integrated Drive Module (iDM220)	Lucid Air Platform	Ultium Drive Front Motor/Rear Motor	eAxe	Maserati Rear Motor
Bemeneti feszültség	400 V	800 V	400/800 V	924 V	400/800 V	400/800 V	400/800 V
Maximális teljesítmény	210 kW	160/270 kW	210 kW	358 kW	180/220 kW	240 kW	300 kW
Maximális nyomaték	400 Nm	350 Nm	430 Nm	600 Nm	440 Nm	430 Nm	450 Nm
Maximális fordulatszám	17000 r/min	15000/20000 r/min	18000 - 20000 r/min	19500 r/min	14000/16000 r/min	14000 - 18500 r/min	17500 r/min
Rétegszám	4	8	8	8	8	6	6
Pólusok száma	6	8	8	6	8	8	8
Hornyok száma	54	48	48	72	96	48	72
Gyártási időszak	2019 - to present	2020 - to present	2021 - to present	2020 - to present	2022 - to present	2021 - to present	TBD
Autók	i4, iX, iX3, i7	Ioniq 5, Ioniq 6, Genesis GV60, Kia EV6, Kia EV9	Mustang Mach-E, Ford F-150 Lighting, Aiways SUV U5	Lucid Air, Lucid Gravity	Hummer EV, Cadillac Lyriq, Brightdrop Zevo 600	Rivian R1T, Rivian R1S, Rivian R2 series	Maserati GranTurismo Folgore

4.3 Hybrid és akkumulátoros villamos autók hairpin motorjai II. [19]

A táblázatokban megfigyelhető, hogyan fejlődött a hairpin tekercselési technológia az autóiparban. A hairpin tekercseléssel ellátott gépek bemeneti feszültsége, teljesítménye, nyomatéka és fordulatszáma is növekedő tendenciát mutat az elmúlt 13 év során. Az is leolvasható, hogy napjainkban az újonnan bemutatott gépek szinte minden hat- vagy nyolcrétegű tekercseléssel és 6 vagy 8 pólussal ($p=3$, $p=4$) rendelkeznek. A hornyok számában általánosságban nem figyelhető meg változás. Összességében egy tipikus, manapság gyártott autóipari hairpin tekercselésű villamos gép paraméterei az alábbi tartományokban helyezkednek el [19]:

$$U = 400\text{-}800 \text{ V} \quad P_{max} = 210\text{-}300 \text{ kW} \quad M_{max} = 400\text{-}600 \text{ Nm}$$

$$n_{max} = 14\text{-}20000 \text{ RPM} \quad \text{Rétegszám} = 4\text{-}8 \quad p = 3\text{-}4$$

$$Z = 48\text{-}72$$

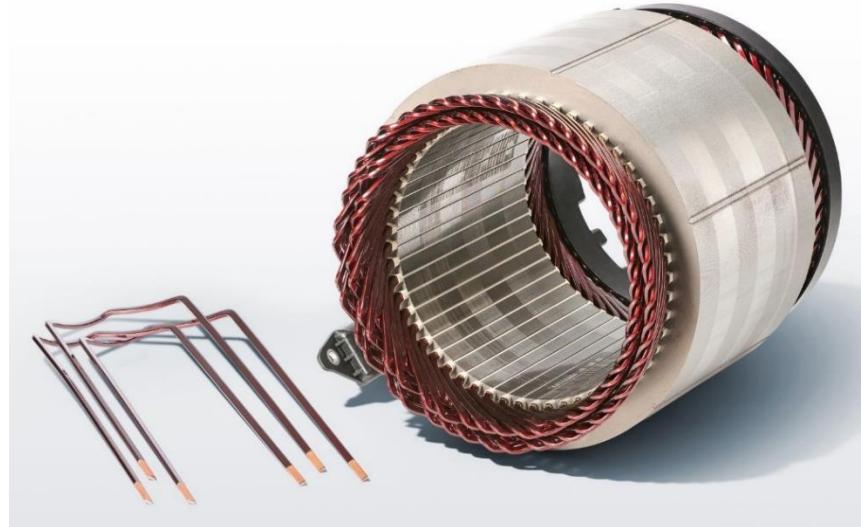
A következő fejezetben a modellezett és vizsgált villamos gép (BMW xDrive 5th Gen.) paraméterei részletes ismertetésre kerülnek.

5 A modell felépítése

A fejezetben a vizsgálatra kiválasztott villamos gép és annak paraméterei alapján készített végelemes modell kerül bemutatásra.

5.1 A vizsgált villamos gép

A hairpin tekercselésű villamos gépek bemutatására a BMW i4, iX, iX3 és i7 autókba épített BMW xDrive 5th Generation nevezetű motor lett kiválasztva. A motor állórésze és hairpin elemei az alábbi ábrán vannak feltüntetve.



5.1 ábra: BMW xDrive 5th Gen. állórésze [35]

A BMW xDrive gerjesztett forgórésze a dolgozat keretében egy állandó mágneses forgórésszel lett kicserélve. A forgórész mágnesinek elrendezése nyilvánosan elérhető adatok hiányában egy „V” alakba elrendezett, Tesla 3D6 topológiához hasonló elrendezéssel lett kialakítva. A motor nyilvánosan elérhető paraméterei az alábbiak [19]:

$$U = 400 \text{ V} \quad P_{max} = 210 \text{ kW} \quad M_{max} = 400 \text{ Nm}$$

$$n_{max} = 17000 \text{ RPM} \quad \text{Rétegszám} = 4 \quad p = 3$$

$$Z = 54 \quad m = 3 \quad q = 3$$

A motor maximális áramának amplitúdója meghatározható az alábbi egyenlet szerint a maximális teljesítmény, a feszültség és a teljesítménytényező felhasználásával. Szinuszos áramot és $\cos \varphi = 0,7$ teljesítménytényezőt feltételezünk.

$$I_{csúcs} = \frac{P_{max}}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi} \quad (5.2)$$

Az áram amplitúdóját és egy általános hairpin tekercselésre vonatkozó áramsűrűséget ($15-25 \frac{A}{mm^2}$) felhasználva az is megbecsülhető, hogy ebben a tekercselésben a párhuzamos ágak száma kettő. Így további három paraméter adható meg az xDrive motorról:

$$I_{csúcs} = 433 \text{ A} \quad \cos \varphi = 0,7 \quad a = 2$$

Az egy ágban folyó áram maximális amplitúdója az alábbi képlettel megkapható:

$$I_{csúcs,ág} = \frac{I_{csúcs}}{a} = 216,5 \text{ A} \quad (5.3)$$

A motor fizikai dimenziói becslés alapján lettek beállítva úgy, hogy a motor képes legyen az ismert maximális nyomaték kifejtésére. A becsléshez a motorról elérhető képek és más, hasonló gépek ismert dimenziói lettek felhasználva. A becsült paraméterek az alábbiak:

$$\begin{array}{lll} l = 183 \text{ mm} & d_{beləső} = 151,3 \text{ mm} & d_{külső} = 210 \text{ mm} \\ d_{légrés} = 0,7 \text{ mm} & Z_{szélesség} = 5 \text{ mm} & Z_{hosszúság} = 13 \text{ mm} \\ H_{szélesség} = 4,24 \text{ mm} & H_{hosszúság} = 2,775 \text{ mm} & H_{szigetelés} = 0,38 \text{ mm} \end{array}$$

l – az állórész lemezcsomag tengelyirányú hossza, d – az állórész paraméterei, Z – egy horony keresztmetszetének paraméterei, H – egy hairpin elem keresztmetszetének paraméterei.

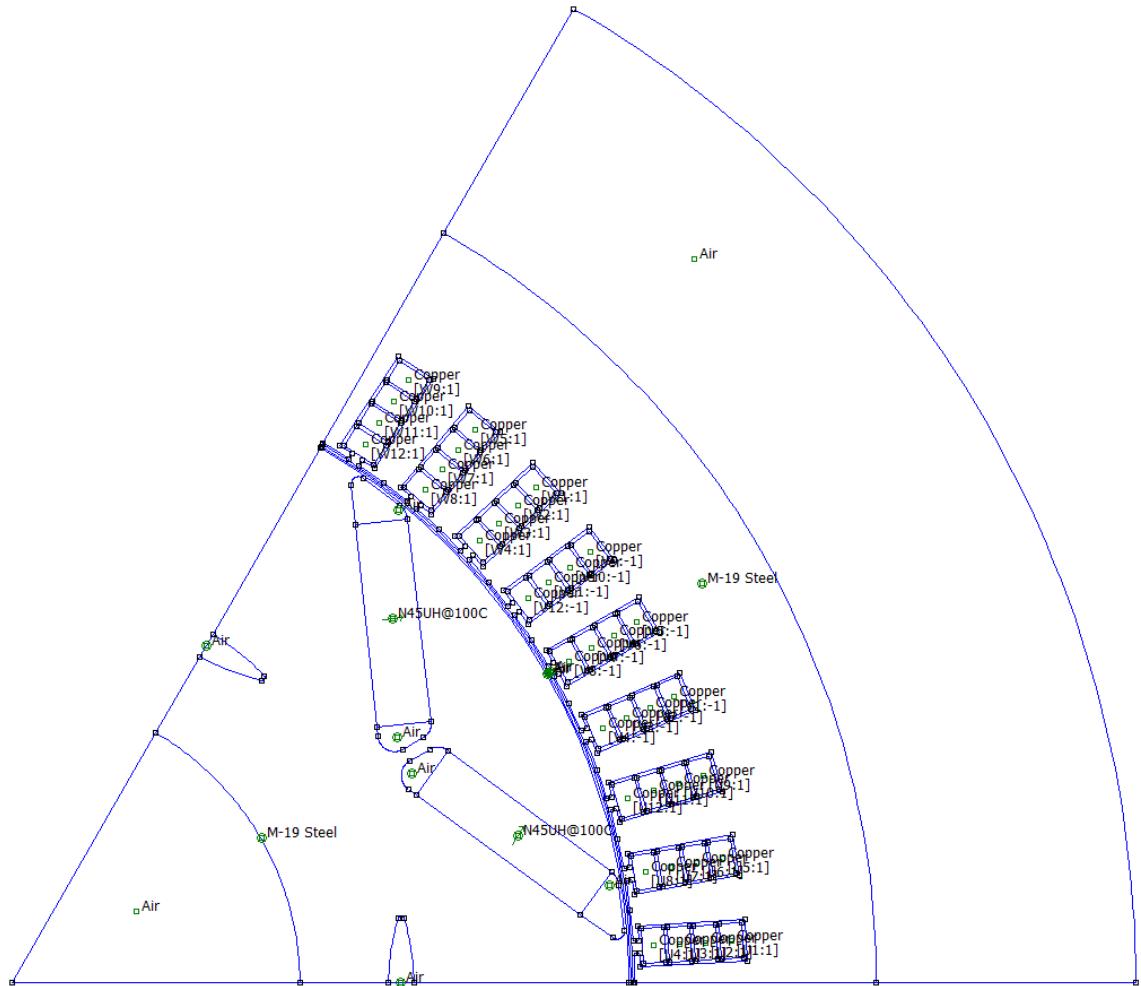
Az állórész lemezcsomag és a forgórész anyaga M19-es szilíciummal ötvözött vas, a hairpin vezetők anyaga réz. Az állandó mágneseknek az N45UH mágnes $100^{\circ}C$ -os karakteristikája van beállítva. A tekercsrendszer nem tartalmaz lépésrövidítést.

5.2 A FEMM modell felépítése

A számítási folyamatok felgyorsítása érdekében az xDrive motor egy pólusa került modellezésre. A pólus határoló szakaszokra antiperiódikus peremfeltételek lettek előírva, hogy a program számítás közben a teljes motor részeként vegye figyelembe, ne egyetlen különálló pólusként. Az állórészt körbevevő levegő szekció külső körívén a $\vec{B}_n = 0$ peremfeltétel kell, hogy teljesüljön, ami azt jelenti, hogy a peremen a mágneses indukció

csak tangenciális komponenssel rendelkezik. Ez megadható $\vec{A} = 0$ peremfeltételeként, mivel [31]:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (5.4)$$



5.5 ábra: A BMW xDrive egy modellezett pólusa

5.3 A kód

A modellt felépítő kód a felhasználó által megadott paraméterekből (forgó- és állórész átmérők, légrés nagysága, hornyok méretei, póluspárok száma stb.) számolja ki, hogy hova kerüljenek a pontok és az azokat összekötő szakaszok, ívek. A számításokat polárkoordináta-rendszerben, a rajzolást Descartes-féle koordinátarendszerben végzi. Az anyagmegadás minden elkülönített területre címkékkel történik, a tekercselések területei áramkörhöz vannak rendelve. A FEMM szoftver és a MATLAB session közötti kommunikáció a megfelelő mappa elérése (`addpath('C:\femm42\mfiles');`) után az OctaveFEMM könyvtár függvényeinek meghívásával történik.

6 A villamos motor paramétereinek meghatározására szolgáló program

6.1 A kód

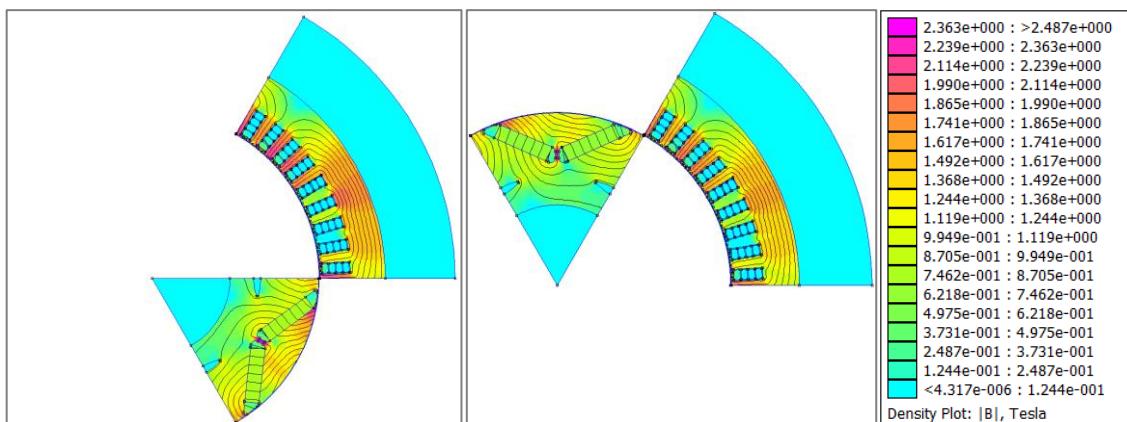
A program MATLAB-kóddal került megvalósításra, mely a modell felépítéséhez hasonlóan az OctaveFEMM parancskönyvtáron keresztül kommunikál a FEMM végeselemes szoftverrel.

6.1.1 Áram pillanatértékeinek meghatározása

A háromfázisú szinuszos gerjesztés három tömb feltöltésével készül, melyek tartalmát forgatási lépéseként kapják meg a fázisvezetők. A feltöltéskor a forgó- és állórész mágneses mezők közötti optimális terhelési szögek is figyelembe lettek véve. A fázisok áramai egymáshoz képest 120 villamos fokkal vannak eltolva. Az áramok egy teljes villamos periódusnyit változnak, míg a forgórész a teljes fordulat harmadát teszi meg (1.2).

6.1.2 Forgórész forgatás

A forgórész két póluslépést (120° -ot) fordul a szimuláció során tetszőleges számú lépésben, ez egy villamos periódus hosszának felel meg. Egy elektromos periódus összesen 120 lépésnek felel meg, így a forgórész lépéseként 1° -ot fordul. A forgórész kezdő pozíciója a bal oldali ábrán látható, míg az utolsó pozíciója a jobb oldali ábrán van feltüntetve.



6.1 ábra: A forgórész kezdő pozíciója és utolsó pozíciója, jelmagyarázat

6.1.3 Örvényáramok számítása

Az örvényáramok számítására alkalmazott metódus a következő fejezetben kerül tárgyalásra.

6.1.4 Forgórészeltolás figyelembevétele

A programmal a forgórészeltolást is lehet implementálni. Ez két, előre- és hátrafordított állított forgórészű szimuláció eredményeinek átlagolásával tehető meg. Az optimális nyomtéklüktetés-csökkentéshez az előre- és hátrafordítás mértéke az alábbi képlettel számítható:

$$\varphi = \frac{\theta}{4 * N} = \frac{120^\circ}{4 * 18} = \frac{10^\circ}{6} \quad (6.2)$$

φ – eltolási szög, θ – rotor által megtett fordulat, N – a felharmonikus rendszáma, ha teljes periódusnak a rotor 120° -os elfordulását vesszük.



6.3 ábra: A Tesla 3D6 motor forgórésze [36]

A BMW xDrive motor forgórészében nincs ilyen eltolás, így ez a funkció a későbbiekben nem került felhasználásra.

6.2 Optimalizálás

Az optimális beállítások elengedhetetlenek a gyors, hatékony és pontos szimuláció érdekében. Ehhez az alábbi intézkedések lettek elvégzve.

Egy pólus került modellezésre antiperiódikus peremfeltételek alkalmazásával a szimuláció gyorsításának érdekében.

A modellhez háromrétegű légrés lett készítve, és a forgórész lépésekkel elmozdulásának nagysága megegyezik a légrésben található háromszögháló

háromszögeinek egész számú többszörösével. Ennek köszönhetően forgás közben a középső légrés háromszöghálója változatlan, így nem növeli a harmonikustartalmakat.

A FEMM alapértelmezett Smart Mesh funkciója a szimulációk közben minden esetben ki van kapcsolva. A háromszögháló sűrűsége a modell különböző szekcióiban szükség szerint lett beállítva. A pontos örvényáramszámítás érdekében a legsűrűbben hálózott szekciók a vezetők keresztmetszetei.

A szilíciummal ötvözött vasból készített állórész lemezcsomag megadott $B(H)$ karakterisztikája meg lett változtatva az 1. fejezetben leírtaknak megfelelően, hogy annak $B(H)$ görbéje $\mu = \mu_0$ mágneses permeabilitású szakasszal végződjön.

6.3 A számított értékek

A szimulációkért felelős program elején az alábbi beállítások találhatók:

```
ROTATION_ON_OR_OFF = 1; % 0: off, 1: on
CIRCUIT_ROTATION_ON_OR_OFF = 1;
EDDY_SIMULATION_ON_OR_OFF = 1;
CALCULATE_CURRENT = 1;
CALCULATE_FLUXLINKAGE = 1;
CALCULATE_TORQUE = 1;
SCREENSHOT_CURRENT = 0;
SCREENSHOT_FLUXDENSITY = 0;
load = 100 %percentage
frequency = 200 %Hz
```

A három számított értékből (CALCULATE) és az örvényáram-számítás eredményeiből a gép elektromágneses paramétereit meghatározhatók.

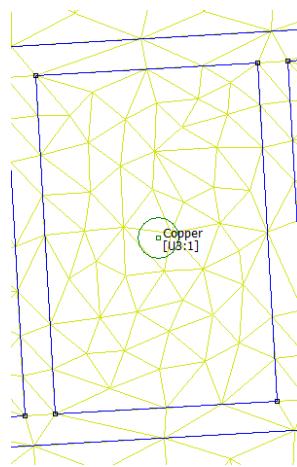
7 Végeselemes módszer az örvényáramok számítására

A vizsgált hairpin tekercselésű PMSM vezetőiben keletkező veszteségek számításához nem alkalmazható a frekvenciartományban végzett vizsgálat. Ennek oka, hogy a frekvenciartományban végzett vizsgálat egy teljes elektromos periódus szimulációja alapján számítja ki az eredményeket, azonban az állandó mágnesekkel felszerelt forgórész pozíciója változik egy elektromos periódus közben. Ennek kiküszöbölése érdekében egy olyan végeselemes eszköz lett elkészítve, mely a forgórész egy elektromos periódusnyi forgásának minden diszkrét pozíciójához kiszámolja a hairpin vezetők örvényáramait adott frekvencián, a megfelelő fázisú áram értékekkel.

7.1 A módszer működésének bemutatása egy vezetőn

A FEMM szoftver magnetosztatikus analízis elvégzésekor az áramkörök által definiált értékeken kívül nem számít áramsűrűség-eloszlást a modellben, így a hairpin vezetők belsejében sem. Azonban a szoftver a modell minden pontjában kiszámítja a mágneses vektorpotenciál értékét. Ezek az értékek felhasználhatók az örvényáramok végeselemes számításához.

Vegyük egy villamos gép egyik hornyában lévő hairpin vezető keresztmetszetét. Ebben a vezetőben a mágneses vektorpotenciál minden pontban eltérő értékű. Osszuk fel a vezető keresztmetszetét kis háromszögekre, vagyis készítsük el a háromszöghálót.



7.1 ábra: Háromszögháló egy hairpin vezető keresztmetszetében

Minden háromszögben olvassuk ki a mágneses vektorpotenciált és léptessünk egyet a forgórészen és az áramértékeken. Így rendelkezünk minden háromszögnek az egy

lépéssel ezelőtti mágneses vektorpotenciál értékével, és elkezdhetjük az iterációval végrehajtott örvényáram-számítást a jelenlegi lépés magnetosztatikai problémájára. Fontos tisztázni, hogy a módszer a forgórész minden pozíójában iterálás segítségével számítja ki a pontos örvényáramokat. Ez alapján a „lépés” kifejezés alatt a forgórész pozíciójának és az áramértékeknek egy adott állapota értendő, míg az „iteráció” kifejezés alatt az egy pozícióban (lépésben) történő örvényáram-számító iterációs művelet egyetlen iterációja értendő.

Tudjuk, hogy a vezetőben az összesen annyi áram folyhat, amennyi a külső forrás árama, így egy adott vezetőben az örvényáramok eredője zérus ($I_{eddy,sum} = 0$) [30]. Ezt a peremfeltételt a vektorpotenciálok felhasználásával a vizsgált hairpin vezetőre iteráció közben az alábbi módon lehet megfogalmazni (a fajlagos vezetőképesség és a két lépés közti idő állandó, így a peremfeltétel megfogalmazásakor elhagyható):

$$\sum_{i=1}^n (\mathbf{dA}_i - \mathbf{dA}^*) * \mathbf{s}_{i,tri} = \mathbf{0} \quad (7.2)$$

$$ahol: \quad \mathbf{dA}_i = \mathbf{A}_{i,new} - \mathbf{A}_{i,old} \quad (7.3)$$

dA_i – az i-edik háromszög mágneses vektorpotenciáljának megváltozása két lépés között, $A_{i,new}$ – az i-edik háromszög kiolvasott mágneses vektorpotenciálja, $A_{i,old}$ – az i-edik háromszög mágneses vektorpotenciálja az előző forgórész pozícióban, n – háromszögek száma a vezető keresztmetszetében, s_{cond} – a vezető keresztmetszete, dA^* - a mágneses vektorpotenciál térbeli, súlyozott átlagolt változása a vezető keresztmetszetén belül.

A feltétel átrendezésével és a háromszögek területeinek ($s_{i,tri}$) felhasználásával a dA^* értéke egy adott iterációra kiszámítható [39]:

$$\mathbf{dA}^* = \frac{\sum_{i=1}^n (\mathbf{dA}_i * \mathbf{s}_{i,tri})}{s_{cond}} \quad (7.4)$$

A számított dA^* értékét felhasználva a háromszögháló minden háromszögére megkapunk egy áramsűrűség értéket [39]:

$$J_i = \frac{(\mathbf{dA}_i - \mathbf{dA}^*) * \boldsymbol{\sigma}}{dt} \quad (7.5)$$

$$ahol: \quad dt = \frac{1}{\mathbf{f} * \mathbf{k}} \quad (7.6)$$

dt – két lépés közötti idő, k – lépésszám egy elektromos periódusban, f – a gerjesztés frekvenciája, J_i – az i-edik háromszöghöz tartozó áramszűrésége, σ – fajlagos vezetőképesség.

Ezzel a háromszögháló csúcspontjaiban (j) megadható az áramerősség [39]:

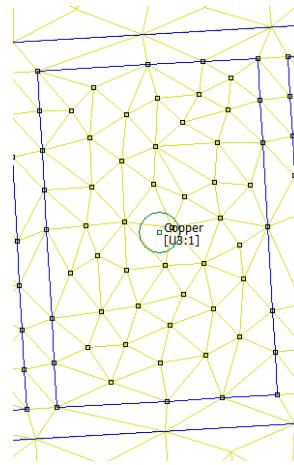
$$I_{j,calc} = \sum_{i=1}^{m_j} (J_i * s_{tri}) \quad (7.7)$$

$I_{j,calc}$ – a j-edik csúcspont számított áramerőssége, m_j – a csúcsponthoz tartozó háromszögek száma, J_i – az i-edik csúcsponthoz tartozó háromszög áramszűrése.

A csúcspontokban az alábbi korrekció elvégzése után beállítható az áramerősség. A korrekcióra azért van szükség, hogy az áramerősség-értékek az iterációs folyamat során egy véges értékhez konvergáljanak.

$$I_{j,set} = I_{j,prev} + c * (I_{j,calc} - I_{j,prev}) \quad (7.8)$$

$I_{j,set}$ – a pontban beállított áramerősség, $I_{j,prev}$ – az előző iterációban beállított áramerősség (első iterációban $I_{j,prev} = 0$), c – korrekciós együttható ($0 < c \leq 1$)



7.9 ábra: Háromszögháló egy hairpin vezető keresztmetszetében, beállított pontáramokkal

Az iterációs folyamat minden iterációval egyre pontosabb, a valódi örvényáramokat egyre jobban közelítő áramerősség-értékeket állít a háromszögek csúcspontjaiba. A megoldás az iterációk számának növelésével pontosítható. Az iterációs folyamat lefutása után a forgórész pozíciót vált, a vezetőben az áramkörre definiált áramerősségek változnak, és az iteráció kezdődik előlről.

7.2 A módszer megvalósítása – az iterációk pontos lépései

Ebben a pontban a végeselemes örvényáram-számító program iterálás közben végrehajtott műveletei kerülnek felsorolásra.

Az iterációs folyamat előtt:

1. Mágneses vektorpotenciálok kiolvasása
2. A forgórész pozíójának az és az áramoknak egy lépésnyi változtatása

Az iterációs folyamat kezdete:

3. Mágneses vektorpotenciálok kiolvasása
4. Az összes dA_i számítása
5. A dA^* kiszámítása
6. A háromszögekhez tartozó áramerősségek kiszámítása
7. A csúcspontok áramerősségeinek számítása
8. Az áramerősségek beállítása
9. Iteráció újrakezdése (ugrás a 3. pontra)

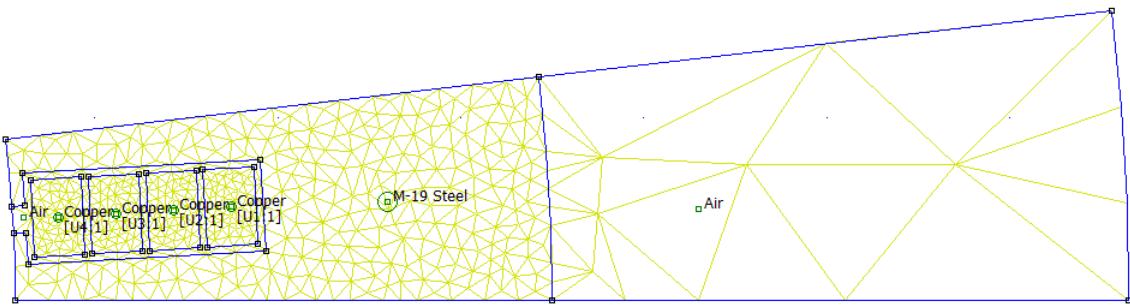
Az iterációs folyamat után:

10. Pontáramok nullába állítása
11. Újrakezdés (ugrás az 1. pontra)

7.3 Helyes működés bizonyítása

A módszer helyes működése és sikeres implementálása a frekvenciatartomány-beli vizsgálat segítségével lett ellenőrizve. A fejezet elején említett indokok miatt az összehasonlítás a két vizsgálat között csak forgó elemek nélkül lehetséges, azonban sikeres ellenőrzés esetén a végeselemes módszer alkalmazható teljes, forgó PMSM számítására.

A módszerek összehasonlítása az alábbi egy hornyot tartalmazó modellen történt, ötféle frekvencián (1Hz, 100Hz, 200Hz, 500Hz, 1000Hz). A modell külső görbüreire és szakaszaira az $A=0$ peremfeltétel lett megszabva.



7.10 ábra: xDrive motor egy hornyát tartalmazó modellje

Az összehasonlításhoz a vezetők összes vesztesége, a maximális áramsűrűségek és az árameloszlások lettek kiszámítva minden módszert alkalmazva. Mivel az áramsűrűségek vizsgálatakor ebben az összehasonlításban kizárolag az örvényáramokra vagyunk kíváncsiak, a frekvenciatartomány-beli analízis eredményei közül az áramsűrűség képzetes része került kijelzésre. Ennek oka, hogy az áramsűrűség komplex fazorjainak valós része a vezetőben folyó árammal fázisban lévő áramokat tartalmazza, míg a képzetes része az attól eltérő fázisú komponenseket. Az örvényáramok és a vezetőben folyó áramok között fázistolás van, mert az örvényáramok maximuma akkor keletkezik, amikor a vezetőben folyó áramerősség a leggyorsabban változik. Ez szinuszos gerjesztés esetében annak nullátmenetéhez közelí időpontban jelentkezik.

A végeselemes módszerrel a teljesítmény pillanatértéke minden lépésben ismert (p_i). Ezeket felhasználva a vezetők hatásos teljesítménye az alábbi módon számítható:

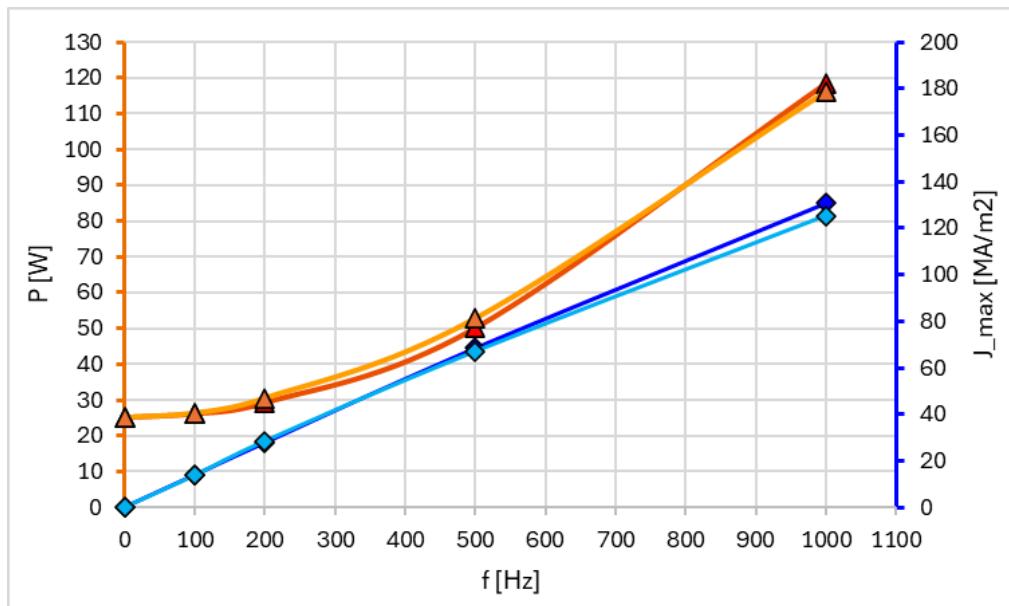
$$P_{FE} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (7.11)$$

Az alábbi táblázat a két metódus (frekvenciatartomány-beli = TH, végeselemes = FE) eredményeit hasonlítja össze.

f	P_TH	P_FE	P_hiba	J_max_TH	J_max_FE	J_hiba
1	25.139	25.140	0.004	0.139	0.126	-9.744
100	26.161	26.390	0.875	13.895	13.741	-1.107
200	29.216	30.532	4.505	27.732	28.433	2.527
500	50.095	52.798	5.397	68.369	66.978	-2.035
1000	118.496	116.124	-2.002	130.762	125.366	-4.127
[Hz]	[W]		[%]		[MA/m ²]	[%]

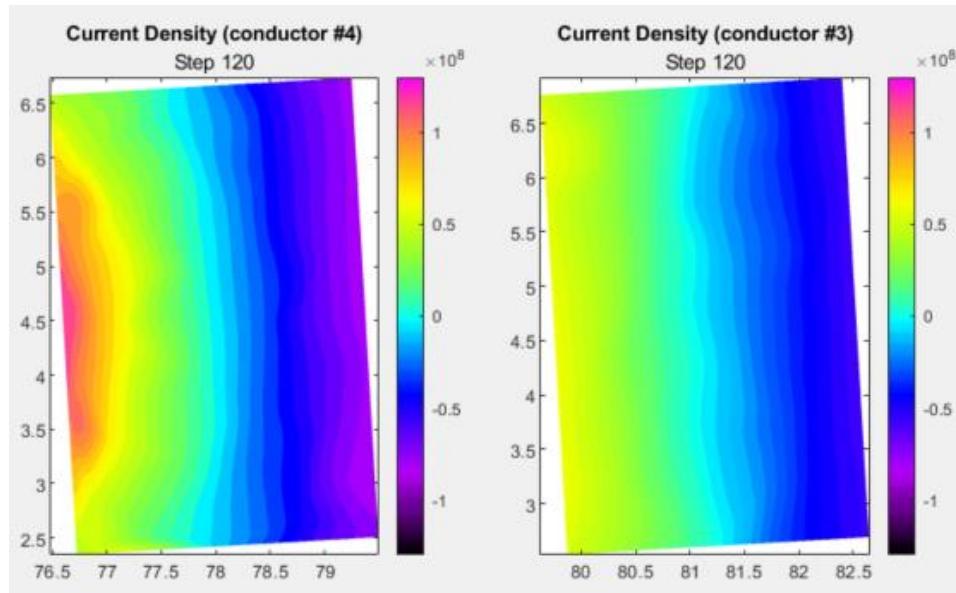
7.12 ábra: A frekvenciatartomány-beli (TH) és végeselemes (FE) analízis eredményei

Látható, hogy a végeselemes módszer számításai többnyire pár százalékos hibán belüli értéket eredményeznek. A két metódus közötti eltérés csökkenthető a háromszögháló sűrítésével.

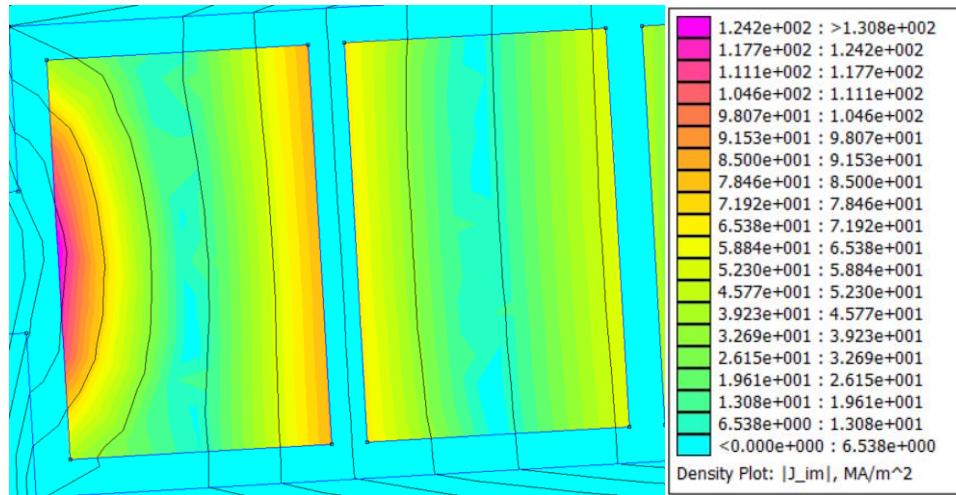


7.13 ábra: A frekvenciatartomány-beli (TH) és végeselemes (FE) analízis eredményei ábrázolva

Az alábbi ábrán két azonos vezető árameloszlása van felrajzolva a két módszer szerinti eredmények alapján, 1000 Hz frekvencián. Fontos megjegyezni, hogy a végeselemes eredmények lépésről lépésre változnak. A másik módszer eredményeivel a maximális áramsűrűséghez tartozó lépés vethető össze. A kétféle számítás eredményei értékekre és jellegre is szinte teljesen azonosak. A színskálák eltérésének oka, hogy a TH eredményeknek csak az abszolútértéke jeleníthető meg, míg az FE eredmények előjelesen kijelzhetők.



7.14 ábra: Végeselemes (FE) módszer áramsűrűség eredményei: $J [10^{-8} * \text{A/m}^2]$



7.15 ábra: Frekvenciatartomány-beli (TH) analízis áramsűrűség eredményei: $|J| [\text{MA/m}^2]$

Ez az ellenőrzés bizonyítja, hogy a későbbiekben használható a végeselemes örvényáramszámító módszer a forgórésszel ellátott villamos motor vizsgálatához.

8 Szimulációs eredmények feldolgozása

A szimulációk eredményei Excel táblázatok és MATLAB-kódok segítségével lettek feldolgozva. A fejezetben bemutatásra kerül, hogy az elkészített eszköz használatával mi állapítható meg adott vizsgált villamos gépről (ez esetben a BMW xDrive motor alapján készített modellről).

8.1 Feszültség

8.1.1 Üresjárási feszültség

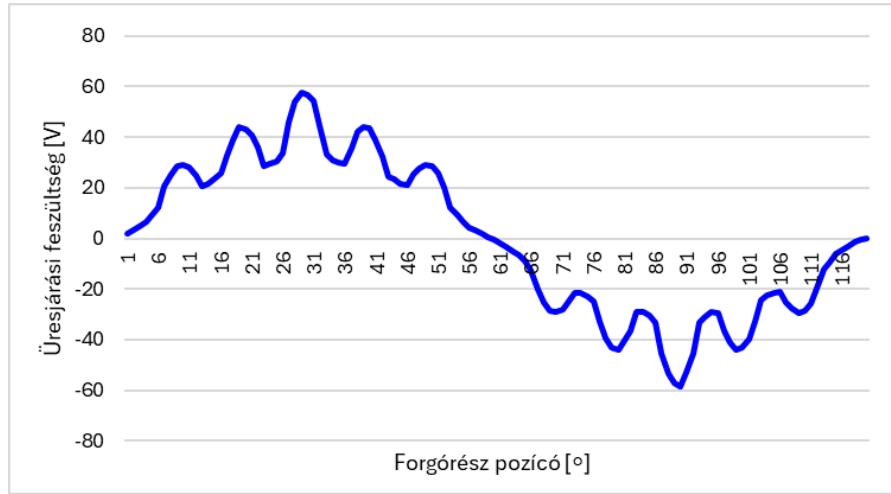
Az üresjárási üzem szimulációjával ellenőrizhető a modellezett motorkonstrukció helyessége. A számított üresjárási feszültség összevethető valódi mérési adatokkal, és ha egyeznek a jelalakok, az arra utal, hogy a motor felépítése helyesen lett modellezve. Az eszköz a feszültséget a számított fluxuskapsolódást felhasználva az alábbi módon számítja:

$$U_{emf} = \frac{\psi_x - \psi_{x+1}}{\Delta t} \quad (8.1)$$

$$\text{ahol: } \Delta t = \frac{\alpha * 60}{n_m * 360^\circ} \quad (8.2)$$

U_{emf} – indukált elektromotoros erő (feszültség), ψ_x – fluxuskapsolódás a szimuláció x-edik lépései, Δt – két lépés közötti forgás ideje, α – két lépés közötti forgás szöge ($=1^\circ$), n_m – mechanikai fordulatszám.

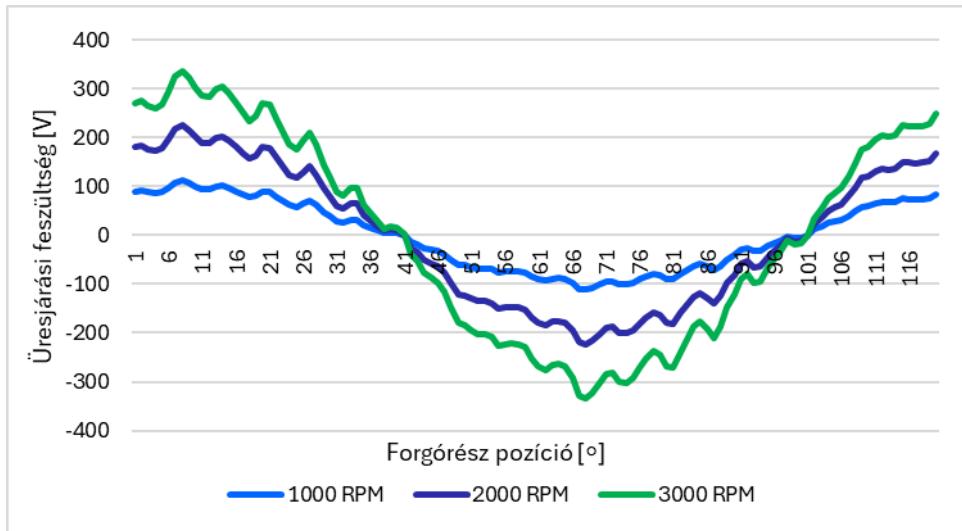
Az alábbi ábrán a V és W kivezetések közötti vonali feszültség látható, üresjárási üzemben. A motor kivezetései csillagba vannak kapcsolva.



8.3 ábra: Számított vonali üresjárási feszültség 1000 RPM-en

8.1.2 Vonali feszültség

Az alábbi ábrán a motor vonali feszültsége van feltüntetve maximális terheléses üzemben, különböző fordulatszámokon. A motor kivezetései csillagkapcsolásban vannak.



8.4 ábra: Számított vonali feszültségek maximális terheléses üzemben

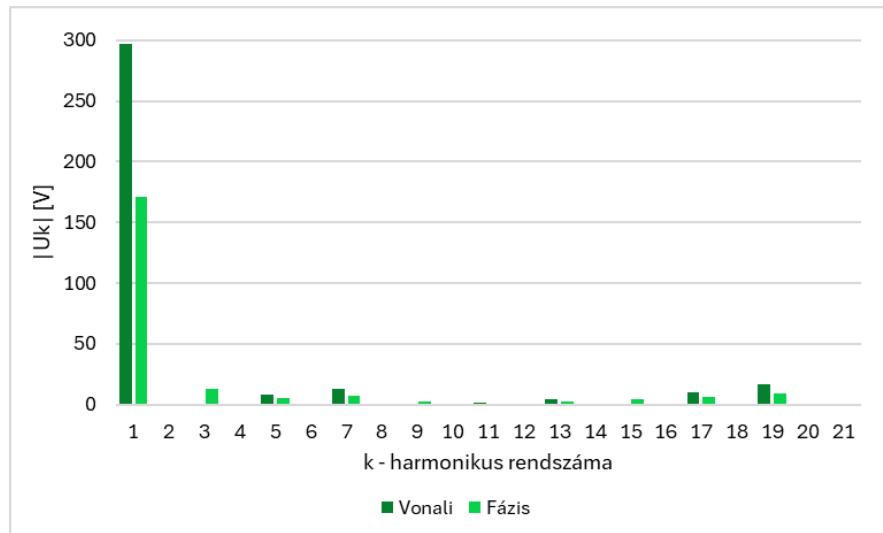
8.1.3 Felharmonikus-tartalom

A motor kivezetéseinek csillagba kapcsolásának fő előnye, hogy a 3. harmonikus (2. felharmonikus) nem jelenik meg a vonali feszültségek jeleiben. A motor feszültségének felharmonikusai megkaphatók a feszültségadatok diszkrét Fourier-transzformálásával. A transzformáció a következőképpen történik [38]:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{-j2\pi kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * \left[\cos\left(-\frac{2\pi kn}{N}\right) + j\sin\left(-\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] \quad (8.5)$$

X_k – k-adik harmonikus komponens, k – harmonikus rendszám, N – minták száma, x_n – n-edik minta.

Az X_k komplex szám abszolútértéke megadja az adott harmonikus komponens amplitúdóját. Az alábbi ábrán a vonali és fázisfeszültségek harmonikus komponenseinek abszolútértékei láthatók.



8.6 ábra: Vonali és fázisfeszültségek harmonikus komponenseinek abszolútértékei (3000 RPM)

Megfigyelhető, hogy a csillagkapcsolásnak köszönhetően a vonali feszültségben nem jelenik meg a 3. harmonikus.

Az eszközzel más felharmonikus-tartalom-csökkentő módszerek is szimulálhatók, mint a korábban említett forgórész-eltolás és a tekercselésbe épített lépésrövidítés.

8.2 Nyomaték

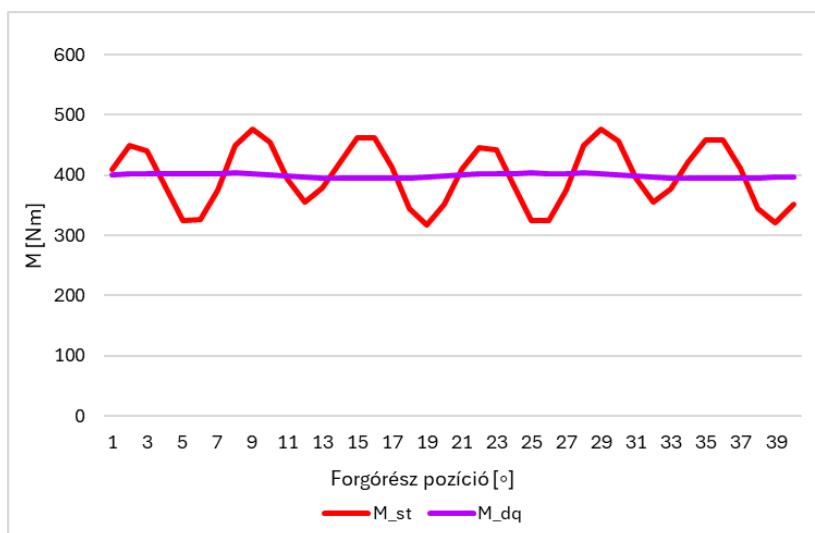
A BMW xDrive motor adatlapja szerint a maximális nyomaték 400 Nm. A nyomaték az eszközzel kétféle módon számítható. Az egyik mód a FEMM programba épített, mo_blockintegral(22) parancs által végrehajtott Maxwell-feszültségtenzoros nyomatékszámítás a forgórész kijelölését követően. A másik mód a nyomaték kiszámítása az áram és a fluxuskapcsolódás d-q komponenseit felhasználva, melyeket a számított eredmények alapján koordináta-transzformációk segítségével lehet megkapni. A pontosabb eredményt a Maxwell-feszültségtenzoros számítással kapjuk, mivel az az eredmény számításához a forgórész teljes térfogatán integrálja a nyomatéket, míg a másik módszer szimplán a vezetőkben érzékelhető hatás alapján ad eredményt. A kétféle nyomatékszámítás különböző, de azonos átlagértékű görbéket eredményez. Mindkét

esetben a felvázolt nyomatékszámítás minden lépésre elvégzendő. Az alábbi nyomatékszámítási mód csak a vezetőkben számított mennyiségeket használja:

$$M = p * \frac{3}{2} * (\psi_d I_q - \psi_q I_d) \quad (8.7)$$

M – motor nyomaték, $\psi_{d,q}$ – fluxuskapsolódás d-q komponensei, $I_{d,q}$ – motor áram.

A kétféle nyomatékszámítás az alábbi görbéket eredményezte azonos szimuláció eredményei alapján. Az ábrán egyharmad elektromos periódusnyi adat van feltüntetve, mivel a nyomaték görbéje egy elektromos periódus alatt 6-szor, egy teljes mechanikai fordulat alatt összesen 18 alkalommal ismétlődik.



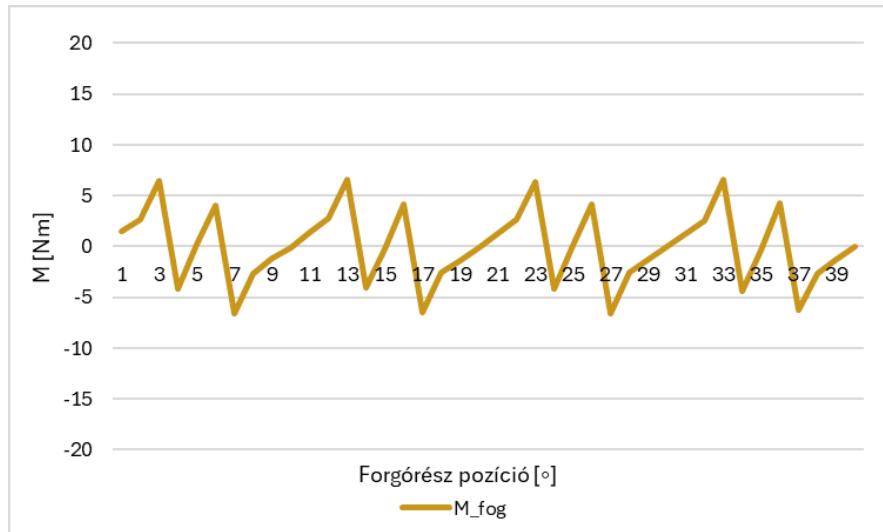
8.8 ábra: Az xDrive nyomaték görbéje maximális terheléses üzemállapotban, kétféle számítással

Az alábbi táblázat alapján látható, hogy a két számítás átlaga valóban szinte megegyező. A motor nyomatékának egy elektromos periódusra vett átlaga 100%-os terheléses üzemben eléri a kívánt 400 Nm értéket.

Módszer	M_max	M_átlag	M_lükttetés
st	478.955	399.374	40.512
dq	-	398.927	-
[Nm]			[%]

8.9 ábra: Az xDrive nyomaték adatai maximális terheléses üzemmódban

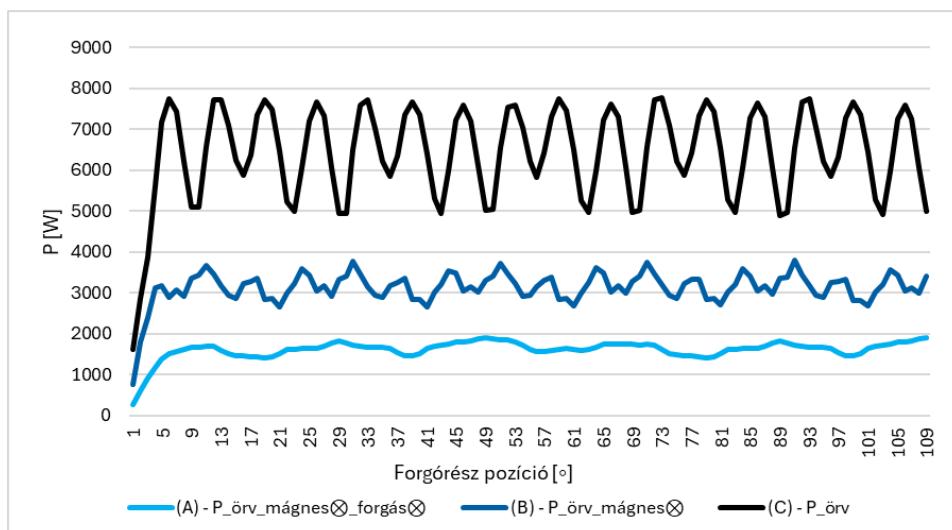
A BMW xDrive-on alapuló gépmóddel üresjárásos üzemben számított nyomatékgörbéje az alábbi ábrán látható.



8.10 ábra: Az xDrive fognyomatéka

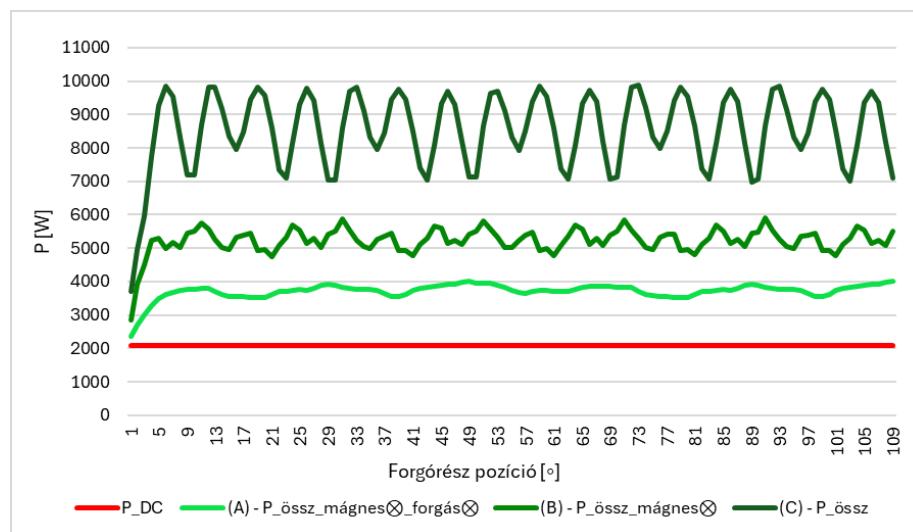
8.3 Örvényáramok

A hairpin PMSM vezetőiben kialakuló örvényáramokért különböző tényezők felelősek. A tényezők a következők: a fázisokban folyó áramok, a forgórész forgása és a mágnesek hatása. Bemutatásra kerül, hogy hogyan változnak a vezetőben keletkező veszteségek a felsorolt tényezők hatására. A tényezők hatásának bemutatása érdekében háromféle szimuláció eredményei kerülnek összehasonlításra. Egy mágnes nélküli, rögzített forgórészű szimuláció (A), egy mágnes nélküli, forgó forgórészű szimuláció (B), és egy mágnesekkel ellátott, forgó forgórészű szimuláció (C). Az alábbi ábrán a három szimuláció közben a teljes gép összes vezetőjében keletkező örvényáramok okozta veszteségek láthatók. A szimulációk 5000 RPM-es mechanikai fordulatszámnak megfelelő, 250 Hz-es gerjesztéssel, 100%-os terheléses üzemállapotban készültek.



8.11 ábra: A gép vezetőiben keletkező örvényáram-veszteségek 5000 RPM-en

A gép vezetőiben keletkező összes veszteség kiszámítása érdekében az örvényáramok okozta veszteségekhez hozzá kell adnunk az egyenáramú veszteséget, mely a szimmetrikus, háromfázisú gerjesztésnek köszönhetően minden lépésben azonos. Az egyenáramú veszteségek számításakor a terekcsfejekben keletkező veszteségek is figyelembe lettek véve.



8.12 ábra: A gép vezetőiben keletkező veszteségek 5000 RPM-en

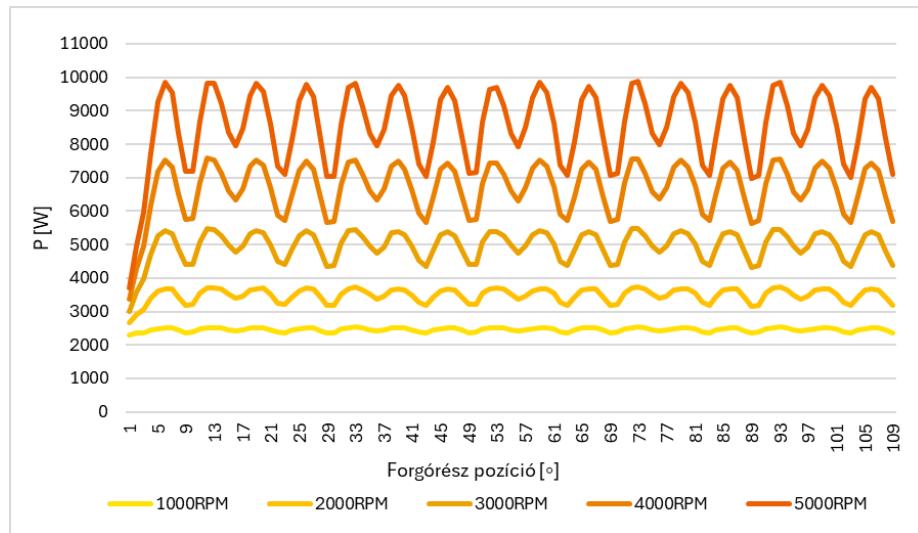
Az egyes lépésekben számított veszteségek átlagolásával megkapjuk a gép valódi veszteségeit a különböző szimulációk közben. Az átlagolás a 6. lépéstől a 105. lépés adataiig lett végrehajtva, állandósult állapotban. Az értékeket az alábbi táblázat foglalja össze.

Beállítások	f	P_DC	P_örv	P_össz
mágnes⊗, forgás⊗	250	2.10	1.64	3.74
mágnes⊗, forgás⊗	250	2.10	3.18	5.28
mágnes⊗, forgás⊗	250	2.10	6.53	8.63
	[Hz]	[kW]		

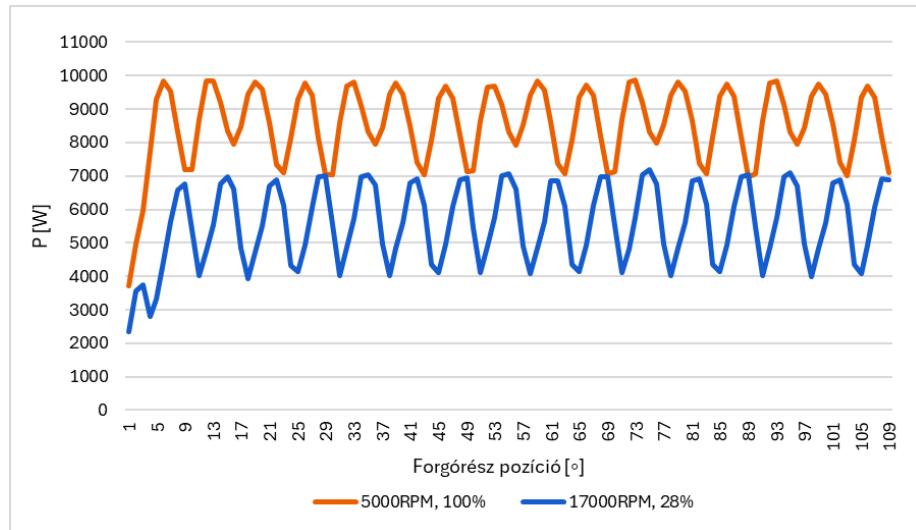
8.13 ábra: A gép vezetőiben keletkező veszteségek 5000 RPM-en

Az eredményekből látható, hogy az egyes tényezőknek milyen hatása van a villamos gép veszteségeire, ezáltal a működésére. A gerjesztés frekvenciának növelése, a forgórész forgása és a mágnesek mágneses tere mind jelentős szerepet játszanak a hairpin tekercselésben létrejövő többletveszteségek kialakításában. Ezen hatások miatt esetünkben a gép teljes vesztesége 5000 RPM-en az egyenáramú veszteségének több, nagyjából 4-szerese.

A következő 6 szimuláció az örvényáramok okozta veszteségek változását mutatja be a fordulatszám változásának függvényében. A szimulált üzemállapotok között szerepel 5 db 100%-os terheléses üzem, mind különböző fordulatszámon, és egy 28%-os, mezőgyengítéses terheléses üzem, mely a gép maximális fordulatszámán van igénybe véve.



8.14 ábra: A gép vezetőiben keletkező veszteségek különböző fordulatszámokon, 100%-os terheléses üzemben

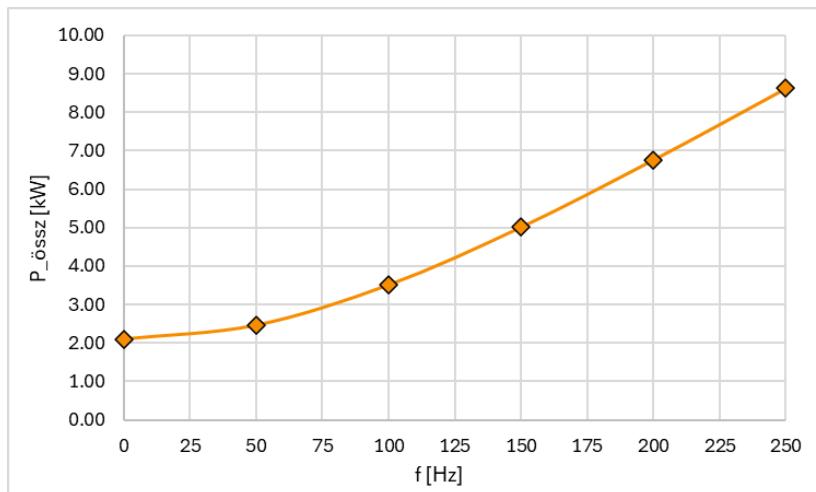


8.15 ábra: A gép vezetőiben keletkező veszteségek különböző üzemállapotokban

A különböző üzemállapotok veszteségei az alábbi táblázatban vannak összefoglalva.

Terhelés	f	n_mech	P_össz
100	50	1000	2.46
100	100	2000	3.51
100	150	3000	5.01
100	200	4000	6.77
100	250	5000	8.63
28	850	17000	5.65
[%]	[Hz]	[RPM]	[kW]

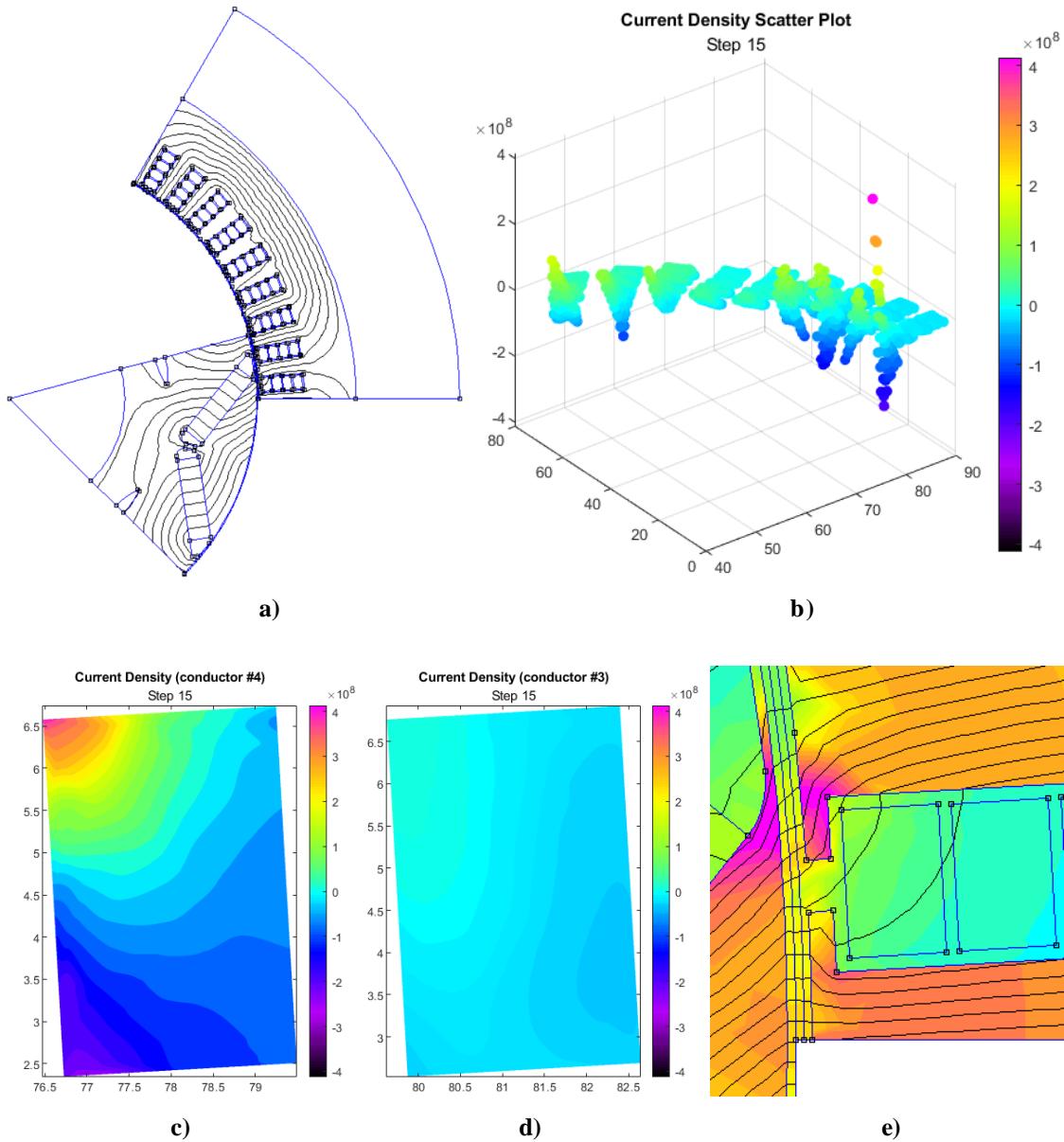
8.16 ábra: A gép vezetőiben keletkező veszteségek különböző üzemállapotokban



8.17 ábra: A gép vezetőiben keletkező veszteség a gerjesztés frekvenciájának függvényében

Megfigyelhető, hogy a vezetőkben fellépő veszteségek nagyban terhelés- és frekvenciafüggőek. A frekvencia növekedése és a terhelés növekedése is nagyobb veszteséget eredményez.

A hairpin PMSM vezetőiben az áramszűréség eloszlása nem sokban hasonlít az egy hornyos modellben létrejövő eloszlásra. Bár a forgó gépben is a horony nyílásához legközelebbi vezetőben jön létre a legnagyobb örvényáram, az áramszűréség jellemzően a vezetők sarkába tömörül. A jelenség vizsgálatához a vezetők árameloszlása MATLAB segítségével ábrázolásra került a forgórész 15. lépései, amiben a legnagyobb áramszűréség lép fel az első horony nyílásához legközelebbi vezetőjében. A 15. lépés részletes ábrázolása az alábbi ábrán tekinthető meg.



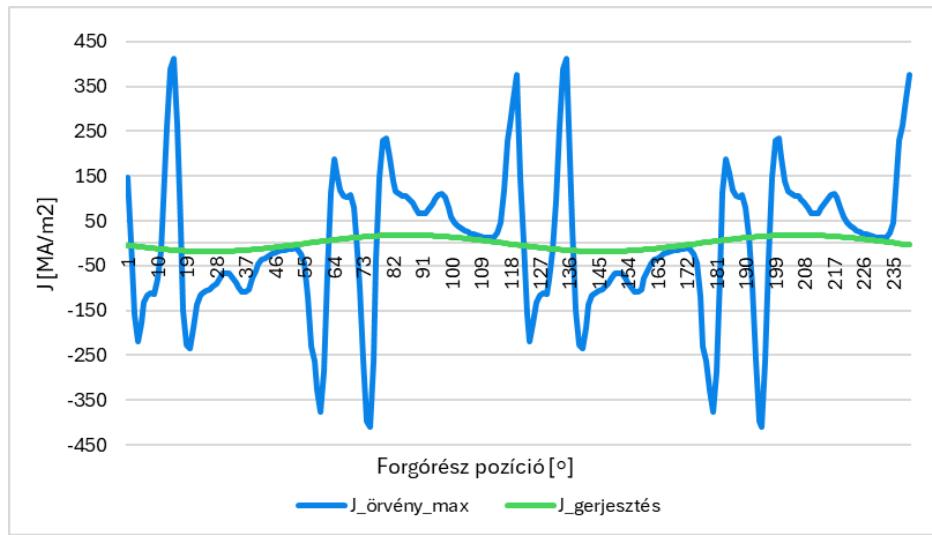
8.18 ábra: 5000 RPM fordulatszámú, 100% terheléses üzem közben kialakuló örvényáramok szemléltetése. A képek minden a 15. lépést mutatják be:

- a) a forgórész pozíciója
- b) áramsűrűség eloszlása az összes vezetőben: $J [10^{-8} * \text{A/m}^2]$
- c) d) áramsűrűség eloszlása az első horony nyílásához legközelebbi vezetőkben: $J [10^{-8} * \text{A/m}^2]$
- e) ekvipotenciális kontúrvonalak és telítődés az első horony nyílásánál

Forgás közben a gép mágneses fluxusának jelentős része adott lépésekben a horony nyílásához közel a vezetőkön keresztül hatol át, ahogy az az e) ábrán a kontúrvonalakat megfigyelve leolvasható. Ennek oka, hogy amikor a mágnesek sarka közel ér egy fog végéhez, az telítődik (e), és mágneses ellenállása a levegőjével és a vezetőjével megegyező, vagy ahhoz közel a fog értékét ér el. A fog végében megnövekedett mágneses ellenállásnak köszönhetően a fluxus számára a fog nem számít előnyös áramlási útnak,

nem különbözik a vezetőn át vezető utaktól. Ennek következtében a fluxus jelentős része nem csupán a fogon keresztül, hanem a horonynyíláshoz legközelebbi vezetőn keresztül is áramlik. A fogvégek telítődése részben a mágnesek, részben a forgás hatásai miatt következik be.

Az első horony nyílásánál elhelyezkedő vezető „bal felső” (8.18 ábra, c) sarkában áramló áramerősség értékei lépésről lépésre feljegyzésre és kirajzolásra kerültek, melynek eredménye az alábbi ábrán látható.



8.19 ábra: Áramsűrűség változása a lépés függvényében az első horony nyílásánál elhelyezkedő vezető „bal felső” sarkában

8.4 Teljesítmény és hatásfok

A BMW xDrive adatlapja szerint a motor maximális mechanikai teljesítménye 210 kW. Hasonló villamos gépek karakteristikái alapján meghatározásra került, hogy ezt a teljesítményt a gép egy olyan üzemállapotban érheti el, melyben a terhelés 92%-os (368 Nm) és a fordulatszám 5500 RPM. A feltételezés ellenőrzése érdekében a gép teljesítményének számítása egy 92%-os terheléses, 5500 RPM fordulatszámú üzemállapot szimulációs eredményei alapján történt.

A végeselemes eszköz a motor mechanikai teljesítményét az alábbi összefüggések felhasználásával számítja, ez esetben egy villamos periódus alatt, vagyis $n = 120$ lépéssben (120° -os fordulat) elvégzett számítások eredményeiből [17]:

$$P_{\text{mech}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} * \omega_{\text{mech}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} * \frac{n_m * 2\pi}{60} = 211,95 \text{ kW} \quad (8.20)$$

P_{mech} – mechanikai teljesítmény, ω_{mech} – mechanikai körfrekvencia.

A kétféle számítás eredményét átlagoljuk. Az eszköz a vezetőkön kívül keletkező veszteségeket elhanyagolja, a vezetőkben keletkező veszteséget az alábbi összefüggés alapján számítja.

$$P_{\text{veszt}} = P_{AC} + P_{DC} = 7,58 \text{ kW} + 2,1 \text{ kW} = 9,68 \text{ kW} \quad (8.21)$$

P_{veszt} – vezetőkben keletkező összes veszteség, P_{AC} – vezetőkben keletkező örvényáramok okozta veszteség, P_{DC} – vezetőkben keletkező egyenáramú veszteség.

A számítások eredményeit felhasználva meghatározható a gépmódell villamos teljesítménye és hatásfoka:

$$P_{\text{vill}} = P_{\text{mech}} + P_{\text{veszt}} = 221,63 \text{ kW} \quad (8.22)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{vill}}} * 100 = 95,58 \% \quad (8.23)$$

P_{vill} – villamos teljesítmény, η – hatásfok.

A BMW xDrive-on alapuló gépmódell adatai maximális teljesítményű üzemállapotban:

Mechanikai fordulatszám (n_m): 5500 RPM

Gerjesztés frekvenciája (f): 275 Hz

Bemeneti feszültség (U): 400 V

Nyomaték (M): 368 Nm

Egyenáramú veszteség (P_{DC}): $2,1 \text{ kW}$

Örvényáram-veszteség (P_{AC}): $7,58 \text{ kW}$

Teljes veszteség (P_{veszt}): $9,68 \text{ kW}$

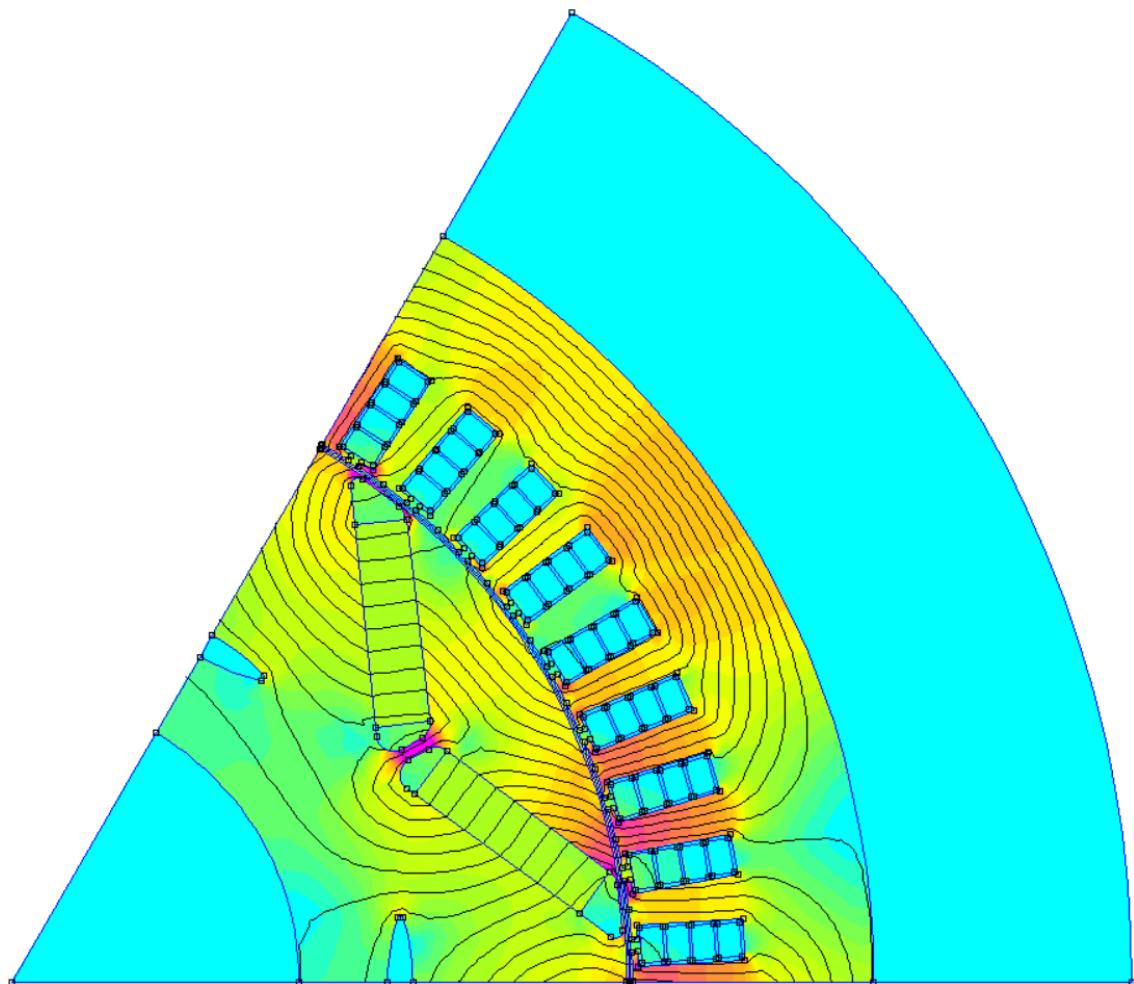
Villamos teljesítmény (P_{vill}): $221,63 \text{ kW}$

Mechanikai teljesítmény (P_{mech}): $211,95 \text{ kW}$

Hatásfok (η): $95,63 \%$

Érdemes megjegyezni, hogy ez a nagy veszteséggel járó, maximális teljesítményű üzemállapot olyan, melyben a villamos gép ritkán és rövid ideig üzemel. A BMW i7, az

egyik xDrive motorral felszerelt villamos autó $0 \frac{km}{h}$ -ról $100 \frac{km}{h}$ -ra 4,7 mp alatt gyorsul fel [37]. Gyorsulás közben a motor a maximális nyomatéket fejti ki, azonban a gyorsulást követően erre nincs szükség. Így általános használat közben a veszteségek okozta melegedés könnyen eliminálható hűtéssel, nagy teljesítményű üzemállapot pedig maximum pár másodpercig lép fel egyhuzamban.



8.24 ábra: A vizsgált gépmodell egy pólusának mágnesköre

9 Konklúzió

A hairpin tekercseléssel ellátott állandó mágneses szinkron gépek elterjedt autóipari alkalmazásának számos oka van. A gépek nagy teljesítmény- és nyomatéksűrűséggel rendelkeznek és hatékonyan működnek villamos autók hajtásláncának elemeként. A hairpin tekercselés rúd alakú vezetői jól kihasználják a horonyban rendelkezésre álló helyet, formájuknak köszönhetően kis tekercsfej alakítható ki velük. A hairpin tekercselések gyártási folyamatának minden lépése végrehajtható automatizált gyártósorokkal.

Az autóipari cégek számára a tekercselés legnagyobb hátránya a drága, bonyolult gyártási folyamat, melynek precíz hegesztések is részét képezhetik. A tekercselés másik legnagyobb hátránya a jelentős veszteségek keletkezése. A többletveszteségekért a hairpin vezetők nagy keresztmetszeteiben fellépő örvényáramok felelősek.

A szakdolgozat keretében végezett munka eredménye egy olyan végeleemes eszköz, mely tetszőleges állandó mágneses szinkron gép elektromágneses paramétereinek meghatározására képes különböző peremfeltételek mellett. Az eszköz MATLAB-kódok és Excel táblázatok összessége, a végeleemes számításokat a FEMM szoftverben végzi.

Az eszköz fontos részét képezi az örvényáram-számító módszer, mely iterálás segítségével a mágneses vektorpotenciál értékeit felhasználva meghatározza az adott gép vezetőiben fellépő örvényáramokat. A módszer implementálása az eszközben elengedhetetlen, mivel a FEMM-ben állandó mágneses szinkrongép vezetőiben keletkező örvényáramok számítására nincs beépített mód.

Az eszközzel vizsgált BMW xDrive motoron alapuló gépmódel feszültsége, nyomatéka, teljesítménye, egyéb elektromágneses paraméterei és a kialakuló örvényáramok, illetve azok okozta veszteségek kerültek meghatározásra. A számított veszteségek szemléltetik a hairpin tekercselés egyik legnagyobb hátrányát. Maximális teljesítményű üzemállapotban a motor tekercselésében több, mint 9 kW nagyságú Joule-veszteség keletkezik.

Irodalomjegyzék

- [1] Munro Live: Lucid Air Rear Motor – Does Size Matter?
<https://www.youtube.com/watch?v=JBC2WYR3CPI>
- [2] Istvan Kiraly, Tiago Cesa, Muhammed Fasil Palakkunnu Veettil: Rotor apparatus for an electric machine (US20240014702A1 Patent)
<https://patents.google.com/patent/US20240014702A1>
- [3] Istvan Kiraly, Tiago Cesa: Rotor Assembly (GB2597239B Patent)
<https://patents.google.com/patent/GB2597239B>
- [4] Kádár István 2019: *Villamos gépek és alkalmazások: III. Szinkron gépek*
- [5] Stock tesla <https://stock-tesla.com/stator-motora-tesla-model-3-1120970-00-f>
- [6] Bloomberg: What Engineers Found When They Tore Apart Tesla's Model 3
<https://www.youtube.com/watch?v=Lj1a8rdX6DU>
- [7] Hideki Ohguchi, Shion Takigawa, Satoshi Imamori 2023: *Comprehensive study on in-plane eddy-current loss in permanent-magnet synchronous machines*
- [8] Arnold Magnetic Technologies: Neodymium Iron Boron Magnets
<https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/>
- [9] BME VIK: Laboratórium 1 Négypólusok vizsgálata
<https://www.mit.bme.hu/oktatas/targyak/vimiac12>
- [10] K&J Magnetics: Temperature and Neodymium Magnets
<https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=temperature-and-neodymium-magnets>
- [11] K&J Magnetics: Magnet Grades
<https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=magnet-grade>
- [12] Copper.org: Copper Facts
<https://copper.org/education/c-facts/>
- [13] Iowa State University: Physics of Nondestructive Evaluation
https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Physical_Chemical/Electrical.xhtml
- [14] Iowa State University: Physics of Nondestructive Evaluation
<https://www.nde-ed.org/Physics/Electricity/resistance.xhtml>
- [15] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova 2010: *Design of rotating electrical machines*
- [16] Horváth Sándor Rajmund: BME Villamos Gépek és Alkalmazások előadás
- [17] Dr. Retter Gyula 1976: *Az egységes villamosgép-elmélet*

- [18] Dr. Korondi Péter, Dr. Fodor Dénes, Décsei-Paróczki Annamária 2014: Digitális szervo hajtások
https://mogi.bme.hu/TAMOP/digitalis_szervo_hajtasok/math-ch08.html
- [19] Stefan M. Goetz, Ricardo Lizana F., Sebastian Rivera 2023: *Hairpin Motors for Electromobility: Twists and Bends of a Technological Breakthrough that Initially Arrived A Century Too Soon*
- [20] Zeiss: Quality Assurance for Hairpins
<https://www.zeiss.com/metrology/en/industries/automotive/emobilitysolutions/e-motor/hairpins.html#Non-Contact-Digitization>
- [21] T. Dimier, M. Cossale, T. Wellerdieck: *Comparison of Stator Winding Technologies for High-Speed Motors in Electric Propulsion Systems*
- [22] Shaoshen Xue: Modelling of Hairpin Winding in Motor-CAD
- [23] Henrik Christoph Born, Florian Sell-Le Blanc, Volkmar Platte, Achim Kampker, Heiner Heimes, Benjamin Dorn, Florian Brans, David Drexler, Fabian Oehler, Andrea zu Münster, Sebastian Reising 2022: *Development of a Production Process for Formed Litz Wire Stator Windings*
- [24] Lucid Motors: Drive Unit: Motor | Tech Talks
<https://www.youtube.com/watch?v=U7IHZxNC6hc>
- [25] Tianjie Zou, David Gerada, Antonino La Rocca, Mohsen Moslemin, Alasdair Cairns, Mengmeng Cui, Anuvav Bardalai, Fengyu Zhang, Chris Gerada 2022: *A Comprehensive Design Guideline of Hairpin Windings for High Power Density Electric Vehicle Traction Motors*
- [26] <https://www.linkedin.com/pulse/comparison-i-pin-hairpin-x-pin-honesthls-roqqc>
- [27] MARS AUTOMATION by Anurag Vishwakarma: Automatic Hairpin Bending Machine <https://www.youtube.com/shorts/CKy4SIDE5f8>
- [28] FELSOMAT: E-Mobility Hairpin Stator
<https://www.youtube.com/watch?v=3chl322LOBQ&list=PLvhIKJaNxOIEIUi5EkuK8bUPINmE73hl&index=4>
- [29] TRUMPF: Ask the Expert – Hairpin welding
<https://www.youtube.com/watch?v=5s0ZBUfiTag>
- [30] Sheppard J. Salon, M. V. K. Chari, Lale T. Ergene, David Burow, Mark DeBortoli 2023: *Eddy Currents – Theory, Modeling and Applications*
- [31] Dr. Gyimóthy Szabolcs 2023: BME Elektromágneses terek alapjai előadás
- [32] Iowa State University: Physics of Nondestructive Evaluation https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Physical_Chemical/Permeability.xhtml
- [33] Kádár István 2019: *Villamos gépek és alkalmazások: I. Transzformátorok*

- [34] Chengbo Li, Ming Cheng*, Wei Qin, Zheng Wang, Xiang Ma, Wei Wang: *Analytical Loss Model for Magnetic Cores Based on Vector Magnetic Circuit Theory*
- [35] <https://www.bimmerarchive.org/photo/gallery-471-fifth-generation-electric-drivetrains.html>
- [36] MotorXP: *Performance Analysis of the Tesla Model 3 Electric Motor using MotorXP-PM.*
https://motorxp.com/wpcontent/uploads/mxp_analysis_TeslaModel3.pdf
- [37] <https://www.bmw.hu/hu/all-models/bmw-i/i7/2022/bmw-i7-sedan-highlights.html>
- [38] Dr. Huba Antal, Dr. Lipovszki György 2014: Méréselmélet
<https://mogi.bme.hu/TAMOP/mereselmelet/ch11.html>
- [39] Király István 2016: Extended space vector theory for determination of parameters of induction machines
<https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/6807>