

Villamos gépek és elektromos hajtású járművek modellezési lépései

Modelling steps for electric machines and battery electric vehicles

NYERGES Ádám¹, HORVÁTH Gergely², WOLLER Péter³

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék
Magyarország, 1111 Budapest, Stoczek utca 6.

www.gjt.bme.hu

¹+3614632380, nyerges.adam@kjk.bme.hu, ²gergely.horvath@edu.bme.hu, ³wollerp@edu.bme.hu

Abstract

The design of electric vehicles requires new approaches, and the automotive industry is in the learning phase these years. Modelling and simulation are important steps in the design and learning process. This paper presents the modelling of a series-produced BEV drivetrain in FEMM and Simulink environment. The research aims to investigate the interaction between the PMSM motor and vehicle energetics and develop the design process of electric drivetrains.

Keywords: permanent magnet synchronous motors, electric vehicles, magnetic simulation, modelling, vehicle energetics.

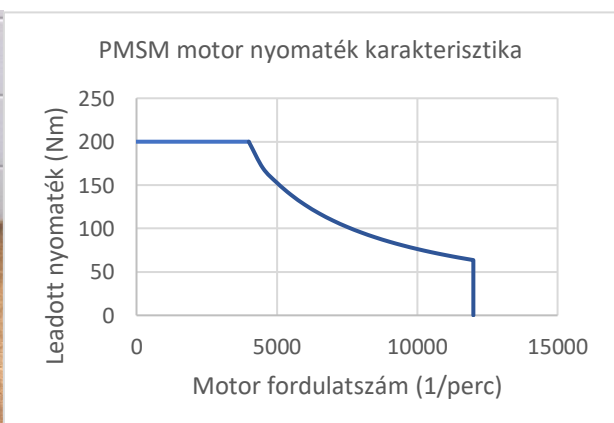
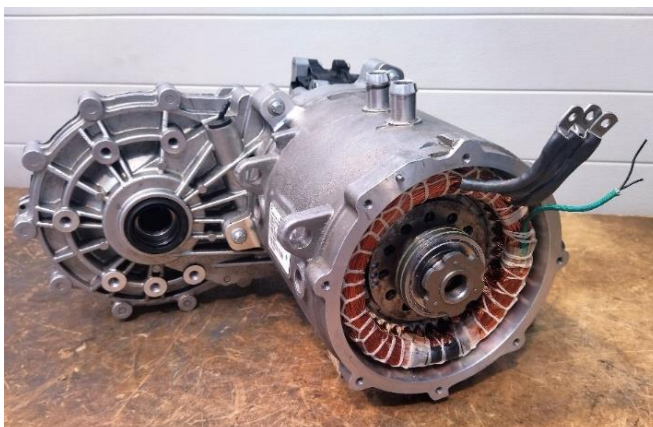
Kivonat

Az elektromos hajtású járművek tervezése sok tekintetben új szemléletet követel meg, a járműipar épp tanulási fázisban van. A tervezési és tanulási folyamat egy fontos lépése a modellezés és szimuláció. Jelen cikkben egy szériagyártásban lévő hajtáslánc modellezése kerül bemutatásra FEMM és Simulink környezetben. A kutatás célja a PMSM motor és a járműenergetika kölcsönhatásának a vizsgálata, mindezeket keresztül pedig az elektromos hajtásláncok tervezési folyamatának a kidolgozása.

Kulcsszavak: állandó mágneses szinkronmotorok, elektromos hajtású járművek, mágnesköri modellezés, járműenergetika, szimuláció.

1. BEVEZETÉS

A járműmérnökök számára az elektromos járművek tervezése egyszerre jelent új kihívásokat és új lehetőségeket [1]. A mágnesköri folyamatok járműipari alkalmazása új, tanulandó tudományterület. Az elektromos hajtásláncok pedig lényegesen egyszerűbb felépítésűek a hagyományos járművéknél, ami több lehetőséget ad a szimulációs tervezési fázisnak [2].



1. ábra. A megvizsgálandó elektromos hajtáslánc és a villamos gép nyomaték karakterisztikája

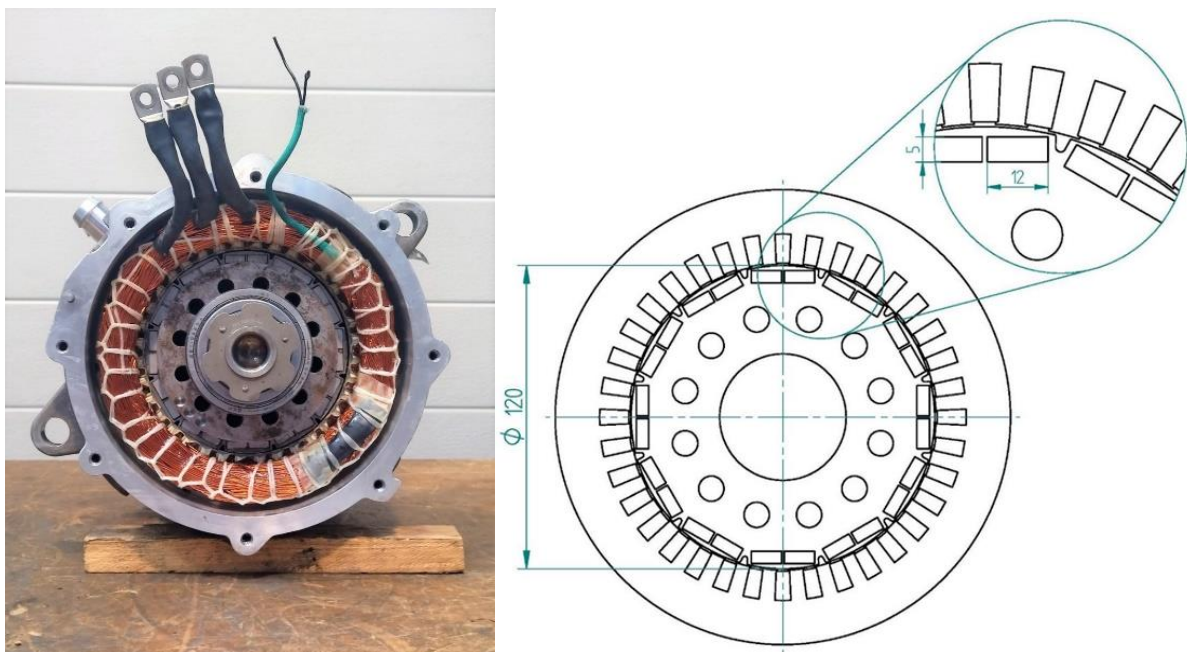
Az elektromos hajtású járművek megjelenésével a gépjármű-mérnöki képzésben is integrálni kell az új ismereteket. Ez gyakorlati szempontból az eddig elsősorban villamosmérnöki ismereteknek számító tananyagot jelentené első megközelítésben. A járműmérnöki tudás előnye viszont a több tudományterület magába foglaló, rendszerben való gondolkodás – adódik a cél, hogy az elektromos hajtású járművekkel kapcsolatos tudanyagot is a meglévő járműtechnikai szemlélettel építsük fel. A hagyományos hajtásrendszereknél az utóbbi évszázadban megismerhettük a jellemző teljesítmény és nyomaték karakterisztikákat, az ebből származtatható járműdinamikai tulajdonságokat és a járműenergetikai nagyságrendeket. Most a korábbi tapasztalatok alapján ugyanezeket kell megismerni az új, alternatív hajtásrendszerek esetén is.

Jelen cikk néhány modellezési lépésben bemutatja a villamos gépben zajló folyamatok és a járműdinamika kapcsolatát. A cikknek a módszertan prezentálás a célja nem közöl konkrét paramétereket. A kutatás hosszú távú célja pedig megvizsgálni a villamos gép karakterisztikájának és a járműenergetikának a kölcsönhatását. A jármű és hajtáslánc közös differenciálegyenletekkel modellezhető, ahogyan [3]-ban is olvasható, erre a célra a Matlab Simulink megfelel [4]. A mágnesköri folyamatok modellezéséhez végeeselemes szimuláció szükséges, amire a FEMM szoftver alkalmas [5]. A vizsgált jármű a Fiat 500e első generációja, melynek hajtásláncja az 1. ábrán látható.

2. PMSM MOTOR 2D MODELL ÉS MÁGNESKÖRI SZIMULÁCIÓ

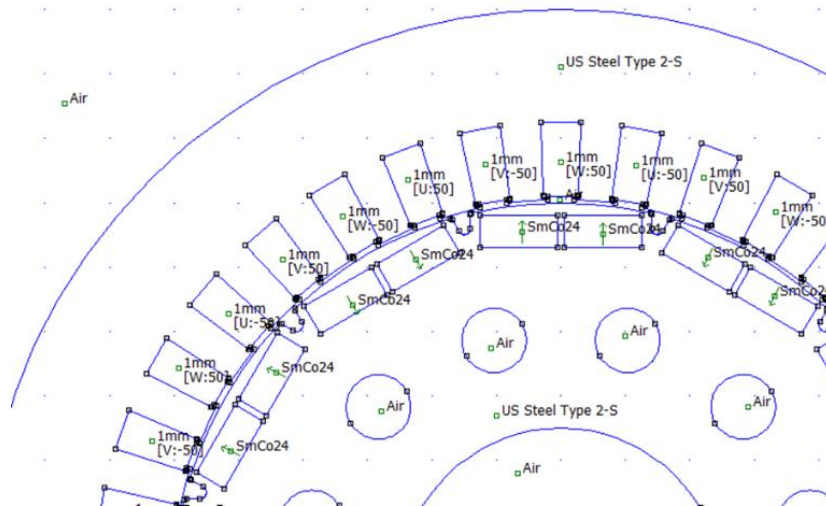
A mágnesköri szimuláció célja megvizsgálni a villamos gépben a tekercsáramok, a kialakuló mágneses mező és a motornyomaték periodikus lefutásának a kapcsolatát. A végeeselemes FEMM szimulációs szoftver két dimenziós, csak a motor egy szeletét vizsgálja.

A 2D FEMM szimulációs modell elkészítéséhez első lépésben el kell készíteni a villamos gép keresztmetszeti rajzát, esetünkben ez egy állandó mágneses szinkrongép. A valós gép és a rajz látható a 2. ábrán. A keresztmetszeti rajz a következő részekből áll: állórész (sztátor), forgórész (rotor), tekercselés hornyai, állandó mágnesek, légrés. A modellezés szempontjából a légrés és a mágnesek geometriája van a legnagyobb hatással a végeredményekre, így ezeknek a méreteknek a pontossága a legfontosabb.



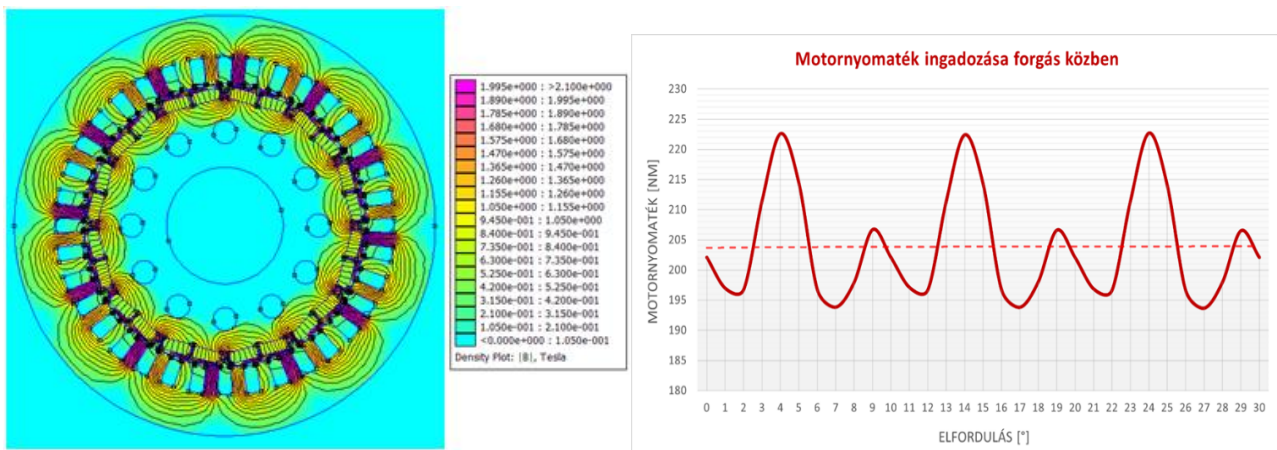
2. ábra. A villamos gép keresztmetszete képen és géprajzon

Második lépésben definiálni kell a peremfeltételeket, az anyagválasztásokat, a tekercseléseket és a mágneseket. Ez látható a 3. ábrán. A motor 12 pólusú (p) és 36 hornyos. A mágnesek anyaga samárium-kobalt, ami járműipari villamos gépekben egy elterjedt mágnes típus a kedvező tulajdonságai miatt: erős mágneses mezővel rendelkezik és magas a lemágneseződési hőmérséklete. A tekercselés 3 fázisú, körülbelül 50 menetszámmal (a horony keresztmetszetéből és a kábelvastagságból becsülve). A tekercselés áramával be lehet állítani a motor nyomatékát. A cél a gyár által megadott nyomaték előállítás.



3. ábra. A 2D FEMM modell anyagválasztásai és tekercselési beállításai

A nyomaték beállításához először meg kell találni a legnagyobb pillanatnyi nyomatékot adó rotor pozíciót. Ehhez állandó tekercs áram mellett meg kell forgatni rotort. A rotor pozíció ismerete után be kell állítani a tekercs áramot a kívánt nyomatékhoz. A villamos gép forgatása (a tekercsáram három fázisú forgatása mellett) ezután megadja a motor nyomatékingadozását, ami a 4. ábrán látható. A valóságban ilyen mértékű nyomaték ingadozás nem jelentkezik, mivel a státor a motor hossz tengelye mentén kis mértékben meg van csavarva. A nyomatékingadozás oka a motor forgása közbeni geometria változás, ami jelentős hatással van a légrésben kialakuló mágneses mezőre.



4. ábra. A FEMM szimuláció eredményei: mágneses mező és az ebből számolt nyomaték lefutás

A FEMM mágnesköri szimuláció előnyei:

- stacioner helyzetben (álló motor) a pillanatnyi nyomatékok pontosan becsülhetők, ahogyan a nyomatéklefutás és a geometriának a kapcsolata is,
- képet ad a mágneses mező képéről és változásairól,
- megmutatja az anyagválasztások és az állórész-forgórész geometria kapcsolatát,
- a nyomatéklefutás a felharmonikusokat is tartalmazza,
- az iparban is elterjedten alkalmazott ingyenes szoftver.

A FEMM mágnesköri szimuláció hátrányai:

- csak stacioner munkapontokat tud vizsgálni,
- a motor hatásfok jellegzőjének az előállítása nehézkes, a motorenergetika vizsgálatára vannak alkalmasabb szoftverek – például a MotorAnalysisPM, viszont ezek a szoftverek nem ingyenesek,
- nem alkalmas dinamikus szimulációra,
- nem alkalmas a motor szabályozásának a vizsgálatára,
- nem felhasználóbarát kezelői felület.

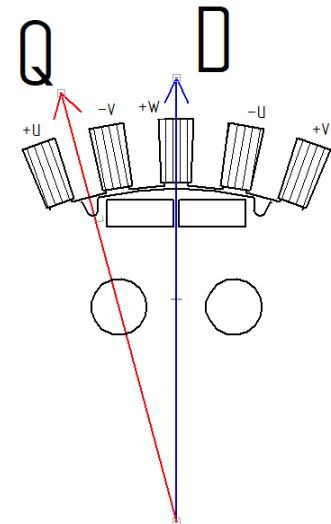
3. PMSM MOTOR DIFFERENCIÁL EGYENLETEI ÉS SZIMULÁCIÓJA

Az állandó mágneses szinkronmotorok működése leírható két differenciálegyenlettel D-Q koordináta rendszerben. A D-Q koordináta rendszer a rotor mágneses mezőjéhez kötött, így ebben a rendszerben a három fázisú tekercselés mágneses mezője nem forog. A D-Q modell blokkvázlata a 6. ábrán tekinthető meg. A villamos gép működtetésének megértéséhez egy olyan modellre van szükség, melynek a bemenete a három fázisra kapcsolt váltakozó feszültség, a kimenete pedig a három fázis árama valamint a villamos gép nyomatóka. A kimenetek-bemenetek és a D-Q koordináta rendszer egyenletei között a kapcsolatot a Clarke és Park transzformációk adják meg [4]. A motorban a D és Q irányok az 5. ábrán láthatók. A működést leíró differenciálegyenletek (1), (2) és (3) alakban írhatók fel.

A PMSM motor modellje így négy paraméterrel becsülhető:

- D és Q irányú inductivitások (L_d és L_q),
- tekercselés ellenállás (R),
- mágnesek által indukált sztátor fluxus (λ).

A Simulink modell beállításához a feladat a négy paraméter becslése a FEMM szimulációs eredmények és a tekercselés tulajdonságainak felhasználásával.

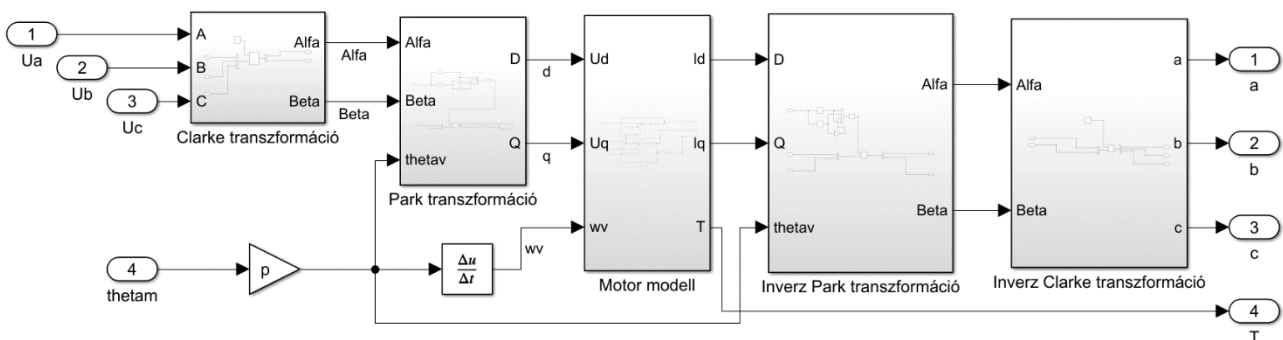


5. ábra. D és Q irányok a rotorban

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{U_q}{L_q} - \frac{R}{L_q} * i_q - \frac{L_d}{L_q} * \omega * i_d - \frac{\omega \lambda}{L_q} \quad (1)$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{U_d}{L_d} - \frac{R}{L_d} * i_d + \frac{L_q}{L_d} * \omega * i_q \quad (2)$$

$$T_e = 1.5 * p * (\lambda * i_q + (L_d - L_q) * i_d * i_q) \quad (3)$$



6. ábra. A PMSM motor D-Q modelljének blokkvázlata

A Matlab Simulink szimuláció előnyei:

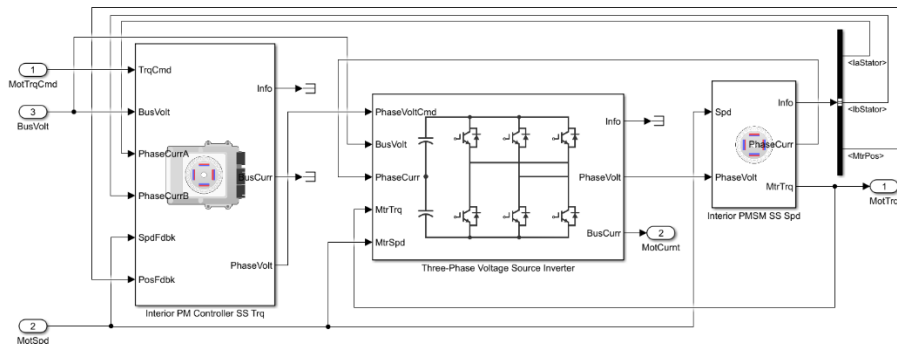
- gyors, dinamikus szimuláció – közönséges differenciálegyenletek megoldása,
- motor és hajtáslánc energetika megvizsgálható,
- a modell összeköthető teljesítményelektronikával és controllerrel, ezáltal a motorszabályozás stratégiái megvizsgálhatók,
- oktatási célra, a folyamatok megértésére kiváló szoftver.

A Matlab Simulink szimuláció hátrányai:

- csak időfüggő paraméterekkel dolgozik, az állórész-forgórész geometriának nincs hatása,
- a sok elhanyagolt motor jellemző miatt pontatlan, az eredményekből kinyerhető hatások térképek szintén pontatlanok,
- nem ismeri a motor pontos nyomatóklefutását, nem tartalmazza a nyomatóklefutás felharmonikusait.

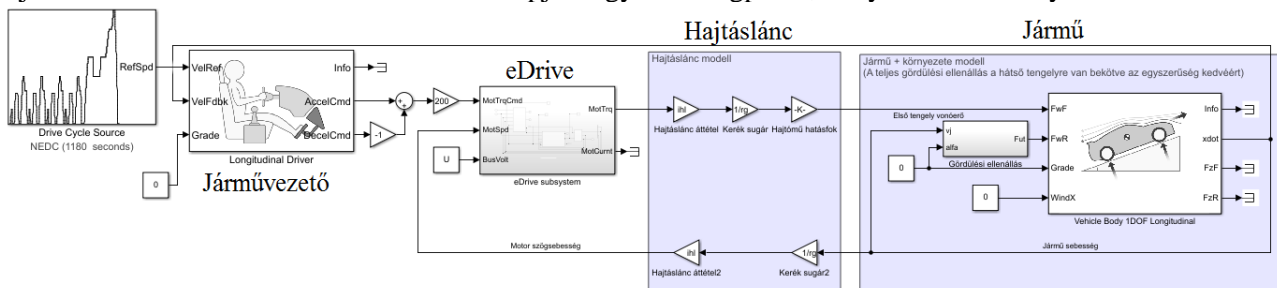
4. JÁRMŰ ÉS HAJTÁSLÁNC MODELLEZÉS

Oktatási szempontból a motorirányítás bemutatása gyakorlati feladattal a legjobban megvalósítható. A Simulink szimulációs rendszer erre is kész megoldásokat kínál. PMSM motor eddig megalkotott modelljét a járműmodellben történő felhasználáshoz ki kell egészíteni egy teljesítményelektronika modellel és egy szabályzóval. A Matlab Simulink erre a célra előre definiált elemei láthatók a 7. ábrán.



7. ábra. A PMSM motornak és irányításának a blokkvázlata [4]

A modellelemeket végül be kell illeszteni egy hosszirányú jármű és hajtáslánc modellbe. A 8. ábrán megtekinthetők a szükséges modellelemek. Az első egy járművezető modell, mely $[-1,1]$ intervallumban maximális fékezés és gyorsítás parancsot adhat ki (ez lényegében egypedálos irányítás). A következő egy hajtáslánc modell, mely figyelembe veszi a motor és a kerekek közötti áttételt, a kerék gördülőköri sugarát, valamint a hajtáslánc hatásfokát. Végül szükség van egy hosszirányú járműmodellre is, mely figyelembe veszi a járműre ható ellenállásereket. A modell alapjele egy sebességprofil, mely lehet szabványos menetciklus is.



8. ábra. A teljes hosszirányú jármű és hajtáslánc modell

5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KITEKINTÉS

A cikk bemutatott az elektromos hajtású járművek és hajtáslánckok vizsgálatára egy olyan modellezési lépéssorozatot, amely alkalmas járműmérnökök számára az egyes részegységek működésének a megértésére. Emellett megvizsgálható vele a villamos gép paramétereinek és a jármű energetikájának a kapcsolata. További kutatásokban részletesen ki kell bontani a FEMM és a Simulink modell validálásának lépéseit és tapasztalatait. Továbbfejlesztési lehetőség lehet még az akkumulátor modellezése valamint az egyes komponensek hővesztéseinek és melegedésének a vizsgálata.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Zöldy M., Csete M., Kolozsi P. P., Bordás P., Török Á. (2021) *Cognitive Sustainability*, In Cognitive Sustainability 2022.03.03 online first, <https://doi.org/10.55343/CogSust.7>
- [2] Nyerges Á., Zöldy M. *Hosszirányú járműmodell fejlesztése elektromos járművek hatótáv becslésére*. Műszaki Szemle (EMT) 74 pp. 13-22. 2019.
- [3] Péter T., Lakatos I., Szauter F. and Pup D. *Complex analysis of vehicle and environment dynamics*, 2016 12th IEEE/ASME MESA, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/MESA.2016.7587112
- [4] Mathworks Help Center. *Permanent Magnet Synchronous Machine*. mathworks.com/help/pmsm (utoljára megnyitva: 2022.03.03.)
- [5] Pei, W.; Zhang, Q.; Li, Y. *Efficiency Optimization Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles Based on Energy Balance*. Symmetry 2022, 14, 164. <https://doi.org/10.3390/sym14010164>