

# Nemlineáris állandó mágneses szinkrongép-modell megvalósítása MATLAB-Simulink környezetben érzékelő nélküli polaritásfelismeréshez

## Implementation of a nonlinear PMSM model for sensorless polarity detection in MATLAB-Simulink

SZALAY István<sup>1,2</sup>, FODOR Dénes<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járómérnöki Kar, Teljesítményelektronika és Villamos Hajtások Tanszék

<sup>2</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont

9026 Győr, Egyetem tér 1. – <https://tvht.sze.hu> – <https://jkk.sze.hu>

### Abstract

*This paper presents the implementation of an extended PMSM model in the MathWorks MATLAB-Simulink environment for signal injection-based sensorless polarity detection algorithm development. We enhance the model by introducing a quadratic flux-current function to account for the polarity-dependent saliency of the machine. We present simulation results of square-wave and sinusoidal injection which are commonly used test signals in sensorless control. We compared the simulation results to measurement data.*

**Keywords:** sensorless, permanent magnet synchronous machine model

### Kivonat

*A cikkben a jelbefecskendezés-alapú érzékelő nélküli polaritásfelismerés fejlesztésében alkalmazható kibővített állandó mágneses szinkrongép-modell MathWorks MATLAB-Simulink környezetben történő megvalósítását ismertetjük. A kibővített modellben másodfokú fluxus-áram függvény szolgál a gép polaritásfüggő sajátosságainak modellezésére. Ismertetjük az érzékelő nélküli módszerekben gyakran alkalmazott négyzögjeles és szinuszos befecskendezés szimulációját. A szimulációs eredményeket mérésekkel hasonlítjuk össze.*

**Kulcsszavak:** érzékelő nélküli, állandó mágneses szinkrongép-modell

## 1. BEVEZETÉS

Az állandó mágneses szinkrongépes (ÁMSZG) hajtások érzékelő nélküli szöghelyzet-meghatározása összetett feladat, a gép fordulatszáma függvényében nagyon eltérő módszerekre van szükség [1, 2]. Nagyfordulatszámon, névleges fordulatszám kb. 3-5 %-a felett, megfigyelő alapú módszereket alkalmaznak, amelyek működése a forgási feszültség szögsebesség- és szöghelyzetfüggésén alapul [4, 5]. Kisfordulatszámon azonban lecsökken, majd állóhelyzetben teljesen megszűnik a forgási feszültség, és a megfigyelő alapú módszerek hatékonysága leromlik, majd működésképtelenné válnak [3, 4]. Helyettük jelbefecskendezés alapú módszereket alkalmaznak, amelyek a gép mágnesköreinek szöghelyzetfüggése által a válaszáramokban okozott torzulások feldolgozásán alapulnak [1, 2].

A kutatómunkánk során a terület egyik kihívását, az állóhelyzetben történő kezdeti szöghelyzet meghatározás és polaritásfelismerés lehetőségeit vizsgáltuk. A polaritásfelismerés lehetővé tétele érdekében kidolgoztunk egy kibővített ÁMSZG-modellt, amely másodfokú fluxus-áram függvényt alkalmaz [1, 2, 8]. A négyzetes tag együtthatói az állórészhez kötött háromfázisú koordináta-rendszerben meghatározó térbeli alapharmonikussal rendelkeznek, aminek köszönhetően a négyzetes nemlinearitás áramtorzító hatásai alapján a forgórész polaritása felismerhető. A cikkben a kutatómunka eredményeként előállt kibővített ÁMSZG-modellt és a MathWorks MATLAB-Simulink környezetben történő megvalósítását ismertetjük, kiegészítve szinuszos és négyzögjeles nagyfrekvenciás feszültségjel-befecskendezés szimulációs és mérési eredményeivel és ezek összehasonlításával.

## 2. MÁSODFOKÚ FLUXUSMODELL BŐVÍTÉS

A kibővített ÁMSZG-modellhez kidolgozott másodfokú fluxus-áram függvény a forgórészhez kötött  $dq0$  koordináta-rendszerben a

$$\underline{\Psi}_{dq0}(\underline{i}_{dq0}) = \underline{\Psi}_{dq0}^{PM} + \underline{L}_{dq0}\underline{i}_{dq0} + \frac{1}{2}(\underline{I}_3 \otimes \underline{i}_{dq0}^T)\underline{\Gamma}_{dq0}\underline{i}_{dq0}$$

alakban írható fel, ahol  $\underline{\Psi}_{dq0}$  a tekercsfluxusvektor,  $\underline{i}_{dq0}$  az áramvektor,  $\underline{\Psi}_{dq0}^{PM}$  az állandó mágneses tekercsfluxusvektor,  $\underline{L}_{dq0}$  az induktivitásmátrix,  $\underline{I}_3$  az egységmátrix, és végül  $\underline{\Gamma}_{dq0}$  a telítődési együttható mátrix, amelyet mi vezetünk be.  $\underline{\Gamma}_{dq0}$  elemei az alábbiak kivételével nulla értékűek [1].

$$\Gamma_{ddd} = -\frac{9}{4}\Gamma_0, \quad \Gamma_{dqq} = \Gamma_{qdd} = \Gamma_{qqd} = -\frac{3}{4}\Gamma_0$$

A fenti nem nulla értékű elemeket a  $\Gamma_0$  polaritásfüggő telítődési együtthatóval adtuk meg. A fluxus-áram függvény  $d$ - és  $q$ -irányú része

$$\Psi_d = \Psi_{PM} + L_{dd}i_d + \frac{1}{2}\Gamma_{ddd}i_d + \frac{1}{2}\Gamma_{daq}i_q, \quad \Psi_q = L_{qq}i_q + \Gamma_{qqd}i_d i_q.$$

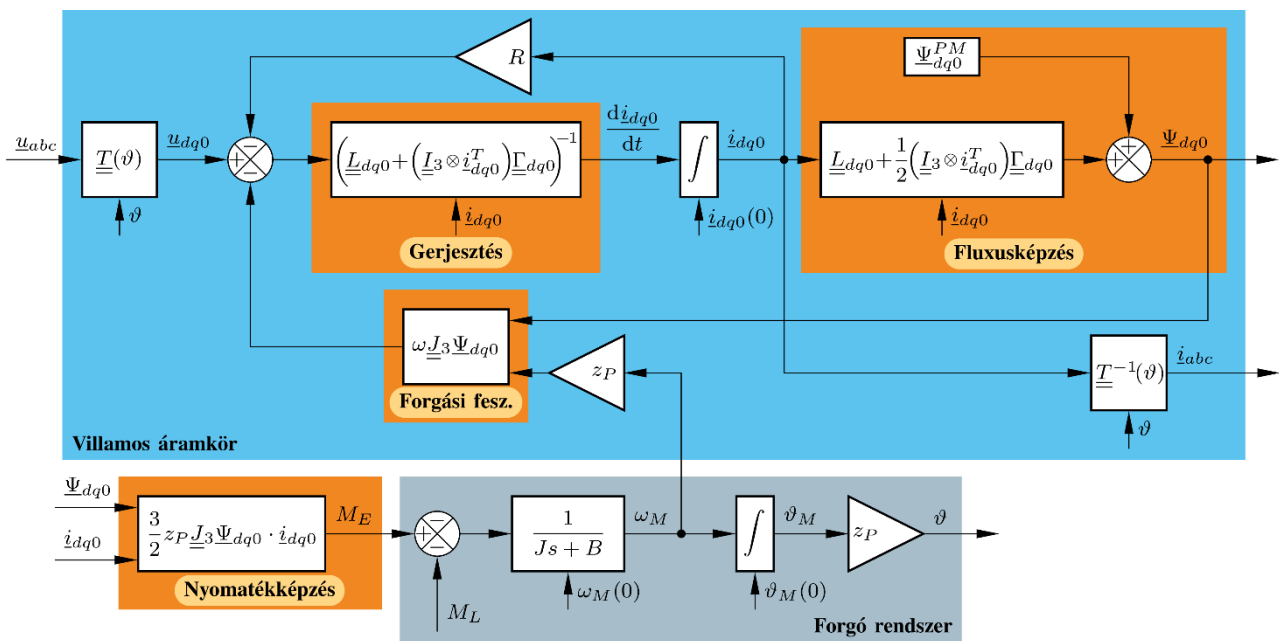
A kibővített modellben a feszültségegyenlet és a nyomatékegyenlet felépítése azonos a hagyományos modellével, azzal a különbséggel, hogy a másodfokú fluxus-áram függvényt kell behelyettesíteni.

$$\underline{u}_{dq0} = R\underline{i}_{dq0} + \frac{d\underline{\Psi}_{dq0}}{dt} + \omega \underline{J}_3 \underline{\Psi}_{dq0}, \quad J \frac{d\omega_M}{dt} = \frac{3}{2}z_P \underline{J}_3 \underline{\Psi}_{dq0} \cdot \underline{i}_{dq0} - B\omega_M - M_T$$

A feszültségegyenletben  $\underline{u}_{dq0}$  jelöli a feszültségvektort,  $R$  a fázisellenállás,  $\omega$  pedig a villamos szögsebesség. A nyomatékegyenletben  $J$  a gép forgórészének tehetetlenségi nyomatéka,  $\omega_M$  a mechanikai szögsebesség,  $z_P$  a póluspárok száma,  $B$  a forgási súrlódási együttható, és  $M_T$  a gépet terhelő forgatónyomaték. A nyomatékegyenlet jobboldalának első tagja az  $M_E$  elektromágneses forgatónyomaték. A mindkét egyenletben szereplő  $\underline{J}_3$  a  $dq$ -síkbeli  $90^\circ$ -os forgatási mátrix.

$$\underline{J}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

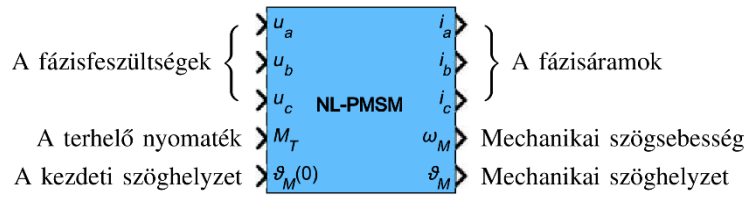
A modellegyenletek alapján felrajzolható a modell jelfolyamábrája (1. ábra), amely a Simulink megvalósítás kiindulási alapját képezi.



1. ábra. A másodfokú fluxusmodellel kibővített állandó mágneses szinkrongép-modell jelfolyamábrája

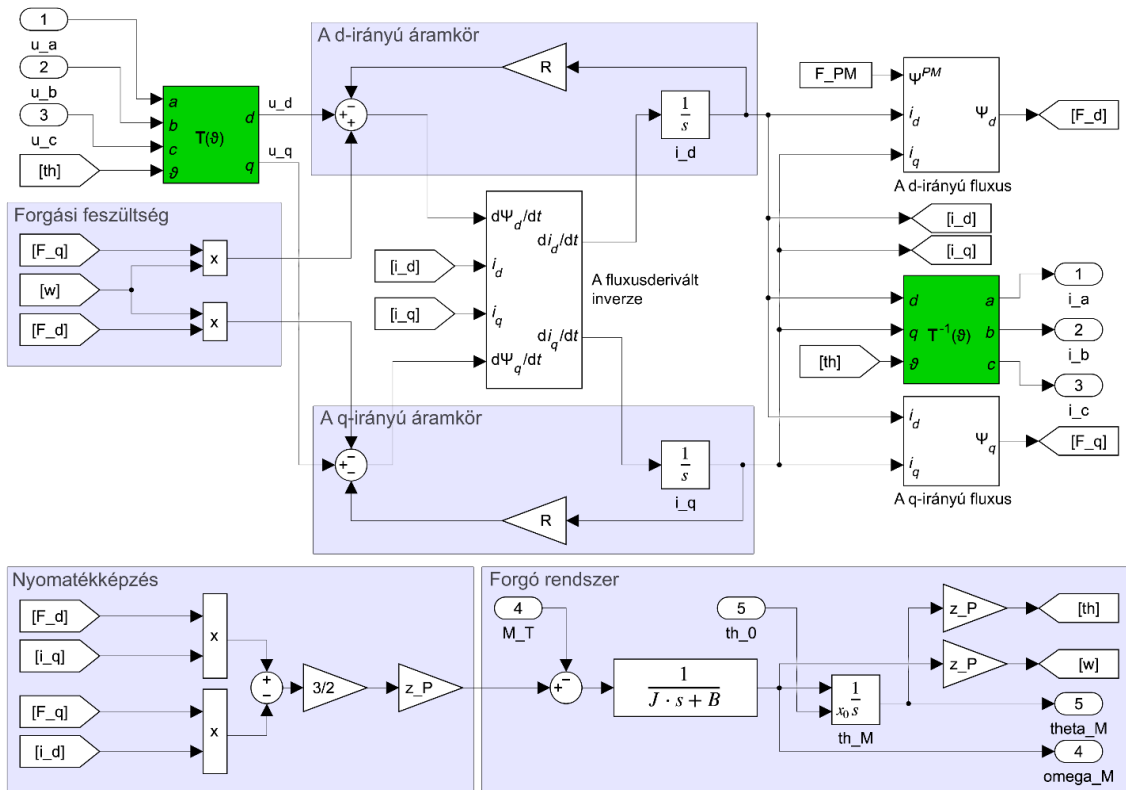
### 3. MEGVALÓSÍTÁS MATLAB-SIMULINK KÖRNYEZETBEN

A Simulinkben megvalósított modell rajzjelét a 2. ábra ismerteti. A modell bemenetei a fázisfeszültségek, a terhelő nyomaték, és a kezdeti szöghelyzet. A modell kimenetei a fázisáramok, a mechanikai szögsebesség és a mechanikai szöghelyzet.

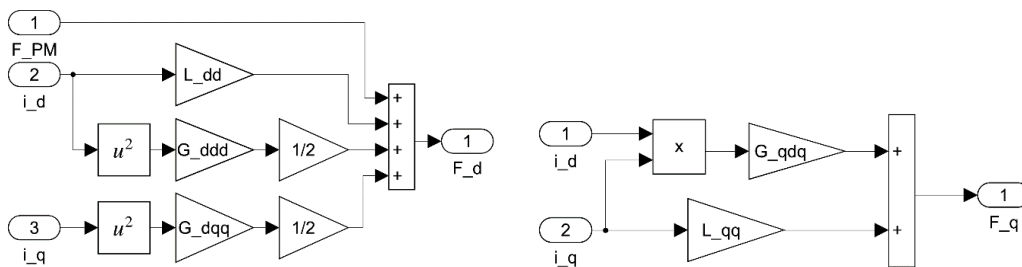


2. ábra. A kibővített modell Simulink blokkjának rajzjele

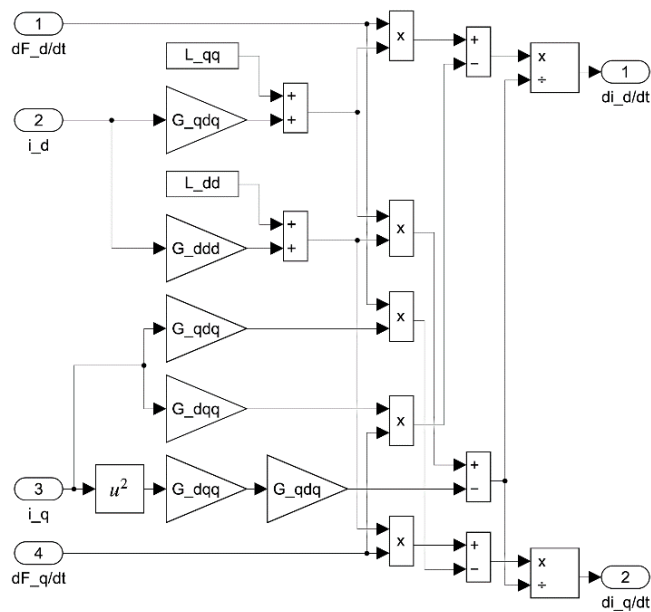
A modell belső felépítését ismerteti a 3. ábra. A blokkdiagram felépítése annyiban tér el a jelfolyamábrától, hogy a vektor értékű jelek összetevőkre lettek bontva, a zérusrendű összetevők el lettek hagyva, illetve a mennyiségek elnevezései mellőzik a görög betűket és az alsó/felső indexeket.



3. ábra. A kibővített ÁMSZG-modell Simulinkben megvalósított blokkdiagramja



4. ábra. A d-irányú (bal oldal) és a q-irányú (jobb oldal) tekercsfluxus számítása



5. ábra. A tekercsfluxus áramvektor szerinti deriváltjának inverze

A blokkdiagram, illetve a kibővített modell központi eleme a tekercsfluxus áramvektor szerinti deriváltjának inverze, amely a feszültségegyenlet integrálható alakra hozása során jelenik meg. A feszültségegyenlet az áramvektor deriváltjára rendezhető a láncszabály alkalmazásával

$$\frac{d\Psi_{dq0}}{dt} = \frac{\partial\Psi_{dq0}}{\partial i_{dq0}} \frac{di_{dq0}}{dt} \Rightarrow \frac{di_{dq0}}{dt} = \left( \frac{\partial\Psi_{dq0}}{\partial i_{dq0}} \right)^{-1} \left( \underline{u}_{dq0} - R\underline{i}_{dq0} - \omega J_3 \Psi_{dq0} \right).$$

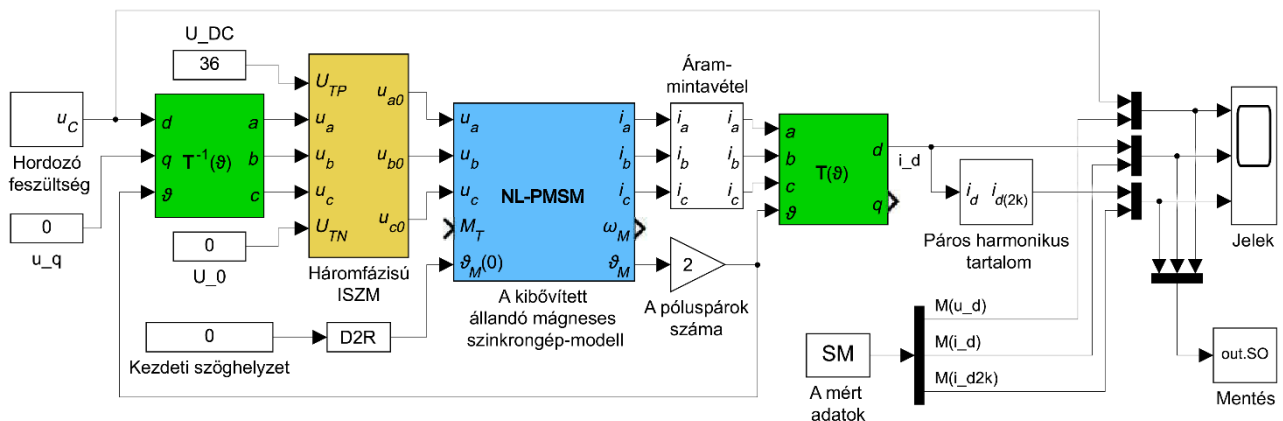
Az inverz mátrix elemekre bontva

$$\left( \frac{\partial\Psi_{dq0}}{\partial i_{dq0}} \right)^{-1} = \frac{1}{(L_{dd} + \Gamma_{ddd}i_d)(L_{qq} + \Gamma_{qqd}i_d) - \Gamma_{dqq}\Gamma_{qdd}i_d^2} \begin{bmatrix} L_{qq} + \Gamma_{qqd}i_d & \Gamma_{ddq}i_q \\ \Gamma_{qdd}i_q & L_{dd} + \Gamma_{ddd}i_d \end{bmatrix}.$$

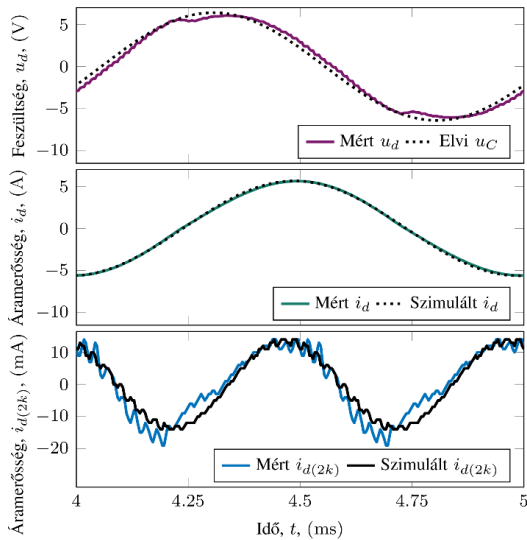
Az elemek számítását végző alrendszer blokkdiagramját ismerteti az 5. ábra.

#### 4. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A megvalósított ÁMSZG-modellt szinuszos és négyszögjel-befecskendezéses szimulációban alkalmaztuk, amelyek a leggyakoribb vizsgálójel-alakok [6]. A szinuszos befecskendezés szimulációjának blokkdiagramját ismerteti a 6. ábra. A szimuláció során az 1 kHz frekvenciájú  $u_c$  hordozófeszültség a  $d$ -irányba lett befecskendezve. A szimuláció magába foglalta a háromfázisú impulzusszélesség-modulációt és az ezzel szinkronizált fázisáram-mintavételt is. Az közbenső köri egyenfeszültség értéke  $U_{DC} = 36$  V volt, a befecskendezett szinuszjel amplitúdója pedig 5 V. A gépparamétereket az 1. táblázat közli.



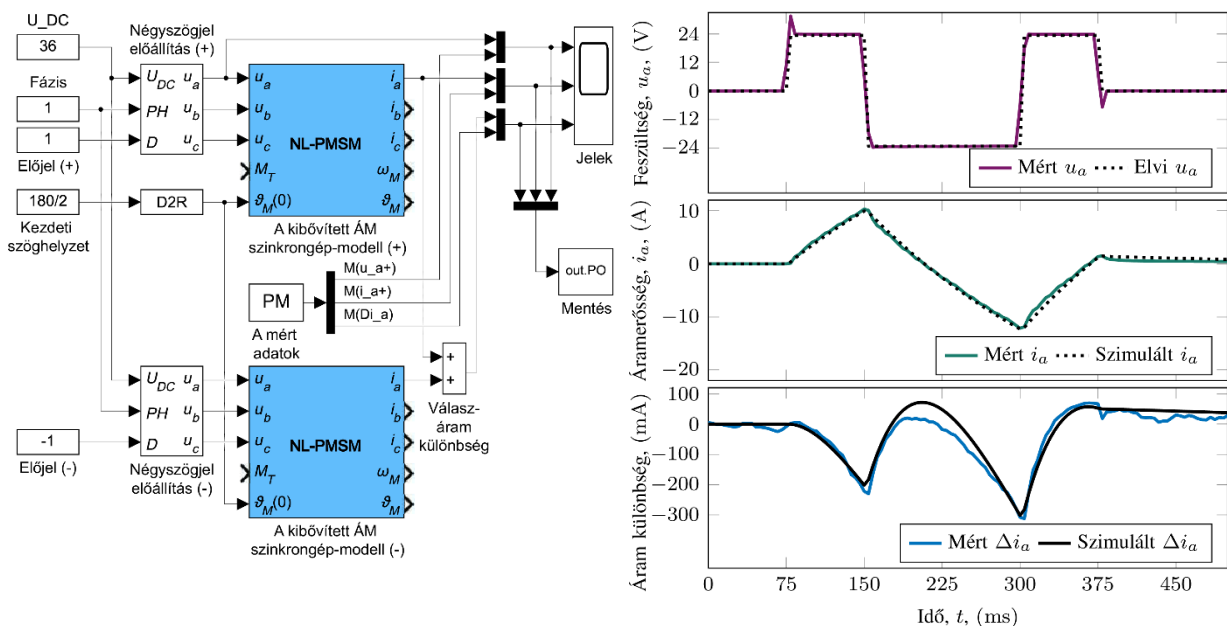
6. ábra. Modulált szinuszos feszültségjel-befecskendezés szimulációja



7. ábra. A szinuszos befecskendezés szimulációja és összehasonlítása mérési eredményekkel

Szinuszos befecskendezésnél a  $d$ -irányú áram második harmonikusa a polaritásfüggő áramösszetevő. A szimulált és mért értékeit a 7. ábra hasonlíttja össze. Szigorúan véve a páros harmonikus tartalom összehasonlítása látható az ábra alsó részén, de ebben a második harmonikus a legnagyobb amplitúdójú összetevő. A szimuláció a mért páros harmonikus amplitúdóját és fázisát is jól közelíti.

Négyszögjel-befecskendezéses vizsgálatoknál a felfutó és lefutó feszítésgugrásokra adott áramválaszok előjeles összege a polaritásfüggő összetevő. Valós méréseknél a két befecskendezést csak egymás után lehet elvégezni, szimulációban azonban párhuzamosan is történhetnek. A négyszögjel-befecskendezéses vizsgálatoknál a 8. ábra jobboldali legfelső diagramján látható páros négyszög feszítésgjelet, illetve ennek  $-1$ -szeresét alkalmaztuk vizsgálójelként. A Simulink modell blokkdiagramja a 8. ábra bal oldalán látható. A felfutó éllel kezdődő vizsgálójel a „Négyszögjel előállítás (+)”, a lefutóval kezdődőt pedig a „Négyszögjel előállítás (-)” hozza létre. A közbenső kör feszültség  $U_{DC} = 36$  V. A felfutó élre adott áramválasz a 8. ábra jobb oldalán középen, a két válaszáram különbsége pedig alul látható. A szimuláció a mért jelek nagyságát és jelalakját egyaránt jól közelíti. A gépparamétereket az 2. táblázat közli.



8. ábra. A négyszög feszítésgjelet befecskendezésének modellje (bal oldal) és a szimulációs és mérési eredmények összehasonlítása (jobb oldal)

1. táblázat. A szinuszos szimuláció modellparaméterei

Paraméter	Jelölés	Érték
A póluspárok száma	$Z_p$	2
Fázisellenállás	$R$	0,55 $\Omega$
Az állandó mágneses tekercsfluxus	$\Psi_{PM}$	24,8 mWb
A $d$ -irányú induktivitás	$L_{dd}$	158 $\mu$ H
A $q$ -irányú induktivitás	$L_{qq}$	182 $\mu$ H
Polaritásfüggő telítődési együttható	$\Gamma_0$	0,125 $\mu$ H/A
Forgási sűrűdési együttható	$B$	6,3 mN m s/rad
Tehetetlenségi nyomaték	$J$	200 g cm <sup>2</sup>

2. táblázat. A négyszögjeles szimuláció modellparaméterei

Paraméter	Jelölés	Érték
A póluspárok száma	$Z_p$	2
Fázisellenállás	$R$	0,645 $\Omega$
Az állandó mágneses tekercsfluxus	$\Psi_{PM}$	24,8 mWb
A $d$ -irányú induktivitás	$L_{dd}$	145 $\mu$ H
A $q$ -irányú induktivitás	$L_{qq}$	188 $\mu$ H
Polaritásfüggő telítődési együttható	$\Gamma_0$	0,16 $\mu$ H/A
Forgási sűrűdési együttható	$B$	6,3 mN m s/rad
Tehetetlenségi nyomaték	$J$	200 g cm <sup>2</sup>

## 5. A MODELLFÁJLOK ELÉRHETŐSÉGE

A megvalósított modellek elérhetők a GitHub-on [9].

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az ismertetett újszerű, kibővített állandó mágneses szinkrongép-modell alkalmas a jelbefecskendezés alapú érzékelő nélküli polaritásfelismerésben történő alkalmazásra. A kibővített ÁMSZG-modell egy másodfokú fluxus-áram függvényt foglal magába a gép polaritásfüggő dinamikus viselkedésének jellemzésére.

A cikk bemutatja a modell MathWorks MATLAB/Simulink környezetben történő megvalósítását. A megvalósított modell helyesen jelzi előre a  $d$ -irányú áram második harmonikusát szinuszos befecskendezés esetén, és a válaszáram-különbséget négyzögjel-befecskendezés esetén. A modell emellett tetszőleges feszültségbefecskendezés szimulációjára is használható.

A kibővített ÁMSZG-modell további nemlinearitások modellezésének alapjául is szolgálhat, és a Simulinkben történő megvalósítás az új polaritásfelismerő algoritmusok fejlesztésének hasznos eszköze.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Szalay, I., Fodor, D., Enisz, K., Medve, H.: Saliency Model Extension for Sensorless Initial Position and Polarity Detection of Permanent Magnet Synchronous Motors, IEEE Access, 2021, 9, 168292-168314. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3136917
- [2] Szalay, I., Fodor, D., Enisz, K., Medve, H.: Permanent Magnet Synchronous Motor Model Extension for High-Frequency Signal Injection-Based Sensorless Magnet Polarity Detection, Energies, 2022, 15(3). doi: 10.3390/en15031131
- [3] Zhao, Y., Yu, H., Wang, S.: An Improved Super-Twisting High-Order Sliding Mode Observer for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor, Energies, 2021, 14(19). doi: 10.3390/en14196047
- [4] Briz, F., Degner, M. W.: Rotor position estimation – A review of high-frequency methods, IEEE Industrial Electronics Magazine, 2011 5(2) 24-36. doi: 10.1109/MIE.2011.941118
- [5] Holtz, J.: Initial rotor polarity detection and sensorless control of PM synchronous machines, IEEE Industry Applications Conference 41st IAS Annual Meeting (2006) 2040-2047. doi: 10.1109/IAS.2006.256816
- [6] Szalay, I., Fodor, D., Enisz, K.: Comparison of square-wave and sinusoidal signal injection in sensorless polarity detection for PMSMs, 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (2022) 583-589.
- [7] Szalay, I., Kohlrusz, G., Fodor, D.: Modeling of slotless surface-mounted PM synchronous motor for sensorless applications, IEEE International Electric Vehicle Conference (2014) 1-5. doi: 10.1109/IEVC.2014.7056198
- [8] Szalay, I., Fodor, D.: Nonlinear PMSM Model Implementation in MATLAB-Simulink for Sensorless Polarity Detection, 2023 IEEE International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), doi: 10.1109/EDPE58625.2023.10273864
- [9] Szalay, I.: Quadratic PMSM model extension for sensorless polarity detection, <https://github.com/Szalay/ML-SLNS>, 2023.