

Állandómágneses szinkrongépek paraméteridentifikációs algoritmusainak összehasonlítása

Comparison of parameter identification algorithms for permanent magnet synchronous machines

BERTÓK Zsanett¹ hallgató, Dr. BUDAI Csaba¹ adjunktus, Dr. STUMPF Péter Pál² egyetemi docens

¹Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

²Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Villamosmérnöki és Informatikai Kar, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

Email: bertokzsanett@gmail.com, budaiccsaba@mogi.bme.hu, stumpf.peter@aut.bme.hu

Abstract

Permanent magnet synchronous machines (PMSM) are playing an increasingly important role in modern technical equipment. In order to implement the closed-loop control of a PMSM, it is essential to know its electrical and mechanical attributes. In this work, different parameter identification algorithms are compared in order to provide an efficient method for estimating the characteristics of PMSM drives.

Keywords: PMSM drives, parameter identification, RLS algorithm, ARMAX model identification, Trust region optimization

Kivonat

Az állandómágneses szinkron gépek egyre nagyobb szerepet játszanak a korszerű műszaki berendezésekben. Ezen motorok alkalmazásához nélkülözhetetlen a hajtás villamos és mechanikai tulajdonságainak ismerete. Jelen munka célja a különböző paraméteridentifikációs algoritmusok mérések segítségével történő összehasonlítása, annak érdekében, hogy a PMSM hajtások jellemzőinek becslésére hatékony eljárást adjon.

Kulcsszavak: PMSM hajtások, paraméteridentifikáció, RLS algoritmus, ARMAX modell identifikáció, Trust region optimalizáció

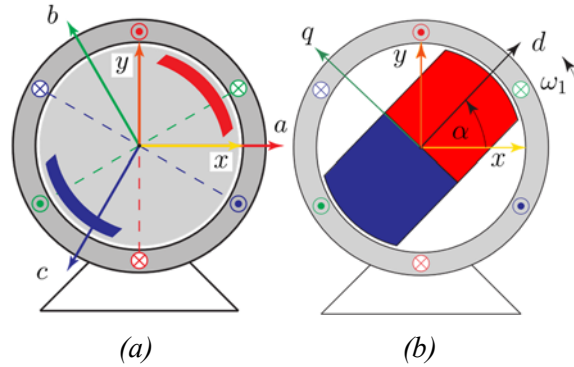
1. Bevezetés

A digitálisan szabályozott teljesítményelektronikai átalakítóról táplált villamos hajtásokat napjainkban egyre szélesebb körben alkalmazzák a műszaki életben, mivel velük költséghatékonyan megvalósítható a villamos és mechanikai energia oda-vissza történő alakítása. Az állandómágneses szinkrongép (Permanent Magnet Synchronous Machine) az egyik leggyakrabban használt géptípus a nagy minőségi követelményeknek eleget tevő szabályozható villamos hajtásokban számos előnyös tulajdonsága miatt, mint a magas hatásfok és a nagy teljesítménysűrűség.

A PMSM hajtások zárt hurkú szabályozásához többféle különböző stratégia terjedt el, mint a mezőorientált szabályozás, szinuszos kommutáció, vagy a manapság egyre népszerűbb prediktív technikák. Bármely modell alapú szabályozás megtervezéséhez elengedhetetlen a motor villamos és mechanikai jellemzőinek minél pontosabb ismerete. Ezek az adatok a motor katalógusában gyakran hiányosan szerepelnek vagy nem kielégítően pontosak. Jelen tanulmány célja ezen hajtások paramétereinek becsléssel történő meghatározása, és egy hatékony módszer kidolgozása az identifikáció folyamatára. Villamos hajtások jellemzőinek azonosítására számos online és offline módszer terjedt el [1]. Ezek közül az egyik jellemzően alkalmazott a rekurzív legkisebb négyzetek módszere (RLS) algoritmus [2]. Kevésbé gyakori az olyan offline módszerekkel történő becslés, mint a Trust Region optimalizáció [3], vagy az ARMAX modell identifikáció [4]. A következőkben ezen módszerek kerülnek összehasonlításra valós eszközön végzett mérések alapján.

2. A vizsgált rendszer modellje

Az állandómágneses szinkron motorok forgórésze beágyazott állandómágneseket tartalmaz. Az ezen mágnesek által létrehozott mágneses tér lép kölcsönhatásba az állórész háromfázisú tekercselése által gerjesztett forgó mágneses mezővel. A rotor pólusai együtt forognak a mágneses térrel, ezért a forgórész mechanikai szögsebessége és a mágneses tér forgási sebessége közti kapcsolat leírható $\omega_1 = P \cdot \Omega$ formában, ahol ω_1 a motor villamos, Ω a mechanikai szögsebessége, valamint P a motor póluspárjainak száma. A gép mozgásának leírásához használt koordinátarendszerek az 1. ábrán láthatók.



1. ábra. A PMSM mozgását leíró (a) állórészhez rögzített x - y , és (b) forgórészhez rögzített d - q koordinátarendszer a háromfázisú a - b - c koordinátarendszerhez képest

A szimmetrikus rotorral rendelkező állandómágneses szinkron gépek villamos egyenletei felírhatók a forgórészhez rögzített d - q koordinátarendszerben a következő alakban [5].

$$u_d = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_1 L i_q, \quad (1)$$

$$u_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_1 (L i_d + \psi_p), \quad (2)$$

ahol u_{dq} , i_{dq} jelölik a d - q koordinátarendszerben felírt feszültség- és áramkomponenseket, R és L a motor armatúra ellenállása, illetve inductivitása, valamint ψ_p jelöli a rotor pólusfluxusát. Az i_q áramkomponens hozzá létre az elektromechanikai nyomatékot, ami

$$M = \frac{3}{2} P \psi_p i_q = K_t i_q \quad (3)$$

alakban adható meg szimmetrikus forgórészű motor esetén. A q irányú áramkomponens és a villamos nyomaték közti kapcsolatot K_t nyomatékkonstans teremti meg. A hajtásra felírva a dinamika alaptételét

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - b\Omega - M_l = K_t i_q - b\Omega - M_l \quad (4)$$

összefüggés adódik, ahol J a tehetetlenségi nyomaték, b a hajtás viszkózus csillapítási tényezője, valamint M_l jelöli a terhelőnyomatékot.

A vizsgált paraméteridentifikációs eljárások alkalmazásához szükséges a feszültség-, áramerősség- és szögsebességjeleket mintavételezni, ezért célszerű a motor diszkrét modelljéből kiindulni. A folytonos idejű modellt előretartó Euler-módszerrel diszkrétizálva a következő összefüggések kaphatók.

$$i_q[k+1] = \underbrace{\left(1 - \frac{R}{L} T_s\right)}_{a_1} i_q[k] + \underbrace{\frac{T_s}{L}}_{b_1} u_q[k] - T_s \omega_1[k] i_d[k] - \underbrace{\frac{T_s \psi_p}{L}}_{c_1} \omega_1[k] \quad (5)$$

egyenlet együtthatóinak becslésével meghatározható a motor ellenállása, inductivitása és a rotor pólusfluxusa, amennyiben a motor forgórésze szimmetrikus. Továbbá (3)-ból elhanyagolva a terhelő nyomatékot

$$\Omega[k+1] = \underbrace{\left(1 - \frac{b T_s}{J}\right)}_{d_1} \Omega[k] + \underbrace{\frac{K_t T_s}{J}}_{e_1} i_q[k] \quad (6)$$

diszkrét idejű egyenlet adódik, ami alapján a hajtás tehetetlenségi nyomatéka, valamint viszkózus csillapítási tényezője azonosítható.

3. Az identifikációs módszerek

Az előzőekben látott diszkrét idejű rendszeregyenletek együtthatói különböző identifikációs algoritmusok segítségével becsülhetők, amennyiben a megfelelő feszültség-, áramerősség- és szögsebességadatok rendelkezésre állnak. A továbbiakban bemutatásra kerülnek azok az identifikációs módszerek, amelyekkel ezen tanulmány során a motorparaméterek azonosítása történni fog.

3.1. RLS algoritmus

A rekurzív legkisebb négyzetek (RLS) egy adaptív szűrő algoritmus [6], ami akkor alkalmazható, ha az u bemenet és y kimenet közötti kapcsolat leírható az alábbi formában

$$y(n) = \theta_n^T u(n), \quad (7)$$

ahol a meghatározandó együtthatókat egy θ_n paramétervektor tárolja. A szűrő rekurzív módon keresi azokat az együtthatókat, amelyek minimalizálják a bemeneti jelekre vonatkozó súlyozott lineáris legkisebb négyzetek költségfüggvényt, ami a várt és a mért kimeneti jel közötti hibából állítható elő. Az algoritmus előnye, hogy van kis számítási kapacitást igénylő formája, valamint a beérkező bemeneti és kimeneti adatpárokat online dolgozza fel, így a paraméterek konvergálása esetén a futtatása megszakítható.

3.2. ARMAX modell identifikáció

Az ARMAX (Autoregressive Moving Average with Extra Input) modell [7] a bemeneti-kimeneti polinomiális modellek családjába tartozik. A modell a kimenetek és bemenetek közti kapcsolatot a következő formában írja le

$$A(z^{-1})y(t) = \sum_{i=1}^{n_u} [B_i(z^{-1})u_i(t - nk_i)] + C(z^{-1})n(t), \quad (8)$$

ahol $u(t)$ a bemeneti jelek, $y(t)$ a kimeneti jelek vektora, $n(t)$ modellezi a zajt; A, B és C z^{-1} alapú polinomok, illetve z az eltolási operátor. A bemenetek száma n_u , míg nk az egyes bemeneti jelekhez tartozó időkésceltetést jelöli. A módszer előnye, hogy a mérési zajt rendkívül jól képes kezelni. Ebben a munkában az ARMAX modell paramétereinek optimalizálása a MATLAB *polyest* függvényével történik, ami egy iteratíván futtatott predikciós hibabecslési eljárással keresi a modell együtthatóit.

3.3. Trust region optimalizáció

A Trust region algoritmus egy numerikus, feltétel nélküli optimalizálási eljárás [8], amely egy olyan bizalmi régió (trust region) meghatározásán alapul, amelyben egy, általában kvadratikus, modellfüggvényt a célfüggvény pontos reprezentációjának tekintünk. Minden egyes lépésben a célfüggvény következő megfelelő modelljét keresi az algoritmus. Ha az adott közelítés jól írja le a célfüggvényt, a régiót bővíti, ellenkező esetben szűkíti. A célfüggvény egy adott bemenetre adott tényleges és számított válasz négyzetes hibájából képezhető, ennek minimumát keressük a mért bemeneti-kimeneti adatpárookra. Mivel a függvény az összes létező mintából áll össze, a megoldandó probléma nagy komplexitású, és az algoritmus futása közben nem lehet megállapítani, hogy a megoldás már konvergált-e. A módszer előnye, hogy lehetővé teszi a nemlineáris tagok hatékony kezelését.

4. mérési eredmények kiértékelése

A vizsgált hajtás egy Hurst DMA0204024B10 típusú motorból áll, amelyet egy Texas Instruments által gyártott kétszintű, háromfázisú feszültséginverteren keresztül hajtunk meg. Az inverter számára szükséges kapcsolójeleket egy TI LAUNCHXL-F28379D LaunchPad digitális jelfeldolgozó processzor állítja elő impulzusszélesség-modulációval. A motor beavatkozási jeleit a d és q irányú feszültségkomponensek képezik, amiből Clarke és Park koordinátatranszformáció elvégzése után kapjuk meg a motorra kiadott háromfázisú feszültséget.

Az identifikáció elvégzéséhez az i_d és i_q áramkomponensek az inverterkártya segítségével mérhetők, míg a szögsebesség értéke a motor tengelyére szerelt inkrementális enkóder által adott szögelfordulás adatokból kerül becslésre. A DSP soros kommunikációs kapcsolatban áll a PC-vel, ami a feszültség-,

áramerősség- és szögsebességadatok beérkezése után elvégzi a kapott adatok alapján történő paraméteridentifikációt.

4.1. A villamos paraméterek becslése

A motor ellenállásának és induktivitásának becslése történhet a motor lefogott állapotában. Ekkor, mivel a motor tengelyének elfordulása gátolva van, a (4) egyenlet a következőképp egyszerűsödik.

$$i_q[k+1] = a_1 i_q[k] + b_1 u_q[k], \quad (9)$$

ahol a mért i_q és u_q adatpárok alapján az a_1 és b_1 együtthatók becsülhetők, és ezek ismeretében meghatározhatók a gép villamos tulajdonságai

$$R = \frac{1 - a_1}{b_1} \text{ és } L = \frac{a_1}{b_1} T_s \quad (10)$$

formában. Ezt követően a kapott a_1 és b_1 értékekre alapozva a rotor pólusfluxusa is azonosítható, ha megengedjük a motor szögelfordulását. Ekkor

$$i_q[k+1] = a_1 i_q[k] - T_s \omega_1[k] i_d[k] + b_1 u_q[k] + c_1 \omega_1[k] \quad (11)$$

egyenletben keressük c_1 értékét, amiből

$$\psi_p = -\frac{L}{c_1 T_s} \quad (12)$$

pólusfluxus számítható. Mivel szinkron gépek esetében a nyomatékkonstans közvetlenül arányos a forgórész fluxusával, ennek azonosítása után a hajtás nyomatékkonstansa

$$K_t = \frac{3}{2} P \cdot \psi_p \quad (13)$$

formában előállítható.

A (4) egyenlet alapján egyszerre is becsülhető a három villamos jellemző. Ekkor a motor forgásának megengedése mellett a kiadott u_q feszültség, a mért áramkomponensek és szögsebességértékek alapján egyszerre kapható meg az a_1 , b_1 és c_1 érték.

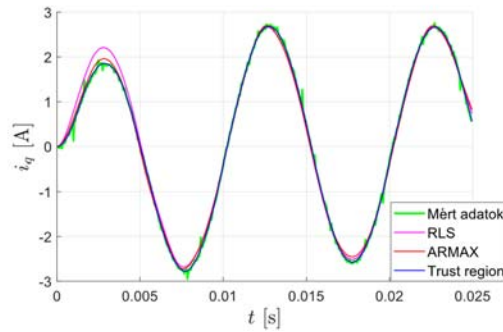
A villamos paraméterek becslése több különböző feszültséggerjesztés mellett zajlott. A vizsgált gerjesztések közül a harmonikus beavatkozási jel esetén adódtak a motor katalógusadataihoz közeli paraméterértékek. Az 1. táblázatban láthatók a lefogott forgórészű mérés, majd az aztán szeparáltan történő pólusfluxus becslésének eredményei, illetve a három paraméter együttes identifikációjával kapott villamos paraméterértékek, harmonikus gerjesztés esetén. Az 2. ábra mutatja az egyes módszerek által illesztett görbéket, összehasonlítva a mért adatokkal.

Leolvasható, hogy abban az esetben kaptunk a várakozásokhoz közelebb eső ellenállás és induktivitás értékeket, amikor a motor szögelfordulása gátolva volt. Az ezen mérések során kapott eredmények nem különböztek jelentősen az egyes identifikációs módszerek esetén. Futási idő tekintetében a legkisebb komplexitású RLS algoritmus teljesített a legjobban. A rotor fluxusának meghatározásához a teljes modell egyidejűleg történő, ARMAX modell identifikációval végzett becslése bizonyult optimálisnak.

Villamos paraméterek értéke

1. táblázat

Paraméter	Elvárt érték	szeparált becslés			együttes becslés			Mérték -egység
		RLS	ARMAX	Trust region	RLS	ARMAX	Trust region	
Ellenállás (R)	0,2850	0,3521	0,3503	0,3522	0,4061	0,4242	0,4202	Ω
Induktivitás (L)	3,2000	3,1082	3,1391	3,1573	2,0830	3,0133	2,8008	10^{-4} H
Pólusfluxus (ψ_p)	0,00790	0,0053	0,0052	0,0053	0,0050	0,0069	0,0062	Wb
Nyomaték- konstans (K_t)	0,0590	0,0394	0,0392	0,0400	0,0378	0,0516	0,0466	Nm/A



2. ábra. A q irányú áramkomponens válasza harmonikus gerjesztésre, valamint az egyes algoritmusok által ráillesztett görbék

4.2. A mechanikai paraméterek becslése

A rendszer mechanikai egyenletéből kiindulva

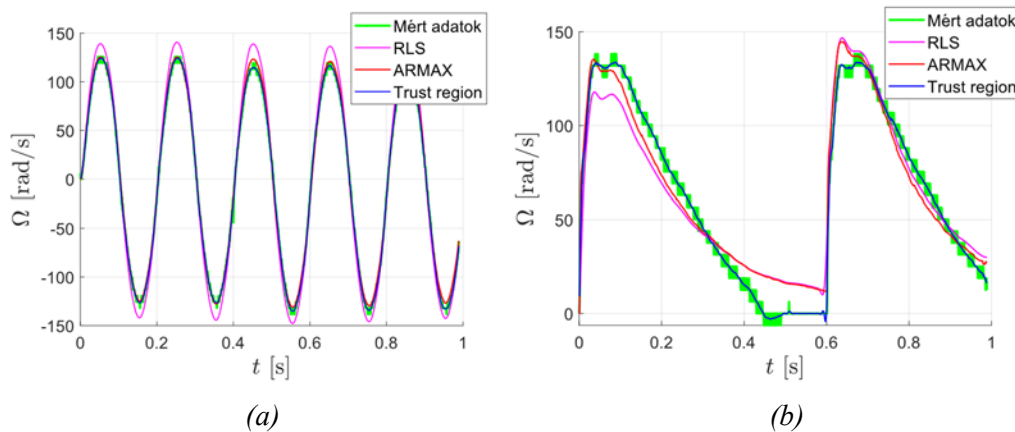
$$\Omega[k+1] = d_1 \Omega[k] + e_1 i_q[k] \quad (13)$$

formában kereshetők a hajtás mechanikai jellemzői, amik az identifikált d_1 és e_1 együtthatókból a következőképpen adódnak.

$$J = \frac{K_t T_s}{e_1} \text{ és } b = \frac{1 - d_1}{T_s} \quad (14)$$

Az identifikációs folyamathoz kizárólag a szögsebesség és a q irányú áramkomponens mérése szükséges.

A mechanikai paraméterek mérése négyzetjeles és harmonikus gerjesztés mellett történt. A 2. táblázatban láthatók az egyes gerjesztések esetén kapott eredmények. Megállapítható, hogy az egyes algoritmusok esetén hasonló eredményekre vezetett a két gerjesztéstípus, és egyedül a Trust region optimalizáció volt képes kielégítően azonosítani mind a hajtás tehetetlenségi nyomatékát, mind a viszkózus csillapítási tényezőt.



3. ábra. A villamos szögsebesség válasza harmonikus (a), illetve négyzetjeles (b) gerjesztésre, valamint az egyes algoritmusok által ráillesztett görbék

Mechanikai paraméterek értéke

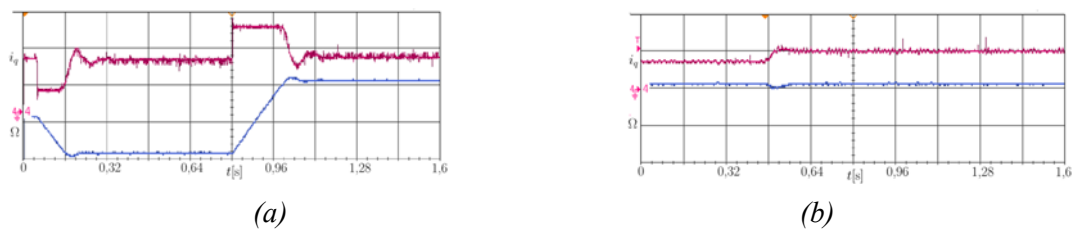
2. táblázat

Paraméter	Elvárt érték	harmonikus gerjesztés			négyzetjeles gerjesztés			Mérték -egység
		RLS	ARMAX	Trust region	RLS	ARMAX	Trust region	
Tehetlenségi nyomaték (J)	1,7700	0,0834	0,4715	1,8934	0,0871	0,3989	1,5666	10^{-5} kgm ²
Viszkózus csillapítási tényező (b)	5,5000	8,7587	18,8101	9,1133	8,8274	15,9100	8,6297	10^{-5} Ns/m

5. A hajtás zárt hurkú szabályozása

A kapott paraméterértékek alapján a motor zárt hurkú szögsebesség- és áramszabályozása megoldható, amihez kaszkád struktúrával rendelkező mezőorientált szabályozás kerül megvalósításra [9]. A szabályozás belső körei a d és q irányú áramkomponenseket szabályozzák. Az ehhez szükséges PI szabályozó paraméterei az armatúra ellenállás és induktivitás ismeretében kerültek hangolásra 61° -os fázistartalékra. Az áramszabályozó kör számára a referencia értéket a külső szögsebességszabályozó kör adja, aminek szabályozóparamétereinek beállítása szimmetrikus optimum kereső eljárással történt, a hajtás tehetetlenségi nyomatéka, valamint a nyomatékkonstansa alapján. A szabályozókör tervezése a mintavételezés és a számításból fakadó holtidő hatásának figyelembevételével történt.

A szabályozókör vizsgálatához először -150 rad/s, majd 150 rad/s értékű szögsebességreferencia került beállításra. A 4a. ábrán látható, kék színnel jelölve, az adott referenciák esetén mért szögsebességválasz, a q irányú áramjelet lila szín jelöli. Megfigyelhető, hogy a szögsebesség gyorsan követi a ráadott alapjelet. Mivel a gép paraméterei működés közben módosulhatnak, a szabályozókör beállási tulajdonságaiban bekövetkezhet kisebb változás. Ez a hatás a szabályozókört megfigyelővel ellátva kiküszöbölhető lenne, így figyelembe véve például a motor ellenállásának és induktivitásának hőmérsékletfüggését. A 4b. ábrán látható a zavarójel hatása, ami terhelőnyomatékként ($M_{load} = 0,1$ Nm) került a rendszerre.



4. ábra. A szabályozókör oszcilloszkópos vizsgálata (a) szögsebességreferenciaváltással és (b) zavaró jel ráadásával

6. Konklúzió

A kapott eredményekből kiindulva a javasolt identifikációs eljárás során az ellenállás és induktivitás becslése a motor tengelyének lefogása mellett történik. Ehhez az RLS algoritmus alkalmazása célszerű, hiszen ezzel a módszerrel valósítható meg leggyorsabban a paraméterbecslés. A pólusfluxus azonosításához ARMAX módszerrel javasolt a teljes egyenlet identifikációja, míg a mechanikai jellemzők meghatározása Trust region optimalizációval történik. A javasolt folyamat kielégítő becslést képes adni a motor villamos és mechanikai tulajdonságaira. A kapott paraméterértékekre alapozva megvalósítható volt a motor zárt hurkú szabályozása, mezőorientált szabályozási stratégia alkalmazásával. A kapott szabályozási kör kiváló beállási tulajdonságokat és zavarjel kompenzációt mutatott.

Irodalmi hivatkozások

- [1] Ahn, H., Park, H., Kim, C., Lee, H. *A Review of State-of-the-art Techniques for PMSM Parameter Identification*. Journal of Electrical Engineering & Technology. Springer, 2020, 15, 1177–1187.
- [2] S. Wiedemann, R. M. Kennel, *Self-Commissioning of the Current Control Loop in AC Drives. PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg, Germany, 2018, pp. 1-8.
- [3] Chaves, W. & Kaneko, E. & Mollon, M. & Niro, L. & Vargas, A. N. & Montezuma, M. *Parameters Identification of a Direct Current Motor Using the Trust Region Algorithm*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science. 2017, 4, 162-169.
- [4] S. -e. Mokhlis, S. Sadki and B. Bensassi, *System Identification of a DC Servo Motor Using ARX and ARMAX Models, 2019 International Conference on Systems of Collaboration Big Data, Internet of Things & Security (SysCoBioTS)*, Casablanca, Morocco, 2019, pp. 1-4.
- [5] P. Stumpf. *Állandómágneses gépek. Teljesítményelektronika és villamos hajtások tantárgy előadási segédlet, BME-AUT, 2019.*
- [6] Monson H. Hayes. *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. John Wiley & Sons, 1996.
- [7] L. Ljung. *Prediction error estimation methods. Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2002, 21, 11–21.
- [8] W. Ye. *Trust-region methods. Northwestern University, 2014*
- [9] P. Stumpf. *Egyenáramú gépek. Teljesítményelektronika és villamos hajtások tantárgy előadási segédlet, BME-AUT, 2019.*