



Modeling the Drive System of an Electric City Bus

István Bendiák and Sándor Semperger

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

November 14, 2022

Villamos hajtású városi autóbusz hajtásrendszerének modellezése

Bendiák István

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, bendiak.istvan@uni-obuda.hu

Dr. Semperger Sándor

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, semperger.sandor@uni-obuda.hu

A villamos hajtású járművek hajtásrendszereinek modellezése kapcsán készült modell, a mely tervezésre és oktatási célra is használható. A modell tartalmazza a villamos hajtás paramétereit, valamint a busz mechanikai adatait. Az első ciklusban elkészített program azt célt szolgálta, hogy kialakuljon egy olyan szimulátor, amely alkalmas változtatható paraméterű elektromos meghajtású busz rendszerének minél szélesebb körű tesztelésére. A modell kiterjesztett valamennyi villamos gép típusra, amelyet villamos és hibrid hajtásrendszereknél alkalmaznak. A városi autóbusz megnevezés arra utal, hogy a menetciklusok elsősorban városban közlekedő buszra készültek, ami átírható elővárosi és távolsági kivitelre is.

1. Bevezető

A LabView modell alkalmas szabályozatlan (pontosabban, nem teljes körűen beavatkozott, hibás működés demonstrációja miatt) és szabályozott (komplexitás alkalmazás függő) villamos hajtások modellezésére is.

Alapvető elképzelése az egyenáramú és szinkron gép elméleti háttéréből indul ki. A modell felépítése alkalmazza azokat az összefüggéseket, amely a statikus és tranziens üzem vizsgálatához szükségesek.

2. Villamos hajtások stabilitásvizsgálata

Villamos hajtásokra érvényes differenciálegyenlet, amely figyelembe veszi az elektromechanikai és villamos időállandókat (T_m elektromechanikai, T_v villamos időállandók, ω szögsebesség, t idő):

$$T_m \cdot T_v \cdot \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + T_m \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \omega_s$$

Lehetséges beállási viszonyok:

Periodikus beállási eset, az elektromechanikai időállandó kisebb, mint a villamos időállandó négyszerese, vagyis:

$$T_m < 4 \cdot T_v$$

Aperiodikus beállási eset, az elektromechanikai időállandó nagyobb, mint a villamos időállandó négyszerese, vagyis:

$$T_m > 4 \cdot T_v$$

Aperiodikus határbeállási eset, az elektromechanikai időállandó egyenlő a villamos időállandó négyszeresével, vagyis:

$$T_m = 4 \cdot T_v$$

Armatúrakör villamos időállandója:

$$T_v = \frac{L_a}{R_a}$$

A motor elektromechanikai időállandója (általános összefüggés):

$$T_m = \frac{J_{\text{motor}} \cdot R_a}{c^2 \cdot \phi^2}$$

A motor indítási ideje, feltételezve csak a motor tehetetlenségi nyomatékát és a motor névleges nyomatékkal gyorsít a névleges szögsebességre (motor névleges nyomatéka M_n).

$$T_{\text{indítási}} = \frac{J_{\text{motor}} \cdot \omega_n}{M_n}$$

A motorhoz hozzáadódó terhelés tehetetlensége:

$$T_{\text{indítási}} = \frac{(J_{\text{motor}} + J_{\text{terhelés}}) \cdot \omega_n}{M_n}$$

Áttérés egy ω_2 és ω_1 szögsebesség között:

$$t_2 - t_1 = \frac{J_{\text{motor}} \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{M_d}$$

Terheléssel figyelembe véve:

$$t_2 - t_1 = \frac{(J_{\text{motor}} + J_{\text{terhelés}}) \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{M_d}$$

A dinamikai nyomatékkal (M_d) kifejezve:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = J_{\text{összes}} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J_{\text{motor}}}{M_d} d\omega$$

Villamos hajtáscsillapítási tényezője (Zeta):

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{T_m}{T_v}}$$

Villamos hajtások általános mozgásegyenlete:

$$M_d = M_{\text{motor}} - M_{\text{terhelés}} = J_{\text{összes}} \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

A villamos hajtás stabilitásának feltétele, hogy a szögsebesség és a dinamikai nyomaték megváltozása ellentétes értelmű legyen, vagyis:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta M_d} < 0$$
$$\frac{d\omega}{dM_d} < 0$$

Átírva a mozgásegyenletet:

$$dt = \frac{J_{\text{összes}}}{M_d(\omega)} \cdot d\omega = \frac{J_{\text{összes}}}{M_M(\omega) - M_T(\omega)} d\omega$$

Áttérés egy másik szögsebesség értékre:

$$t_2 - t_1 = \frac{J_{\text{összes}} \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{M_d} = \frac{J_{\text{összes}} \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{M_M - M_T}$$

Ahol:

M_d dinamikai nyomaték [Nm]

M_T terhelőnyomaték [Nm]

M_M motornyomaték [Nm]

$J_{\text{összes}}$ hajtás össze tehetlenségi nyomatéka [kgm²]

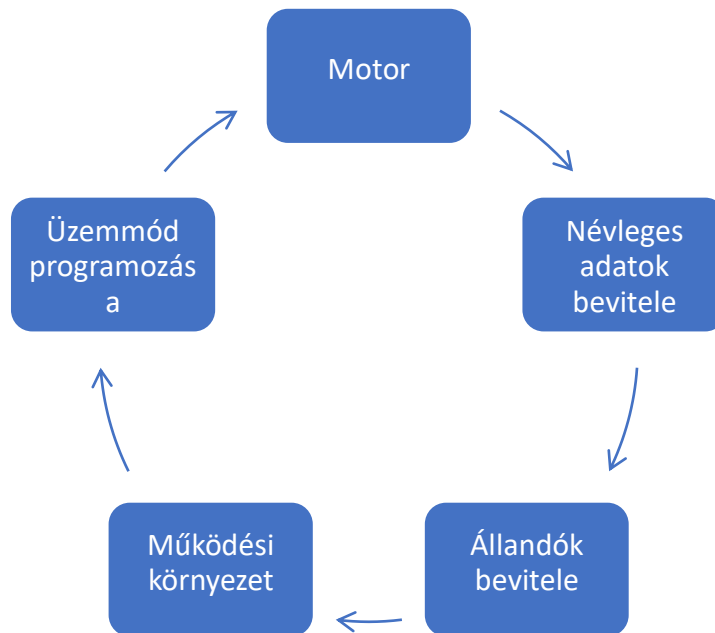
ω -szögsebesség [r/s]

LabView modellbe beépítésre kerültek ezek az összefüggések.

A LabView program adatbevétele igazodik a mérési és más típusú hajtómotor alkalmazásához is. A jármű tömegadatai, keréksugar megadhatóak, amely a tehetlenségi nyomaték számításához szükséges.

3. Busz modell előkészítése

Adatok bevitel a járműre vonatkozólag:



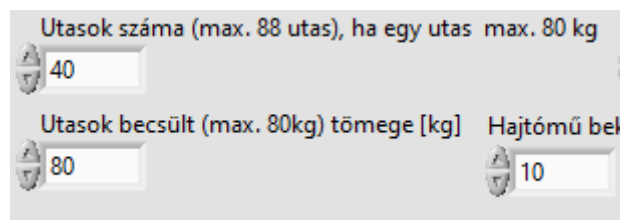
3.1. ábra A LabView program adat beviteli elképzelése.

Adatok bevitel:

- T_v villamos időállandó
- T_m elektromechanikai időállandó
- K_t nyomatéki állandó
- R_a armatúra belső ellenállása
- J_{motor} motor tehetetlenségi nyomatéka
- Jármű tömege

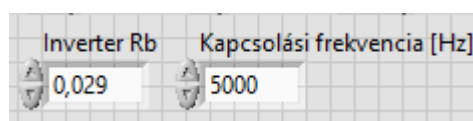
A jármű tömege ebben az esetben az üres tömeget jelenti és ehhez hozzákerül az utasok száma és tömege.

Utasok száma, pl. Ikarus 415 esetén maximum 88 utas, ha egy ember tömege nem haladja meg a 80 kg-ot.



3.2. ábra Utasok számának programozása.

Adatok bevitel a motor tápláló inverterre vonatkozólag pl.:

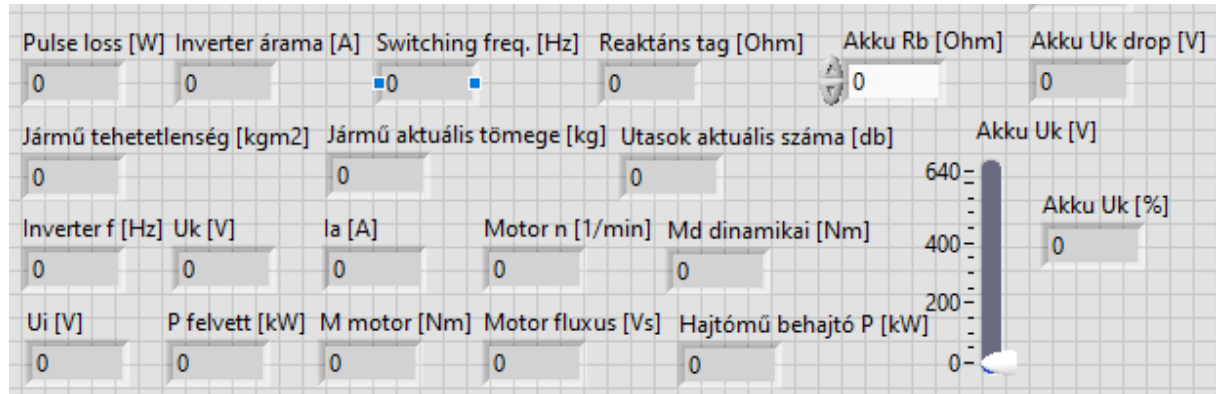


3.3. ábra Inverterre vonatkozó adatok megadása.

XXXVIII. Kandó Konferencia KSC2022

2022. november 3-4.

A frekvenciaváltó jellemezhető egy belső ellenállásként modellezhető veszteségként, illetve a félvezetők kapcsolási frekvenciáját (switching frequency) figyelembe vevő komponenssel. A LabView programban mindkét paraméter állítható. A modellben levő numerikus kijelzők visszaadnak minden lényeges adatot.



3.4. ábra Busz hajtásra vonatkozó adatok visszajelzése.

Az adatok jelzése tetszőlegesen változtatható. A jelenlegi struktúra a hajtásmodell-készítést segítette és adja alapját a következő szabályozási stratégia kialakításának.

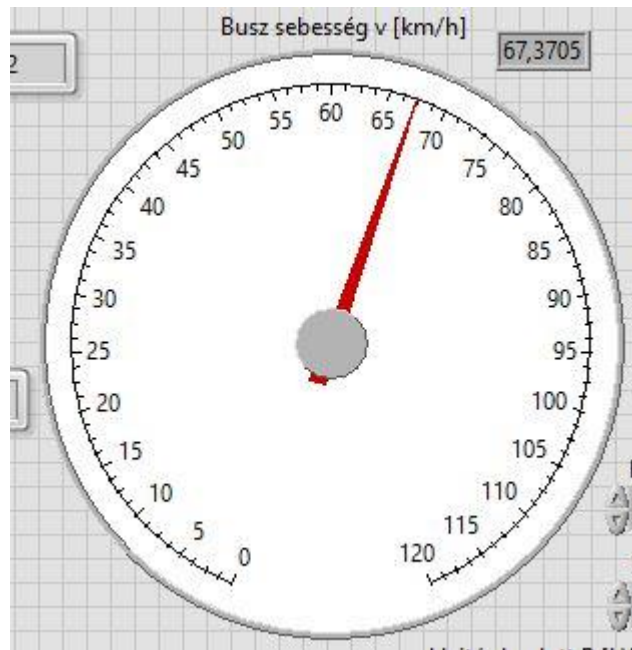
A motorra vonatkozó alapadatok visszaadása mindenféleképpen szükséges, mert ha motortípus-váltás történik, rendelkezünk megfelelő adatmennyiséggel.

Paraméterezés (a nem teljes lista, mert a műszerezés részlegesen leírt):

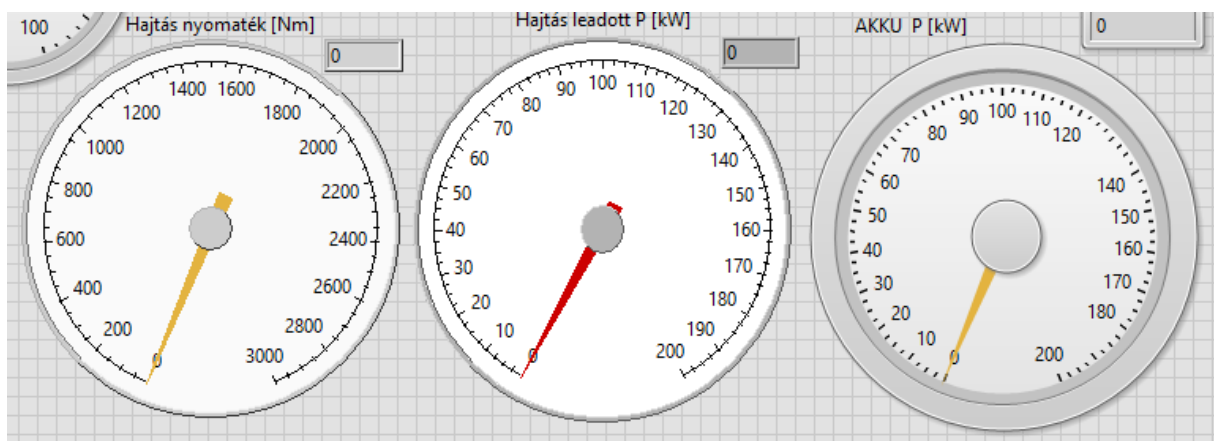
- Pulse loss: Számított félvezetőkre vonatkozó veszteség
- Inverter árama: Az inverter kimeneti árama a motort táplálva.
- Switching frequency: Az inverterben lévő félvezetők aktuális kapcsolási frekvenciája.
- Reaktáns tag: Félvezető egységre vonatkozó reaktáns tag megadás.
- Akku R_b [Ohm]: Akkumulátor belső ellenállása.
- Akku U_k [V] drop: Akkumulátor kapocsfeszültségének figyelése.
- Jármű tehetetlensége [kgm²]: A busz aktuális tehetetlenségi nyomatéka függően a tehertől.
- Jármű aktuális tömege: Jármű tömeg.
- Utassok aktuális száma: A busz befogadó képességének megfelelően alakuló utasszám.
- Inverter f [Hz]: Inverter alapharmonikus frekvenciája.
- U_k [V]: Inverter kimeneti számított feszültség értéke.
- I_a [A]: Hajtómotor armatúra árama.
- Motor n [1/min]: Hajtómotor mért fordulatszáma a hajtómű előtt.
- M_d dinamikai [Nm]: Hajtáslánc mért/számított dinamikai nyomatéka.
- Akku Uk [%]: Akkumulátor feszültség százalékosan kifejezett értéke.
- U_i [V]: A hajtómotor számított indukált feszültsége.
- P felvett [kW]: A hajtómotor által felvett hatásos teljesítmény.
- M motor [Nm]: A hajtómotor mért/számított forgatónyomatéka.
- Motor fluxus [Vs]: A hajtómotor számított aktuális fluxusa.
- Hajtómű behajtó P [kW]: A motor kimeneti tengelynyomatéka vagy a hajtómű bemeneti nyomatéka.

4. Sebességmérés és korlátozás, akkumulátor paraméterek és kezelőfelületek

A LabView modellbe már beépítésre került a buszba helyezendő sebességmérés (4.1. ábra) és figyelő szabályozás. A korábbi fejezetben bemutatott utasszám és tömeg azért is szükséges, mert folyamatos átszámítás szükséges a tehetetlenségi nyomatékok tekintetében. A jármű ürestömeggel értelemszerűen gyorsabban képes haladni, nagyobb tömeggel lassabban.

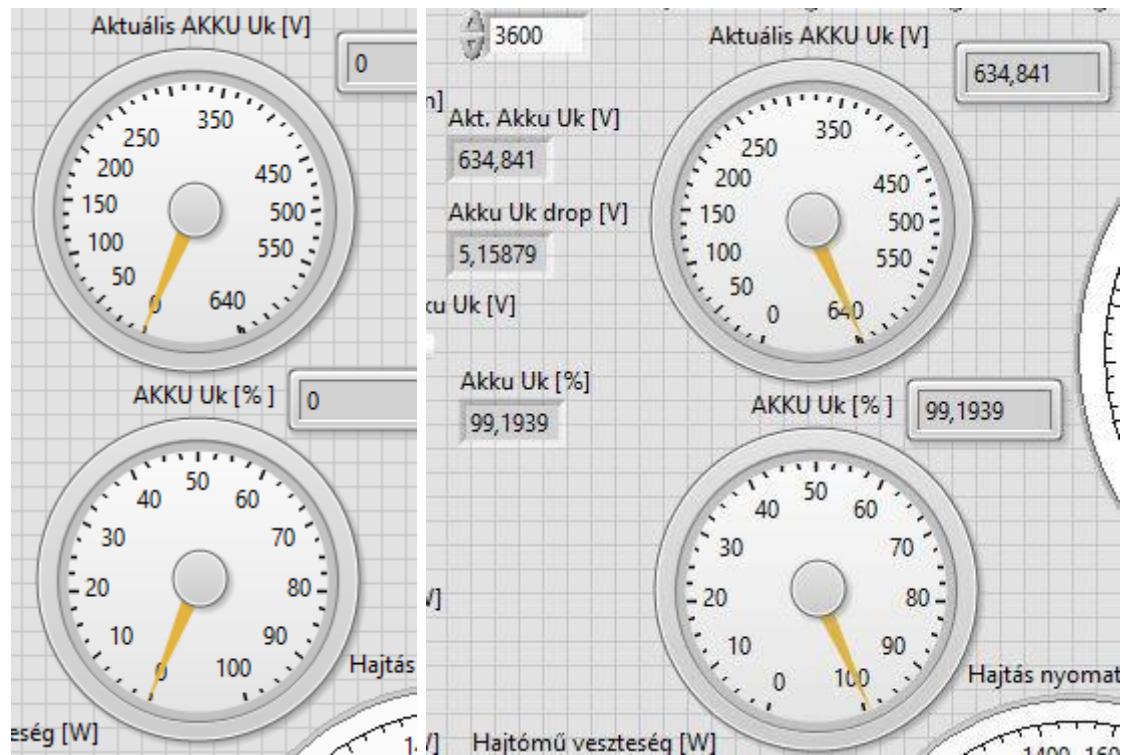


4.1. ábra Sebességmérés a buszban szimulációs környezetben.



4.2. ábra ábra Virtuális műszerfal, kihajtónyomaték, teljesítmény és akkumulátor teljesítmény.

A busz menetideje szempontjából az akkumulátor U_k kapcsolófeszültségének figyelése és összehasonlítása a névleges értékkel szintén létfontosságú szempontok közé tartozik.



4.3. ábra Akkumulátor paramétereinek figyelése.

Az akkumulátor paramétereinek figyelése (4.3. ábra), aktuális kapcsolófeszültség [V], összehasonlítva a névleges feszültséggel [%], és ezen értékek mutatós és numerikus kijelzésével. Akkumulátor numerikus értéki fájlba is kérhető, tovább feldolgozhatók, a kijelzések az aktuális állapot „gyors” ellenőrzését célozzák meg, ennek részletes elemzése a mesterséges intelligencia feladata. A „mutatós” kijelzés a „virtuális sofőr” számára érdekes, a műszerek skálabeállítása szintén állítható érték.

Az akkumulátor feszültségcsökkenése hátrányosan befolyásolja a dinamikai tulajdonságokat ezért, az áramkorlát ekkor olyan értéket vesz fel, amely egyrészt visszajelzést ad az adatfeldolgozóknak, másrészt a legoptimálisabb áramtartományt igyekeznek követni.

Áramkorlát alapjel beállítását nemcsak a hajtómotor névleges árama határozza meg, ha szükség esetén olyan gyorsító nyomatékot kell biztosítani, akkor a korlátozás állítható. Ez azonban csak akkor lehetséges, ha a beállítandó határokat nem lépi túl. A nyomatékképzésben az áramnak kiemelt szerepe van, ezért nem lehet a két módszert egyértelműen szétválasztani (nyomaték és áramkorlát).

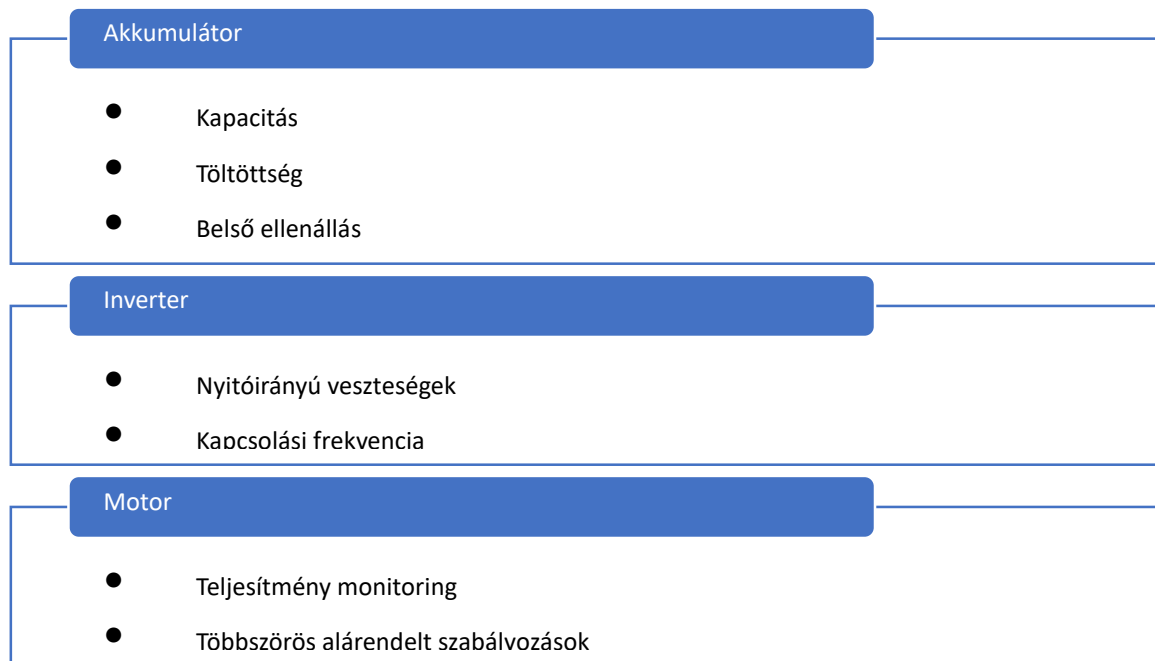
5. Összefoglalás

Az első ciklusban elkészített LabView modell azt célt szolgálta, hogy kialakuljon egy olyan szimulátor, amely alkalmas változtatható paraméterű elektromos meghajtású busz rendszerének a tesztelésére.

Kialakítás követelmények:

- Változtatható motor paraméterek
- Változtatható hajtómű áttétel és hatásfok
- Változó frekvenciatartomány (hajtómotort tápláló inverter)
- Állítható időállandók (villamos és mechanikai)
- Mérhető, változtatható veszteségi komponensek
- Fuzzy szabályozások előkészítése

A modell koncepciója:



5.1. ábra Elektromos meghajtású busz modell alapkonceptiója.

A 5.1. ábra koncepciója egyszerűsíti az alapmodell felépítését. Az akkumulátor adatai változtathatók, illetve a lemerülés gyorsítható, lassítható, illetve real-time-ban is üzemeltethető, természetesen a realitásokat figyelembe véve, az előbbinek a fokozott lemerülési igénybevétel miatt van jelentősége.

A modell szükség esetén átirható akár személygépkocsira is, hiszen, motor, hajtómű, tömeg, gyorsítási igények, teljesítmény, fordulatszámkorlátok tetszőlegesen programozhatóak, vagyis modell univerzális jellegű.

6. Irodalomjegyzék

- [1] Jafar Zarei, Javad Poshtan, An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection, *Tribology International* 42 (2009) 213-219
- [2] V. Fernao Pires, J. F. Martins, A. J. Pires, Eigenvector/eigenvalue analysis of a 3D current referential fault detection and diagnosis of an induction motor, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 901-907
- [3] A. Roque, J. M. F. Calado and J. M. Ruiz, Vibration Analysis versus Current Signature Analysis, *Supervision and Safety of Technical Processes*, August 29-31, 2012. Mexico City, Mexico
- [4] Sukhjeet Singh, Amit Kumar, Navin Kumar, Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems, *Science Direct, Procedia Materials Science* 6 (2014) 171-177
- [5] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágydiagnosztikája, TDK dolgozat, Budapest 2019
- [6] Izzet Önel, Mohamed Benbouzid, Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study, Izzet Önel, Mohamed Benbouzid. *Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study. IEEE IEMDC'07*, May 2007, Antalya, Turkey. 2, pp.1073-1078, 2007. <hal-00531271, HAL Id: hal-00531271 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00531271> Submitted on 2 Nov 2010
- [7] Mariana IORGULESCU, Robert BELOIU University of Pitesti, Electrical Engineering Departament, Pitesti, ROMANIA, Vibration and Current Monitoring for Fault's Diagnosis of Induction Motors, *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, No. 32, 2008; ISSN 1842-4805
- [8] William H. Yeadon, PE. Editor and Chief, Alan W. Yeadon, PE. Associate Editor, *Handbook of Small Electric Motors*, McGraw Hill, New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Toronto, Mexico City, New Delhi, Sydney, Toronto. 2003.
- [9] Szabó József Zoltán, Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása, PhD értekezés, 2010, Budapest
- [10] Ahmed Alwodai, Tie Wang, Zhi Chen, Fendshou Gu, Robert Cattley, Andrew Ball, A Study of Motor Bearing Fault Diagnosis Using Modulation Signal Bispectrum Analysis of Motor Current Signals, *Journal of Signal and Information Processing*, 2013, 4, 72-79
- [11] Neelam Mehala #1, Ratna Dahiya *2, Detection of Bearing Faults of Induction Motor Using Park's Vector Approach, 1# Department of Electronics and Communication Engineering YMCA University of Science and Technology, Faridabad-121006(Haryana) INDIA, 2* Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Kurukshetra-136119 (Haryana) INDIA, Neelam Mehala et al. /*International Journal of Engineering and Technology* Vol.2(4), 2010, 263-266
- [12] M.S. Othman1*, M.Z. Nuawi1 and R. Mohamed2, Induction Motor Bearing Fault Diagnostics Using i-kaz™ and Decision Tree Classification, 1Department of Mechanical and Material Engineering, 2Department of Electrical, Electronic and Systems Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Jalan Bangi 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia. *Email: sufian@jkr.gov.my, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)* ISSN: 2229-8649 (Print); ISSN: 2180-1606 (Online); Volume 13, Issue 2 pp. 3361 - 3372, September 2016 ©Universiti Malaysia Pahang Publishing
- [13] Partha Sarathee Bhowmik1, Sourav Pradhan2 and Mangal Prakash3, Fault Diagnostic and Monitoring Methods of Induction Motor: A Review, 1Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Durgapur, India, 2Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Durgapur, India,

3Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Durgapur, India, International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE) Volume 1, Number 1, May 2013

[14] WEIDONG LI Pinchin Environmental Ltd, 5749 Coopers Avenue, Mississauga, Ontario, L4Z 1R9, Canada, CHRIS K. MECHEFSKE Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, K7L 3N6, Canada (chrism@me.queensu.ca), Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods, (Received 10 August 2004 accepted 24 October 2005)

[15] Muhammad Aman Sheikh, Nursyarizal Mohd Nor, Taib Ibrahim, Sheikh Tahir Bakhsh, M.Irfan, Nordin B Saad, An Intelligent Automated Method to Diagnose and Segregate Induction Motor Faults, J. Electrical Systems 13-2 (2017): 241-254

[16] Akshat Singhal, Meera A. Khandekar, Bearing Fault Detection in Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 7, July 2013

[17] Martin Blödt, Pierre Granjon, Bertrand Raison, Jérémie Regnier, Mechanical Fault Detection in Induction Motor Drives Through Stator Current Monitoring - Theory and Application Examples, HAL Id: hal-00485734 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00485734> Submitted on 21 May 2010,

[18] Sukhjeet Singh, Amit Kumar, Navin Kumar, Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems, 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014), ScienceDirect

[19] A Dissertation by Lin Wang, Induction Motor Bearing Fault Detection Using a Sensorless Approach, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, May 2007

[20] Mounir Djeddi, Member IEEE, Pierre Granjon, and Benoit Leprettre, Bearing Fault Diagnosis in Induction Machine Based on Current Analysis Using High-Resolution Technique, Date Added to IEEE Xplore: 04 December 2007

[21] Retter Gyula: Egységes villamos gép elmélet, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976

[22] SILEX IPARI AUTOMATIZÁLÁSI KFT. TMI-02 Villamos forgatónyomatékmérő műszer, Használati útmutató, Azonosítószám: 300-01-01-090-2.1, 2000 november

[23] Norbert Hesselmann, Digitális jelfeldolgozás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985

[24] Farkas András-Gemeter Jenő-Nagy Lóránt: Villamos gépek, ÓE-KVK 2043, Budapest, 2010

[25] Kovács K. Pál: Villamos gépek tranziens folyamatai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970

[26] Halász Sándor: Villamos hajtások, Havas&Társas, Budapest, 1987

[27] Halász Sándor: Automatizált villamos hajtások I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1989

[28] Halász Sándor-Hunyár Mátyás-Schmidt István: Automatizált villamos hajtások II., Műegyetem Kiadó, Budapest, 1998

[29] M. Muteba, "Dual Stator Dual Rotor Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Hybrid Electric Vehicles," 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 2020, pp. 462-465, doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161707.

[30] T. Imakawa, K. Chimata, N. Hoshi, A. Chiba, M. Takemoto and S. Ogasawara, "Characteristic measurements of switched reluctance motor on prototype electric vehicle," 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/IEVC.2012.6183265.