

Nagy Sándor¹, Bendiák István², Semperger Sándor³

VILLAMOS HAJTÁSÚ VÁROSI AUTÓBUSZ HAJTÁSRENDSZERÉNEK SZÁMÍTÁSA LABVIEW⁴ KÖRNYEZETBEN

CALCULATION OF THE DRIVE SYSTEM OF AN ELECTRIC CITY BUS IN THE LABVIEW ENVIRONMENT

[HTTPS://DOI.ORG/10.30583/2024-1-2-150](https://doi.org/10.30583/2024-1-2-150)

Összefoglalás:

A villamos hajtású járművek hajtásrendszereinek modellezése kapcsán készült egy modell, mely lakossági busztervezésre, honvédségi busz fejlesztésére és oktatási célra is használható. A modell tartalmazza a villamos hajtásrendszer (motorok, nyomatékváltó, tömeg, tapadás, változó útkörülmények) paramétereit, valamint a busz mechanikai adatait. Az első ciklusban elkészített program azt a célt szolgálta, hogy kialakult egy olyan szimulátor, amely alkalmas változtatható paraméterű elektromos meghajtású busz rendszerének minél szélesebb körű tesztelésére. A modell kiterjeszthető valamennyi villamos géptípusra, amelyet villamos és hibrid hajtásrendszereknél alkalmaznak. A városi autóbusz megnevezés arra utal, hogy a menetciklusok elsősorban városban közlekedő buszra készültek, de ez felhasználható elővárosi és távolsági, illetve terepi kivitelre is. Ezen folyamat során összehasonlíthatóak a hajtásrendszerek és busztípusok a különböző terhelési viszonyok adta terhelési különbségekre.

¹ Sándor Nagy PhD hallgató, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola, nagy.sandor@celitron.com

² Bendiák István Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, bendiak.istvan@uni-obuda.hu

³ Dr. Semperger Sándor, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, semperger.sandor@uni-obuda.hu

⁴ Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench rövidített megnevezése (nyers fordításban: Laboratóriumi Virtuális Műszer Mérnöki Munkapad). a National Instruments terméke, melynek első verziója 1986-ban jelent meg, és azóta a világ egyik vezető szoftvere mérésautomatizálás terén.

Kulcsszavak: Villamos hajtású járművek, innováció, fosszilis energia

Abstract:

A model has been developed in relation to the modelling of electric vehicle drive systems, which can be used for civilian bus design, military bus development, and educational purposes. The model includes the parameters of the electric drive system (motors, torque converter, mass, traction, variable road conditions), as well as the mechanical data of the bus. The program completed in the first cycle served the purpose of developing a simulator capable of testing the system of an electrically driven bus with variable parameters as widely as possible. The model can be extended to all types of electric machines used in electric and hybrid drive systems. The term city bus indicates that the driving cycles were primarily made for buses operating in the city, but it can also be used for suburban and long-distance, as well as off-road designs. In this process, the drive systems and bus types can be compared for the load differences given by the different terrain conditions.

Keywords: Electrically driven vehicles, innovation, fossil energy.

1. Bevezető

A Magyar Honvédségnél folyamatos autóbuszfejlesztés folyik a Honvédelmi Minisztérium tulajdonában lévő HM Currus Zrt. támogatásával. A haderőfejlesztési program Euro 5-ös besorolású dízelmotorral meghajtott gépjárművekkel lett felszerelve 2015 nyarán, majd 2017-ben már az Euro 6-os prototípusa jelent meg. Az Aries buszok belső tere moduláris, így át lehet építeni azokat az adott célnak megfelelően.

Következő átépítési lehetőségek:

- személyszállító;
- sebesültszállító;
- orvosi vizsgáló, rendelő;
- tárgyaló busz.

A Magyar Honvédségben megtalálható Currus Aries moduláris belső felépítésű, többfunkcióssá tehető autóbuszok képviselik a speciális, katonai alkalmazásra optimalizált változatokat. A szerzők elvégez-

ték ezeknek a buszoknak, az esetleges villamos hajtásláncot alkalmazó változatainak elsődleges vizsgálatához szükséges elemzéseket. A korábban említett energiabiztonsági és környezetvédelmi problémák miatt a világban egyre jobban terjednek a hibrid, illetve tisztán elektromos hajtásláncú közúti járművek, amely folyamat kihat a korszerű haderők, így a Magyar Honvédség járműfejlesztési elképzeléseire is. Ezt a fejlesztést segítheti elő az ismertetett kutatás, amely alkalmas lehet villamos meghajtású katonai buszoknak a prototípus megépítését megelőző elemzésére, amellyel megadhatók a különféle feladatkörök-höz tartozó energiamérlegek.

2. A világ olajtartaléka⁵

A teljes világot behálózó energetikai innovációt az olajtartalékok kimerülésének és a környezetvédelemnek a veszélye idézte elő.

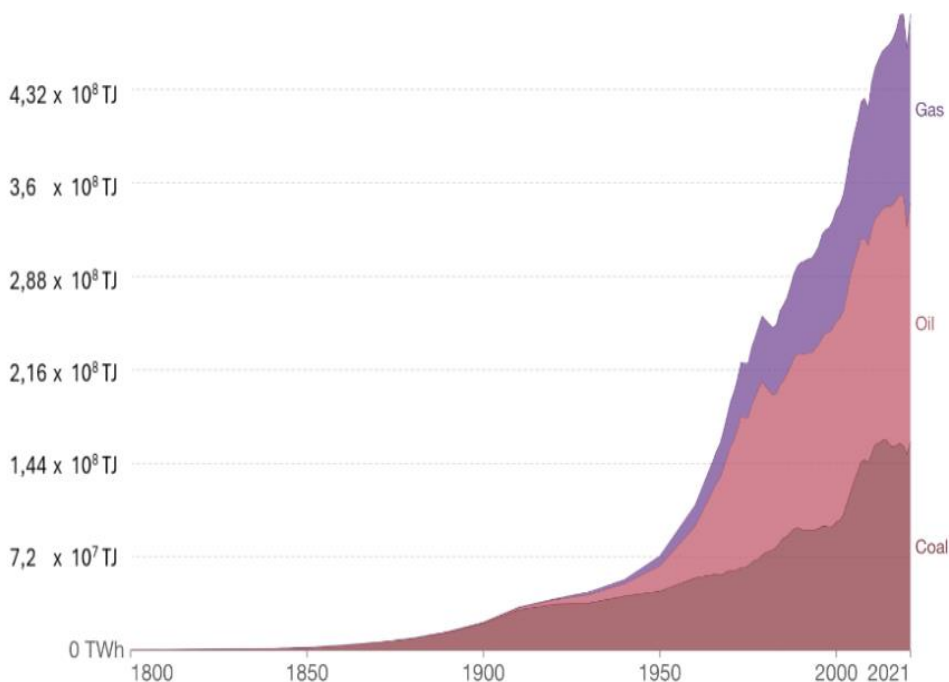
Számszerűsítve az aggodalmat, a BP (British Petrol) brit olajipari óriáscég által publikált éves energiaipari jelentését vesszük alapul⁶, mely szerint 1700 milliárd hordót tesz ki a Föld jelenlegi ismert olajtartaléka, amely valamivel több, mint 52 évre elegendő.

A BP Statistical Review of World Energy című kiadványa szerint tavaly Oroszország olaj- és gáztartaléka bővült a legnagyobb mértékben 10 milliárd hordóval, így az ország teljes tartaléka meghaladja a 100 milliárd hordót. Ezzel a hatodik helyre lépett a világ legnagyobb olajtartalékkal rendelkező államainak rangsorában, Venezuela, Szaúd-Arábia, Kanada, Irán és Irak mögött, megelőzve Kuvaitot és az Egyesült Arab Emírátsukat. Az Egyesült Államok tartaléka 48,5 milliárd hordóra nőtt tavaly az egy évvel korábbi 44 milliárdról.

A BP jelentése szerint - a 2008/2009-es válságot leszámítva - 2000 óta a legkisebb mértékben, napi 843 ezer hordóval nőtt a világ olajigénye (1. ábra). A hordókat tonnára átszámítva - a kőolaj sűrűségét is figyelembe véve - 1 tonna = 7 hordó közelítő értékkel tudunk számolni.

⁵ [Frequently Asked Questions \(FAQs\) - U.S. Energy Information Administration \(EIA\)](#)

⁶ https://hvg.hu/gazdasag/20150610_Meg_52_ev_es_kimerulhetnek_a_Fold_olajtar



1. számú ábra. Globális fosszilis energiafogyasztás⁷

A leginkább megfontolandó, hogy a kimerülőben lévő fosszilis energiahordozókat hogyan használjuk fel és térjünk át egy másik energiafelhasználó bevezetésére, miközben egyensúlyban tartjuk mind a gazdasági oldalakat, mind a technikai fejlesztések eredményességét új energiaforrás fejlesztésében.

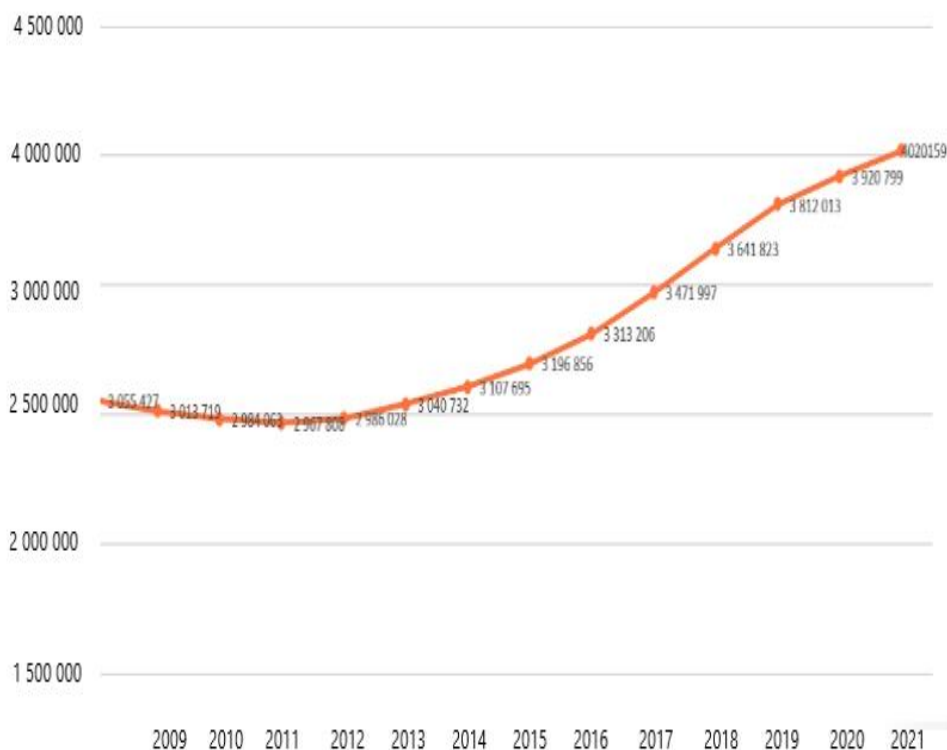
A BP jelentésében beszámol arról is, hogy az újrahasznosítható energia volt a leggyorsabban fejlődő energiaforrás tavaly; a világ energiatermelésének 6 százalékát megújuló energiából állították elő, amely 12 százalékos növekedés az egy évvel korábbihoz képest. Kínában regisztrálták a legnagyobb, 15,1%-os növekedést.

A közeljövőben várható földi olajkészlet kimerülésének következtében egyre inkább áttérünk az elektromos energia minél mélyebb kihasználására. Ezen lehetőségek innovációja, fejlesztése került napjainkban előtérbe, ezért vizsgáljuk mi is ezt az utat, hogy maximalizáljuk a jelen körülmény adta lehetőségeket.

⁷ <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/when-will-fossil-fuels-run-out>

3. Elektromos járművek történelme

Egy-egy jármű vonatkozásában a villamos meghajtás környezetre gyakorolt kedvezőbb hatása nem számottevő, de ha figyelembe vesszük, hogy az elmúlt években milyen ütemben nőtt csak Magyarországon a forgalomba helyezett közúti járművek száma (2. ábra), jól látható, hogy az általuk felhasznált fosszilis energiahordozók mennyiségének csökkentése mind környezetvédelmi, mind energiabiztonsági oldalról vizsgálva is rendkívül fontos.



2. számú ábra. KSH, Magyarország személyi gépjármű-számának dinamikus növekedése

Ezen aggodalmak az olajtartalékokról még csak a közelmúltban kezdtek kiélesedni, mégis a kutatások és a kreatív fejlesztők már a régmúltban meglátták a további lehetőségeket a gépjárműveink meghajtásához.

Legelső kifejlesztett gépi üzemű járműként a gőzüzemű meghajtást említem meg érdekességképpen, mely 1769-ben került forgalomba

Ferdinand Verbiest (1623-1688) által (már ilyen korán igyekezett az emberiség minden energiaforrást felhasználni)⁸.

Most azonban inkább az elektromos gépjárművekre fókuszálók, melyek nyilvánosan 1828-ban keltek életre egy Jedlik Ányos által tervezett autómoddellel⁹.

1837-ben Robert Davidson építette meg az első villamos meghajtású gépjárművet, amely több ember szállításra is alkalmas volt.

1859-ben Gastó Planté feltalálta az ólomsavas akkumulátort.

1881-ben a francia Charles Jeantaud megalkotta az első elektromos autót, mely 1893-ban sorozatgyártásba is került.

1899-ben a Porsche is hibrid járművek gyártásába kezdett.

Mint láthatjuk, már több mint egy évszázada megjelentek a fosszilis energiaforrástól eltérő meghajtással rendelkező gépjárművek, melyek napjainkban már képesek a felső kategóriát is képviselni.

Ehhez példaként megemlítem a Rimac Nevera¹⁰-t, amely képes elérni a 412 km/h-s végsebességet 120 kWh-s akkumulátorcsomaggal.

4. Gazdasági növekedés, szerteágazó kihívások az elektronikában

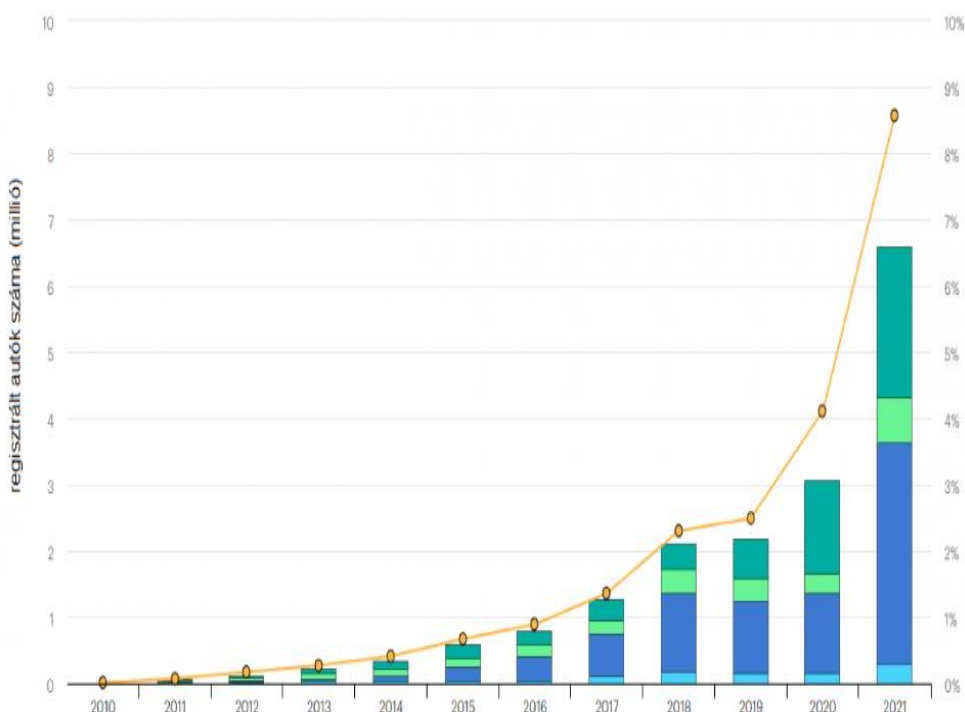
Az előbbiekben említett fejlesztések már érezhető nyomokat mutatnak gazdasági oldalon is, vagyis kijelenthetjük, hogy a közeljövőben túllépünk a fosszilis energiával ellátott gépjárművek életciklusának a csúcspontján, és az elektromos meghajtású motorok felfutóága megkezdődött. Ezen tendencia megfigyelhető a következő diagrammon (3.ábra), ahol megfigyelhető a forgalomba hozott elektromos gépjárművek száma és a teljes járműállományból való részesedése is.¹¹

⁸ dr. Szabó Lóránt „A villamos járművek története”, Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Villamosgépek Tanszék. Weboldal: [Microsoft Word - Villauto_tortenet.doc \(utcluj.ro\)](#)

⁹ [A VILLANYAUTÓK TÖRTÉNETE, I. rész - Modern Mobilitás \(modern-mobilitas.hu\)](#)

¹⁰ <https://www.rimac-newsroom.com/press-releases/rimac-automobili/record-breaking-rimac-nevera-hits-412kph-to-become-world-s-fastest-production-elee>

¹¹ [Global Electric Vehicle Outlook 2022 \(iea.blob.core.windows.net\)](#)



3. számú ábra. Globálisan értékesített elektromos autók száma és azok aránya az összes autóeladásban (2010-2021)

A világ szembesült a kihívással, hogy nemcsak a természet kötelez bennünket a fejlesztésekre, de a társadalmi igények is megváltoztak, és a környezetvédelem jobbítását célzó paradigmaváltás kezd új szemléletmódként beágyazódni az emberiségbe. Ezen fejlődés nagyon megnyugtató a külső szemlélők szemszögéből, viszont a szakemberekre jelentős mennyiségű fejlesztési feladat hárul, hogy biztosítsák ezen igények kielégítését. Ezen megfogalmazás alatt értem az elektromos piac szerteágazásának a mértékét, mely biztosítja a teljes ellátást^{12,13}:

- autógyárak teljeskörű átalakítása;
- töltőállomások biztosítása;

¹² Elektromos autózás üzleti lehetőségei 2024-ben: Új dimenziók az üzleti világban - Business World Magazin (bwm.hu)

¹³ Dr. Csonka Bálint – Dr. habil. Csiszár Csaba – Dr. Földes Dávid, Elektromos közúti gépjárművek beszerzését támogató költségszámítási módszer és alkalmazás kidolgozása, https://real.mtak.hu/170455/1/KTSZ_2022_4_4-19.pdf

- szoftveres alkalmazások fejlesztése;
- akkumulátorok fejlesztése, gyártása;
- fenntartható gyártási folyamatok bevezetése.

5. Elektromos kontra belsőégésű meghajtású autó

A két meghajtási mód összehasonlítását a hatékonyság, a teljesítmény és az ár alapján végzem el, figyelembe véve a jelenlegi álláspontokat¹⁴. Elsősorban a vásárlás terén mutatom meg a különbséget, mely szerint átlagosan 40%-kal drágább egy elektromos gépjármű, miáltal szembesülnünk kell az akkumulátor feltöltési lehetőségeivel és időtartamával. Kiválasztása jelen helyzetben erősen korlátozott, és ebben a folyamatban prioritásként szerepel a napi megteendő km mennyisége, a töltőállomások elhelyezkedése.

Nem szabad azonban az anyagi többlettől megrettenni, ugyanis komolyabb állami támogatások ösztönzik a környezetvédelemre a társadalmat.

Emellett további fontosságú a jármű fenntartása, melyben az elektromos technika fejhosszal vezet a kopó alkatrészek mennyiségi aránya szempontjából. Az elektromos motorok működési elve egyszerűbb, mint a belső égésű motoroké, az indítás után a teljes nyomatékuk rendelkezésre áll azonnal, míg a benzines vagy dízel meghajtásúaknál kis időre van szükség, amíg a nyomaték felépül.

Jelenleg kiemelt problémaként szerepel a hatótáv, mely az első elektromos modelleknél 80-120 km között helyezkedett el. Napjainkban külön akkumulátorcsomagok kaphatók, amelyek már 484 km-es hatótávot biztosítanak tesztkörülmények mellett.

A legfontosabb kérdés, amelybe érdemes belemélyedni, hogy mennyivel „zöldebb” (természet barátságosabb) a vizsgált technika.

Vizsgálati kérdések:

- az akkumulátorok előállítása¹⁵;

¹⁴ <https://www.zoldpalya.hu/uton/elektromos-benzines-auto-osszehasonlitas-302287.html>

¹⁵ <https://www.theguardian.com/global-development/2019/dec/16/apple-and-google-named-in-us-lawsuit-over-congolese-child-cobalt-mining-deaths>

- a használt akkumulátorok felhasználása;
- az elektromos autók által használt áram^{16,17}.

Ezen pontok mélyen elemezhetők, melyre jelen cikkben nem térek ki. Csapatunkkal a már kifejlesztett technikák optimalizálására törekszünk, ezzel fejlesztve az akkumulátor kihasználtságát és optimális megválasztását.

6. Felhasznált szimulációs program

A LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)^{18,19} programot, másnéven a grafikus „G” nyelvet használtuk fel a fejlesztésünk megvalósításához.

Ez egy olyan programcsomag, mellyel virtuális műszereket (virtual instruments) valósíthatunk meg, amelyek alkalmasak mátrix elrendezésű adatokkal történő műveletek elvégzésre, valamint lineáris algebrai problémák megoldására, akár digitális jelfeldolgozásra is.

Egy meglehetősen összetett programról beszélünk, amely felhasználható általános célú grafikus programozási nyelvként is, virtuális műszerek tervezésére, kialakítására és az alkalmazások műszereként is alkalmazható. Egy olyan speciális célberendezés, mely adott célra készül, adott input és output lehetőségekkel rendelkezik, amellyel a felhasználó részére célspecifikus felhasználási lehetőséget biztosít az optimalizált kezelőfelületével, eközben az eredmény megjelenítésére szolgáló felület is csak a szükséges információt és felhasználói felületet biztosítja.

A LabVIEW grafikus programfejlesztő rendszer programozása könnyű, a menürendszer nem bonyolult. Könnyedén megtalálhatóak és kezelhetőek benne a keresett elemek, mivel azok grafikus képét is

¹⁶ <https://www.computertrends.hu/technologia/pontosan-kiderult-hogy-mennyire-kornyezetbarat-magyarorszagon-egy-elektromos-auto-302130.html>

¹⁷ Németh T., Kovács L. „Elektromos autók fogyasztói megítélése Magyarországon – elméleti megfontolások és kérdőíves felmérés eredményei”, International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS) Vol. 7. (2022) No. 2 DOI: 10.21791/IJEMS.2022.2.1.

¹⁸ https://maxwell.sze.hu/~kovacs/Virtualis_Eszkoztervezes/Grafikus%20programoz%C3%A1s%20LabVIEW-ban.pdf

¹⁹ [C. függelék - Dinamikus rendszerek szimulációs eszközei \(LabVIEW MathScript RT Module\) \(bme.hu\)](#)

láthatjuk ikon formájában a kiválasztáskor. A programnyelv mérésadat-gyűjtésre specializált elemeket tartalmaz, mint például gombok, kapcsolók, analóg és digitális kijelzők, grafikonok, melyek mellett kialakíthatunk saját műszereket is. A kialakított kezelőfelületet, avagy a megjelenített műszerek közötti kapcsolatokat kell definiálnunk, mely szintén grafikusán oldható meg másik ablakban.

A LabVIEW programokat virtuális műszereknek (virtual instruments) vagy VI-nek nevezik, mely magában foglalják a szekvenciák, szelekciók, illetve az iterációk különböző fajtáit. Mindemellett aritmetikai és logikai műveleteket, függvényeket is alkalmazhatunk más programnyelvből származó beágyazott kódokkal. A végrehajtás sorrendjét a program grafikus blokkdiagramjának struktúrája határozza meg (ez a LabVIEW „forráskód”), amelyben a programozó a különböző funkciójú blokkokat vezetékekkel kapcsolja össze. Ezek a vezetékek továbbítják a kiszámított értéket, és bármelyik blokk azonnal végrehajtásra kerül, amint minden bemeneti adata megérkezik, miközben a struktúrák párhuzamos működésre is képesek.

7. Elemzési módszer

A járműrendszer-modellezésnél lényeges szempont lehet a virtuális járműmodell kialakítása, amelynek tartalmaznia kell minden olyan paramétert, amely befolyásolja a jármű alapvető funkcióinak működését. Az említett és a következőkben vizsgált paraméterek közé tartoznak:

- hajtómotor-fordulatszám;
- hajtómotornyomaték;
- az akkumulátor feszültsége és az akkumulátorból kivehető áram nagysága, tehát az akkumulátor teljesítménye;
- kerék fordulatszáma és átmérője;
- ABS-jeladó fogszámaiból adódó impulzusszám;
- aktuális áramfogyasztás;
- az útviszonyokból fakadó tapadási együttható változási tartományai, amelyek a kerékgumi típusától és minőségétől is függenek.

Ezen tényezők szerepelnek a fejlesztett felhasználóbarát kezelőfelület belső szoftver logaritmusában, ahol számításaink az akkumulátor kapacitására, az üzemeltetés hatótávolságára fókuszálnak. A Lab-

View-modell alkalmas szabályozott és szabályozatlan villamos hajtások modellezésére is a biztonsági paraméter megfelelő beállításával. Alapvető elképzelése az egyenáramú és szinkron gép elméleti háttéréből^{20,21,22,23,24} indul ki. A modell felépítése alkalmazza azokat az összefüggéseket, számítási módszereket, amelyek a statikus és tranziens üzem vizsgálatához szükségesek.

8. Villamos hajtások stabilitásvizsgálata

A villamos hajtások vizsgálata esetén a tranziens üzem elemzéséhez szükséges a differenciálegyenletek alkalmazása. A villamos hajtásokat leíró differenciálegyenlet^{25,26,27} figyelembe veszi az elektromechanikai és villamos időállandókat (T_m elektromechanikai, T_v villamos időállandó), valamint az ω szögsebességet, és a t időt.^{28,29,30,31}

- ²⁰ 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
- ²¹ 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
- ²² Bendiák István, Aszinkron motorok csapágydiagnosztikája, TDK dolgozat, Budapest 2019
- ²³ 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.
- ²⁴ 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
- ²⁵ 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
- ²⁶ 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
- ²⁷ Bendiák István, Aszinkron motorok csapágydiagnosztikája, TDK dolgozat, Budapest 2019
- ²⁸ Kovács K. Pál: Villamos gépek tranziens folyamatai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970
- ²⁹ Halász Sándor: Villamos hajtások, Havas&Társ, Budapest, 1987
- ³⁰ Halász Sándor: Automatizált villamos hajtások I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1989
- ³¹ Halász Sándor-Hunyár Mátyás-Schmidt István: Automatizált villamos hajtások II., Műegyetem Kiadó, Budapest, 1998

Ezen tényezőkkel paraméterezve az egyenletet megkapjuk, hogy a stabil üzemi állapotól mennyi idő telik el a nyomaték- és fordulatszám-változás esetén az új stabil üzemállapotig. Ezáltal megkapjuk, hogy két stabilis üzemállapot közt milyen időintervallum fog eltelni.

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

Több lehetséges beállási viszonyt szükséges figyelembe venni³², melyeket a lengő beállítás csökkentése érdekében számítjuk. A lengő beállítás nemkívánt számú amplitúdóváltozással éri el az állandósult állapotot, így jelentősen megnő a szabályzási idő, melyet kiemelten műszaki okok miatt minimalizálni vagy megszüntetni kell.

Az alábbi lehetőségeket szükséges mérlegelni a szabályzó beállítása és tesztelése során:

- az elektromechanikai időállandó kisebb:
azon periodikus beállási eset, amikor az elektromechanikai időállandó kisebb, mint a villamos időállandó négyszerese, vagyis:

$$T_m < 4 \cdot T_v$$

- az elektromechanikai időállandó nagyobb:
olyan periodikus beállási eset, ahol az elektromechanikai időállandó nagyobb, mint a villamos időállandó négyszerese, vagyis:

$$T_m > 4 \cdot T_v$$

- egyenlőség esete:
jelen helyzetben azon periodikus határbeállási esetet vizsgáljuk, amikor az elektromechanikai időállandó egyenlő a villamos időállandó négyszeresével, vagyis:

$$T_m = 4 \cdot T_v$$

- felhasznált időállandók:
 - a forgórész körüli villamos tér időállandója:

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

ahol: L_a - armatúrakör induktivitása [H];
 R_a – armatúra-ellenállás [Ω];

³² Farkas András-Gemeter Jenő-Nagy Lóránt: Villamos gépek, ÓE-KVK 2043, Budapest, 2010

- a motor elektromechanikai időállandója (általános összefüggés)^{33,34}:

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

ahol: c - armatúratekerctől függő gépállandó;
 J_{motor} - motor tehetetlenségi nyomatéka [kgm^2];
 ϕ - motorfluxus [Wb].

A kitűzött cél a géprendszer indítási, fékezési és üzemi idejének a számítása, melyhez a következő szemléletek alapján vizsgáljuk a folyamatot.

Ezen pont kiemelt befolyásoló elemei a villamos hajtások üzemeltetése során fellépő terhelés-változásban megjelenő tehetetlenségi nyomásváltozás esetének lehetséges vizsgálati módszerek az alábbiak szerint számíthatók.

A motor indítási ideje, feltételezve csak a motor tehetetlenségi nyomatékát, és hogy a motor névleges nyomatékkal gyorsít a névleges szögsebességre, egyéb külső befolyásoló tényező nem befolyásolja a szimulációt (motor névleges nyomatéka M_n)³⁵:

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

A következő esetben a motorra egy adott nagyságú tehetetlenséget kapcsolunk, mely kiemeli azon fizikai törvényszerűséget, hogy két állandósult szögsebesség között milyen lekövetési késleltetés, mérték fejezhető ki. Ezen összefüggést a következő képlet képviseli^{36,37,38,39}:

³³ Retter Gyula: Egységes villamos gép elmélet, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976

³⁴ Farkas András-Gemeter Jenő-Nagy Lóránt: Villamos gépek, ÓE-KVK 2043, Budapest, 2010

³⁵ Halász Sándor: Automatizált villamos hajtások I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1989

³⁶ Kovács K. Pál: Villamos gépek tranziens folyamatai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970

³⁷ Halász Sándor: Villamos hajtások, Havas&Társ, Budapest, 1987

³⁸ Halász Sándor: Automatizált villamos hajtások I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1989

³⁹ Halász Sándor-Hunyár Mátyás-Schmidt István: Automatizált villamos hajtások II., Műegyetem Kiadó, Budapest, 1998

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

A következő lépés a vizsgált két szögsebesség közötti időátlépés (ω_2 és ω_1), mely megadja a két szögsebesség-változás közötti eltelt időt:

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

A következő számításban újra a két szögsebesség közti váltás közti eltelt időt kapjuk. Itt viszont bővítettük a képletet a busz hatásában megjelenő tehetetlenségi nyomatékkal. Ezen paramétert erősen befolyásolja a busz tömege, annak felhasználási funkciója, szállított eszközök és az utasainak száma:

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

A következő lépésben a dinamikai nyomatékot (M_d) fejeztük ki, mely a stabilitásvizsgálatra ad rálátást. Itt a számított adatokból arra kapunk megoldást, hogy a motor képes-e legyőzni az őt terhelő nyomatékot, így át tud térni ω_1 -ről ω_2 -re, nem marad álló állapotban:

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

A villamos hajtás csillapítási tényezője (Zeta), mely a labilis állapot elkerülésére szolgál; ezen biztonsági tényező felhasználásával elkerülhető a rezonancia vagy öngerjesztés állapota:

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

A villamos hajtások általános mozgásegyenlete⁴⁰: az üzembiztonságban igen fontos összefüggés a dinamikai (M_d) ismerete, amely tartalmazza a motornyomaték és a terhelő nyomaték értékét az alábbi képlet szerint:

⁴⁰ Farkas András-Gemeter Jenő-Nagy Lóránt: Villamos gépek, ÓE-KVK 2043, Budapest, 2010

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

A villamos hajtás stabilitásának vizsgálata érdekében részletesebben kitértünk a stabilitás feltételeire, hogy a szimuláció milyen eredményváltozásokat fog produkálni, amint több oldalról, több feltétel alapján definiáljuk a számításban a következő pontok alapján.

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 mozgásegyenletet⁴¹:

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

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];

$J_{\text{összes}}$ – a hajtás összes tehetetlenségi nyomatéka [kgm²];

ω - szögsebesség [r/s].

A LabView-modellbe beépítésre kerültek ezek az összefüggések, amely a háttérben feldolgozza a kezelőfelületen megadott értékeket. A kifejlesztett programban a hatásfok-orientált szabályozásra fókuszál a

⁴¹ Farkas András-Gemeter Jenő-Nagy Lóránt: Villamos gépek, ÓE-KVK 2043, Budapest, 2010

számításunk, melyet korlátlan paraméterrel és számítási ciklussal lehet elemezni a GPS-paraméterekhez viszonyítva, így az elvégzett műveletek mennyisége alapján fokozottan pontosabb átlagolás érhető el.

9. Buszmodell előkészítése

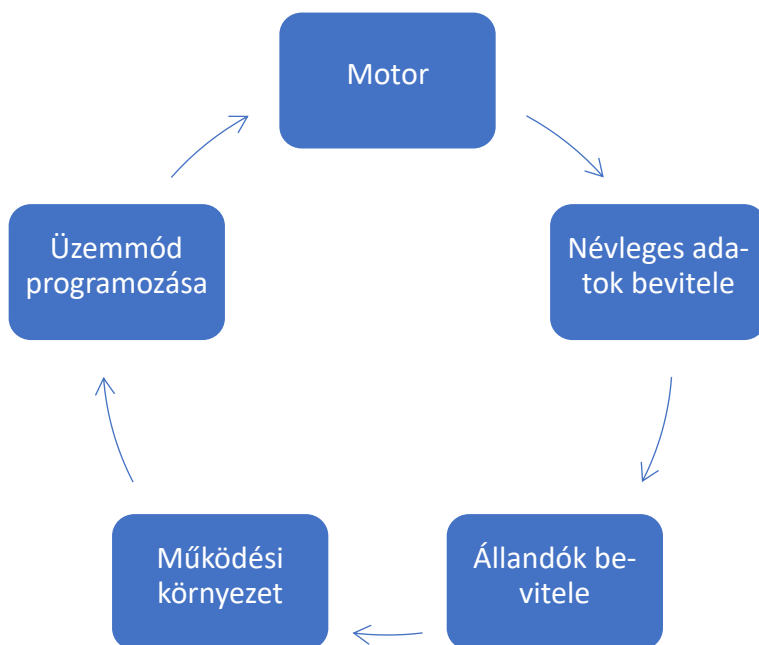
A buszmodell előkészítése az alábbi folyamatábra szerint lehetséges, mely megadja a jelenlegi kutatásunk eredményét, amelynek a már említett akkumulátorkapacitás a témája. A jövőben ezen jellemzők bővítése lesz a cél.

Az elkészített programunkban a busz terhelhetősége a következő szempontok szerint módosítható:

- névleges adatok bevitele;
- nyomaték- és áramkorlátozások beállítása;
- gépállandók bevitele;
- működés vonatkozó környezeti adatok;
- hajtómotor-üzemmód programozás;
- motortípus kiválasztása.

Adatok bevitele a járműre vonatkozólag:

- T_v - villamos időállandó;
- T_m - elektromechanikai időállandó;
- K_t - nyomatéki állandó;
- R_a - armatúra belső ellenállása;
- J_{motor} - motor tehetetlenségi nyomatéka;
- jármű tömege és változási tartománya, utasok száma, szállított tömeg változási tartományai.

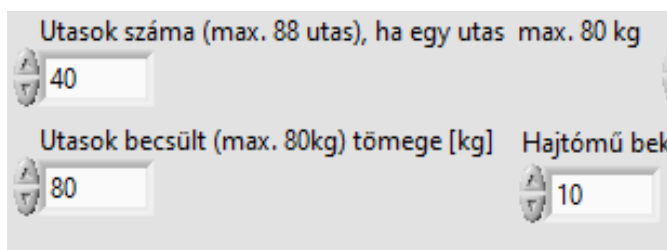


4. számú ábra. A LabView program adat beviteli elképzelése

A jármű össztömegének a számítása a következő módosítható adatokból áll:

- a jármű tömege, mely ebben az esetben az üres tömeget jelenti;
- szállított utasok száma, mely a számításban módosítható létszám és átlagtömeg alapján is.

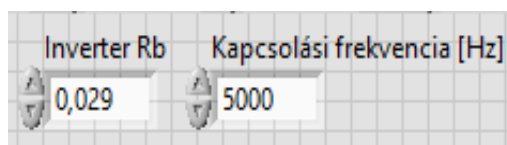
Az utasok száma pl. Ikarus 415 esetén maximum 88, ha egy ember tömege nem haladja meg a 80 kg-ot.



5. számú ábra. Az utasok számának programozása

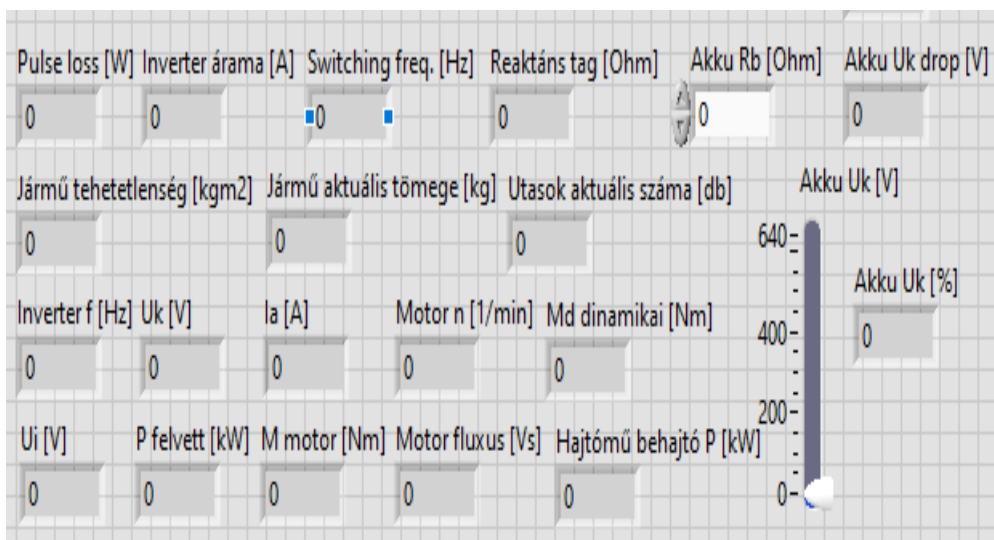
Az inverter melegedésének egyik lehetséges modellezése, melyhez a kapcsolási frekvenciát használtuk fel, így összesítve a frekvenciaváltó veszteségeit egy paraméterben.

Adatok bevitele a motortápláló inverterre vonatkozólag, pl.:



6. számú ábra. Az inverterre vonatkozó adatok megadása

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.



7. számú ábra. A buszhajtásra vonatkozó adatok visszajelzése

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

A motorra vonatkozó alapadatok, melyek teljes tartományban módosíthatók, és szerepelnek a szimulációkban, mindenféleképpen szükségesek, mert ha motortípus-váltás történik, rendelkezünk kell a megfelelő adatmennyiséggel.

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

- Pulse loss: a számított félvezetőkre vonatkozó veszteség;

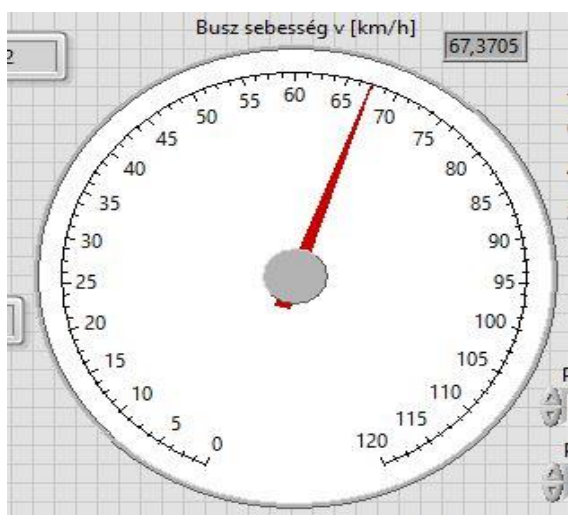
- inverter árama: az inverter kimeneti árama a motort táplálja;
- switching frequency: az inverterben lévő félvezetők aktuális kapcsolási frekvenciája;
- reaktáns tag: a félvezető egységre vonatkozó reaktáns tag megadása;
- Akku R_b [Ohm]: az akkumulátor belső ellenállása;
- Akku U_k [V] drop: az akkumulátor kapocsfeszültségének figyelése;
- jármű tehetetlensége J [kgm^2]: a busz aktuális tehetetlenségi nyomatéka, függően a tehertől;
- jármű aktuális tömege: járműtömeg;
- utasok aktuális száma: a busz befogadóképességének megfelelően alakuló utasszám;
- Inverter f [Hz]: az inverter alapharmonikus frekvenciája;
- U_k [V]: az inverter számított kimenetifeszültség-értéke;
- I_a [A]: a hajtómotor-armatúra árama;
- Motor n [1/min]: a hajtómotor főtengelyének mért fordulatszáma;
- M_d dinamikai [Nm]: a hajtáslánc mért/számított dinamikai nyomatéka;
- Akku U_k [%]: az akkumulátorfeszültség 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

10. Sebességmérés és -korlátozás, akkumulátor paraméterek és kezelőfelületek

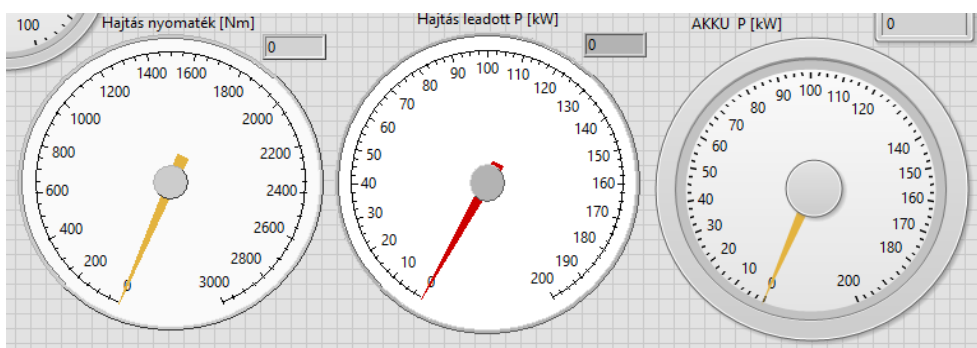
Az előbb említett elméleti felépítést a következő LabView műszerfal-modellezésben valósítottuk meg, ahol már beépítésre került a buszba helyezendő sebességmérés (8. ábra) és -figyelő szabályozás. A korábbi fejezetben bemutatott utasszám és tömeg azért is szükséges, mert folyamatos átszámítás szükséges a tehetetlenségi nyomatékok tekintetében. A jármű ürestömeggel értelemszerűen gyorsabban képes haladni, nagyobb tömeggel lassabban.

A következő ábra [9. ábra] a számításaink középpontját mutatja a következő paraméterekkel:

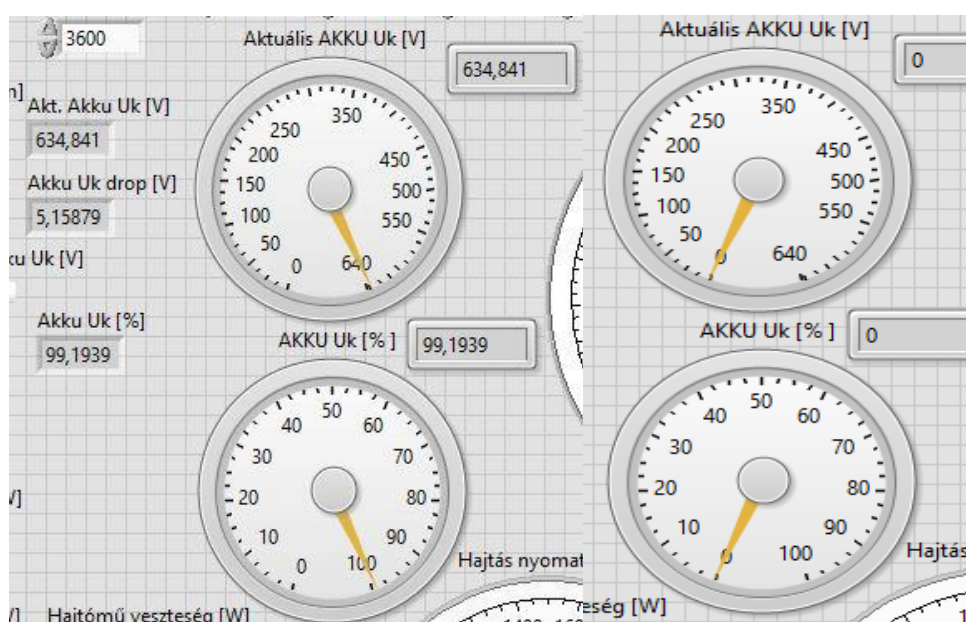
- a váltó kihajtónyomaték;
- a hajtásra adott kimeneti teljesítmény;
- az akkumulátor és inverter közti teljesítmény.



8. számú ábra. Sebességmérés a buszban, szimulációs környezetben



9. számú ábra. Virtuális műszerfal, kihajtónyomaték, teljesítmény és akkumulátorteljesítmény



10.számú ábra. Az akkumulátor paramétereinek figyelése

A busz menetideje szempontjából az akkumulátor U_k kapcsolófeszültségének figyelése és összehasonlítása a névleges értékkel szintén létfontosságú szempontok közé tartozik (9. ábra).

Az akkumulátor paramétereinek figyelése (10. ábra), aktuális kapcsolófeszültség [V], összehasonlítva a névleges feszültséggel [%] és ezen értékek mutatós és numerikus kijelzésével. Az előbb említett ábrán már kalkulált paraméter is megfigyelhető.

Akkumulátor numerikus értéki fájlba is kérhető, tovább feldolgozható, a kijelzések az aktuális állapot „gyors” ellenőrzését célozzák meg, ennek részletes elemzése a mesterséges intelligencia feladata.

A „mutató” 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 adatfeldolgozónak, másrészt a legoptimálisabb áramtartományt igyekszik követni.

Az áramkorlát alapjel-beállítását nemcsak a hajtómotor névleges árama határozza meg; ha szükség esetén olyan gyorsító nyomatékokat 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).

11. Összefoglalás

Az első ciklusban elkészített LabView-modellel elértük a kitűzött célunkat; ezáltal kialakítottunk egy olyan szimulátort, amely alkalmas változtatható paraméterű elektromos meghajtású busz rendszerének a tesztelésére, mely alkalmazható oktatásban, kutatásban, tesztelésben.

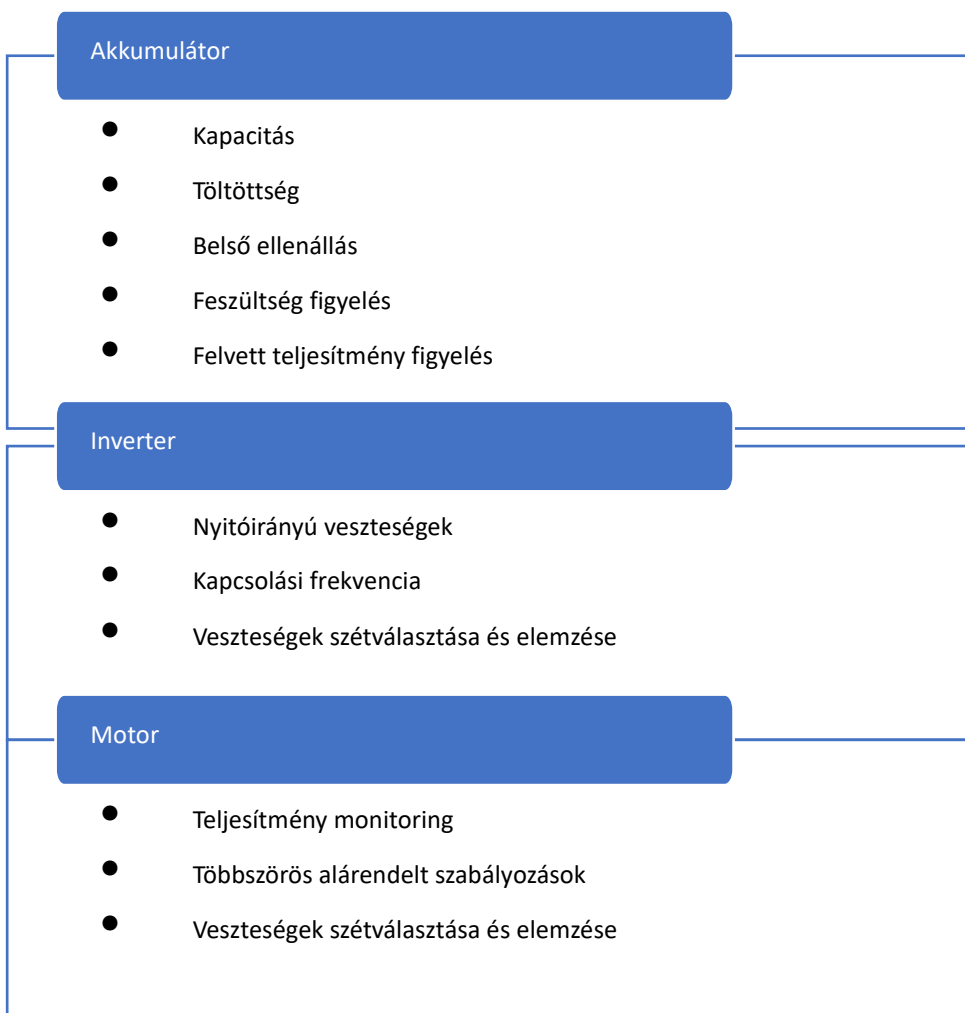
Kialakítási követelmények:

- változtatható motorparaméterek;
- változtatható hajtóműáttétel és -hatásfok;
- változó frekvenciatartomány (hajtómotort tápláló inverter);
- állítható időállandók (villamos és mechanikai);
- mérhető, változtatható veszteségi komponensek;
- Fuzzy-szabályozások előkészítése.

A modell koncepciója:

A 11. ábra koncepciója egyszerűsíti az alapmodell felépítését. Az akkumulátor adatai változtathatók, illetve a lemerülés gyorsítható, lassítható, illetve valós időben (real-time-ban) is üzemeltethető, természetesen a realitásokat figyelembe véve; az előbbinek a fokozott lemerülési igénybevétel miatt van jelentősége.

A modell szükség esetén átírható akár személygépkocsira és egyéb katonai járműre is, hiszen motor, hajtómű, tömeg, gyorsítási igények, teljesítmény, fordulatszámkorlátok tetszőlegesen programozhatóak, vagyis a modell univerzális jellegű.



11. számú ábra. Elektromos meghajtású buszmodell alapkonceptiója

A szimuláció felhasználható, hogy előre optimalizáljuk a céljárműveink meghajtását az ideális akkumulátortípussal, amint a célkörnyezet adataival leteszteltük, és maximalizáltuk a gépjárművünk kihasználhatóságát az adott környezetre, viszonyokra. Így életciklus-modell állítható fel, és a hatékonyság területén optimalizálható járművünk igénybevétele, míg a műszaki hatékonysági oldaláról így igyekszünk minimalizálni a folyamat szükségleteit.

Irodalomjegyzék

- [1] [Frequently Asked Questions \(FAQs\) - U.S. Energy Information Administration \(EIA\)](#)
- [2] [https://hvg.hu/gazdasag/20150610 Meg 52 ev es kimerulhetnek a Fold olajtar](https://hvg.hu/gazdasag/20150610_Meg_52_ev_es_kimerulhetnek_a_Fold_olajtar)
- [3] <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/when-will-fossil-fuels-run-out>
- [4] <https://kiszamolo.hu/napi-abra-gepjarmuvek-szama-magyarorszagon/>
- [5] dr. Szabó Lóránt „A villamos járművek története”, Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Villamosgépek Tanszék. Weboldal: [Microsoft Word - Villauto tortenet.doc \(ut-cluj.ro\)](#)
- [6] [A VILLANYAUTÓK TÖRTÉNETE, I. rész - Modern Mobilitás \(modern-mobilitas.hu\)](#)
- [7] <https://www.rimac-newsroom.com/press-releases/rimac-automobili/record-breaking-rimac-nevera-hits-412kph-to-become-world-s-fastest-production-ele>
- [8] [Global Electric Vehicle Outlook 2022 \(iea.blob.core.windows.net\)](#)
- [9] [Elektromos autózás üzleti lehetőségei 2024-ben: Új dimenziók az üzleti világban - Business World Magazin \(bwm.hu\)](#)
- [10] https://real.mtak.hu/170455/1/KTSZ_2022_4_4-19.pdf
- [11] <https://www.zoldpalya.hu/uton/elektromos-benzines-auto-oszszehasonlitas-302287.html>
- [12] <https://www.theguardian.com/global-development/2019/dec/16/apple-and-google-named-in-us-lawsuit-over-congolese-child-cobalt-mining-death>
- [13] <https://www.computertrends.hu/technologia/pontosan-kiderult-hogy-mennyire-kornyezetbarat-magyarorszagon-egy-elektromos-auto-302130.html>
- [14] Németh T., Kovács L. „Elektromos autók fogyasztói megítélése Magyarországon – elméleti megfontolások és kérdőíves felmérés eredményei”, International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS) Vol. 7. (2022) No. 2 DOI: 10.21791/IJEMS.2022.2.1.

- [15] https://maxwell.sze.hu/~kovacsg/Virtualis_Eszkoztervezes/Grafikus%20programoz%C3%A1s%20LabVIEW-ban.pdf
- [16] [C. függelék - Dinamikus rendszerek szimulációs eszközei \(LabVIEW MathScript RT Module\) \(bme.hu\)](#)
- [17] 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
- [18] 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
- [19] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágydiagnosztikája, TDK dolgozat, Budapest 2019
- [20] 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.
- [21] Szabó József Zoltán, Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása, PhD értekezés, 2010, Budapest
- [22] 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
- [23] 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)
- [24] 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,

- [25] 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
- [26] 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
- [27] Retter Gyula: Egységes villamos gép elmélet, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976
- [28] Farkas András-Gemeter Jenő-Nagy Lóránt: Villamos gépek, ÓE-KVK 2043, Budapest, 2010
- [29] Kovács K. Pál: Villamos gépek tranziens folyamatai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970
- [30] Halász Sándor: Villamos hajtások, Havas&Társ, Budapest, 1987
- [31] Halász Sándor: Automatizált villamos hajtások I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1989
- [32] Halász Sándor-Hunyár Mátyás-Schmidt István: Automatizált villamos hajtások II., Műegyetem Kiadó, Budapest, 1998
- [33] 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.