

Fodor Attila, Sándor Tamás: Villamos motorok hatékonyságának meghatározása a járműsebességből visszaszámolással

Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék, Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek
Intézet, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem,
[1084 Budapest, Tavaszmező utca 17., Budapest, Magyarország]
e-mail: fodor.attila@stud.uni-obuda.hu, sandor.tamas@kvk.uni-obuda.hu

Absztrakt: Kutatásunk ezen szakaszában egy kinematikai eljárást mutatunk be, amellyel a jármű sebessége és a sebességváltóval kiválasztott áttétel mellett az út meredekségének ismeretében meghatározható egy villamos motor hatásfoka. Az így generált keresőtábla később felhasználható Simulink modellezés során, így a hajtáslánc megvalósítása lerövidül, szimulációja pedig a csökkentett számítási igényeknek köszönhetően felgyorsítható.

Kulcsszavak: kinematika, villamos hajtás, gépjárműdinamika, járműhatékonyság

1. Bevezetés

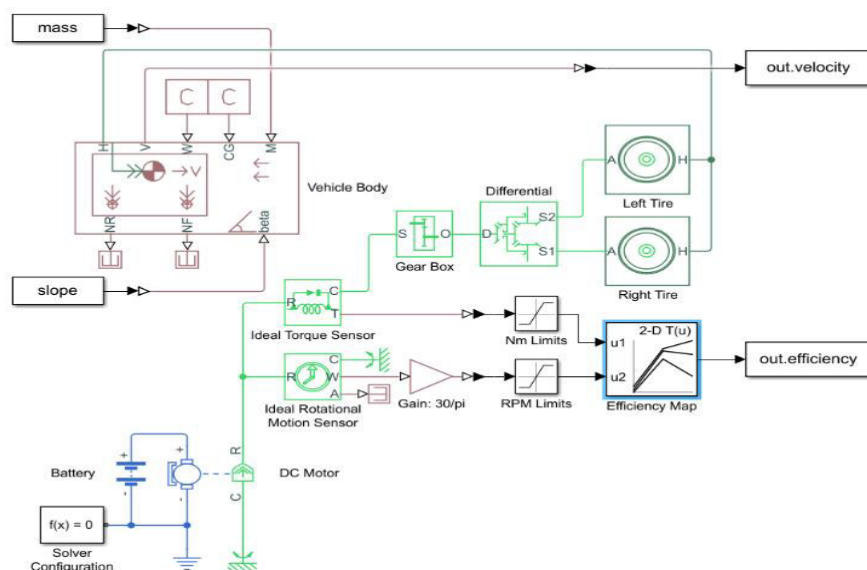
Napjaink egyik legfontosabb kihívásai közé tartozik, hogy csökkentsük a járműveink fogyasztását, növeljük hatékonyságukat és megbízhatóságukat. Ezeknek számos aspektusa és vonatkozása, részleteinek kutatása megjelenik tudományos folyóirat cikkekben: önvezetés, üzemanyagcellák, baleseti statisztikák és okaik [11], vonatok üzemeltetése és a mobil távközlés [6], az okosvárosok nyújtotta információ források [4, 5], intelligens járművek közti kommunikáció [13] sem elhanyagolható témakör. [24]

Kutatásunkban az elektromos ikermotorhajtású buszok fogyasztásának optimalizálása a cél. Bár az elektromos meghajtású személygépjárművek túlnyomó többsége sebességváltó nélkül kerül forgalomba, de egy menetrend szerint közlekedő, elektromos meghajtású autóbusz esetében elengedhetetlen a sebességváltó használata. Ennek egyik oka a elektromos motor hatásfokának lehető legmagasabb értékén történő tartása, ami a tömegközlekedésben résztvevő buszok esetében a nagyon gyakori megállások miatt egy fontos szempont, ugyanis a buszok útvonala buszmegállók sorát érinti [3], így gyorsításra alkalmas egyenes szakaszokon is meg kell állnia.

A személygépjárművek esetén több szempont alapján dönthetnek a gyártók a sebességváltó mellőzése mellett: rekuperációs fékezés lehetőségének fenntartása, a jármű össztömegének csökkentése érdekében vagy előfordulhat, hogy a kerekek önálló hajtással rendelkeznek, így nincs szükség a láncolatra, menetstabilizálás vagy a kerekek állapotának megőrzése [12] érdekében pedig csak egy viszkózus csatolás biztosítja a nyomaték elosztását vagy vektorozását. [8]

A menetrendet követő közlekedésnek van egy hatalmas előnye a személygépjárművekre jellemző „szabad kóborlás” közlekedési profillal szemben: az optimalizációk során rendelkezésre áll az útvonal terv, és annak jellemzői, mint például az útszakasz emelkedése vagy a várható megállások sora, melyet indokolhat éles kanyar, kereszteződés vagy buszmegálló. [10] Ezen forgalmi szituációk következménye, hogy az úthálózatok bejárására [15] hivatott algoritmusok számításigényes futtatására, és eredményeinek elemzésére nincs szükség az intelligens hajtásvezérlés során. Másik előnye, hogy becslés tehető a szükséges üzemanyag- vagy az akkumulátorban tárolt energia mennyiségére, melyet akár napelemes töltőrendszerrel is ki lehet egészíteni. [14]

Korábban megjelent cikkeinkben a járműdinamikai paramétereket a bemenetre kapcsolt menetciklus [20], létrehozásának módszerei [1] alapján szabályozott hajtás szimulációjával határoztuk meg. A hirtelen változó- és az állandó környezeti paraméterek, valamint a járműdinamikai paraméterek is összegyűjtésre kerültek. [16] Az automata sebességváltó működtetéséhez fixen programozott és fuzzy beavatkozó rendszerek is kipróbálásra kerültek. [17]. Elemzések készültek az elektromos motorok fluxusának, nyomatékának és szögsebességének szabályozásáról egy- és kétmotoros környezetben, [18] továbbá a hajtás elemeinek meghibásodási lehetőségeiről. [19]



1. Ábra

Hajtásmodell, melynek futtatását előre kiszámított hatékonysági térképpel lehet felgyorsítani

Mindezek digitális szimulációkkal kerültek elvégzésre, mely nem más, mint egy időbeni folyamat, melyet a számítógép hajt végre. A digitális szimuláció fogalma nem összekeverendő a virtuális szimulációval, ahol 3 dimenziós reprezentációja szerepel egy virtuális környezetben. Digitális szimuláció esetén nem az ábrázolás az elsődleges cél, hanem időbeni fizikai folyamatok megfigyelése, elemzése, azokkal számítások elvégzése. A digitalizációnak köszönhetően lehetőség van a múltba tekintésre, korábbi állapotokra visszatérni, de a rendszer jövőbeni állapotaira is lehet becsléseket tenni (vagy akár előre leszimulálni), így több lehetséges kimenet is megvizsgálható, majd az eredmény algoritmus a gyakorlatban is felhasználható. [9]

A szimulációk felgyorsításának érdekében kidolgozásra került egy eljárás, mellyel meghatározható a beszerelt elektromotor hatékonysága a járműre ható erők összegzéséből, melynek során a motor hatékonysági térképének síkját kifesztítő független változók, azaz a motor belső állapotai (megtermelt nyomaték és fordulatszám) lecserélésre kerültek járműdinamikai paraméterekre és a jármű hajtásának állapotaira. Így a független változók a jármű sebessége és a kiválasztott fokozatváltó áttétel lettek. [2]

A hatékonysági térkép felvételéhez két komponenst kell meghatározni azonos síkon, ezek a forgási sebesség és a motor nyomatéka. Ha az a helyzet, mikor a motor épp annyi nyomatékot termel, mint amekkora a hajtás nyomatékigénye egyensúlyi helyzetként van kezelve, akkor a jármű éppen aktuális sebességéből és a gépjármű dinamikai paraméterek ismeretében felvehető a két komponens: a nyomaték 0 és 550 Nm között, a forgási sebesség pedig 0 és 8000 RPM között.

$$\omega = \frac{v}{r_{dk}}$$

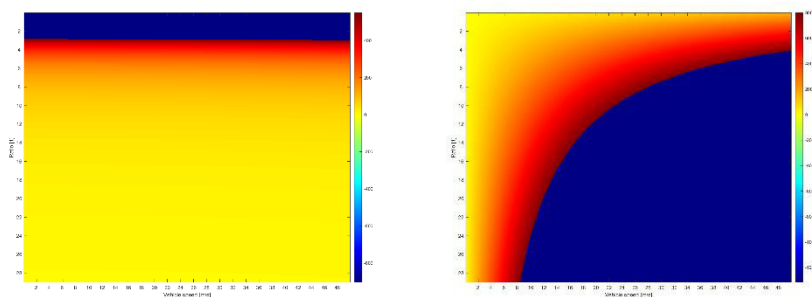
$$M_{igény} = \frac{r_{sk} \cdot (c_1 \cdot A \cdot v^2 + m \cdot (c_2 \cdot \theta'^5 + c_3 \cdot \theta'^3 + c_4 \cdot \theta'^1))}{i_v \cdot i_d}$$

Együttható	Érték
c_1	0.74379
c_2	0.12086
c_3	-2.523
c_4	15.108

2. Ábra

A nyomaték és forgási sebesség kiszámítása a gépjárműdinamika egyenleteiből átrendezett és optimalizált számításigényű műveletek és együtthatók segítségével

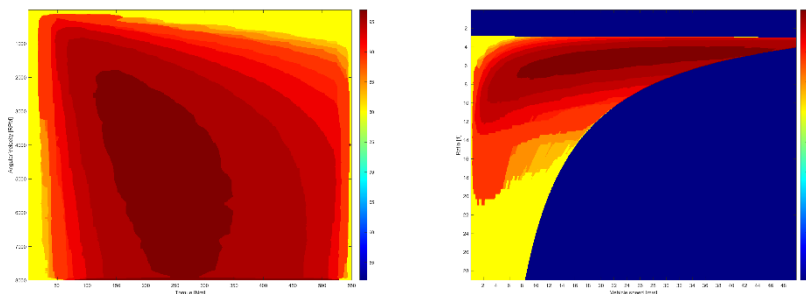
Az értelmezési tartományon kívül eső területek egy előre kiválasztott értékkel kerültek feltöltésre. A maximum és a minimum érték különbségének másfélszerese levonásra került a minimum értékből és ez a kiugróan alacsony szám jelöli, hogy a hatékonyság adott pontban nem értelmezett. Megválasztása önkényesen történt, az egyértelmű ábrázolhatóságot szem előtt tartva.



3. Ábra

Kalkulált nyomaték és forgási sebesség értékek a járműsebesség és az áttételek összerendelésében

A motor adatlapjában [27] megtalálható a gyártó által közölt hatékonysági térkép, melyet képfeldolgozó eljárásokkal be lehet olvasni és bemenetként felhasználni. A forrás hatékonysági térkép a fentebb tárgyalt két komponens független változóként, így minden képponthoz a két komponens megegyező pontja rendelhető. Megfigyelhető, hogy az eredmény hatékonysági térkép örökölte a komponensek értelmezési tartományainak metszetét.



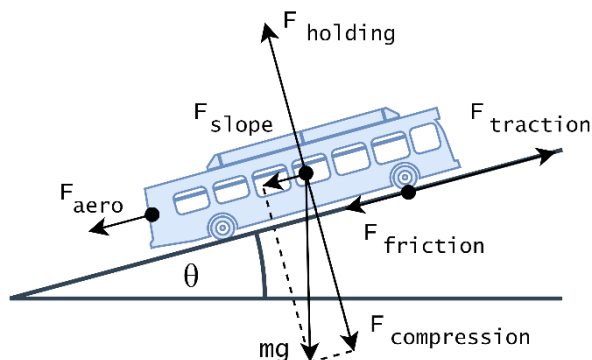
4. Ábra

A bemeneti- (bal) és a kimeneti (jobb) hatékonysági térképek

2. Számítások

2.1 Járműtestre ható erők

Az egyensúlyi helyzet felírásához a gépjárműre ható erőket kell áttekinteni. A vonóerő, ami gyorsítaná a járművet, míg a nyomóerő, az útmeredekségből fakadó erő és az aerodinamikai ellenállás a vonóerő ellen dolgozik, ezért ezek összege adja az eredő erőt, amiből végül meghatározható a gépjármű gyorsulása. Ha ezen erők előjeles összege nulla, akkor a hajtás egyensúlyi helyzetben van. [23]



5. Ábra

Járműtestre ható erők

A jármű gyorsulása az eredő erő és a gépjármű össztömegének a hányadosa, a gyorsulás idő szerinti integráltja pedig a jármű sebessége. Az egyenletrendszer rendezése után a nyomatékigény kifejezhető a hajtás nyomatékigénye, a sebességet elosztva a dinamikus keréksugárral a forgási sebesség is adódik. A kettő szorzata pedig a teljesítmény. [2] Megfigyelhető, hogy a súlyerő az útemelkedésből adódó erő és a nyomóerő kompozíciója, tehát trigonometrikus függvényeket tartalmaz. Ezeket 32 és 64 bites rendszereken CORDIC algoritmussal szokás implementálni [25], viszont a kidolgozás alatt álló algoritmusnak beágyazott rendszereken is működnie kell a jövőben, ezért érdemes inkább a 8 és 16 bites rendszereknél használt Taylor-sor alapú közelítést használni. Az út emelkedés szűkös tartományon mozog így, tovább egyszerűsíti a helyzetet, hogy negyedik fokú polinom alkalmazása esetén már 3 tizedesjegy pontossággal közelíthetőek a koszinusz és a szinusz hullámok értékei. [2]

Ami problémát okoz a számítások során és nehezen kioptimalizálható az az algebrai hurok jelensége. Ugyanis a sebesség meghatározása a járműre ható erőkből történik, viszont az útterhelés is és az aerodinamikai ellenállás is négyzetesen függ a jármű sebességétől. Az egyensúlyi helyzet feloldja az utóbbi esetet, viszont az útterhelés meghatározására más módszert kell találni.

2.2 Útterhelés

Az útterhelés 3, a vonóerő ellen dolgozó erőhatás, melyek különböző karakterisztikák szerint függenek a jármű aktuális sebességétől, együttesen egy másodfokú polinomot képezve. [21, 22] Jellemezni 3 együtthatóval szokás, melyek mértékegységei a kiváltott erő és a jármű sebesség megfelelő karakterisztikájának hányadosa. Meghatározásuk csak mérések során közelítéssel lehetséges, felhasználásuk a jármű károsanyag kibocsájtásának meghatározása során, vagy a jármű energia fogyasztásának és így hatékonyságának meghatározása során történik. [10, 12]

Az útterhelés szintén algebrai hurkot okoz a számítások során, akárcsak a jármű sebessége. Feloldására az útterhelés nem, mint kiszámolandó lépés szerepel az algoritmusban, hanem mint futó változó szerepel, aminek köszönhetően nincs több hurok, viszont az eredmény hatékonysági térkép még egy független változóval kiegészül. Járulékos hátránya, hogy ábrázoláskor a kapott képen mozgó munkapont vízszintes irányban (jármű sebesség változásának iránya) nem képes elmozdulni anélkül, hogy ne mozdulna el az újonnan, művileg hozzáadott dimenzióban is. Ez szerencsére csak adatvizualizálásban (és a hatékonysági térkép részeinek előtöltése során) okoz gondot, de nem zavar bele az algoritmus működésébe.

2.3 Jármű tehetetlen tömege

A jármű össztömegének változása igen jelentősen befolyásolja a járműdinamikát, viszont elmondható, hogy jelentős változás csak a megállások alkalmával történik a le- és felszálló utasoknak, továbbá csomagjainak köszönhetően.

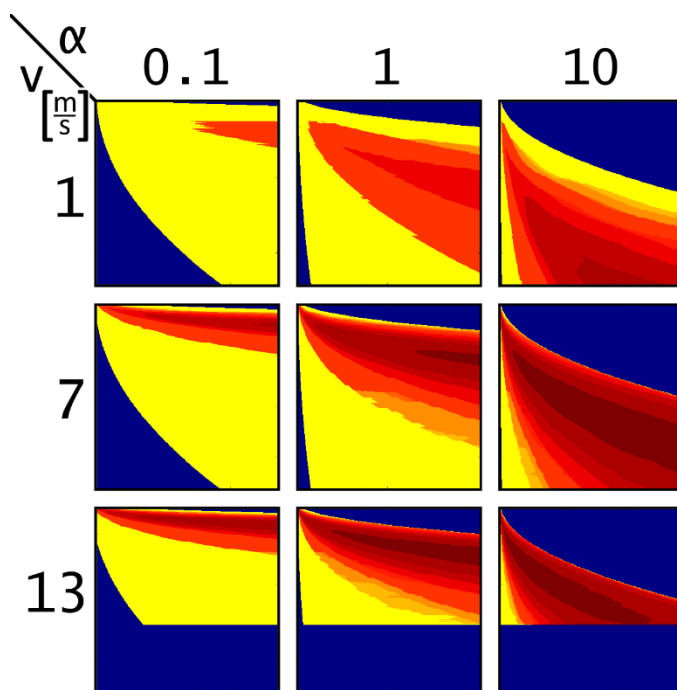
Bár a számítások során a teljes busz pontszerű testként volt kezelve, a jármű tervezésekor fontos szempont a jármű tehetetlen tömegét adó testek elrendezése, ugyanis tehetetlenséggel rendelkeznek, ezzel befolyásolják nem csak a hajtás nyomatékigényét, de a vezetési stílust is. Ez nem csak az utasok helyzetére, hanem az akkumulátorok elrendezésére is épp úgy vonatkozik, hiába lenne elegendő hely a jármű mennyezetén az energiatárolók elrendezésére, a tömegközépponttól távolra elhelyezett tehetetlen tömeg nehezen kormányozhatóvá vagy akár borulékonyá is teheti a járművet.

Sajnos a 4. ábrán látható hatékonysági térkép már önállóan egy 3 dimenziós összerendelés, annak ellenére, hogy a színek nyújtotta ábrázolási lehetőség miatt a síkra van leképezve. Kiterjeszteni egy képzett útterhelési együttható és a tehetetlen tömeg tengelyével csak a dimenziószám növelésével lehet, melyet érzékelni és felfogni az ember képtelen, de képzelőereje és kreativitása alkalmas magasabb dimenziószámok esetén is absztrakt matematikai műveletek értelmezésére. [7]

Az alábbi ábrán a jármű tömege, mint futó változó 50 kg és az Ikarus 415 maximális össztömege, azaz 16200kg között mozog, a másik független változó itt is az áttétel értéke. Megfigyelhető, hogy a jármű nyomatékigénye a növekszik az össztömeg függvényében.

A külső tengelyek közül a függőlegesen a járműsebesség látható 6 m/s léptékkel. Ahogyan növekszik a sebesség, úgy csökken a maximális áttétel érték, ennek a villamos motor maximális fordulatszáma az oka. A változás karakterisztikája az előző ábrákon megfigyelhető.

Az útterhelés értéke az alféval jelölt külső vízszintes tengelyen látható dekád osztással. Ez az érték a számítások során egy negyedfokú polinom két páros kitevőjű tagjának együtthatóját paraméterezi és egy nulladik fokú tag együtthatójaként is szerel. Ez a karakterisztika a hatékonysági térkép legalacsonyabb és legmagasabb áttétel értékeinél, mint burkológörbe jelenik meg.



6. Ábra

Az 5 dimenziós hatékonyság egy formája

Záró gondolatok

Kinematikai eljárással a gépjármű sebességéből, az út emelkedéséből, a jármű össztömegéből és az útterhelési együtthatóból meghatározásra került egy villamosmotor hatékonysága.

Az algebrai hurkok feloldása miatt, továbbá a hajtás paramétereinek az újra konfigurálhatóságát támogatva az újonnan generált hatékonysági térkép magasabb dimenziószámmal rendelkezik, mint az eredeti, így tárolása és áttekintése is összetett feladat.

A szimulációk során kiderült, hogy egy tömegközlekedésben részt vevő busz járműdinamikai paraméterei dinamikusan változnak a használata során és forgalomtól függően több időt tölthet alacsony hatásfokú állapotban, mintha a személyautókra jellemző utazási profillal közlekedne azonos útvonalon, ezért fokozatváltó használata indokolt.

A forráskutatás során számos, a témakört különböző szempontokból elemző (meghibásodásokat, emberi tényezőket, járműdinamikát, elektronikát és kommunikációs megoldásokat elemző publikációk) dokumentum áttekintésre került, a megoldandó probléma multidiszciplináris és még rengeteg megoldandó kérdést hordoz, mely további kutatások alapjául szolgálhat.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulensemnek, Sándor Tamás tanárúrnak, hogy bevezetett a kutatók világába azzal, hogy meghívott kutatási projektjébe és azt, hogy folyamatosan figyelemmel kíséri tevékenységemet. Köszönet a többi, a kutatási projektben részt vevő hallgatónak a közös ötletelésekért és a modellezésben nyújtott segítségért.

Köszönöm a családomnak a folyamatos támogatást és azt, hogy utazásaik alkalmával részt vettek az adatgyűjtésekben.

AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM ÚNKP-22-1 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.

Források

- [1] A. Fodor and T. Sandor: "Study of vehicle dynamic properties and gear shifting mechanism of electric vehicles", 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 177-180, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667815.
- [2] A. Fodor and T. Sandor: "Calculating the efficiency of an electric motor from the speed of the vehicle and the slope of the road", unpublished.
- [3] A. Fodor and T. Sandor: "Development of a Drivecycle-based Twin Drive Control Procedure to Increase the Efficiency of Electric Motors", unpublished.
- [4] D. Borsos and L. Berek: "Challenges of LoRaWAN Technology in Smart City Solutions", Interdisciplinary Description of Complex Systems (INDECS), 20(1), 1-10, 2022, doi: 10.7906/indecs.20.1.1
- [5] D. M. Kozma, Á. Kohanecz and D. Borsos: "LoRaWan hálózat stabilitás vizsgálata különböző környezeti viszonyok mellett", Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2021) 138 p. pp. 41-50. , 10 p.
- [6] A. Bódi and D. Maros: "Az 5G és a közlekedés digitalizációja", Budapest, Magyarország: Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ) (2020) 273 p. pp. 55-65. , 11 p.
- [7] J. Tar, B. Varga, P. Galambos, L. Szűcs, M. Siket, Á. Varga, Gy. Eigner, L. Kovács: "Abstraction in teaching ways of control engineering to support the understanding of mathematics behind Industry 4.0 – a Hungarian approach", IFAC PAPERSONLINE 55 : 17 pp. 230-235. , 6 p. (2022), doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.284
- [8] L. Zhang, L. Li, C. Lin, C. Wang, B. Qi, J. Song: "Coaxial-coupling traction control for a four-wheel-independent-drive electric vehicle on a complex road", Proc IMechE Part D: Journal of Automobile Engineering 2014, Vol. 228(12) 1398-1414, doi: 10.1177/0954407014529941
- [9] P. Baranyi, Á. Csapó, T. Budai, Gy. Wersényi: "Introducing the Concept of Internet of Digital Reality – Part I", ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 18 : 7 pp. 225-240. , 16 p. (2021), doi: 10.12700/APH.18.7.2021.7.12
- [10] J. Békési, A. Nagy: "Combined Vehicle and Driver Scheduling with Fuel Consumption and Parking Constraints: a Case Study", ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 17 : 7 pp. 45-65. , 21 p. (2020), doi: 10.12700/APH.17.7.2020.7.3
- [11] Zs. Cs. Horváth, L. Buics, P. Földesi, B.E.Balassa: "The Role of Hungarian Traffic Rules Education and Examination System – a Quality Function Deployment Approach", ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 19 : 7 pp. 7-26. , 20 p. (2022)
- [12] M. Kazemian, F. Astaraki, A. Mohammadidoost, M. Akbarivarmaziar, M. M. Rad and Sz. Fischer, "Effects of Wheel Surface Defects on Ground Borne Vibration" Acta Polytechnica Hungarica Vol. 19, No. 6, 2022
- [13] G. Kovács, Á. Hőgye-Nagy, Gy. Kurucz: "Human Factor Aspects of Situation Awareness in Autonomous Cars – An Overview of Psychological Approaches", ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 18 : 7 pp. 7-24. , 18 p. (2021), doi: 10.12700/APH.18.7.2021.7.1
- [14] I. Nagy: "Hierarchical Mapping of an Electric Vehicle Sensor and Control Network", ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 18 : 9 pp. 161-180. , 20 p. (2021), doi: 10.12700/APH.18.9.2021.9.10
- [15] T. Péter, A. Hány, F. Szauter, K. Szabó, T. Vadvári, I. Lakatos: "Analysis of Network Traversal and Qualification of the Testing Values of Trajectories", ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 18 : 10 pp. 151-171. , 21 p. (2021), doi: 10.12700/APH.18.10.2021.10.8
- [16] H. Bertold János and S. Tamás, "The role of traffic effects and environmental effects in optimizing the consumption of an electric bus," 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 187-192, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667879.
- [17] S. K. Somogyi and T. Sándor, "Efficiency optimization of electric buses through transmission control," 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 181-186, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667803.

- [18] I. Bendiák and T. Sándor, "Comparison of the propulsion of electric vehicles for passenger cars and buses in terms of efficiency optimization," 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 173-176, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667858.
- [19] I. Bendiák, "Analysis of Shaft Alignment Fault of Asynchronous Motors by Current Signature Method," 2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 2021, pp. 59-64, doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667871.
- [20] Á. Zsuga and A. Dineva, "Review and Conceptual Design of FPGA-based Application for Data-Driven Power Electronic Systems," 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503033.
- [21] Komnos, D.; Broekaert, S.; Grigoratos, T.; Ntziachristos, L.; Fontaras, G. "In Use Determination of Aerodynamic and Rolling Resistances of Heavy-Duty Vehicles". Sustainability 2021, 13, 974. doi: 10.3390/su13020974
- [22] J. Kühlwein, "The Impact of official versus Real-World Road Loads on CO2 emissions and Fuel consumption of European passenger cars", ICCT The International Council on Clean Transportation, May 2016
- [23] C. Larouci, A. Chaibet and M. Boukhniher, "A Vehicle Transmission Simulator Applied to the Automated Driving," VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference, 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2009.5073353
- [24] D. Tokody, J. I. Mezei and Gy. Schuster, "Autonomous Intelligent Vehicles in Europe", 1 January 2016, oai:ojs.ek.szte.hu:article/12720
- [25] K. J. Lin and C. C. Hou, "Implementation of trigonometric custom functions hardware on embedded processor," 2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2013, pp. 155-157, doi: 10.1109/GCCE.2013.6664782.
- [26] Green NCAP Driving resistance test procedure, Version 1.0.0 February 2019
- [27] Parker Global Vehicle Motors GVM Series, Technical Manual, PVD 3668\GB, November 2016