HIBRIDINIO AUTOMOBILIO DEGALŲ SĄNAUDŲ IR ANGLIES DIOKSIDO PRIKLAUSOMYBĖS NUO BATERIJOS TALPOS TYRIMAS SKAITINIO MODELIAVIMO BŪDU

Tadas Vipartas[1, 2], Alfredas Rimkus[1, 2]

[1]*Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija, Antakalnio g. 54, LT-10303 Vilnius*
[2]*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius*

Anotacija. Hibridinių automobilių sistemos, vertinančios eksploatavimo sąlygas ir važiavimo dinamiką, remiasi skirtingais valdymo algoritmais, kurie užtikrina pakankamą varančiąją jėgą, tačiau maksimaliai taupo degalų energiją ir taip mažina teršalų emisijas. Skaitinio modeliavimo programa AVL CRUISE sudarytu hibridinio automobilio skaitiniu modeliu siekiama įvertinti degalų sąnaudų ir anglies dioksido priklausomybę nuo aukštos įtampos baterijos talpos, naudojant pasaulinę suderintą lengvųjų automobilių bandymų procedūrą. Visas važiavimo ciklas yra sudarytas ir keturių greičio etapų – mažo, vidutinio, didelio ir itin didelio, kuriais siekiama imituoti hibridinio automobilio važiavimą miesto, priemiesčio, užmiesčio keliais ir greitkeliu. Gauti rezultatai rodo, kad hibridinio automobilio baterijos talpa turi būti koreguojama, atsižvelgiant į numatomas eksploatacijos sąlygas.

Reikšminiai žodžiai: hibridiniai automobiliai, anglies dioksidas, degalų sąnaudos, aukštos įtampos baterijos talpa, skaitinis modeliavimas, AVL CRUISE.

Įvadas

2019 metais Europos Komisija paskelbė Europos žaliąją kursą (Pietzcker ir kt., 2021), kurio pagrindinis tikslas – didinti Europos Sąjungos (ES) ekonomikos tvarumą ir siekti, kad Europa iki 2030 m. CO_2 emisiją sumažintų bent iki 55 proc., palyginti su 1990 m. (Europos Komisija, 2020), o iki 2050 m. taptų neutrali klimatui, neišmetanti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (Europos Komisija, 2021). Norint pasiekti užsibrėžtų tikslų, ES šalims būtina investuoti į ekologiškas technologijas, mažinant teršalų emisijas (Europos Komisija, 2019).

Hibridinėms transporto priemonėms skiriama vis daugiau dėmesio dėl mažesnio išmetamų teršalų kiekio (Rahman ir kt., 2016), nes esant mažai apkrovai naudojama tik elektrinė pavara, o atsiradus galios poreikiui – paleidžiamas vidaus degimo variklis (VDV) (Un-Noor ir kt., 2017). Hibridinių automobilių sistemos, atsižvelgdamos į eksploatacijos sąlygas ir važiavimo dinamiką, priima skirtingus valdymo sprendimus, būtinus užtikrinti pakankamą varančiąją jėgą, tačiau maksimaliai taupo degalų energiją (Tran ir kt., 2020) ir taip mažina taršą.

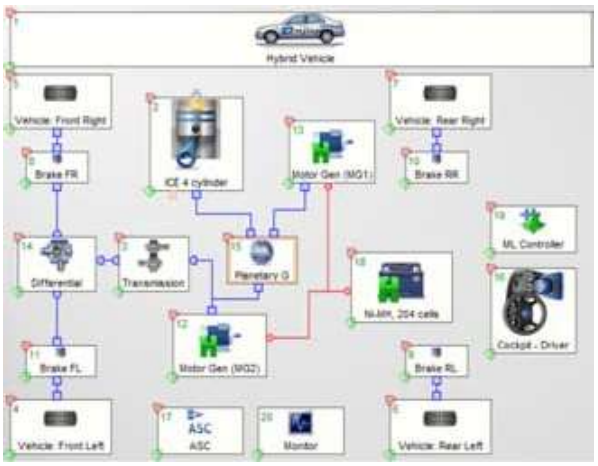
Didžiausias hibridinių automobilių privalumas – efektyvesnis vidaus degimo variklio veikimas didesnės apkrovos zonose. Elektriniam varikliui būdingas didelis sukimo momentas, kai sūkiai maži, todėl yra sumažinamas VDV sukimo momento poreikis (Balcı ir kt., 2021), kuris, kaip ir efektyvumas, labai priklauso nuo sūkių bei apkrovos (Ruan ir kt., 2017). Variklių efektyvumo sumažėjimas nuo greičio yra palyginti mažas, ypač kai sūkiai dideli (Zhang ir kt., 2017). Hibridinių automobilių degalų sąnaudų ir anglies dioksido sumažėjimas yra įvardijamas vienu esminiu privalumu, palyginti su VDV varomais automobiliais (Taymaz ir kt., 2014).

Šio straipsnio tikslas – pritaikius pasaulinę suderintą lengvųjų automobilių bandymų procedūrą, remiantis skaitinio modeliavimo programa AVL CRUISE, nustatyti degalų sąnaudų ir anglies dioksido emisijos pokytį keičiant hibridinio automobilio aukštos įtampos baterijos talpą.

1. Hibridinio automobilio skaitinio modeliavimo metodika

Sudarant skaitinį hibridinio automobilio modelį (1 pav.), parinktas keturių cilindrų, 2 494 cm^3 darbinio tūrio kibirkštinio uždegimo variklis (2), kurio maksimali galia – 114 kW, esant 5 700 min^{-1}. Maksimalus sukimo momentas – 206 Nm, esant 4 400– 4 800 min^{-1}. (Automobilio prototipas – TOYOTA RAV4 HV, variklio kodas – 2AR-FXE).

Hibridinę pavarą sudaro du nuolatinės srovės elektriniai varikliai: 1 variklis-generatorius (13), 2 variklis-generatorius (12) ir aukštos įtampos baterija (18). 2 variklis-generatorius pasiekia maksimalią 105 kW ga-



1 pav. Hibridinio automobilio skaitinio modelio schema
Šaltinis: sudaryta autorių.

lią ir maksimalų 270 Nm sukimo momentą, kurį per transmisiją (3) ir diferencialą (14) perduoda į priekinės ašies varančiuosius ratus. 1 variklis-generatorius modelyje atlieka vidaus degimo variklio paleidimo ir aukštos įtampos baterijos įkrovimo funkcijas. Visos hibridinės sistemos, taip pat ir kibirkštinio uždegimo variklio, maksimali galia yra 147 kW.

Aukštos įtampos nikelio-metalo hidrido baterija sudaryta iš 34 modulių, kiekviename iš jų yra po 6 elementus (iš viso 204 vnt.), kurie elektrinėje grandinėje sujungti nuosekliai. Vieno elemento nominali įtampa yra 1,2 V, bendra baterijos nominali įtampa – 244,8 V, talpa – 6,5 Ah. Aukštos įtampos baterijos didžiausia įkrovimo įtampa sudarytame modelyje yra 300 V, iškrovimo – 220 V. Bendra aukštos įtampos baterijos masė – ~30,6 kg (vieno elemento masė – ~150 g).

Hibridinio automobilio skaitiniame modelyje yra naudojama antipraslydimo kontrolės sistema (17) (angl. *Anti Slip Control* – ASC), kuri užtikrina varančiųjų ratų sukibimą su važiuojamąja kelio danga ir neleidžia jiems praslysti, kai automobilis greitėja. Stabdymo ir greitėjimo charakteristikos pateiktos automobilio salono sistemoje (16). Rodiklių stebėsenai ir gautų rezultatų analizei naudojama duomenų surinkimo ir atvaizdavimo sistema (20).

Siekiant, kad modelyje sudarytas važiavimo ciklas būtų kuo artimesnis įprastoms automobilio važiavimo sąlygoms kelyje, yra taikoma pasaulinė suderinta lengvųjų automobilių bandymų procedūra, kurios suminė važiavimo ciklo trukmė – 30 minučių (1 800 s), nuvažiuotas atstumas – 23,25 km. Modelyje visą važiavimo ciklą (2 pav.) sudaro keturi etapai:

- mažo greičio (vidutinis greitis – 25,0 km/h, maksimalus – 56,5 km/h, važiavimo trukmė –589 s, sustojimo trukmė – 156 s),
- vidutinio greičio (vidutinis greitis – 44,4 km/h, maksimalus – 76,6 km/h, važiavimo trukmė – 433 s, sustojimo trukmė – 48 s),
- didelio greičio (vidutinis greitis – 60,5 km/h, maksimalus – 97,4 km/h, važiavimo trukmė – 455 s, sustojimo trukmė – 31 s),
- itin didelio greičio (vidutinis greitis – 93,7 km/h, maksimalus – 131,3 km/h, važiavimo trukmė – 323 s, sustojimo trukmė – 7 s).

Šiais važiavimo ciklo etapais yra imituojamas hibridinio automobilio važiavimas miesto, priemiesčio, užmiesčio keliais ir greitkeliu.

2. Skaitinis modeliavimas AVL CRUISE programa: pradinių duomenų parinkimas ir gautų rezultatų analizė

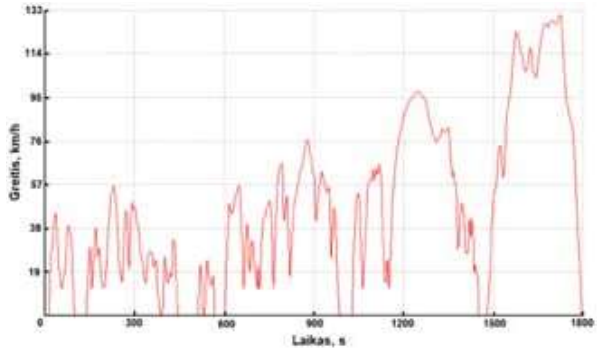
Siekiant įvertinti degalų sąnaudų ir CO_2 pokytį, sudarytame hibridinio automobilio modelyje yra analizuojami trys skirtingi atvejai keičiant aukštos įtampos nikelio-metalo hidrido baterijos talpą (6,5 Ah, 13 Ah, 19,5 Ah), kurios pradinis įkrovimo lygis – 100 proc.

Didinant baterijos talpą, didinama bendra hibridinio automobilio masė. Nominali įtampa nesikeičia (244,8 V), nes papildomi elementai elektrinėje grandinėje jungiami lygiagrečiai. Norint užtikrinti aukštos įtampos baterijos ilgaamžiškumą, maksimali leistina įkrovimo įtampa modelyje apribota iki 300 V, minimali – 220 V.

Sudaryta vieno baterijos elemento įkrovimo charakteristika (3 pav.), nurodant įkrovimo lygį ir įtampos reikšmes: minimali įtampa – 1,08 V, nominali – 1,2 V, maksimali – 1,47 V. Elemento iškrovimo charakteristika sudaryta pagal tokią pačią įtampos priklausomybę nuo iškrovimo lygio.

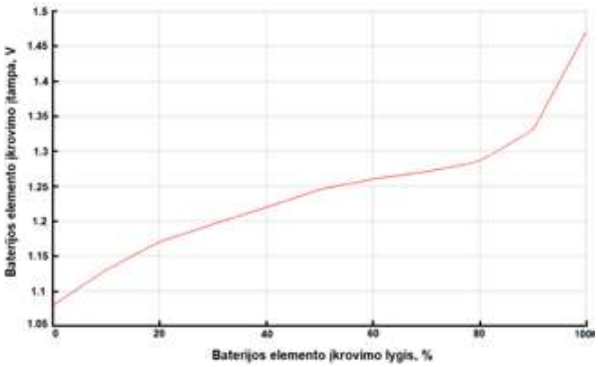
Važiavimo ciklas pagal pasaulinę suderintą lengvųjų automobilių bandymų procedūrą modelyje yra sudarytas iš keturių etapų: važiuojantis mažu greičiu hibridinis automobilis sustoja ir stovi (greitis = 0 km/h) 26,5 proc. šiam etapui skirto važiavimo laiko, vidutiniu – 11,1 proc., dideliu – 6,8 proc. ir itin dideliu – 2,2 proc. Tokiu būdu yra imituojamas šalto kibirkštinio uždegimo variklio paleidimo režimas.

Hibridinio automobilio važiavimo ciklo bandymai atlikti parinkus 6,5 Ah aukštos įtampos baterijos talpą, naudojant 95 oktaninio skaičiaus benziną, kurio šilumingumas – 43,5 MJ/kg. Vidutinės degalų masės sąnaudos yra 7,42 kg/h (4 pav.). Vertinant kiekvieną važiavimo ciklo etapą, mažiausios vidutinės sąnau-



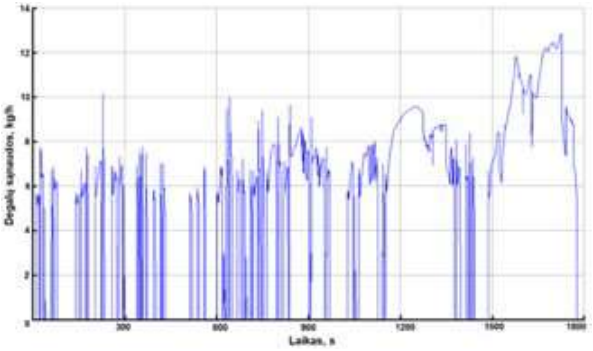
2 pav. Hibridinio automobilio skaitinio modelio važiavimo ciklas pagal pasaulinę suderintą lengvųjų automobilių bandymų procedūrą

Šaltinis: sudaryta autorių.

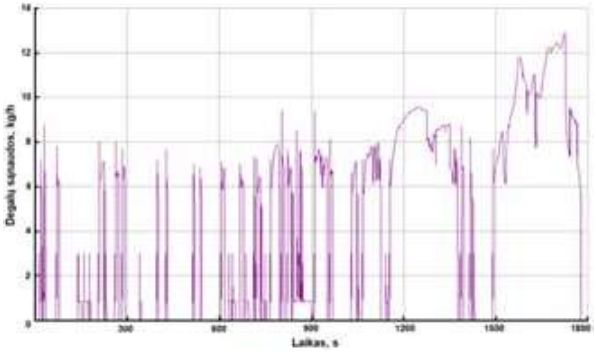


3 pav. Aukštos įtampos baterijos elemento įkrovimo charakteristika

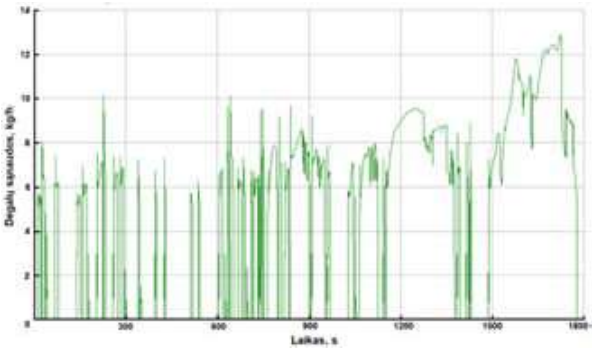
Šaltinis: sudaryta autorių.



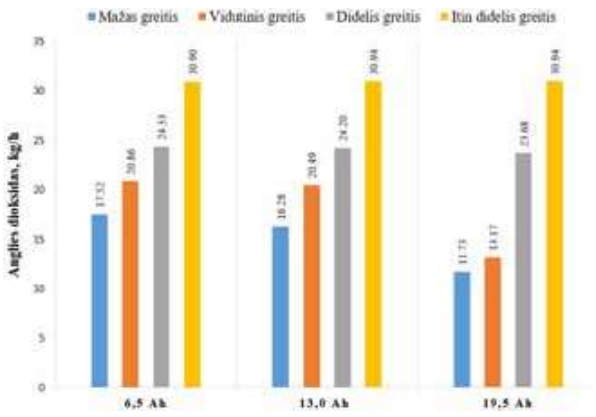
4 pav. Degalų sąnaudų pokytis pagal pasaulinę suderintą lengvųjų automobilių bandymų procedūrą. Baterijos talpa – 6,5 Ah
Šaltinis: sudaryta autorių.



6 pav. Degalų sąnaudų pokytis pagal pasaulinę suderintą lengvųjų automobilių bandymų procedūrą. Baterijos talpa – 19,5 Ah
Šaltinis: sudaryta autorių.



5 pav. Degalų sąnaudų pokytis pagal pasaulinę suderintą lengvųjų automobilių bandymų procedūrą. Baterijos talpa – 13,0 Ah
Šaltinis: sudaryta autorių.



7 pav. Anglies dioksido emisijos priklausomybė nuo aukštos įtampos baterijos talpos
Šaltinis: sudaryta autorių.

dos, kai automobilis važiuoja mažu greičiu – 5,56 kg/h (miesto režimu). Didžiausios vidutinės sąnaudos fiksuojamos, kai automobilis važiuoja itin dideliu greičiu – 9,80 kg/h.

Didinant hibridinio automobilio aukštos įtampos baterijos talpą iki 13,0 Ah, matomas degalų sąnaudų sumažėjimas (5 pav.). Vidaus degimo variklis yra paleidžiamas rečiau ir dirba trumpesnį laiką. Mažiausios vidutinės sąnaudos, kai automobilis važiuoja mažu greičiu – 5,16 kg/h, didžiausios vidutinės sąnaudos – itin dideliu greičiu – 9,81 kg/h.

Didžiausias vidutinis degalų sumažėjimas pasiekiamas, kai baterijos talpa padidinama iki 19,5 Ah ir automobilis važiuoja mažu greičiu – 3,72 kg/h (6 pav.). Daugiausia degalų vidaus degimo variklis sunaudoja, kai automobilis važiuoja itin dideliu greičiu – 9,81 kg/h.

Hibridinio automobilio išmetamas anglies dioksido kiekis tiesiogiai priklauso nuo sunaudojamų degalų masės. Pastebima tendencija, kad didinant aukštos įtampos baterijos talpą (6,5 Ah iki 13 Ah ir 19,5 Ah) anglies dioksido sumažėja, kai automobilis važiuoja tik mažu ir vidutiniu greičiu dėl sukaupto didesnio elektros energijos kiekio baterijose (7 pav.).

Dideliu ir itin dideliu greičiu važiuojančio automobilio baterijos talpa įtakos emisijoms neturi, nes, atsiradus didesniam galios poreikiui, užvedamas vidaus degimo variklis. Važiuojant itin dideliu greičiu ir padidinus baterijos talpą iki 19,5 Ah, CO_2 kiekis šiek tiek padidėja (~1,3 %) dėl padidėjusios automobilio masės.

Išvados

Hibridinio automobilio veikimo skaitinis modeliavimas atliktas taikant pasaulinę suderintą lengvųjų automobilių bandymų procedūrą, kuria siekiama imituoti automobilio važiavimą miesto, priemiesčio, užmiesčio keliais ir greitkeliu. Nustatytos šios energetinių ir ekologinių rodiklių pokyčio tendencijos keičiant hibridinio automobilio aukštos įtampos baterijos talpą:

1. Didinant hibridinio automobilio baterijos talpą nuo 6,5 Ah iki 19,5 Ah, baterijos masė išauga nuo ~31 kg iki ~93 kg ir tai padidina automobilio riedėjimo varžą bei inerciją.

2. Miesto sąlygomis mažu (~25,0 km/h) greičiu važiuojančio hibridinio automobilio degalų sąnaudos sumažėja ~33 proc., nes padidinus baterijos talpą (nuo 6,5 Ah iki 19,5 Ah) daugiau išnaudojama regeneracinio stabdymo metu sukaupta elektros energija, o vidaus degimo variklis yra užvedamas rečiau ir dirba trumpesnį laiką.

3. Didinat vidutinį hibridinio automobilio greitį nuo mažo (~25,0 km/h) iki itin didelio greitkelio greičio (~93,7 km/h), vidutinės degalų sąnaudos auga.

Įtakos neturi ir baterijos talpa, nes, didėjant energijos poreikiui įveikti oro pasipriešinimą, mažėja energijos dalis, gaunama iš elektros variklio, ir intensyviau naudojamas vidaus degimo variklis.

4. Važiuojant greitkeliu itin dideliu (~93,7 km/h) greičiu, didesnės talpos baterija turi labai mažą įtaką degalų sąnaudoms, nes stabdymo metu regeneruota elektros energija naudojama santykinai mažiau, palyginti su degalų energija, o energijos poreikis įveikti riedėjimo varžą papildomai išauga dėl sunkesnės baterijos.

5. Hibridiniu automobiliu važiuojant mieste mažu bei vidutiniu greičiu, parinkus optimalią baterijos talpą ir efektyviai išnaudojant stabdymo energijos regeneraciją, galima gerokai (~33 %) sumažinti CO_2 emisiją. Skaitiniu modeliavimu nustatyta, kad itin dideliu greičiu greitkeliu važiuojančio automobilio didesnės talpos baterija CO_2 emisijos ne tik nemažina, bet gali ir nedaug didinti.

Padėka

Autoriai dėkoja AVL kompanijai už galimybę pritaikyti transporto priemonių sistemų ir transmisijos skaitinio modeliavimo programą AVL CRUISE. Ši programa buvo panaudota hibridinio automobilio degalų sąnaudų ir anglies dioksido priklausomybei nuo baterijos talpos tirti ir rezultatams pristatyti. Tarp Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos fakulteto ir „AVL Advanced Simulation Technologies“ sudaryta bendradarbiavimo sutartis.

Literatūra

Balcı, Ö., Karagöz, Y., Gezer, O., Kale, S., Köten, H., Pusat, S. ir Yüksek, L. (2021). Numerical and experimental investigation of fuel consumption and CO_2 emission performance for a parallel hybrid vehicle. *Alexandria Engineering Journal, 60*, 3649–3667. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.02.025.

European Commission, Joint Research Centre, Alberti, V., Caperna, G., Colagrossi, M. ir kt. (2021). *Tracking EU citizens' interest in EC priorities using online search data: the European Green Deal, Publications Office*. Prieiga per internetą: https://data.europa.eu/doi/10.2760/18216.

European Commission. (2020). Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/2030-climate-target-plan_en.

European Commission. (2019). *2050 long-term strategy.* Prieiga per internetą: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en.

Pietzcker, R. C., Osorio, S. ir Rodrigues, R. (2021). Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector. *Applied Energy, 293*, 116914. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116914.

Rahman, I., Vasant, P. M., Singh, B. S. M., Abdullah-Al-Wadud, M. ir Adnan, N. (2016). Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58*, 1039–1047. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.353.

Ruan, J., Walker, P. D., Zhang, N. ir Wu, J. (2017). An investigation of hybrid energy storage system in multi-speed electric vehicle. *Energy, 140*, 291–306. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.119.

Taymaz, I. ir Benli, M. (2014). Emissions and fuel economy for a hybrid vehicle. *Fuel, 115*, 812–817. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.045.

Tran, D.-D., Vafaeipour, M., El Baghdadi, M., Barrero, R., Van Mierlo, J. ir Hegazy, O. (2020). Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119*, 109596. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109596.

Un-Noor, F., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., Mollah, M. ir Hossain, E. (2017). A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. *Energies, 10*, 1217. https://doi.org/10.3390/en10081217.

Zhang, Y., Chu, L., Fu, Z., Xu, N., Guo, C., Zhang, X., Chen, Z. ir Wang, P. (2017). Optimal energy management strategy for parallel plug-in hybrid electric vehicle based on driving behavior analysis and real time traffic information prediction. *Mechatronics, 46*, 177–192. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.008.

DEPENDENCE OF HYBRID CAR FUEL CONSUMPTION AND CARBON DIOXIDE ON BATTERY CAPACITY USING NUMERICAL MODELING METHOD

Tadas Vipartas[1, 2], Alfredas Rimkus[1, 2]

[1]*Vilnius College of Technologies and Design*
[2]*Vilnius Gediminas Technical University*

Summary. Hybrid car systems that evaluate operating conditions and driving dynamics are based on different control algorithms that ensure sufficient driving force, but maximizes fuel energy savings and thus, reduce pollutant emissions. Numerical simulation program AVL Cruise's model of a hybrid car aims to evaluate the dependence of fuel consumption and carbon dioxide on the capacity of a high-voltage battery using the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure. The entire driving cycle is also composed of four speed stages – low, medium, high and ultra-high, which aim is to simulate the driving of a hybrid car in the city, suburbs, on country roads and the highway. The obtained results show that the battery capacity of the hybrid car must be adjusted depending on the expected operating conditions.

Key words: hybrid cars, carbon dioxide, fuel consumption, capacity of high voltage battery, numerical modeling, *AVL Cruise*.