



18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos

TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,

vykusios 2015 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'

TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2015, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 18-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»

ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 6 мая 2015 г., Вильнюс, Литва

ALTERNATYVIŲ ENERGIJOS ŠALTINIŲ PANAUDOJIMO TRAUKOS RIEDMENIMS GALIMYBIŲ ANALIZĖ

Darius Vasiliauskas

Geležinkelių transporto katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223

El. paštas: darius.vasiliauskas@stud.vgtu.lt

Santrauka. Šiame darbe nagrinėjami energijos šaltiniai naudojami traukos riedmenų parke ir analizuojamos alternatyvių energijos šaltinių (akumuliatorių baterijų, superkondensatorių, kuro elementų, fotovoltinių įrenginių) pritaikymo galimybės. Analizuojami alternatyvių energijos šaltinių privalumai ir trūkumai ir jų naudojimo geležinkelių transporto infrastruktūroje aspektai. Atlikus galimų naudoti traukos riedmenis pagrindinių alternatyvių energijos šaltinių analizę, pasiūlyta Lietuvos riedmenų parke eksploatuoti traukos riedmenis su akumuliatorių baterijomis. Tyrimui atlikti pasirinkta elektrinė transporto priemonė su skirtingomis akumuliatorių baterijomis (ličio jonų, ličio oro, ličio sieros, cinko oro ir ZEBRA). Atlikus elektrinių transporto priemonių baterijų parametrų priklausomybės nuo ridos tyrimą, nustatyta skirtingų tipų baterijų mažiausia baterijos masė, mažiausias energijos suvartojimas ir mažiausios išlaidos.

Reikšminiai žodžiai: alternatyvūs energijos šaltiniai, traukos riedmenys, kuro elementai, superkondensatoriai, saulės elementai, akumuliatorių baterijos.

Įvadas

Didžiausią įtaką aplinkos oro kokybei daro mobiliųjų taršos šaltinių emisijos, kurios sudaro 65 % visos oro taršos. Pagrindiniai aplinkos orą teršiantys emisijų šaltiniai geležinkelių transporte yra dyzeliniai lokomotyvai ir dyzeliniai traukiniai (Lingaitis, Katkus 2000). Dyzeliniai traukiniai į aplinkos orą išmeta anglies dioksido – 92,1 g/keleiviui km, anglies monoksido – 0,62 g/keleiviui km, azoto oksidų – 0,88 g/keleiviui km, angliavandenilių – 0,26 g/keleiviui km, o tuo tarpu elektriniai: anglies dioksido 68,4 g/keleiviui km, anglies monoksido – 0,03 g/keleiviui km, azoto oksidų – 0,32 g/keleiviui km, angliavandenilių – 0,001 g/keleiviui km (Harper 1991). Todėl aplinkos tarša angliavandeniliais iš dyzelinių traukinių yra apie 260 kartų, o anglies monoksidu apie 20 kartų didesnė nei iš elektrinių. Tuo tarpu Lietuvos geležinkelio parke daugiausiai dyzelinių lokomotyvų. Dyzelinių lokomotyvai ne tik teršia aplinką, bet ir pasižymi didelėmis degalų sąnaudomis, be to, jie kelia triukšmą.

Lietuvoje ir daugelyje kitų pasaulio šalių pagrindiniu energijos šaltiniu traukos riedmenims yra naftos produktai. Tačiau žinoma, kad naftos atsargos sparčiai senka, o iš jos pagaminama energija yra brangi. Dėl mažėjančių iškastinio kuro atsargų pasaulyje imta ieškoti alternatyvių iškastiniam kurui energijos šaltinių bei atliekami alterna-

tyvių energijos šaltinių panaudojimo geležinkelių transporto sektoriuje tyrimai.

Elektriniai traukiniai mažiau teršia aplinką, yra greitesni, galingesni nei dyzeliniai, todėl vis labiau populiarėja. Tačiau jiems reikia tiesioginio elektros tiekimo iš jėgainių, o tai stabdo geležinkelio linijų elektrifikaciją – ne visada ekonomiškai apsimoka tiesti atskirą maitinimo liniją. Elektriniai lokomotyvai nėra pats geriausias sprendimas geležinkelių transporto infrastruktūroje. Todėl reikia ieškoti naujų energijos šaltinių panaudojimo galimybių.

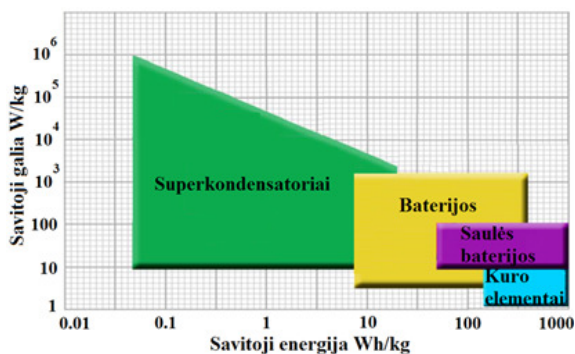
Šiame darbe atlikta alternatyvių energijos šaltinių panaudojimo geležinkelių transporto infrastruktūroje galimybių analizė, išnagrinėti skirtingų tipų akumuliatorių baterijų ypatumai ir jų pritaikymo traukos riedmenų parke aspektai.

Alternatyvių energijos šaltinių analizė

Be įprastų energijos šaltinių, naudojamų geležinkelių transporte, gali būti taikomi ir alternatyvūs energijos šaltiniai, tokie kaip akumuliatorių baterijos, kuro elementai, superkondensatoriai, fotovoltiniai įrenginiai ar kiti alternatyvūs energijos šaltiniai.

Keleto alternatyvių energijos šaltinių, kuriuos galima naudoti traukos riedmenims, palyginimas pagal savi-

tąją galią ir energiją pateiktas 1 paveiksle. Matome, kad didžiausia savitąja energija pasižymi kuro elementai, o didžiausia savitąja galia – superkondensatoriai.



1 pav. Skirtingų energijos šaltinių savitosios galios ir energijos palyginimas

Superkondensatoriai gali būti naudojami geležinkelių transportui kaip alternatyva iškastiniam kurui. Svarbiausi superkondensatorių pranašumai prieš akumuliatorių baterijas: didesnė savitoji galia (>500 W/kg), labai geras grįžtamumas (90–95 %) (Grečys *et al.* 2006), ilgas naudojimo laikas (>500 000 ciklų) (Conway 1999; (Nishino 1996). Superkondensatorių išvystoma energija yra mažiausia, o išsikrovimo trukmė trumpiausia lyginant su kitais energijos kaupikliais. Pagrindinis superkondensatorių trūkumas yra mažesnė energijos kiekio atsarga lyginant su akumuliatorių baterijomis. Superkondensatoriuose savitoji energija yra nedidelė, todėl plataus tiesioginio pritaikymo (ir geležinkelių transporte) jie dar neturi.

Kuro elementas yra elektrocheminis įrenginys, kuris, naudodamas vandenilį ir deguonį, gamina elektros energiją t. y. cheminę energiją paverčia elektros energija, todėl kuro elementai yra vienas iš alternatyvių energijos šaltinių, galinčių tiekti energiją geležinkelių transporto priemonėms. Pagrindinis kuro elementų pranašumas yra jų efektyvumas – su tuo pačiu degalų kiekiu galima pagaminti kur kas daugiau energijos (elektros ir šilumos) nei naudojant degalus. Kuro elementų efektyvumas (naudingumas) gali siekti iki 70–80 %, lyginant su tradicinių elektros gamybos būdų efektyvumu 30–40 %. Svarbiausios šiuolaikinių kuro elementų rūšys yra: fosforo rūgšties, šarminis, lydytų karbonatų, polimerinių elektrolitų, tiesioginio metanolio, kietųjų oksidų (Burke 2007). Traukos riedmuo su kuro elementais yra „nulinės taršos“ transporto priemonė, nes kaip šalutinį produktą išskiria vandenį, jei vandenilis naudojamas kaip degalai (Wee 2010; Garcia *et al.* 2010). Traukos riedmuo su kuro elementais turi didesnę naudingąją galią, didesnę energijos atsargą, didesnę energijos bei galios tankį ir spartesnę įkrovimą, lyginant su traukos riedmeniu turinčiu baterijas, tačiau yra triukšmingesnės transporto priemonės nei akumuliatorinės transporto priemonės. Tačiau vis dar didelė medžiagų, iš kurių gaminami kuro elementai, kaina. Pagrindinis trūkumas susijęs su kuro elementų naudojimu: vandenilio gamybos, sandėliavimo ir transportavimo proceso sudėtingumas. Pasaulyje neišvystyta vandenilio degalinių infrastruktūra, todėl vandenilio kaip kuro naudojimas

traukos riedmenims kol kas nėra galimas. Išsprendus šias problemas, kuro elementų naudojimas galėtų tapti sprendimu sumažinsiančiu senkančio iškastinio kuro atsargas geležinkelių transporto sektoriuje.

Vienas iš galimų energijos panaudojimo alternatyvių būdų geležinkelių transporto sektoriuje galėtų būti akumuliatorių baterijos traukos riedmenyse. Rinkoje stebima akumuliatorių baterijų įvairovė: ličio jonų, ličio sieros, ličio oro, cinko oro, natrio ir dar daugelis kitų. Akumuliatorių baterijos pasižymi viso ciklo ilgaamžiškumu, jų įkrovų/iškrovų efektyvumas siekia apie 80–90 % (švino rūgštinų ir NiCd baterijų efektyvumas yra mažiausias (apie 60–75 %)). (Thounthong *et al.* 2009). Nors akumuliatorių baterijos pagal veikimo trukmę ir nusileidžia superkondensatoriams, tačiau jų veikimo trukmė pakankamai ilga (nuo 5 iki 15 metų). Šiuo metu ličio jonų baterijos sudaro didžiausią elektrinių transporto priemonių baterijų rinkos dalį. ZEBRA (natrio nikelio chlorido) baterijos perspektyvoje pralenks ličio jonų baterijas savo mažesne kaina, saugumu ir tarnavimo trukme, tuo tarpu ličio sieros ir ličio oro baterijos išsiskiria iš kitų baterijų rūšių didele savitąja energija, nors ličio oro baterijos gali pasiekti labai didelę savitąją energiją, tačiau jos yra dar tik kūrimo ir bandymų stadijose (Zhang *et al.* 2010; Kallhammer *et al.* 2007). Pritaikius baterijas traukos riedmenyse išvengtume elektros kontaktinio tinklo tiesimo ir sutaupyti, tačiau reikia nepamiršti, kad akumuliatorių baterijas reikia krauti, o jų krovimas nėra spartus procesas. Akumuliatorių baterijas galima būtų įkrauti nuo kontaktinio tinklo baterijų įkrovimo stotelėse ar bevieliu būdu. Naudojant baterijas, elektra varomas traukos riedmuo aplinką teršia mažiau lyginant su tradiciniu geležinkelių transportu su vidaus degimo varikliu. Tokių traukos riedmenų naudojimas leistų išspėsti ne tik oro taršos, bet ir triukšmo problemą, nes elektrinis transportas yra žymiai tylėsnis.

Kitas svarbus atsinaujinančios energijos šaltinis yra saulės elementai (fotovoltiniai įrenginiai), kurie geba paversti laisvą iš saulės gaunamą energiją elektros energija beveik be teršalų išmetimo į aplinką (Barrie *et al.* 2010). Saulės elementai skirstomi į tris pagrindines kategorijas: silicio monokristalai, silicio polikristalai ir amorfinis silicis (Markvart 2001). Monokristalinio silicio saulės elementų efektyvumas yra didžiausias lyginant su polikristalinio silicio ir amorfinio silicio saulės elementais, tačiau jie yra brangiausi. Metinis Saulės energijos kiekis, krentantis į 1 m² ploto paviršių, Lietuvoje didesnis nei 1000 kWh (Šūri *et al.* 2005), todėl saulės elementų paplitimas Lietuvoje auga, tačiau nėra paplitęs geležinkelių transporto sektoriuje, nes ir daug sumontuotų saulės elementų išvystomos galios nepakaktų traukos riedmenims judėti. Saulės elementais gali būti dengiami traukos riedmenų stogai, o pagaminta energija naudojama traukiniais važiuojančių keleivių poreikiams tenkinti (pvz., apšvietimui, kondicionierių veikimui, šildymui). Taip pat fotovoltinius įrenginius galima panaudoti traukos riedmenų akumuliatorių baterijų pakrovimo stotelėse.

Išnagrinėjus pagrindinių alternatyvių energijos šaltinių privalumus ir trūkumus ir jų naudojimo geležinkelių transporte galimybes, tikslinga traukos riedmenų parke

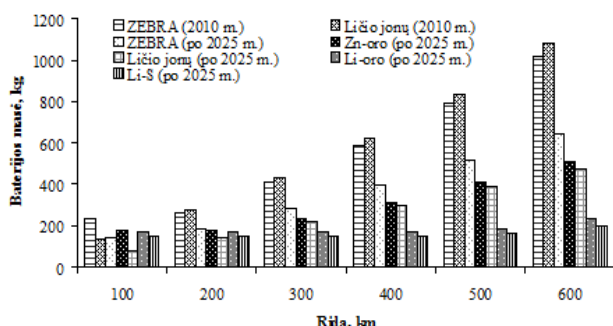
Lietuvoje naudoti traukos riedmenis su akumuliatorių baterijomis, todėl kaip alternatyvus energijos šaltinis plačiau bus nagrinėjama akumuliatorių baterijos ir jų panaudojimo traukos riedmenyse galimybės.

Traukos riedmenyse naudotinų akumuliatorių baterijų tyrimo rezultatai

Analizei pasirinktos penkių rūšių (ličio jonų, ZEBRA, Zn-oro, Li-oro, Li-S) akumuliatorių baterijos, vertinant rinkoje esančių baterijų (2010 m.) techninius parametrus su ateityje rinkoje pasirodysiančiomis baterijomis (po 2025 m.) (Gerssen-Gondelach *et al.* 2012).

Tyrimui pasirinkta 1,12 t masės elektrinė transporto priemonė, vertinant skirtingų tipų baterijų masės, energijos poreikio, išlaidų priklausomybes nuo ridos.

Analizuojama elektrinės transporto priemonės skirtingų baterijų masės priklausomybė nuo ridos (2 pav.).



2 pav. Baterijos masė skirtingoms ridoms

Baterijos masės priklausomybę nuo ridos galima aproksimuoti eksponentine funkcija:

$$M(R) = M_0 e^{\frac{R}{R_0}} + C, \quad (1)$$

čia: M – baterijos masė, kg; R – rida, km; M_0 ir C – du parametrai, kurių suma atitinka baterijos masę, kai rida $R = 0$: $M(0) = M_0 + C$; R_0 – rida, kuriai reikalinga baterijos masė $M = eM_0 + C$.

1 lentelė. Įvairius baterijų tipus aproksimuojantys parametrai: M_0 , R_0 ir C

Baterijos tipas	M_0 , kg	R_0 , km	C , kg
Li-S (po 2025 m.)	$3,19 \cdot 10^{-3}$	62,2	150
Li-oro (po 2025 m.)	$1,18 \cdot 10^{-2}$	70,2	169
Ličio jonų (po 2025 m.)	$7,40 \cdot 10^2$	1230	-729
Zn-oro (po 2025 m.)	$8,01 \cdot 10^1$	342	50,0
ZEBRA (po 2025 m.)	$3,25 \cdot 10^2$	583	-259
Ličio jonų (2010 m.)	$7,24 \cdot 10^2$	661	-707
ZEBRA (2010 m.)	$2,68 \cdot 10^2$	407	-140

Iš (1) lygties ir 1 lentelėje gautų parametru reikšmių galima nustatyti mažiausią baterijos masę, \bar{M} , reikalingą 1000 km ridai.

Didžiausia elektrinės transporto priemonės rida \bar{R} (su 1000 kg masės baterija) nustatyta logaritmuojant (1) lygtį:

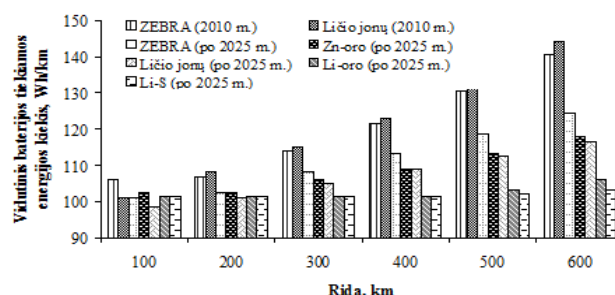
$$\bar{R} = R_0 \ln \left(\frac{M - C}{M_0} \right). \quad (2)$$

Gautos parametru vertės pateiktos 2 lentelėje. Iš šioje lentelėje pateiktų duomenų matome, kad mažiausia baterijos masė \bar{M} ($0,154 \cdot 10^4$ kg), reikalinga nuvažiuoti 1000 km ridą, pasižymės Zn-oro (po 2025 m.) baterijos, o didžiausia rida \bar{R} (1043,6 km) su 1000 kg masės baterija – ličio jonų (po 2025 m.) baterijos. Gauti tyrimo duomenys rodo, kad Li-S (po 2025 m.) baterijos bus daugiau nei 20 kartų (20,1) sunkesnės už Zn-oro (po 2025 m.) baterijas. Tuo tarpu, ridos atžvilgiu, projektuojamos ličio jonų (po 2025 m.) baterijos bus beveik du kartus pranašesnės (1,84) už esančias rinkoje ličio jonų (2010 m.) baterijas.

2 lentelė. Mažiausia baterijos masė \bar{M} , reikalinga 1000 km ridai ir didžiausia elektrinės transporto priemonės rida \bar{R} su 1000 kg masės baterija

Baterijos tipas	\bar{M} $\cdot 10^4$, kg	\bar{R} , km	$\frac{\bar{M}}{M_{\min}}$	$\frac{\bar{R}}{R_{\min}}$
Li-S (po 2025 m.)	3,09	775,8	20,1	1,37
Li-oro (po 2025 m.)	1,84	783,3	11,9	1,39
Ličio jonų (po 2025 m.)	0,939	1043,6	6,10	1,84
Zn-oro (po 2025 m.)	0,154	846,2	1,00	1,49
ZEBRA (po 2025 m.)	0,155	789,3	1,01	1,39
Ličio jonų (2010 m.)	0,258	566,4	1,68	1,00
ZEBRA (2010 m.)	0,299	589,4	1,64	1,04

Tyrimo metu vertinta elektrinės transporto priemonės energijos poreikio priklausomybė nuo ridos (3 pav.).



3 pav. Elektrinės transporto priemonės vidutinės baterijos tiekiamos energijos poreikiai skirtingoms ridoms

Tyrimo metu nustatytas mažiausias baterijos tiekiamos energijos kiekis \bar{E} , reikalingas elektrinei transporto priemonei nuvažiuoti 1000 km atstumą ir didžiausia elektrinės transporto priemonės rida \bar{R} , suvartojant 1 kWh/km energijos (3 lentelė).

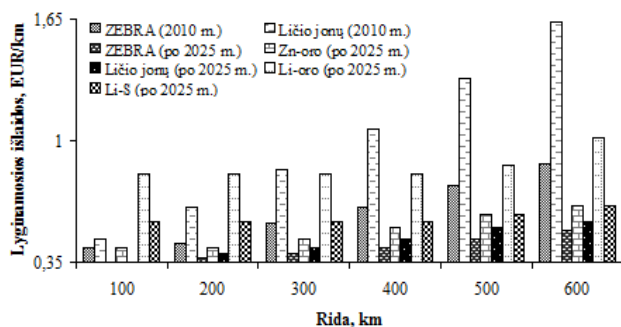
Nustatyta, kad mažiausiu baterijos tiekiamu energijos kiekiu \bar{E} ($0,135$ kWh/km), reikalingu nuvažiuoti 1000 km atstumą, pasižymės ličio jonų (po 2025 m.) baterijos, o suvartojant 1 kWh/km energijos didžiausia rida \bar{R} (5407 km) pasižymės ličio jonų (po 2025 m.) baterijos (3 lentelė). Tyrimo rezultatai rodo, kad mažiausiu baterijos tiekiamos energijos kiekiu pasižymės Li-jonų (po 2025 m.) baterijos, kuris bus daugiau nei 5 kartus mažesnis nei Li-S (po 2025 m.) baterijų. Elektrinė transporto priemonė galės

nuvažiuoti didesnę atstumą su projektuojamomis ličio jonų baterijomis, lyginant jas su jau rinkoje esančiomis tos pačios rūšies baterijomis, o tai rodo, kad šios baterijos ateityje bus apie 2,3 karto pranašesnės už šiuo metu rinkoje esančias ličio jonų baterijas (2010 m.).

3 lentelė. Mažiausia energija \bar{E} reikalinga elektrinei transporto priemonei nuvažiuoti 1000 km ir didžiausia elektrinės transporto priemonės rida \bar{R} suvartojant 1 kWh/km energijos

Baterijos tipas	\bar{E} , kWh/km	\bar{R} , km	$\frac{\bar{E}}{E_{\min}}$	$\frac{\bar{R}}{R_{\min}}$
Li-S (po 2025 m.)	0,709	1027	5,25	1,00
Li-oro (po 2025 m.)	0,623	1046	4,61	1,02
Ličio jonų (po 2025 m.)	0,135	5407	1,00	5,26
Zn-oro (po 2025 m.)	0,162	1972	1,20	1,92
ZEBRA (po 2025 m.)	0,164	2541	1,21	2,47
Ličio jonų (2010 m.)	0,207	2350	1,53	2,29
ZEBRA (2010 m.)	0,227	1762	1,68	1,72

Atliktas elektrinių transporto priemonių su skirtingomis akumuliatorių baterijomis lyginamųjų išlaidų palyginimas (4 pav.).



4 pav. Lyginamosios išlaidos skirtingoms ridoms, naudojant įvairias akumuliatorių baterijas

Tyrimo metu nustatyta, kad mažiausiomis lyginamosios išlaidomis \bar{S} (0,809 EUR/km), kurios reikalingos elektrinei transporto priemonei nuvažiuoti 1000 km ridą ir didžiausia rida \bar{R} (3544 km) su 5 EUR/km išlaidomis pasižymės ličio jonų (po 2025 m.) baterijos (4 lentelė). Tyrimo metu elektros kaina buvo 0,10 EUR/kWh.

4 lentelė. Mažiausios lyginamosios išlaidos \bar{S} , reikalingos nuvažiuoti 1000 km atstumą ir didžiausia elektrinės transporto priemonės rida \bar{R} su 5 EUR/km lyginamosioms išlaidoms

Baterijos tipas	\bar{S} , EUR/km	\bar{R} , km	$\frac{\bar{S}}{S_{\min}}$	$\frac{\bar{R}}{R_{\min}}$
Li-S (po 2025 m.)	7,00	965	8,65	1,17
Li-oro (po 2025 m.)	49,1	822	60,7	1,00
Ličio jonų (po 2025 m.)	0,809	3544	1,00	4,31
Zn-oro (po 2025 m.)	1,21	1689	1,50	2,05
ZEBRA (po 2025 m.)	0,915	1840	1,13	2,24
Ličio jonų (2010 m.)	3,40	1233	4,20	1,50
ZEBRA (2010 m.)	1,78	1552	2,20	1,89

Mažiausiomis lyginamosiomis išlaidomis pasižymės Li-oro (po 2025 m.) baterijos, kurių lyginamosios išlai-

dos bus virš 60 kartų mažesnės nei Li-oro (po 2025 m.) baterijų ir beveik 9 kartus mažesnės nei Li-S (po 2025 m.) baterijų. Prognozuojama, kad elektrinė transporto priemonė galės nuvažiuoti beveik 3 kartus didesnę atstumą su ateityje rinkoje pasirodysiančiomis ličio jonų baterijomis (po 2025 m.), lyginant jas su jau rinkoje esančiomis ličio jonų baterijomis (2010 m.). Tuo tarpu ridos atžvilgiu ličio jonų (po 2025 m.) baterijos pralenks ličio oro (po 2025 m.) baterijas beveik 4 kartus (4 lentelė).

Kadangi didžiausia savitąja galia ir įkrovimo / iškrovimo efektyvumu bei ilgiausia naudojimo trukme pasižymi dabar rinkoje esančios ličio jonų baterijos, kurios prognozuojama ir ateityje dominuos rinkoje, todėl geležinkelių transportui perspektyvu naudoti šio tipo baterijas. Akumuliatorių baterijų naudojimo kaip alternatyvaus energijos šaltinio galimybės turėtų būti svarstomos ir traukos riedmenų parke. Lietuvoje traukos riedmenys su akumuliatorių baterijomis galėtų būti pritaikytas keleiviams vežti neelektrifikuotuose kelio ruožuose, pvz., vietoje automotrisių (620M) ar dyzelinių traukinių (RA2). Tam, kad dvivagonis (~80 t) traukos riedmuisi galėtų važiuoti, jame turi būti sumontuota 32 vienetai ličio jonų (LIM30H-8A) baterijų, kurių bendra masė siektų 640 kg. Toks traukos riedmuisi galėtų nuvažiuoti apie 20 km atstumą (papildomai neįkrovus), važiuodamas 65 km/val. greičiu. Toks traukos riedmuisi privažiavęs stotį, kurioje įdiegti greito įkrovimo įrenginiai, ar važiuodamas elektrifikuotu ruožu, pantografu įkrautų baterijas. Kai traukos riedmuisi pasiektų neelektrifikuotą zoną, judėtų naudodamas baterijose sukauptą energiją. Baterijos taip pat būtų kraunamos rekuperaciniu būdu stabdant traukos riedmenis. Traukos riedmens baterijos pilnai įkraunamos per 20 min. Traukos riedmenis su akumuliatorių baterijomis Lietuvoje tikslinga būtų eksploatuoti trumpose geležinkelių ruožuose, pvz. keleiviams vežti iš geležinkelio stoties į oro uostą (ši kelio atkarpa ~4 km). Traukos riedmuisi su ličio jonų baterijomis pasirinktą maršrutą papildomai neįkraunant galėtų nuvažiuoti du kartus.

Išvados

– Išanalizavus alternatyvių energijos šaltinių (kuro elementų, superkondensatorių, akumuliatorių baterijų, saulės elementų) naudojimo traukos riedmenyse galimybes nustatyta, kad traukos riedmenys su akumuliatorių baterijomis būtų racionaliausias sprendimas traukos riedmenų parkui Lietuvoje.

– Tyrimas parodė, kad beveik visus alternatyvius energijos šaltinius (kuro elementus, superkondensatorius, baterijas) galima pritaikyti traukos riedmenų judėjimui, išskyrus fotovoltinius įrenginius. Jų išvystomos galios (1 m² fotovoltinio modulio ploto išvysto tik 0,2 kW galią) užtektų tik traukiniu važiuojančių keleivių poreikiams įgyvendinti (apšvietimui, oro kondicionierių veikimui ir pan.).

– Išnagrinėjus skirtingas akumuliatorių baterijas nustatyta, kad geriausiomis eksploatacinėmis savybėmis šiuo metu ir po 2025 m. daugeliu atveju pasižymi elektri-

nės transporto priemonės su ličio jonų baterijomis, todėl geležinkelių transporto sektoriuje rekomenduojama analizuoti traukos su šios rūšies akumuliatorių baterijomis naudojimo galimybes.

– Traukos riedmenis su akumuliatorių baterijomis tikslinga naudoti neelektrifikuotuose kelio ruožuose važiavimui trumpais maršrutais (iki 20 km).

Literatūra

- Barrie, J. W. B.; Mecrow, C.; Jack, A. G.; Atkinson, D. J.; Freeman, A. J. 2010. Drive topologies for solar-powered aircraft, *IEEE Transactionson Industrial Electronics* 57 (1): 457–464.
- Burke, A. F. 2007. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid and fuelcell vehicles, in *Proceeding of IEEE* 95(4): 806–820.
- Conway, B. E. 1999. *Electrochemical Supercapacitors Scientific Fundamentals echnological Applications*. New York. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 699 p.
- Garcia, C. A.; Manzini, F.; Islas, J. 2010. Air emissions scenarios from ethanol as a gasoline oxygenate in Mexico City Metropolitan Area, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9): 3032–3040.
- Gerssen-Gondelach, S. J.; Fajj, A. P. C. 2012. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term, *Journal of Power Sources* 212(8): 111–129.
- Grevys, S.; Balčiūnas, P.; Adomavičius, V.; Norkevičius, P.; Griškoniš, E. 2006. Redokso tipo elektros energijos kaupiklių su cirkuliuojančiais elektrolitais savybių, taikymo galimybių ir kūrimo problemų įvertinimas, *Lietuvos taikomųjų mokslų akademijos mokslo darbai: tarptautinis inovacinis taikomųjų mokslo darbų žurnalas* 3: 53–67.
- Harper, L. 1991. *Wrong side of the tracks? Impacts of road and rail transport on the environment: a basis for discussion*. TEST report no 100. England. 272 p.
- Kalhammer, F. R.; Kopf, B. M.; Swan, D. H.; Roan, V. P.; Walsh, M. P. 2007. *Status and prospects for zero emissions vehicle technology*. Report of the ARB independent expert panel. Retrieved from State of California air resources board. Available from internet: <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf>.
- Lingaitis, L.; Katkus, A. 2000. Geležinkelių transporto poveikis aplinkai, *Tausojanti plėtra informacinėje visuomenėje: tarptautinė konferencija: pranešimų tezės*, spalio 2–4 d. 2000 m. Vilnius.
- Markvart, T. 2001. *Solar electricity*. West Sussex: John Wiley & Sons. 228 p.
- Nishino, A. 1996. Capacitors: operating principles, current market and technical trends, *Journal of Power Sources* 60(2): 137–147.
- Šūri, M.; Hiild, T. A.; Dlp, E. G. 2005. PVGIS: a web-based solar radiation database for calculation of PV potential in Europe, *International Journal of Sustainable Energy* 24(2): 55–67.
- Thounthong, P.; Chunkag, V.; Sethakul, P.; Davat, B.; Hinaje, M. 2009. Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device, *IEEE Transactionson Vehicular Technology* 58(8): 3892–3904.
- Wee, J. H. 2010. Contribution of fuel cell systems to CO₂ emission reduction in their application fields, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2): 735–744.
- Zhang, J. G.; Wang, D.; Xu, W.; Xiao, J.; Wiliford, R.E. 2010. Ambient operation of Li/Air batteries, *Journal of Power Sources* 195(13): 4332–4337.