

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU _____

Katedros vedėja: prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė
2013

ELEKTRONIKOS IR ELEKTROS INŽINERIJOS MAGISTRANTŪROS
STUDIJŲ PROGRAMOS „PRAMONĖS ELEKTROS ĮRANGA IR
AUTOMATIKA“
(Studijų kodas 612H60002)
MAGISTRO TEZĖS

SUPERKONDENSATORIŲ
PANAUDOJIMAS ELEKTROS
TRANSPORTO PRIEMONĖSE

Recenzentas: doc. dr. Algirdas Brazaitis
2013

Vadovas: prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė
2013

Recenzentas: prof. habil. dr. Antanas Andrius
Bielskis
2013

Rengė: TMPE-11, Saulius Petkus
2013

Klaipėda, 2013

1 priedas
BAKALAURO IR MAGISTRO BAIGIAMŲJŲ DARBŲ LYDRAŠČIO FORMA

Pildo bakalauro/magistro baigiamojo darbo autorius

Saulius Petkus

(bakalauro/magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė)

Superkondensatorių panaudojimas elektros transporto priemonėse

(bakalauro/magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

Patvirtinu, kad bakalauro/magistro baigiamasis darbas parašytas savarankiškai, nepažeidžiant kitiems asmenims priklausančių autorių teisių, visas baigiamasis bakalauro/magistro darbas ar jo dalis nebuvo panaudotas Klaipėdos universitete ir kitose aukštosiose mokyklose.

Saulius Petkus

(bakalauro/ magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė ir parašas)

Sutinku, kad bakalauro/magistro baigiamasis darbas būtų naudojamas neatlygintinai 5 m. Klaipėdos universiteto studijų procese.

Saulius Petkus

(bakalauro/ magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė ir parašas)

Pildo bakalauro/magistro baigiamojo darbo vadovas

Bakalauro/magistro baigiamąjį darbą ginti

2013 05 27

(data)

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė

(bakalauro/magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, administratorius (sekretorius)

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje

.....
(data)

Sigita Kasparavičienė

(katedros sekretorės vardas, pavardė ir parašas)

Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, vedėjas

Bakalauro/magistro baigiamąjį darbą ginti

2013 05 27

(data)

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė

(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

Recenzentu(-ais) skiriu prof. habil. dr. Andrius Antanas Bielskis.....

.....doc. dr. Algirdas Brazaitis.....

(įrašyti recenzento(u) vardą, pavardė)

2013 05 27

(data)

prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė

(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

Santrauka

Autorius – Saulius Petkus

Darbo pavadinimas – „**SUPERKONDENSATORIŲ PANAUDOJIMAS ELEKTROS TRANSPORTO PRIEMONĖSE**“

Kalba – lietuvių kalba

Magistro baigiamasis darbas

Darbo vadovė: prof. dr. Eleonora Guseinoviėnė

Klaipėdos universitetas

Jūrų technikos fakultetas

Elektrotechnikos katedra

Klaipėda, 2013

Darbo apimtis: 50 psl, 26 lent., 20 pav.

Raktažodžiai: Superkondensatoriai, elektromobiliai, baterijos.

Darbo tikslas – ištirti superkondensatorių naudą elektros transporto priemonių dinaminėms savybėms. Darbo uždaviniai: apžvelgti akumuliatorių ir superkondensatorių įkrovimo/iškrovimo charakteristikas bei naujausių superkondensatorių technologijas; išanalizuoti kombinuotos baterijų ir superkondensatorių lygiagrečios darbo įkrovimo/iškrovimo sistemą; Apskaičiuoti elektromobilių dinamines charakteristikas naudojant skirtingus ar kombinuotus elektros energijos šaltinius ir palyginant su vidaus degimo varikliu varomo automobilio dinaminėmis charakteristikomis.

Buvo nustatyta, kad superkondensatorių panaudojimas tikslingas tik elektromobilyje, kurio maksimalus greitis yra iki 100 km/h. Jei elektromobilio maksimalus greitis didesnis, baterijų atiduodama galia pakankamai didelė išibėgėti neviršijant baterijų rekomenduojamo srovės stiprio.

Vien šiandieniniais superkondensatoriais varomas elektromobilis negali pakeisti automobilio varomo vidaus degimo variklio, nes maksimalus atstumas, kurį elektromobilis gali nuvažiuoti yra tik 6,3 km.

Vien grafeno superkondensatoriais varomo elektromobilio maksimalus greitis prilygsta benzinu varomo automobilio maksimaliam 233,6 km/h greičiui. Toks elektromobilis būtų penkis kartus galingesnis ir nuvažiuotų tokį patį atstumą, kaip vien baterijomis varomas elektromobilis.

Summary

Author – Saulius Petkus

SUPERCAPACITOR APPLICATION FOR ELECTRIC VEHICLES

Master thesis in electric engineering science

Language – English

Supervisor: prof. dr. Eleonora Guseinoviene

Klaipėda University

Faculty of Marine Engineering

Department of Electrical Engineering

Klaipėda, 2013

Work size: 50 papers, 26 tables, 20 pictures.

Key words: Supercapacitor, ultracapacitor, electric vehicle, battery.

The main objective of the work is to explore the benefits of supercapacitor for electric vehicle dynamic characteristics. The goal of work: to overview the battery and supercapacitor charge / discharge characteristics and the latest technologies of supercapacitors, to analyze the combination of batteries and supercapacitors in “Buck – Boost” converter, Calculate electric dynamic characteristics using different or combined electric energy sources, and compare to an internal combustion engine driven vehicle dynamic characteristics.

It was found that the supercapacitor is purposive only electric vehicle, with a maximum speed of 100 km / h. If the top speed of electric car is over 100 km/h then a total power output of batteries is large enough to accelerate and not to exceed the recommended current of the battery.

Electric vehicle powered today’s supercapacitors can not replace the internal combustion engine because the maximum distance you can travel is only 6.3 km.

graphene supercapacitors driven electric vehicle maximum speed is equivalent gasoline-powered car for a maximum of 233.6 km / h. This electric car is five times more powerful and driven the same distance as the battery-powered electric vehicle.

Lentelių sąrašas

Eilės numeris ir pavadinimas
1 Lentelė. Ličio jonų baterijų tipų palyginimas
2 lentelė. Ciklų skaičiaus priklausomybė nuo iškrovimo lygio
3 lentelė. Baterijos talpos priklausomybė nuo temperatūros.
4 lentelė. Automobilio techninė specifikacija [18].
5 lentelė. Naudojamo elektros variklio specifikacija.
6 lentelė. Pasirinktos 3xE – 40 Ah baterijų celės parametrai.
7 lentelė. Baterijų bloko parametrai.
8 lentelė. Greičių dėžės ir reduktoriaus perdavimų skaičius.
9 lentelė. Skirtingų pavarų greičio intervalai
10 lentelė. Automobilio įsibėgėjimo charakteristikos.
11 lentelė. Elektromobilio įsibėgėjimo charakteristikos.
12 lentelė. 190 baterijų bloko parametrai.
13 lentelė. Elektromobilio įsibėgėjimo charakteristikos su dvigubai daugiau baterijų.
14 lentelė. Elektromobilio ir automobilio įsibėgėjimo palyginimas.
15 lentelė. Nuvažiuojamas maksimalus atstumas vienu įkrovimu naudojant baterijas.
16 lentelė. Maxwell firmos superkondensatoriaus BCAP3000 parametrai.
17 lentelė. Superkondensatorių bloko parametrai.
18 lentelė. Apskaičiuotas elektromobilio su kombinuota sistema įsibėgėjimo greitis.
19 lentelė. 238 superkondensatorių bloko parametrai.
20 lentelė. Apskaičiuotas elektromobilio su Maxwell superkondensatoriais įsibėgėjimo greitis.
21 lentelė. Nuvažiuojamas maksimalus atstumas vienu įkrovimu naudojant Maxwell superkondensatorius.
22 lentelė. Grafeno superkondensatorių charakteristikos.
23 lentelė. Grafeno superkondensatorių bloko charakteristikos.
24 lentelė. Apskaičiuotas elektromobilio su grafeno superkondensatoriais įsibėgėjimo greitis.
25 lentelė. Nuvažiuojamas maksimalus atstumas vienu įkrovimu naudojant grafeno superkondensatorius.
26 lentelė. Elektromobilių su skirtingais energijos šaltiniais palyginimas.

Paveikslų sąrašas

1 pav. Galvaninis elementas [1].
2 pav. Švino elektrodo cheminė reakcija.
3 pav. Švino oksido elektrodo cheminė reakcija.
4 pav. Ličio jonų migracija tarp elektrodų [2].
5 pav. Talpos priklausomybė nuo ciklų skaičiaus [3].
6 pav. Talpos priklausomybė nuo ciklų skaičiaus esant skirtingoms įkrovimo įtampoms [3].
7 pav. Įkrovimo/iškrovimo ciklų skaičius priklausomai nuo įkrovimo/iškrovimo koeficiento
8 pav. Laisvųjų elektronų pasiskirstymas kondensatoriaus plokštelėse
9 pav. Elektrolitinio kondensatoriaus sandara
10 pav. Superkondensatorių skirstymas
11 pav. Skanuoti CNT anglies nanovamzdeliai elektronų mikroskopu [8].
12 pav. Skanuoti g-CNT anglies nanovamzdeliai elektronų mikroskopu [8].
13 pav. Superkondensatoriaus įkrovimo/iškrovimo kreivė [11].
14 pav. Grafeno superkondensatorių energijos tankio priklausomybė nuo galio tankio [11].
15 pav. Mikro superkondensatoriaus gamybos procesas [14].
16 pav. Dvikryptis nuolatinės srovės reguliatorius
17 pav. Superkondensatorių įkrovimo lygis priklausomai nuo greičio ir baterijų įkrovimo lygio.
18 pav. Reguliatoriaus generuojamas impulsas.
19 pav. „Proteus“ programa sumodeliuotas keitiklis
20 pav. Induktyvumo ir apkrovos srovės.

Turinys

Įvadas	8
1. Literatūros apžvalga.....	9
1.1. Baterijos	9
1.2. Akumuliatorių kenksmingos sąlygos.....	14
1.2.1. Įkrovimo iškrovimo ciklų skaičiaus įtaka eksploataavimo trukmei [1].....	14
1.2.2. Temperatūros įtaka eksploatacijos trukmei [4].	16
1.2.3. Didelio įkrovimo/iškrovimo srovių stiprio įtaka [5].....	17
1.3. Kondensatoriai	18
1.3.1. Tradiciniai kondensatoriai	18
1.3.2. Elektrolitinis kondensatorius	20
1.3.3. Superkondensatorius	21
1.3.4. Naujausios superkondensatorių technologijos	22
2. Tyrimo metodai.....	28
2.1. Dvikryptčio srovės reguliatoriaus modelio kūrimas naudojant modeliavimo programą „Proteus“.....	28
2.2. Elektromobilio dinaminių charakteristikų skaičiavimas	34
3. Tyrimo rezultatai.....	37
3.1.1. Elektromobilis su baterijomis, be superkondensatorių.....	37
3.1.2. Elektromobilis su kombinuota baterijų ir superkondensatorių sistema.....	43
3.1.3. Elektromobilis su Maxwell superkondensatoriais	44
3.1.4. Elektromobilis su grafeno superkondensatoriais.....	46
4. Tyrimo rezultatų aptarimas.	48
Įšvados	50
Literatūra.....	52
Priedai	54

Ivadas

Elektromobilių problematika aprėpia: neišvystytą įkrovimo stotelių infrastruktūrą, pirkėjų abejingumą naujovėms, didelę elektromobilių kainą, elektromobilio baterijų eksploataciją, techninės priežiūros personalo nebūvimą, ilgą elektromobilių įkrovimo laiką.

2010 m. fizikos mokslų srityje Nobelio premija buvo apdovanoti Andre Geim ir Konstantin Novoselov už grafeno medžiagos atradimą. Grafenas tai pati ploniausia vieno atomo storio medžiaga, kuri yra laidus elektros srovei. Šią medžiagą tinkamai panaudojus superkondensatoriuose būtų pasiektas didesnis sukauptos energijos kiekis, dėl didelio elektrodų ploto. Kadangi superkondensatoriai pasižymi dideliu galios tankiu, superkondensatoriai gali būti iškraunami ir įkraunami dideliu srovės stipriu, o baterijas įkraunant ar iškraunant dideliu srovės stipriu, sumažinamas baterijų ciklų skaičius.

Tyrimo objektas – transporto priemonė varoma superkondensatorių energija.

Darbo tikslas – ištirti superkondensatorių naudą elektros transporto priemonėms ir jų dinaminėms savybėms.

Uždaviniai:

1. Apžvelgti akumuliatorių ir superkondensatorių įkrovimo/iškrovimo charakteristikas bei naujausių superkondensatorių technologijas;
2. Išanalizuoti kombinuotos baterijų ir superkondensatorių lygiagrečios darbo įkrovimo/iškrovimo sistemą;
3. Apskaičiuoti elektromobilių dinamines charakteristikas naudojant skirtingus ar kombinuotus elektros energijos šaltinius ir palyginant su vidaus degimo varikliu varomo automobilio dinaminėmis charakteristikomis;

Tyrimo metodai:

1. Apžvelgti mokslinius straipsnius, baterijų ir superkondensatorių gamintojų rekomendacijas, objektyvius baterijų ir superkondensatorių tyrimus;
2. Sukurti dvikryptčio srovės reguliatoriaus modelį naudojant modeliavimo programą „Proteus“;
3. Apskaičiuoti elektromobilių įsibėgėjimo greičius naudojant skaičiavimo programą „Mathcad“.

1. Literatūros apžvalga.

Šiame skyriuje bus apžvelgta akumuliatorių ir superkondensatorių tipai, veikimo principai, kenksmingi veiksniai, naujausios technologijos, optimaliausi darbo režimai ir sąlygos.

1.1. Baterijos

Paprasčiausios neįkraunamos baterijos, kitaip vadinamo galvaninio elemento, veikimo principas:

Į du atskirus indus yra įpilami skirtingi tirpalai: cinko sulfatas ir vario sulfatas. Į šiuos du atskirus indus atitinkamai įmerkiami skirtingų metalų cinko ir vario elektrodai. Elektrodai sujungiami medžiaga laidžia elektros srovei (laidu). Elektros srovė netekės be dar vieno svarbaus elemento - druskų tilto (Salt bridge). Druskų tiltas reikalingas palaikyti teigiamai įelektrintų molekulių (katijonų) ir neigiamai įelektrintų molekulių (anijonų) balansą abiejuose induose.

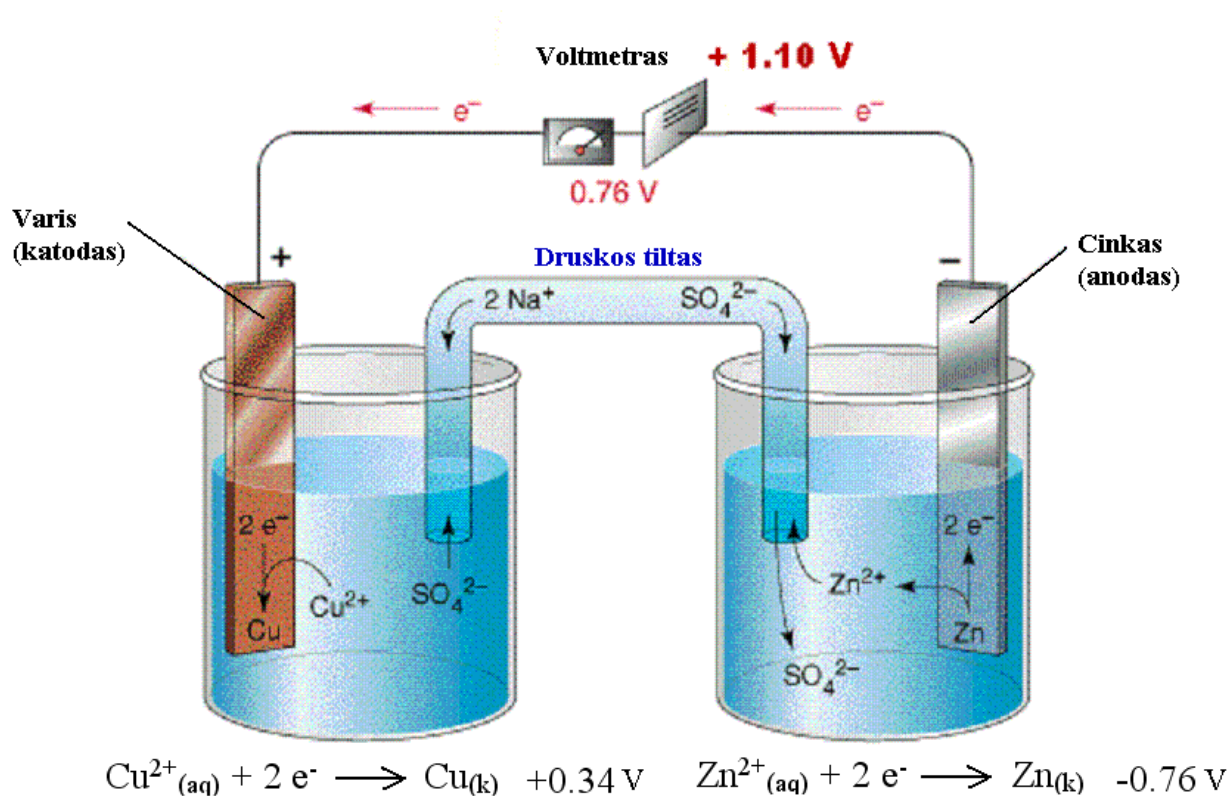
Kuo didesnis (teigiamesnis) medžiagos redukcijos – oksidacijos potencialas (1 Priedas), tuo didesnė medžiagos trauka elektronams. Elektrodo potencialų skirtumas yra galvaninio elemento įtampa. Kiekvieno elektrodo potencialą reakcijos metu galima sužinoti iš lentelės Priede Nr. 1.

Cinko redukcijos – oksidacijos potencialas yra $-0,76V$ (neigiamas), vario redukcijos – oksidacijos potencialas yra $0,34V$, todėl cinkas yra linkęs atiduoti elektronus variui. Paveikslėlyje pavaizduoto galvaninio elemento įtampa yra:

$$\begin{aligned} E^0_{celėe} &= E^0_{katodo} - E^0_{anodo}; \\ E^0_{celėe} &= 0,34 - (-0,76) = 1,10V; \end{aligned} \tag{1}$$

Cinko metalas atiduoda 2 elektronus variui ir elektrolite išsiskiria kaip cinko katijonas Zn^{2+} (nemetalas). Nuo cinko elektrodo laidu iki vario elektrodo atiteka du elektronai, kuriuos pritraukia vario katijonai Cu^{2+} esantys elektrolite $Cu^{2+}SO_4^{2-}(aq)$. Vario katijonas pritraukdamas 2 elektronus tampa vario metalu. Dėl šių priešasčių cinko elektrodas atiduodamas elektronus variui – yra, o aplink vario elektrodą susidaro papildomas vario sluoksnis.

Cinko elektrolito tirpale susidaro didelis kiekis teigiamai įelektrintų molekulių (Zn^{2+}), o vario elektrolito tirpale – neigiamai įelektrintų molekulių (SO_4^{2-}). Užtikrinti cheminės reakcijos tęstinumą, reikalinga palaikyti teigiamai ir neigiamai įelektrintų molekulių balansą elektrolitų tirpaluose, tam yra naudojamas druskos tiltas.



1 pav. Galvaninis elementas [1].

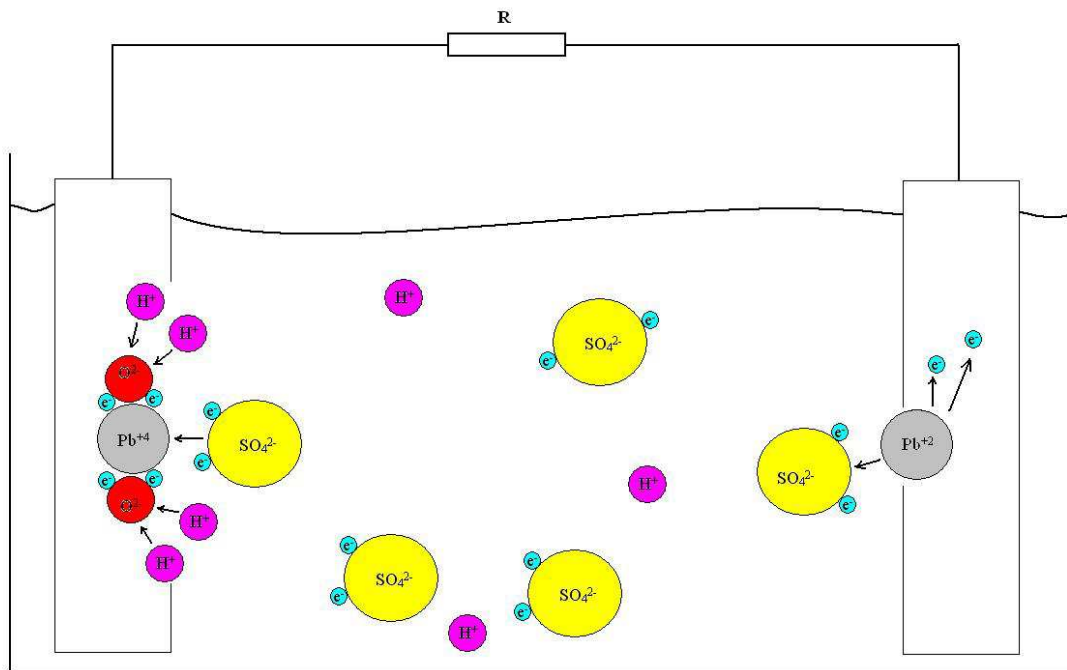
Švino rūgštis įkraunami akumulatoriai veikia šiek tiek kitaip. Švino *Pb* ir švino (IV) oksido *PbO₂* elektrodai merkami į sieros rūgštis tirpalą (elektrolitą). Pagal priedą Nr. 1 švino elektrodas įgauna -0,13V neigiamą potencialą, o švino oksido elektrodas – +1,70V potencialą. Kadangi švino potencialas neigiamas, o švino oksido teigiamas, švinas atiduos savo elektronus švino oksidui. Vienos švino rūgštis akumulatoriaus celės įtampa:

$$\begin{aligned}
 E^0_{\text{celė}} &= E^0_{\text{katodo}} - E^0_{\text{anodo}}; \\
 E^0_{\text{celė}} &= 1,70 - (-0,31) = 2,01\text{V};
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

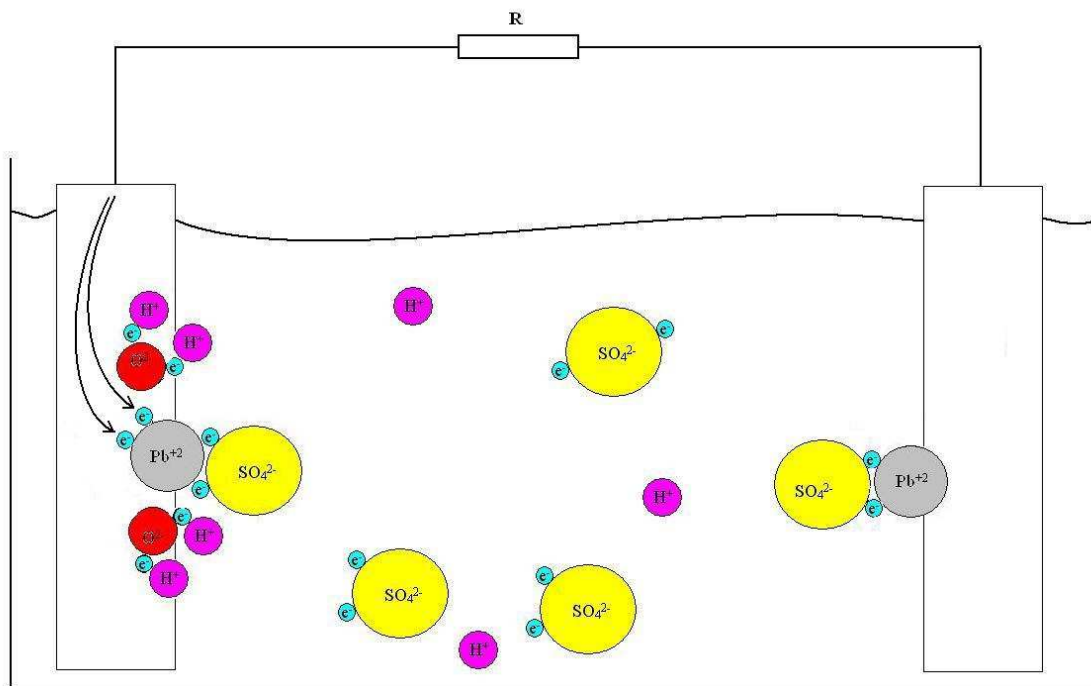
Švinas praranda 2 elektronus, kurie keliauja išorine grandine į švino oksido elektrodą. Švino metalas praradęs du elektronus virsta švino katijonu Pb^{2+} ir sudaro joninį ryšį su sulfatu SO_4^{2-} , kuris išoriniame sluoksnyje turi 2 elektronus. Tokiu būdu ant švino elektrodo formuojasi švino sulfatas.

Kai švino oksidas priima du elektronus, vandenilio jonai iš švino oksido „atima“ deguonies atomus ir tokiu būdu sudaro vandenį H_2O , o sulfatas prisijungia likusį švino katijoną. Išsikraunant akumulatoriui ant abiejų elektrodų susiformuoja švino sulfato sluoksnis.

Pradedant krauti akumuliatorių vyksta grįžtamoji cheminė reakcija: švino sulfatas prisijungęs du elektronus virsta švino metalu ir sulfato jonu, o prie kito elektrodo švino sulfatas atidavęs du elektronus išardo vandens molekulę, prisijungia du deguonies atomus ir nuo savęs „atpalaiduoja“ sulfato joną taip vėl sudarydamas švino oksidą.

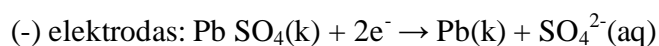
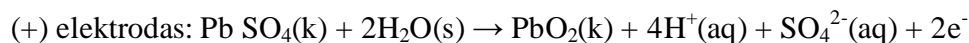


2 pav. Švino elektrodo cheminė reakcija.

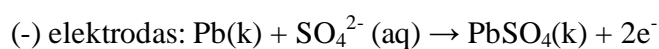


3 pav. Švino oksido elektrodo cheminė reakcija.

Cheminių reakcijų vyksmai prie atitinkamų elektrodų įkraunant akumuliatorių:



Iškraunant akumuliatorių:



Ličio jonų baterija yra sudaryta iš dviejų elektrodų: ličio junginio elektrodo ir dažniausiai anglies elektrodo. Tarp elektrodų yra elektrolitas. Baterijos energijos tankis, ilgaamžiškumas, iškrovimo ir kitos charakteristikos priklauso nuo ličio junginio elektrodo. Šiuo metu naudojami elektrodai:

1 Lentelė. Ličio jonų baterijų tipų palyginimas

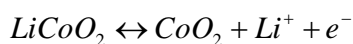
Elektrodas	Potencialas, V	Specifinė talpa, (mAh/g)	Privalumai	Trūkumai
Teigiami elektrodai				
LiCoO ₂	3.9	140	Geros charakteristikos	Riboti kobalto ištekliai ir kaina, mažas talpumas, nepasižymi ilgaamžiškumu
LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	3.8	180–200	Didelis talpumas ir įtampa,	nesaugūs, didelė kaina, riboti

			greitas įkrovimas	nikelio ir kobalto ištekliai
$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$	3.8	160–170	Didelė įtampa, vidutiniškai saugūs	didelė kaina, riboti nikelio ir kobalto ištekliai
LiMn_2O_4	4.1	100–120	Didelis Mangano paplitimas ir maža kaina, didelė įtampa, vidutiniškai saugūs, greitas įkrovimas	Ribotas įkrovimo/iškrovimo ciklų skaičius, mažas talpumas
LiFePO_4	3.45	170	Ypatingai saugūs, iškraunant nekinta įtampa, Didelis geležies paplitimas, maža kaina, mažas toksiškumas	Maža įtampa ir talpumas, mažas energijos tankis
Neigiami elektrodai				
Graphite	0.1	372	didelis įkrovimo/iškrovimo ciklų skaičius, didelis anglies paplitimas	Santykinai mažas energijos tankis, neefektyvus dėl kieto elektrolito formavimosi ant elektrodo paviršiaus
$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	1.5	175	"Zero strain" medžiaga, geras efektyvumas, įkraunant/iškraunant nekinta įtampa	Aukšta įtampa, mažas talpumas ir mažas energijos tankis

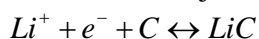
Ličio jonų baterijos veikimo principas panašus į kitų baterijų – vienas elektrodas atiduoda elektroną kitam elektrodui. Kaip pavyzdys bus nagrinėjama LiCoO_2 ir grafito elektrodais ličio jonų baterija:

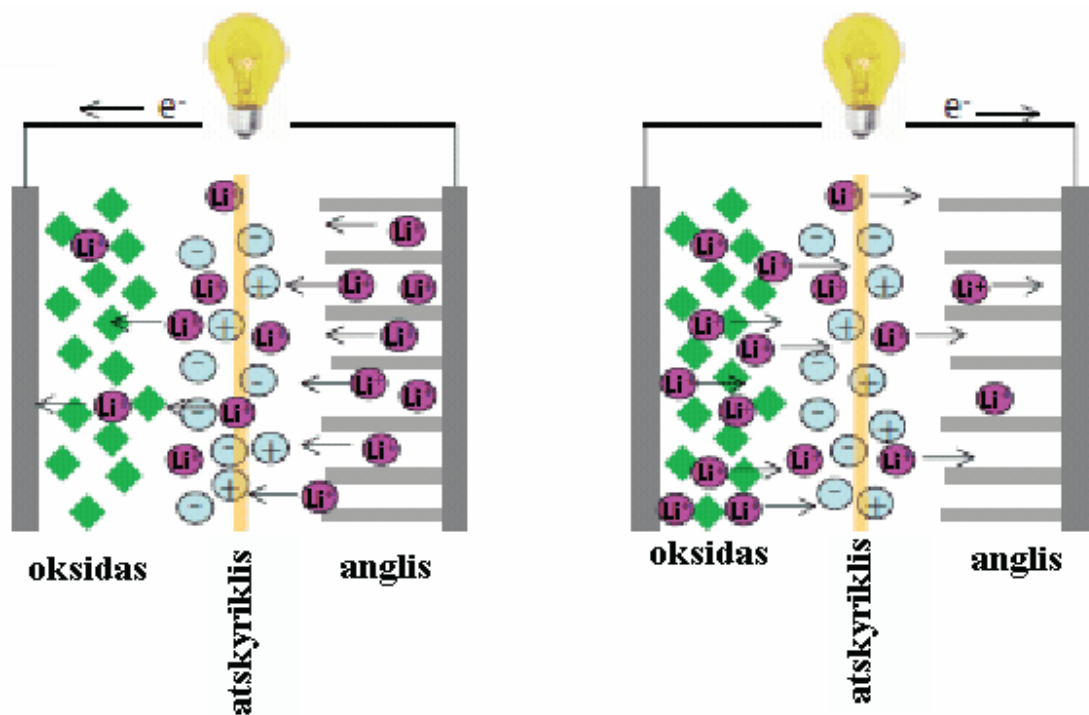
Iškraunant ličio jonų akumuliatorių, elektroną atiduoda neigiamas grafito elektrodas ir elektroną priima teigiamas CoO_2 elektrodas, kuris priėmęs elektroną tampa LiCoO_2 elektrodu. Įkraunant akumuliatorių, sukuriama dirbtinis elektrinis laukas tarp elektrodų (įkroviklis) priverčia LiCoO_2 elektrodą atiduoti elektronus grafito elektrodui. LiCoO_2 teigiamas elektrodas atidavęs elektroną vėl tampa CoO_2 elektrodu, o ličio jonai atitrūkę nuo teigiamo elektrodo migruoja link neigiamo grafito elektrodo. Kai grafito atomai C susijungia su ličio jonais, sudaromas LiC junginys.

Cheminė reakcija ant teigiamo elektrodo:



Cheminė reakcija ant neigiamo elektrodo:





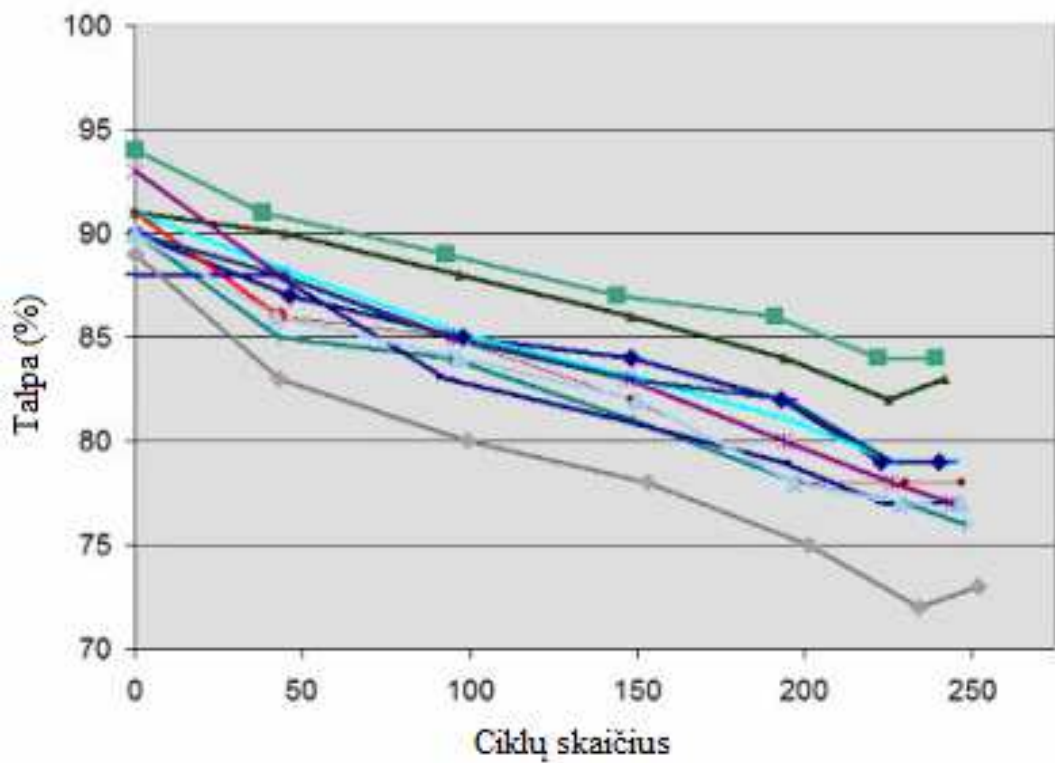
4 pav. Ličio jonų migracija tarp elektrodų [2].

Visų baterijų veikimo principas pagrįstas cheminėmis reakcijomis. Cheminė reakcija tai vienos medžiagos virsmas kita medžiaga.

1.2. Akumuliatorių kenksmingos sąlygos.

1.2.1. Įkrovimo iškrovimo ciklų skaičiaus įtaka eksploataavimo trukmei [1].

Didelis baterijų įkrovimų ir iškrovimų ciklų skaičius mažina baterijos talpą. 4 paveikslėlyje pavaizduotas vienuolikos Li-ion baterijų talpos sumažėjimas, kurios buvo periodiškai įkrautos ir iškrautos Cadex laboratorijoje. 1500mAh baterijos iš pradžių buvo įkrautos iki 4.20V per celę 1C srove (1500mA), tada iškrautos 1500mA srove iki 3.0V per celę, ir ciklas buvo kartojamas. Visos 11 baterijų pradinis talpumas 88-94 procentai ir sumažėja iki 73-84 procentų po 250 ciklų. Lentelėje 2 parodyti įkrovimo/iškrovimo ciklai, iškraunant baterijas iki tam tikro lygio. Baterijų universitetas (Battery University) teigia, kad baterijos nebetinkamos naudoti kai jos talpa pasiekia 70 procentų ribą.



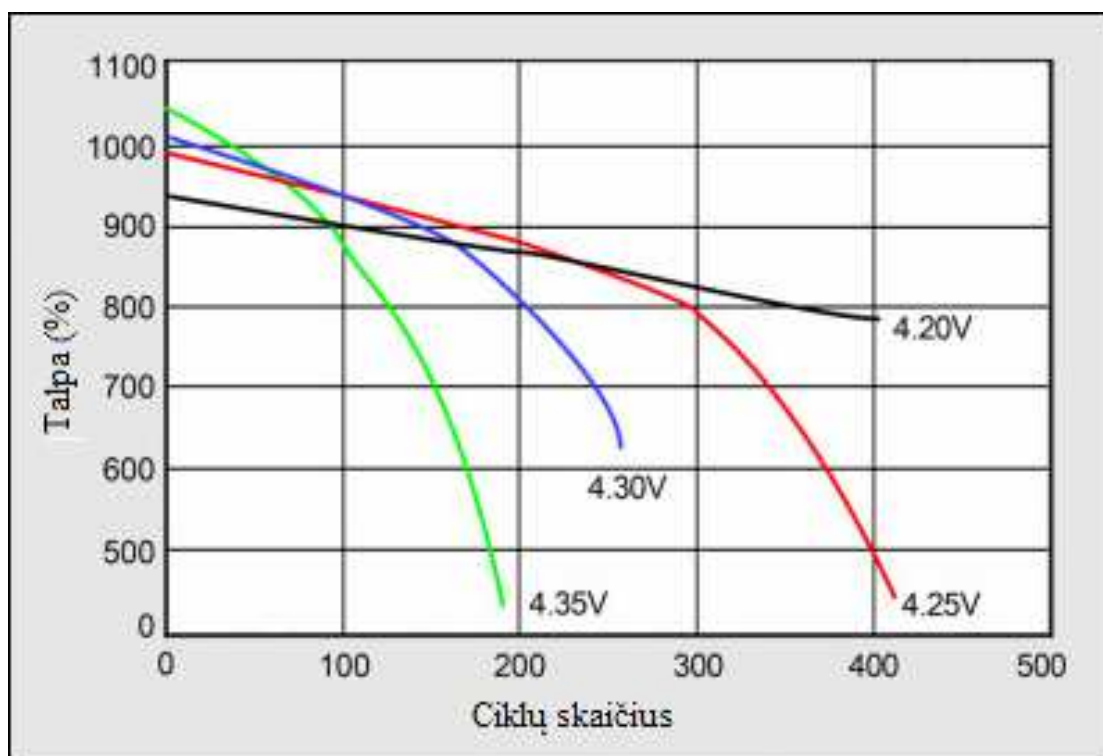
5 pav. Talpos priklausomybė nuo ciklų skaičiaus [3].

Pirmoje lentelėje matome, kad dalinis iškrovimas mažiau kenkia baterijos tarnavimo laikui.

2 lentelė. Ciklų skaičiaus priklausomybė nuo iškrovimo lygio

Iškrovimo lygis(%)	Ciklų skaičius
100%	500
50%	1500
25%	2500
10%	4700

Taip pat akumulatoriaus įkrovimo lygis turi reikšmės baterijos tarnavimo trukmei. Įkraunant bateriją daugiau nei 4,2 V įtampa per celę, talpa padidėja nuo 10% iki 15%, tačiau dramatiškai sumažėja ciklų skaičius. 6 paveikslas parodo akumulatoriaus celės įkrovimo lygį ir ciklų skaičių.



6 pav. Talpos priklausomybė nuo ciklų skaičiaus esant skirtingoms įkrovimo įtampoms [3].

1.2.2. Temperatūros įtaka eksploatacijos trukmei [4].

Aukšta temperatūra, didelis įkrovimo/iškrovimo srovės stipris ir didelė įkrovimo įtampa mažina ciklų skaičių. Aukšta temperatūra – didesnė nei 30°C, o didelė įtampa – aukštesnė nei 4.10 V per celę. Pilnai įkrautos baterijos laikymas aukštoje temperatūroje, kenkia labiau nei įkrovimo, iškrovimo ciklai.

3 lentelė. Baterijos talpos priklausomybė nuo temperatūros

Baterijos temperatūra	Talpos mažėjimas esant 40% įkrautai baterijai sandėliavimo metu (Rekomenduojamas įkrovimo lygis)	Talpos mažėjimas esant 100% įkrautai baterijai sandėliavimo metu (Daugelio vartotojų laikymo sąlygos)
0°C	2% per 1 metus; 98% likusi talpa	6% sumažėjimas per 1 metus; 94% likusi talpa
25°C	4% per 1 metus; 96% likusi talpa	20% sumažėjimas per 1 metus; 80% likusi talpa
40°C	15% per 1 metus; 85% likusi talpa	35% sumažėjimas per 1 metus; 65% likusi talpa
60°C	25% per 1 metus; 75%; likusi talpa	40% talpos sumažėjimas per 3 mėnesius

Aplinkos temperatūra turi didelę įtaką baterijos tarnavimo laikui ir charakteristikai. Žema temperatūra sulėtina cheminių procesų vyksmus baterijoje ir sumažina jos talpą. Baterijos, kurios turi 100% talpos, esant 25°C laipsnių temperatūrai, esant neigiamai -18°C laipsnių temperatūrai turės tik apie 50% talpos. Talpa tiesiogiai priklauso nuo temperatūros.

Li-ion baterijų charakteristikos yra žymiai blogesnės esant žemoms temperatūroms, nei – aukštoms. Baterijos pasiekia ilgiausią tarnavimo laiką, esant 20°C laipsnių temperatūrai. Daugelio nikelio, ličio, švino pagrindu pagamintų akumuliatorių charakteristikos pablogėja esant žemai -20 °C temperatūrai.

1.2.3. Didelio įkrovimo/iškrovimo srovių stiprio įtaka [5].

Kuo didesnis elektros srovės stipris įkraunant bateriją, tuo greičiau baterija bus įkrauta, tačiau rekomenduojama baterijas įkrauti ir iškrauti ne didesne kaip 1C srove [5], tai reiškia nerekomenduojama baterijos įkrauti ar iškrauti greičiau nei per vieną valandą. Raidė C nurodo baterijos talpą, pavyzdžiui 1500mAh, o skaičius esantis šalia raidės C yra įkrovimo/iškrovimo srovės koeficientas, kuris nurodo kokiu tempu įkraunama arba iškraunama baterija. Pavyzdys:

Akumuliatoriaus talpa, $C = 1500\text{mAh}$;

Įkrovimo/iškrovimo srovės koeficientas = 0.7;

Šiuo atveju baterijos įkrovimo ar iškrovimo srovės stipris bus:

$$I = 0.7 \cdot C = 0.7 \cdot 1500 = 1050\text{mA}; \quad (3)$$

Laikas, per kurį baterija bus įkrauta arba iškrauta:

$$t = \frac{C}{I} = \frac{1500}{1050} = 1.42\text{h}; \quad (4)$$

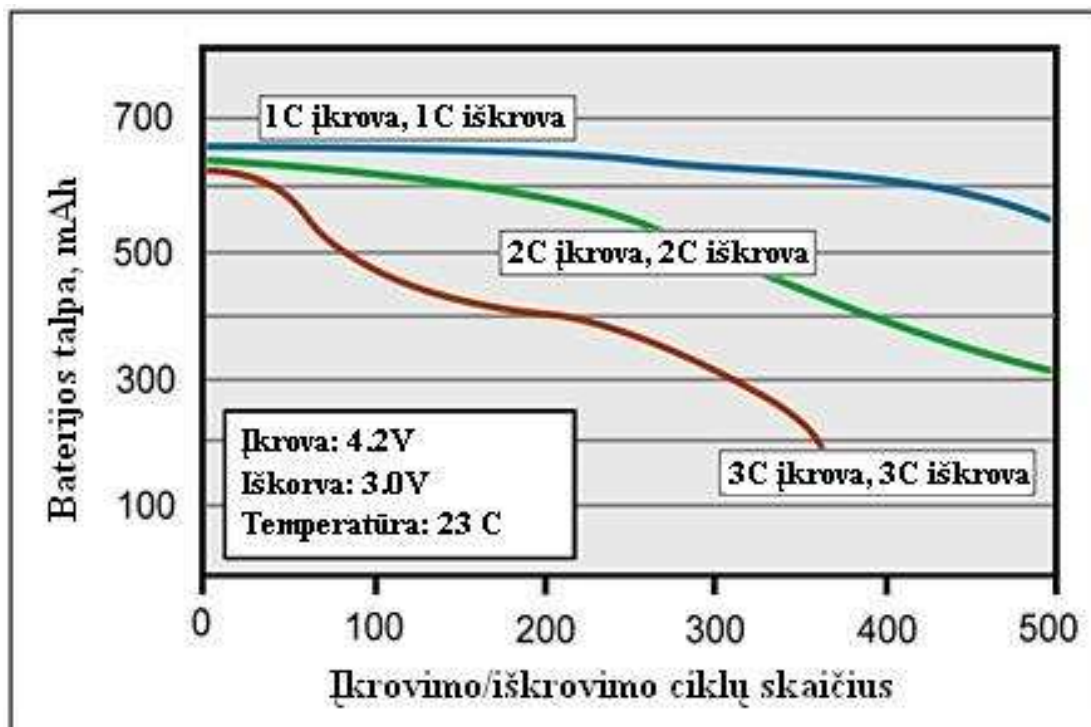
Ličio jonų baterijų gamintojai rekomenduoja pavyzdyje paminėta iškrovimo/įkrovimo srovės koeficientą 0,7. Kuo mažesnis šis koeficientas, tuo daugiau įkrovimo/iškrovimo ciklų baterija tarnauja. Įkrovimo/iškrovimo ciklas vadinamas baterijos iškrovimas ir įkrovimas. Baterijų gamintojai atlikdami tyrimus ir pateikdami baterijų specifikacijas baterijos įkrovimo/iškrovimo ciklu vadina, kai baterija yra iškraunama 80% (20% baterijos lieka neiškrauta) ir įkrauna iki 100%. Gamintojo teigimu baterijos realiame naudojime nėra 100% iškraunamos todėl ir pasirinktas 80% iškrovimo lygis.

Paveiksle Nr. 7 palyginama ličio jonų baterijų ciklų skaičius jas įkraunant/iškraunant skirtingais įkrovimo/iškrovimo srovės dydžiais: 1C, 2C ir 3C.

Įkraunant/iškraunant bateriją 1C srovės dydžiu, po 500 įkrovimo/iškrovimo ciklų, baterijos talpa sumažėjo nuo 650mAh iki 550mAh talpos. Talpa sumažėjo iki 84%.

Įkraunant/iškraunant bateriją 2C koeficientu, po 500 įkrovimo/iškrovimo ciklų baterijos talpa sumažėjo iki 310mAh, tai yra iki 47%.

Įkraunant/iškraunant bateriją 3C koeficientu, po 360 įkrovimo/iškrovimo ciklų talpa sumažėjo iki 26%.

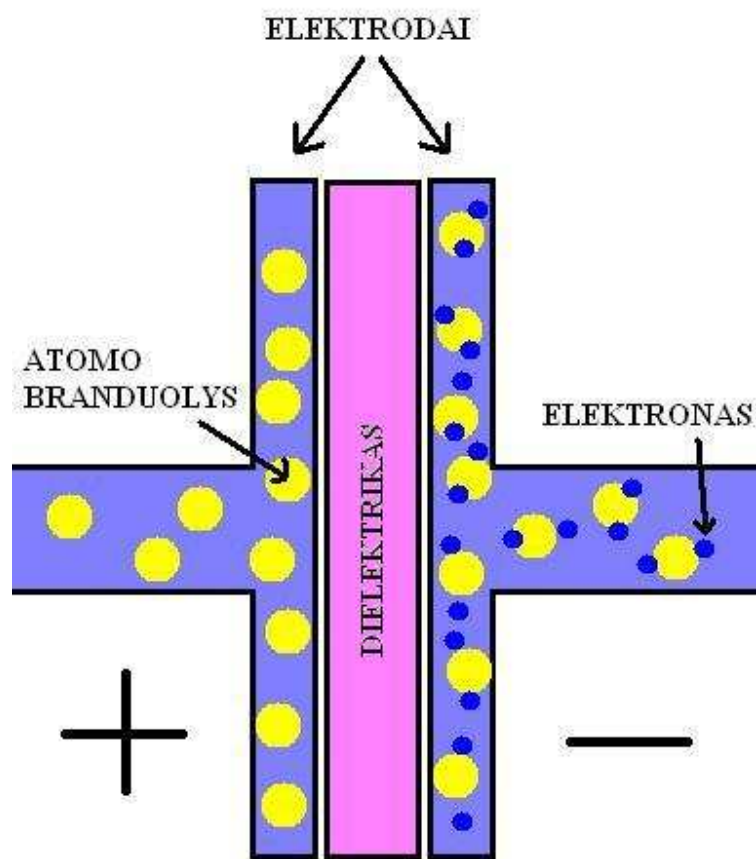


7 pav. Įkrovimo/iškrovimo ciklų skaičius priklausomai nuo įkrovimo/iškrovimo koeficiento Taigi, kuo lėčiau iškrausime bateriją, tuo ilgesnis bus baterijos tarnavimo laikas.

1.3. Kondensatoriai

1.3.1. Tradiciniai kondensatoriai

Kondensatorius yra įrenginys, kuris geba kaupti elektros krūvį. Jis sudarytas iš dviejų elektrai laidžių elektrodų tarp kurių yra izoliuojanti medžiaga – dielektrikas. Elektrodams prijungus elektros šaltinį, elektroduose ir laiduose esantys laisvieji elektronai orientuosis ant plokštelės turinčios mažesnę potencialą, nei likusioji. Tokiu būdu tarp elektrodų susidarys elektrinis laukas, kuris ir nusako sukauptos energijos dydį.



8 pav. Laisvųjų elektronų pasiskirstymas kondensatoriaus plokštelėse
Pagrindinis kondensatoriaus parametras – talpa, kurios matavimo vienetas yra faradas (F).

$$C = \frac{q}{U}; \quad (5)$$

- Čia C – elektrinė talpa;
 q – vieno elektrono krūvis;
 U – potencialų skirtumas (įtampa) tarp elektrodų.

Realiai skaičiuojant kondensatorių talpas, formulės skiriasi priklausomai nuo kondensatoriaus elektrodų konstrukcijos:

Plokščiasis kondensatorius:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}; \quad (6)$$

ε – dielektrinė skvarba;

ε_0 – elektrinė konstanta $8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$;

S – kondensatoriaus plokštelių bendras plotas;

d – atstumas tarp elektrodų..

Sferinis kondensatorius:

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}; \quad (7)$$

R_1, R_2 – kondensatorių sudarančių sferų spinduliai.

Cilindrinis kondensatorius:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}; \quad (8)$$

R_1, R_2 – kondensatorių sudarančių cilindro spinduliai;

l – cilindro ilgis.

kondensatoriaus sukaupta energija apskaičiuojama pagal formulę:

$$W_C = \frac{C \cdot U^2}{2}; \quad (9)$$

W_C – energija, J;

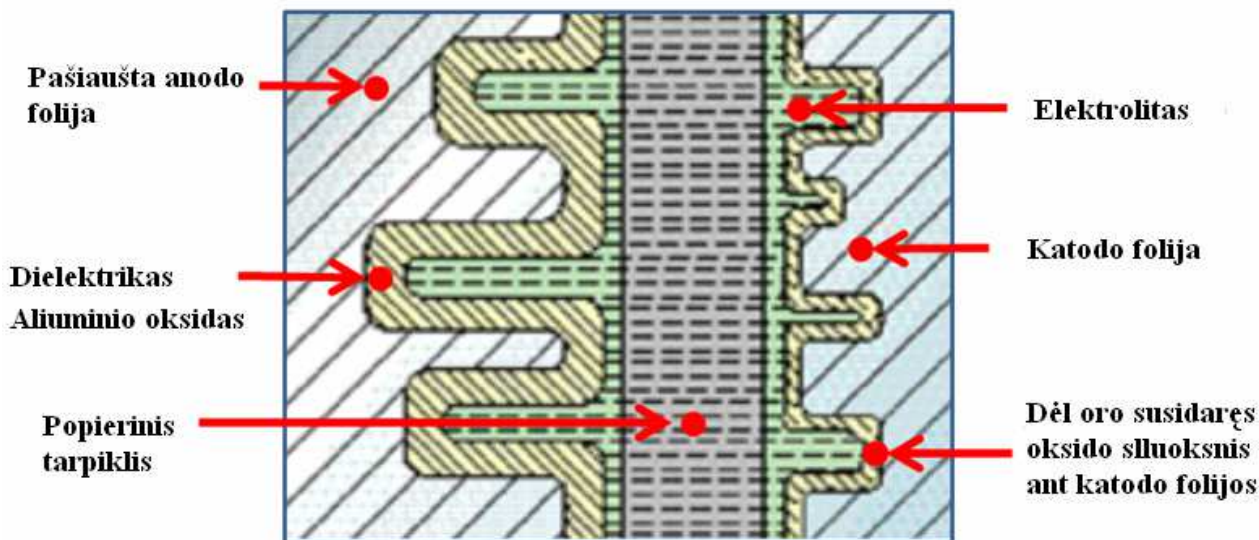
C – talpa, F;

U – įtampa, V.

1.3.2. Elektrolitinis kondensatorius

Elektrolitinis kondensatorius susideda iš dviejų aliuminio folijų (elektrodų), kuri viena iš jų, cheminiu būdu yra padengta aliuminio oksidu. Plonas aliuminio oksido sluoksnis atlieka dielektriko vaidmenį. Plokštelė padengta aliuminio oksidu yra anodas, o elektrolitas naudojamas kaip skystas katodas. Elektrolitas yra laidus elektros srovei. Skystas katodas (elektrolitas) užpildydamas visas aliuminio oksido mikroporas užtikrina glaudų kontaktą ir mažą atstumą tarp elektrodų. Popierinis

tarpiklis tarp aliuminio folijų naudojamas kaip apsauga nuo tiesioginio kontakto su aliuminio oksidu ir kitos aliuminio folijos (katodo).



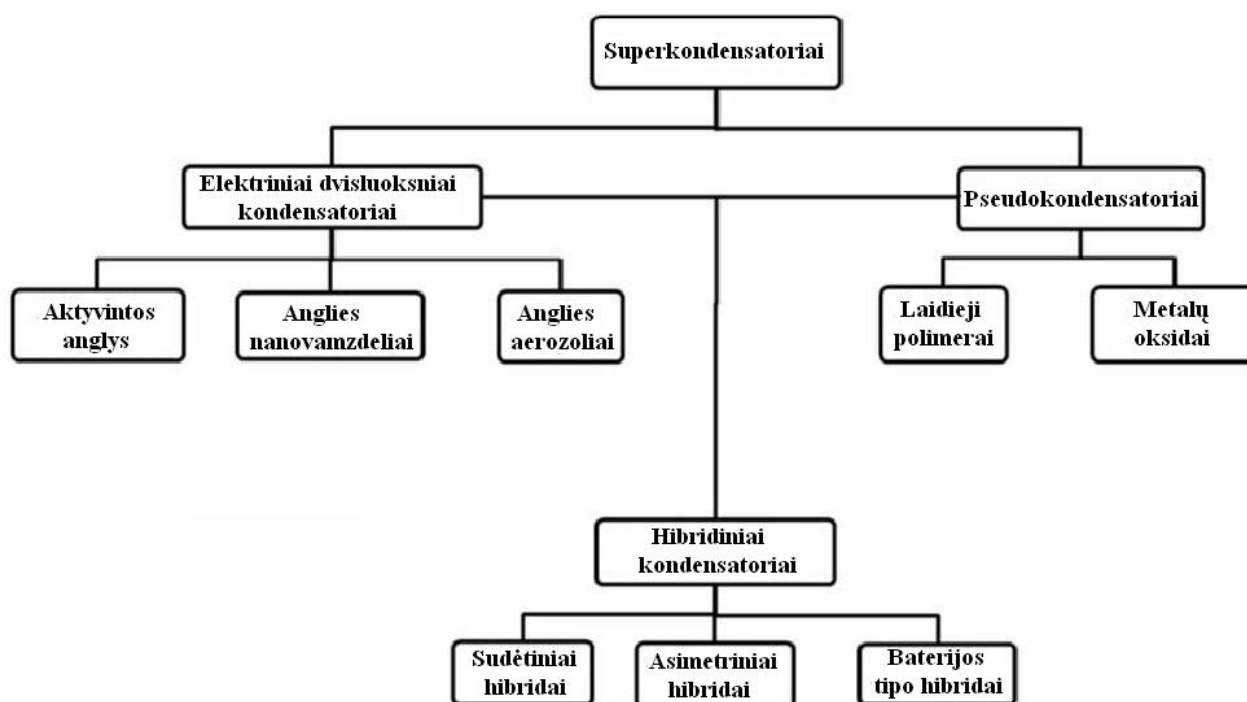
9 pav. Elektrolitinio kondensatoriaus sandara

1.3.3. Superkondensatorius

Superkondensatoriai ir paprasti kondensatoriai skiriasi savo specifine talpa. Superkondensatorių specifinė talpa yra didesnė 10000 [6] kartų nei elektrolitinių kondensatorių.

Superkondensatoriai pasižymi dideliu galios tankiu ir ilgaamžiškumu (daugiau nei 100 000 [7] įkrovimo/iškrovimo ciklų) lyginant su baterijomis, kadangi superkondensatorių vidinė varža yra žymiai mažesnė nei baterijų. Dar vienas superkondensatorių privalumas lyginant su baterijomis – trumpa įkrovimo trukmė. Tačiau superkondensatorius lyginant su baterijomis turi ir neigiamų savybių – mažas energijos tankis. Dėl šios priežasties superkondensatorius negali visiškai pakeisti baterijų. Šiuo metu yra siekiama padidinti superkondensatorių energijos tankį nesumažinant galios tankio ir nepadidinant įkrovimo trukmės.

Superkondensatoriai pagal elektrodams naudojamą medžiagą ir pagal krūvio kaupimo būdą yra skirstomi į tris grupes:



10 pav. Superkondensatorių skirstymas

Tyrimė bus naudojami elektriniai dvisluksniai kondensatoriai (toliau – EDSK). Šiuose kondensatoriuose krūvis kaupiamas tarp dvigubo sluoksnio paviršių. Dvigubas sluoksnis susidaro anglies ir elektrolito sąlyčio zonoje, prijungus kondensatorių prie išorinio maitinimo šaltinio. Elektrolito molekulės migruoja link neigiamo EDSK elektrodo ir atvirkščiai, dėl šios priežasties susidaro du sluoksniai, kurių vienas susiformuoja prie neigiamo elektrodo, o kitas prie teigiamo.

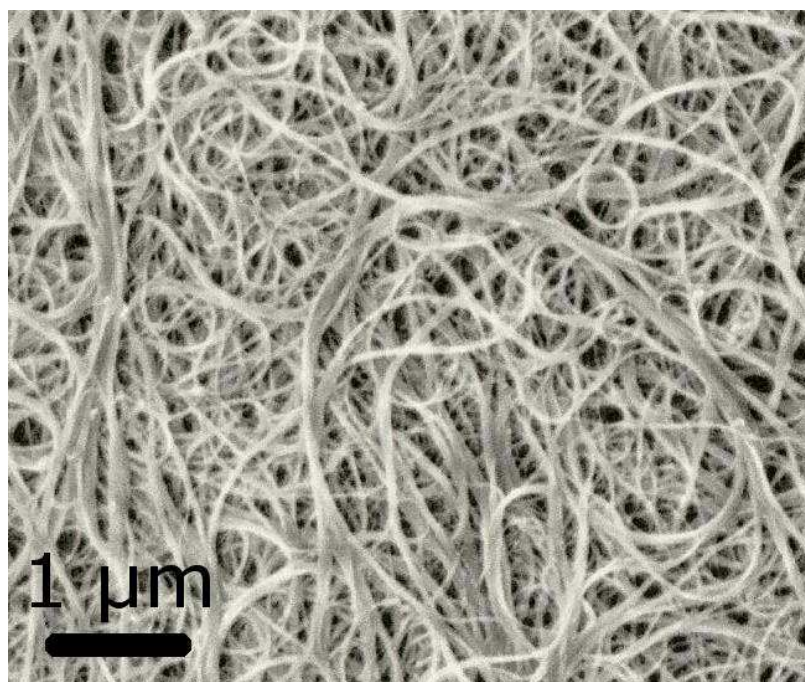
Tyrimė naudosime Maxwell firmos superkondensatorius. Šių superkondensatorių ilgalaikis maksimalus iškrovimo srovės stipris yra 210 A. Superkondensatoriuje tekant tokiai srovei, temperatūra pakyla 40°C, todėl šiltuoju metų laiku reikalingas priverstinis aušinimas, tam kad nebūtų viršyta maksimali veikimo temperatūra.

1.3.4. Naujausios superkondensatorių technologijos

Anglies nanovamzdelių superkondensatoriai (Carbon NanoTube – CNT). Anglies nanovamzdelių superkondensatorių specifinė talpa siekia nuo 20 iki 180 F/g [11], o elektrodų paviršiaus plotas iki 1,300 m²/g. Teoriškai įmanoma pasiekti elektrodų paviršiaus plotą iki 2000 m²/g.

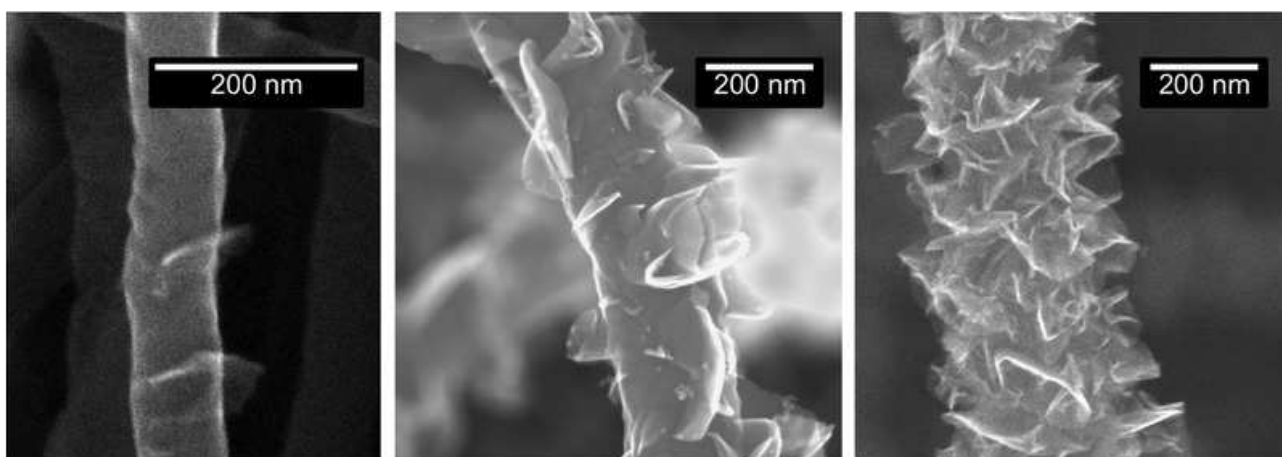
Pagrindiniai trūkumai:

- Didelė kaina;
- Sudėtinga gamyba, nes nanovamzdeliai linkę susiraizgyti į kamuolių.



11 pav. Skanuoti CNT anglies nanovamzdeliai elektronų mikroskopu [8].

Elektrodų paviršiui padidinti 2011 buvo atrastas būdas kaip „apauginti“ anglies nanovamzdelius grafeno sluoksniais (g-CNT).



12 pav. Skanuoti g-CNT anglies nanovamzdeliai elektronų mikroskopu [8].

Vietoje to, kad toliau tobulinti ir ieškoti būdu kaip sumažinti CNT superkondensatorių kainą, Nanotek Instruments, Inc. stropiai dirbo alternatyvai atrasti. Buvo atrasti vieno sluoksnio grafeno lapeliai ir pavadinti nanografeno plokštelėmis (NanoGraphene Platelets – NGP). NGP yra vieno anglies atomo storio, tai yra mažiau nei 0,34 nm. Nanografeno medžiagos pasižymi dideliu temperatūros laidumu, elektros laidumu ir tvirtumu.

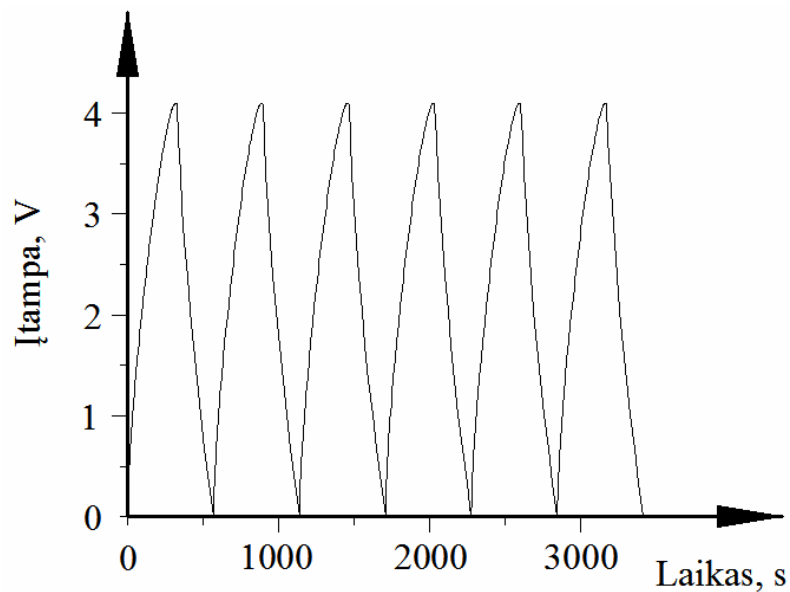
Kad ant elektrodo galėtų susikaupti kuo didesnis kiekis krūvininkų, turi būti didelis elektrodo plotas todėl jis turi būti porėtas, kad liktų kompaktiškas. Kadangi grafeno plokštelės linkusios sluoksniuotis, jas reikia kažkokiu būdu atskirti ir išlaikyti atitinkamą tarpelį tarp jų.

Šaltiniai [9] ir [10] teigia atradę būdą išlaikyti tarpus tarp grafeno plokštelių (spacer-modified). Grafeno plokštelės storis yra mažesnis nei 10nm ir tarp jų yra pavieniai, dielektriniai tarpikliai. Tarpikliai yra prisitvirtinę prie plokštelės paviršiaus. Šios struktūros elektrodo poros buvo panaudotos kalio hidroksido (KOH) elektrolito molekulėms, kurios yra mažesnės už joninio elektrolito molekules.

Naujajame išradime nenaudojami minėti tarpikliai. Tarpikliai nereikalingi, nes grafeno plokštelės yra išlenktos ir taip sudaro mezo-poras, tokiu būdu išvengia sluoksniavimosi. Naujasis superkondensatorius susideda iš dviejų elektrodų, poringo separatoriaus tarp dviejų elektrodų ir joninio skysto elektrolito. Vienas iš dviejų elektrodų sudarytas iš mezo-poringos struktūros suformuotos iš daugybės nanografeno plokštelių ir porų. Elektrodas pagamintas iš grafeno ir 15% priemaišų. Panaudotas elektrolitas – $C_6H_{11}BF_4N_2$. Kai į poras patenka joninio tirpalo (elektrolito) molekulės, jose formuojasi didelis kiekis dvigubo sluoksnio elektrinių krūvių. dėl šių priežasčių šie superkondensatoriai pasižymi išskirtinai didele specifine talpa ir lyginant su kitais superkondensatoriais – dideliu energijos tankiu [11].

Elektrolito molekulės dydis yra nuo 1,2 nm iki 1,6 nm. Pageidautinas poros dydis yra bent tris kartus didesnis už molekulės dydį, tai yra apie 4 nm. Patento autoriai ištyrė, kad poros mažesnės už 2 nm neleidžia joninio skysčio molekulėms laisvai patekti į poras. Poros mažesnės už 4nm apsunkina dvigubo sluoksnio krūvio formavimąsi. Įprastai mezo-poros yra nuo 2 nm iki 50 nm, tačiau porų dydis naujajame įrenginyje – nuo 2 nm iki 25 nm [11].

Elektrodas sveria 6.6 mg, o jo diametras – 13 mm. Superkondensatoriaus specifinė talpa siekia nuo 100 F/g iki 250 F/g esant dideliame srovės tankiui (1A/g) ir 4V iškrovimo įtampai. Iškrovimo kreivė yra beveik tiesi linija, kas rodo gerą dvigubo elektrinio krūvio sluoksnio formavimąsi (13 pav.). Energijos tankis 81,4 Wh/kg prie 1 A/g. Galios tankis 9838 W/kg prie 8 A/g (energijos tankis šiuo atveju 53,1 Wh/kg). 90, 85.6, 76.3, 67.7 ir 53.1 Wh/kg energijos tankis buvo pasiektas atitinkamai prie tokių srovės tankių: 0.5, 1, 2, 4 ir 8 A/g, iškrovimo/įkrovimo laikai atitinkamai: 580, 270, 120, 50 ir 20 sekundžių [11].



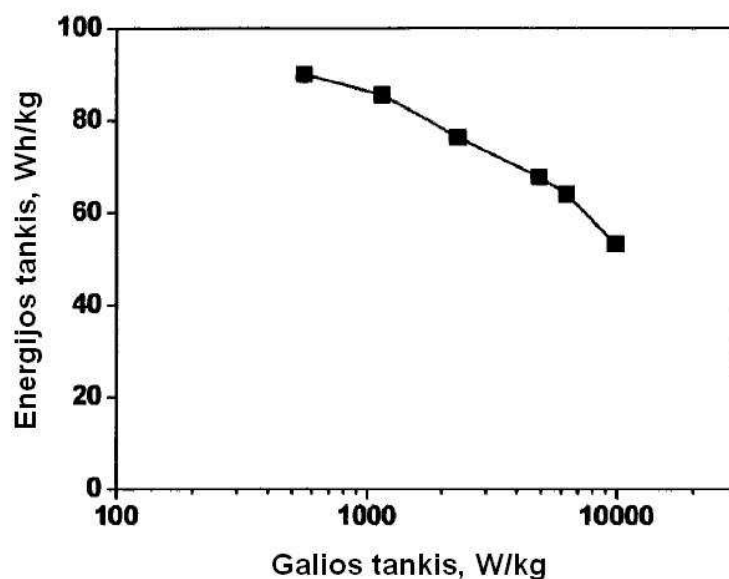
13 pav. Superkondensatoriaus įkrovimo/iškrovimo kreivė [11].

Dėka jau minėto elektrolito, įkrauto kondensatoriaus įtampa siekia daugiau kaip 4,5V. Dėl šios priežasties padidėja superkondensatorių energijos tankis.

NGP superkondensatorių elektrodų paviršiaus plotas – $2,675 \text{ m}^2/\text{g}$, tai yra dvigubai didesnis nei CNT superkondensatorių plotas.

Pasiekti geresnių parametrų būtų galima panaudojus abu elektrodus iš mezo-porų. Grafeno plokštelės storis turi būti ne didesnis nei 100 nm, idealiu atveju - atomo storio.

Galima teigti, kad šių superkondensatorių nominalus energijos tankis yra apie $67,7 \text{ Wh/kg}$, kas prilygsta nikelio metalo hidrido baterijoms (75 Wh/kg [13]), kurios buvo naudojamos elektromobiliuose EV1 [12].



14 pav. Grafeno superkondensatorių energijos tankio priklausomybė nuo galios tankio [11].

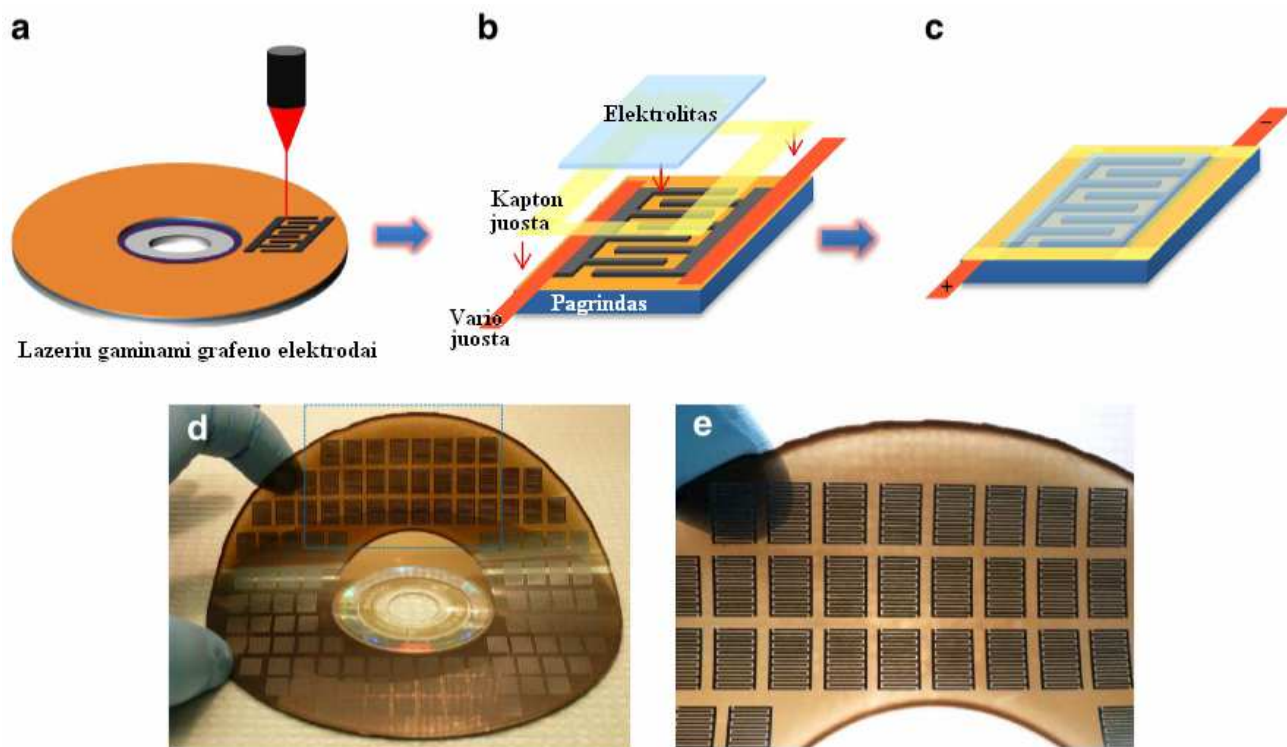
Iš kreivės paveiksle 14 matyti, kad grafeno superkondensatorių energijos tankis gali būti pakankamai didelis – iki 90 Wh/kg. Jei superkondensatorių iškrausime dideliu srovės stipriu, tuo metu matuojamas energijos tankis bus mažesnis, o galios tankis didesnis. Jei superkondensatoriaus sukaupta energija bus iškrauta pamažu, perskaičiuotas energijos tankis bus didesnis.

Pats naujausias superkondensatorius buvo atrastas atsitiktinai. Iš pažiūros labai paprastos konstrukcijos, bet įspūdingų charakteristikų.

Maher El – Kady, magistro studijų studentas Richard'o Kaner'io laboratorijoje susimastė kas nutiktų grafito oksido lakštą apšvitinus galingu lazeriu. Grafito oksidas apšvitintas lazeriu tampa grafenu (vieno atomo storio anglies pluoštas). Grafeno superkondensatorių teorinė maksimali specifinė talpa yra 550F/g [14]. Išradėjų teigimu jų pagaminto superkondensatorius specifinė talpa siekia 276F/g. [14]. 2013 m. vasario mėnesį publikuotame straipsnyje (Nature Communications), Kaner'is ir El – Kady aprašė būdą, kaip pagaminti micro – superkondensatorius naudojant DVD rom'ą. Šie superkondensatoriai dar efektyvesni, Kaner'io teigimu šių superkondensatorių specifinė talpa siekia iki 400F/g. Naudojant kompaktinių plokštelių įrašymo įrenginio lazerį, padaromi grafeno superkondensatoriaus labai ploni elektrodai ir paliekamas labai mažas atstumas tarp jų.

Šie superkondensatoriai yra santykinai pigūs, nesudėtinga jų produkcija ir aukštas energijos tankis. Siekiant pradėti šių superkondensatorių serijinę gamybą ir išleidimą į rinką, Kaner'is ir jo komanda pasirašė sutartį su superkondensatorių gamintojų kompanija. Kaner'is nesitiki šių

superkondensatorių išleisti į rinką 2014 metais, jo manymu juos bus įmanoma nusipirkti tik po 5 – 10 metų.



15 pav. Mikro superkondensatoriaus gamybos procesas [14].

Paveikslėlyje Nr. 15 b Kapton juosta yra pagaminta iš poliamido plėvelės, kurią išvystė DuPont įmonė. Ši plėvelė išlieka stabili kintant temperatūrai dideliame intervale nuo -273 iki $+400$ °C [15].

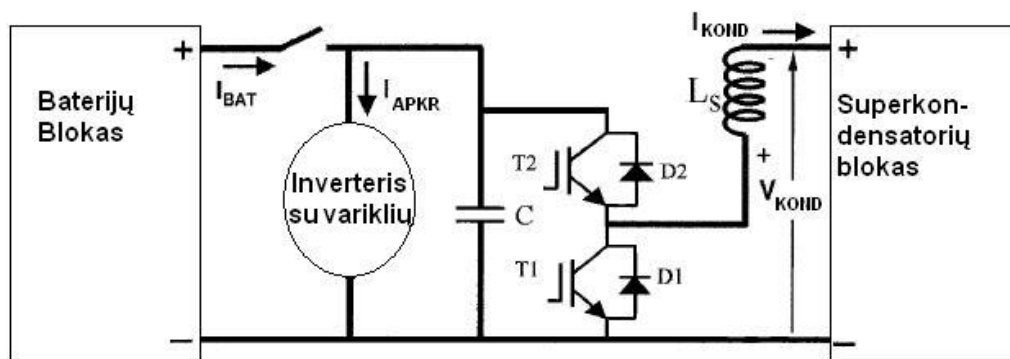
Superkondensatorių pranašumas prieš baterijas yra didelis galios tankis. Superkondensatorių didelis galios tankis yra pasiekiamas dėl mažos vidinės varžos. Kadangi superkondensatoriaus įtampa yra tiesiogiai proporcinga įkrovimo lygiui bus reikalingas keitiklis palaikyti pastovų įtampos lygį. Naujausių superkondensatorių energijos tankis siekia iki 90Wh/kg (neskaitant pseudokondensatorių).

2. Tyrimo metodai.

2.1. Dvikryptčio srovės reguliatoriaus modelio kūrimas naudojant modeliavimo programą „Proteus“.

Lygiagrečiai veikiančios baterijos ir superkondensatoriai turi turėti specialią įkrovimo/ iškrovimo sistemą palaikyti reikiamam superkondensatorių įkrovos lygiui. Superkondensatoriai turi būti visiškai iškrauti važiuojant dideliu (priklauso nuo superkondensatorių bloko talpos) greičiu, o stovint vietoje arba važiuojant mažu greičiu turi būti visiškai įkrauti, kad galėtų bet kuriuo momentu atiduoti visą sukauptą energiją per trumpą laiką. Tokiu būdu yra tausojamos baterijos išsibėgėjimo metu. Tokia įkrovimo/iškrovimo sistema anglų kalboje vadinama „Buck – boost converter“, o lietuvių kalboje – „Dvikryptis nuolatinės srovės reguliatorius“.

Principinė veikimo schema:



16 pav. Dvikryptis nuolatinės srovės reguliatorius

T1 ir T2 – IGBT tranzistoriai;

L_s – induktyvumas;

D1 ir D2 – diodai;

C – paprastas kondensatorius, pulsacijoms sumažinti.

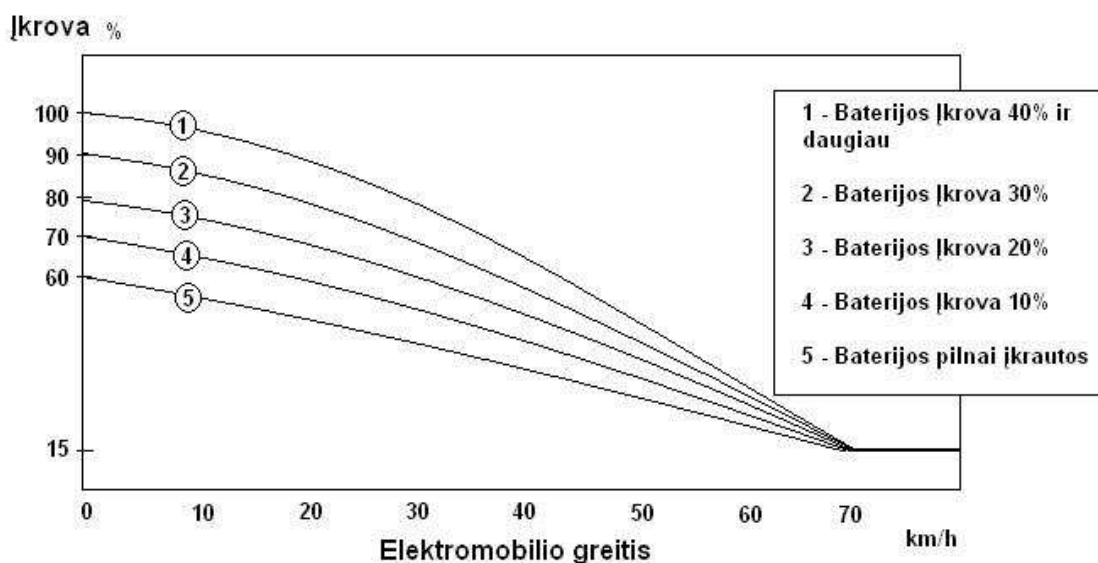
Ši sistema skirta perduoti energiją iš baterijų bloko į kondensatorių bloką ir atvirkščiai. Kai elektros energija perduodama iš superkondensatorių bloko į baterijų bloką arba į variklį, keitiklis veikia kaip „Lygiagretusis, įtampą aukštinantis reguliatorius“. Kai elektros energija yra perduodama iš baterijų bloko arba iš variklio veikiančio generatoriaus režimo rekuperacijos metu, keitiklis veikia kaip „Nuoseklusis, įtampą žeminantis reguliatorius“.

Kai tranzistorius T1 yra įjungtas iš kondensatorių bloko imama energija ir kaupiama induktyvume Ls. Kai T1 išjungiamas, induktyvume sukaupta energija teka per diodą D2 ir prafiltruota kondensatoriaus C keliauja į baterijų bloką arba į variklį.

Tokiu būdu elektros energiją galima perduoti aukštesnę įtampą turinčiam elektros šaltiniui, ar aukštesnės nominalios veikimo įtampos elektros varikliui, nei superkondensatorių bloko įtampa. Dėl to nukritus superkondensatorių bloko įtampai, srovė nenustoja tekėti, dėka šio keitiklio.

Kai tranzistorius T2 yra įjungtas, energija teka iš baterijų bloko per induktyvumą Ls į superkondensatorių bloką, dalis energijos kaupiama induktyvume. Kai tranzistorius T2 užsidaro, induktyvume sukaupta energija atiduodama į superkondensatorių bloką per diodą D1.

Tokia sistema leidžia reguliuoti superkondensatorių įkrovimo lygį priklausomai nuo akumuliatorių įkrovimo lygio ir nuo elektromobilio esamo greičio. Tam kad rekuperacinis stabdymas būtų efektyvus, superkondensatorių blokas turi būti pilnai iškrautas.



17 pav. Superkondensatorių įkrovimo lygis priklausomai nuo greičio ir baterijų įkrovimo lygio.

Šią valdymo sistemą galima pagaminti naudojant Atmega 32 mikrovaldiklį. Valdiklio išėjimai siųstų impulso pločio moduliatoriaus (IPM, angl.– PWM) signalus T1 ir T2 tranzistoriams, priklausomai nuo įėjimo signalų.

Įėjimo signalai būtų: elektromobilio greitis nuo holo daviklio, Akumuliatorių ir kondensatorių blokų matavimo įtampa ir srovės matavimas.

Tranzistoriui T2 siunčiamo IPM signalo impulso plotis turi būti paduodamas priklausomai nuo to kaip greitai norime stabdyti elektromobilį.

Tranzistoriui T1 siunčiamo IPM signalo impulso plotis turi keistis priklausomai nuo superkondensatorių bloko įkrovimo lygio. Kuo mažesnis superkondensatorių bloko įkrovimo lygis, tuo didesnis IPM signalo impulso plotis [16].

$$k = \frac{t_1}{t} \quad (8)$$

$$E_1 = (1 - k) \cdot E_2 \quad (9)$$

$$k = \frac{1 - E_1}{E_2} \quad (10)$$

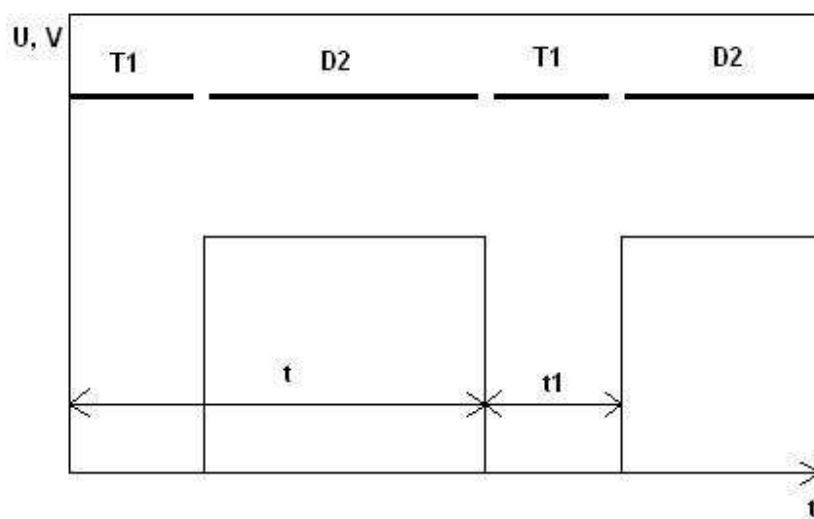
Čia E_1 – superkondensatorių bloko įtampa;

E_2 – baterijų bloko įtampa arba variklio nominali įtampa;

t – impulso periodas;

t_1 – l jungto T2 tranzistoriaus veikimo laikas.

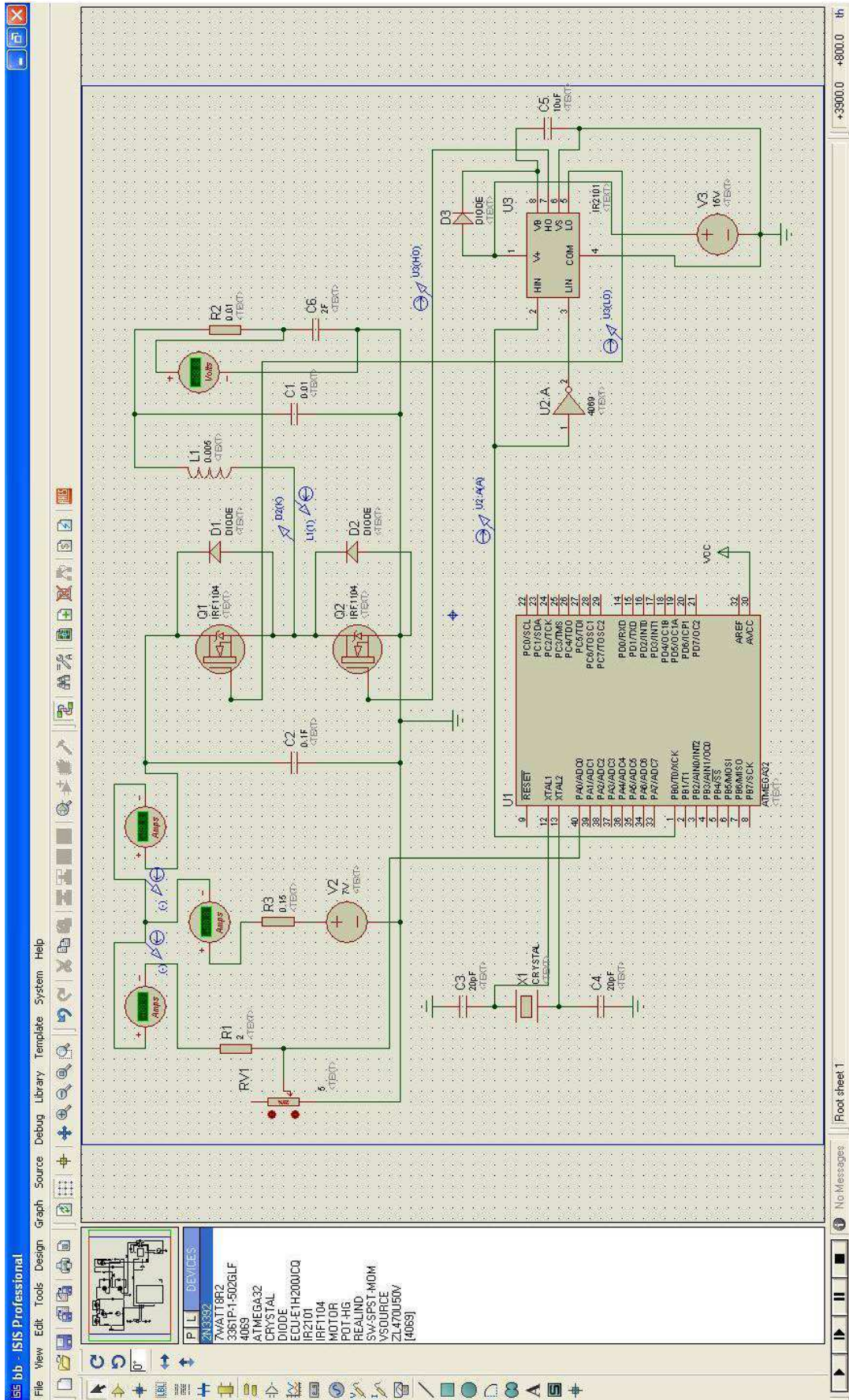
Pagal šias formules galima apskaičiuoti reikiamą impulso plotį pagal pirminę E_1 ir antrinę E_2 įtampas [17].



18 pav. Regulatoriaus generuojamas impulsas.

Tokiai sistemai modeliuoti buvo parinkta modeliavimo programa „Proteus“. Šioje programoje galima pasirinkti realius komponentus, kuriuos galima nusipirkti elektronikos parduotuvėje.

Sistemai valdyti parinktas Atmel firmos mikrovaldiklis „Atmega32“, MOSFET lauko tranzistoriai. „Proteus“ programoje sumodeliuota schema atrodo taip:



19 pav. „Proteus“ programa sumodeliuotas keitiklis

V2 – imituojamas elektromobilio akumuliatorių blokas;

V1 – imituojamas elektromobilio superkondensatorių blokas;

RV1 – imituojamas elektromobilio elektros variklis. Variklis pakeistas kaip reguliuojama varža;

R2 ir R3 – baterijų bloko ir superkondensatorių bloko vidinės varžos.

Programoje parinktos elementų charakteristikos parinktos veikimo principui išsiaiškinti. Jos neatitinka konkrečių baterijų, superkondensatorių ar elektros variklio charakteristikų.

Šioje modeliavimo programoje tranzistoriai Q1 ir Q2 bus valdomi vienu IPM signalu, tačiau vienam iš jų bus siunčiamas invertuotas signalas o kitam tranzistoriai neinvertuotas signalas. IPM signalus generuoja mikrovaldiklis.

Į mikrovaldiklio koją ADC0 (Analog Digital Converter) siunčiamas įtampos kritimo ant varžos signalas, kuris parodo srovės stiprį grandinėje. Įtampos kritimas kinta nuo 0 iki 5 V įtampos. Mikrovaldiklis šią įtampą priklausomai nuo jos dydžio verčia į skaičių nuo 0 iki 255 (skaičių intervalas priklauso nuo pasirinkto laikrodžio (TIMER)). Reikia perskaičiuoti srovės stiprį esant skirtingam įtampos kritimui ant varžos. Kai srovės stipris perskaičiuotas pagal įtampos kritimą ant varžos, pagal įtampos kritimą ant varžos perskaičiuojama koks skaičius konvertuotas valdiklyje (0-255) kokį srovės stiprį atitinka. Programuojant mikrovaldiklį C++ kalba, kai yra žinoma kokį srovės stiprį atitinka skaitmeninis skaičius (0 – 255) gaunamas ADC0 įėjime, galime programoje nurodyti nuo kokios srovės stiprio grandinėje ribos turi būti siunčiamas IPM signalas į MOSFET tranzistorius, tam kad perduotų elektros energiją iš superkondensatorių bloko ir padidintų bendrą atiduodamą galingumą į apkrovą. Programa mikrovaldikliui buvo rašoma AVR studio programa (Priedas Nr 2). Sukurtas .hex failas įkeliamas į „Proteus“ programoje naudojamą virtualų mikrovaldiklį, kuris veikia pagal įrašytą programą.

Parinkant tranzistorių atsidarymo ir užsidarymo laikus reikia įvertinti tai, kad induktyvume tekanti srovė, uždarius tranzistorių T1, nesumažėtų iki nulio. Induktyvumo didėjanti srovė išreiškiama formule:

$$i_{L1}(t) = \frac{E_1 \cdot t}{L} + I_0; \quad (11)$$

Čia i_{L1} – srovės didėjimas induktyvume, A;

E_1 – superkondensatorių bloko įtampa, V;

t – laikas, s;

L – induktyvumas, H;

I_0 – induktyvumo srovė ciklo pradžioje, kai $t=0$, A.

Induktyvume mažėjančiai srovei išreikšti naudojama formulė:

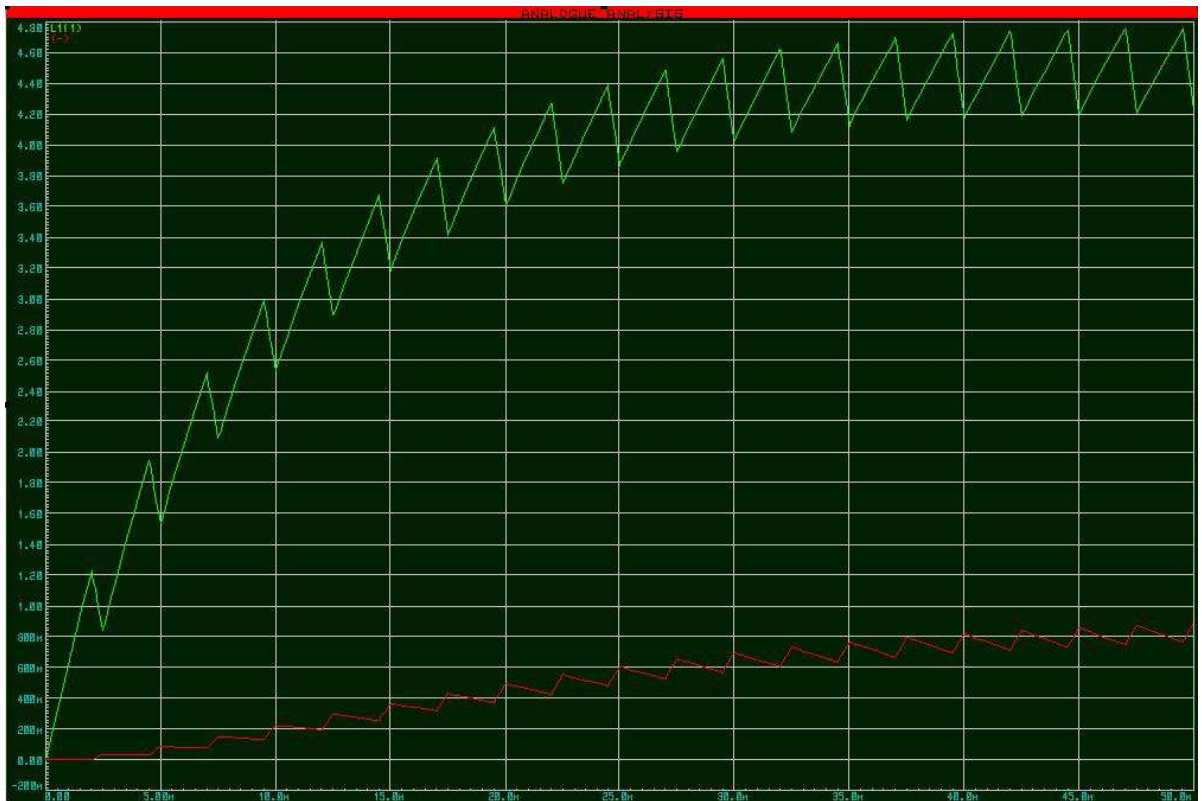
$$i_{L2}(t) = \frac{(E_1 - E_2) \cdot t}{L} + i_{L1}(T_1); \quad (12)$$

Čia E_2 – variklio nominali arba baterijų krovimo įtampa, V;

T_1 – T1 tranzistoriaus įjungimo laikas, s;

$i_{L1}(T_1)$ – maksimalus induktyvumo srovės dydis, A.

Pasinaudojus formulėmis galima paskaičiuoti kokių santykiu reikia atidaryti ir uždaryti tranzistorius, kad apkrovoje srovės nebūtų trūkios. Modeliuojant buvo gautos tokios srovės:



20 pav. Induktyvumo ir apkrovos srovės.

Žalios spalvos kreivė tai yra srovė tekanti per ritę (induktyvumą), o raudona kreivė yra srovė apkrovoje. Kaip matome abi srovės yra netrūkios, tačiau šiek tiek pulsuojančios.

Jei superkondensatorių įtampa iškrovimo metu kistų tiek pat nedaug kaip ir baterijų įtampa, toks keitiklis būtų nereikalingas. Veikiant superkondensatoriams ir baterijoms lygiagrečiai lygiagrečiai be šio regulatoriaus, superkondensatorių įtampa greitai krenta ir tada visa apkrova tenka baterijoms.

2.2. Elektromobilio dinaminė charakteristikų skaičiavimas.

Bus apskaičiuoti ir palyginti keturi elektromobilių variantai:

- elektromobilis be superkondensatorių;

- elektromobilis su kombinuota baterijų ir superkondensatorių sistema;
- elektromobilis su Maxwell superkondensatoriais;
- elektromobilis su grafeno superkondensatoriais.

Pasipriešinimas galia elektromobilio judėjimui bus skaičiuojama pagal formulę:

$$P = (m \cdot a + F_{oro} + F_{tr.}) \cdot v; \quad (13)$$

Čia P – pasipriešinimo galia, W;
 m – elektromobilio masė, kg;
 a – elektromobilio pagreitis, m/s²;
 F_{oro} – oro trinties pasipriešinimo jėga, N;
 F_{tr} – riedėjimo trinties jėga, N;
 v – elektromobilio greitis, m/s.

Tikslas bus įvertinti kiek yra viršijama nominali baterijų srovė ir kaip tai įtakos jų ilgaamžiškumą. Trečiuoju pavyzdžiu bus vertinamas tik superkondensatorių ilgaamžiškumas. Taip pat bus apskaičiuota kokį atstumą elektromobilis naudodamas vien tik superkondensatorius gali nukeliauti.

Pirmiausia reikia apsiskaičiuoti kiek energijos elektromobilis suvartoja išibėgdamas ir kokio galingumo turi būti varomoji jėga. Tam tikslui panaudota Mathcad matematinių skaičiavimų programą. Į programą suvedami reikalingi parametrai ir skaičiavimų formulės. Pakeitus bet kurį parametą, rezultatai perskaičiuojami, tokiu būdu galima greitai sužinoti elektromobilio suvartojamą energiją įvairiais režimais (Priedas 2).

Palyginimui bus parenkamas benzinu varomas automobilis, kurio charakteristikoms bus bandoma prilygti. Palyginimui bus parinktas BMW 325 (1991-1998m.) automobilis.

4 lentelė. Automobilio techninė specifikacija [18].

BMW 3 serijos sedanai (E36) 325i (1991 - 1998) dimensijos, kuro suvartojimas, akceleracija	
Cilindrų skaičius ir išdėstymas	L6
Degimo kamero tūris	2494 cm ³
Galia	141 kW @ 5900 RPM 192 AG @ 5900 RPM 189 BAG @ 5900 RPM
Sukimo momentas	245 Nm @ 4200 RPM
Kuro įpurškimo sistema	Multipoint Injection
Kuras	Petrol
CO2 emisijos	209 g/km

Maksimalus greitis	233 km/h
Akceleracija 0-100 km/h	8 s
Kuro sąnaudos	
Mieste	11.9 L/100Km
Greitkelyje	6.6 L/100Km
Mišriu režimu	8.8 L/100Km
Transmisija	
Važiuklės tipas	Galiniai varomieji ratai
Pavarų dėžė	Mechaninė, 5 laipsnių
Stabdžiai	
Priekiniai	Ventiliuojami stabdžių diskai
galiniai	Stabdžių diskai
Ratai	
Ratų dydis	205/60 ZR15
Dimensijos	
Ilgis	4430 mm
Plotis	1699 mm
Aukštis	1389 mm
Front/rear Track	1,420/1,430 mm
Ratų bazė	2700 mm
Bagažinės talpa	436 L
Aerodinaminis koeficientas, Cd	-
Svoris	
Svoris	1330 kg
Maksimalus svoris	1790 kg

Taigi tuščias (be keleivių ir bagažo) automobilis sveria 1330 kg. Sužinoti elektromobilio svorį, reikia išimti vidaus degimo variklį, įdėti elektros variklį (variklius) ir baterijas (arba superkondensatorius).

3. Tyrimo rezultatai.

3.1.1. Elektromobilis su baterijomis, be superkondensatorių.

Elektros variklis parenkamas panašaus sukimo momento kaip ir vidaus degimo variklis – Evo-electric AFM-140. elektros variklio svoris – 40kg.

5 lentelė. Naudojamo elektros variklio specifikacija.

Tipas	Ašinio srauto sinchroninis variklis
Maksimalus apsisukimų greitis	2850 aps./min.
Nominalus sukimo momentas	220 Nm
Maksimalus sukimomomentas (iki 60s)	400 Nm
Paleidimo sukimo momentas (iki 18s)	600 Nm
Nominali įtampa	320 V
Nominali galia	75 kW
Maksimali nominali galia (iki 60s)	167,5 kW
Sukimo momento tankis	10 Nm/kg
Galios tankis	4.2 kW/kg
Maksimalus efektyvumas	96.5 %
Aušinimas vanduo/glikolis	(50/50)
Aušinimo skysčio debetas	> 8 l/min
Ilgis	115,2 mm
Diametras	380 mm
Svoris	40 kg

Elektromobilio baterijų bloko kiekis ir nuoseklus, lygiagrečius baterijų grupių jungimas parenkamas pagal elektros variklio ir baterijų nominalią įtampą.

Pasirinktos elektromobilio baterijos – LiFePO_4 , kadangi įkrovimo ir iškrovimo metu išlaiko gan pastovią įtampą. Taip pat šių baterijų pasiūla rinkoje yra pakankama.

6 lentelė. Pasirinktos 3xE – 40 Ah baterijų celės parametrai.

Ličio junginio elektrodas	LiFePO_4
Nominali talpa	40 Ah
Nominali įtampa	3,4 V
Įkrovimo įtampa	3,6 V

Iškrautos baterijos įtampa	2 V
Maksimali įkrovimo srovė	≤3C
Maksimali iškrovimo srovė (30s)	≤4C
Maksimalus iškrovimo srovės impulsas (5ms)	≤12C
Standartinė įkrovimo/iškrovimo srovė	≤0,3C
Iškrovimo/ įkrovimo ciklų skaičius (80% iškrovimas)	≤2000 ciklų
Iškrovimo/ įkrovimo ciklų skaičius (70% iškrovimas)	≤3000 ciklų
Temperatūra įkraunant	0 – 55°C
Temperatūra iškraunant	-25 – 55oC
Efektyvumas iškraunant žemoje temperatūroje	≥85%
Savaiminis išsikrovimas per mėnesį	≤0,3%
Svoris	1,5 kg

Baterijų kiekis parenkamas taip, kad baterijų bloko įtampa būtų artima variklio nominaliai įtampai – 320 V. Visos celės jungiamos nuosekliai reikiamos įtampos gavimui.

$$N_{bat} = \frac{320}{3,4} = 94,1 \approx 95; \quad (14)$$

N_{bat} – celių skaičius.

Celių skaičius apvalinamas į didžiąją pusę. Baterijų bloko sudaryto iš 95 celių įtampa yra:

$$U_{bat} = 95 \cdot 3,4 = 323V; \quad (15)$$

Baterijų talpa, jungiant celes nuosekliai, nesikeičia. Ličio jonų baterijos rekomenduojama iškrovimo srovė yra 1C, šiuo atveju $I_{bat}=40A$. Remiantis šia rekomendacija, sukomplektuoto baterijų bloko nominalus galingumas:

$$P_{bat} = I_{bat} \cdot U_{bat} = 40 \cdot 323 = 12920W; \quad (16)$$

$$P_{batMAX} = 4 \cdot I_{bat} \cdot U_{bat} = 4 \cdot 323 = 51680W; \quad (17)$$

Elektros variklio ir baterijų bloko bendras svoris yra:

$$m = m_v + m_{bat} = 40 + (1,5 \cdot 95) = 182,5kg; \quad (18)$$

Vidaus degimo variklis sveria 198kg [19]. Taigi elektromobilis sveria 15,5kg mažiau, neatėmus kuro bako svorio – 1314,5 kg.

7 lentelė. Baterijų bloko parametrai.

Baterijų skaičius	95 vnt.
-------------------	---------

Nominali talpa	40 Ah
Nominali įtampa	324 V
Maksimali iškrovimo srovė (30s)	160 A (4C)
Ilgalaikė įkrovimo/iškrovimo srovė	40 A (1C)
Svoris	142,5 kg

Perdarant automobilį greičių dėžė nebus išmontuojama dėl aiškesnio palyginimo tarp elektromobilio ir automobilio. Bus paskaičiuota kaip keičiasi perdaryto automobilio dinaminės savybės. Elektromobilio išibėgėjimo greičiui apskaičiuoti, reikia žinoti pavarų dėžės perdavimo koeficientus:

8 lentelė. Greičių dėžės ir reduktoriaus perdavimų skaičius.

Modelis	1	2	3	4	5	reduktorius
BMW 325i	4.23	2.52	1.66	1.22	1.00	3.15

9 lentelė. Skirtingų pavarų greičio intervalai

Pavara	Greitis, km/h	
	Automobiliu	Elektromobiliu
1	0 – 55,2	0 – 24,2
2	55,2 – 92,6	24,2 – 40,6
3	92,6 – 140,6	40,6 – 61,6
4	140,6 – 191,3	61,6 – 83,9
5	191,3 – 233,4	83,9 – 102,3

Iš lentelės Nr. 9 matome, kad dėl lėtesnių elektros variklio apsisukimų elektromobilio greičio intervalai perjungiant pavaras ir maksimalus greitis yra mažesni. Palyginimo, tarp automobilio ir elektromobilio, palengvinimui, bus apskaičiuotas ir pakeistas elektromobilio reduktoriaus perdavimo skaičius greičio intervalams suvienodinti su automobilio greičio intervalais.

Perskaičiuoto reduktoriaus perdavimo skaičius:

$$R_{el} = \frac{R_{auto} \cdot v_{auto1}}{v_{el1}} = 1,38; \quad (19)$$

Čia: R_{el} – elektromobilio reduktoriaus perdavimo skaičius;

R_{auto} – automobilio reduktoriaus perdavimo skaičius;

v_{auto1} – automobilio maksimalus greitis pirma pavara;

v_{el1} – elektromobilio maksimalus greitis pirma pavara.

10 lentelė. Automobilio įsibėgėjimo charakteristikos.

pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Reikalinga galia, kW	Viršijama baterijų rekomenduojama galia, kW	Baterijų iškrovimo srovė, A
1	0 – 55,2	3,32	96,363	44,683	298,3
2	55,2 – 92,6	6,8	110,392	58,712	341,8
3	92,6 – 140,6	14	120,693	69,013	373,7
4	140,6 – 191,3	27,7	130,361	117,441	403,6
5	191,3 – 233,4	55	138,569	125,649	429,0

Iš lentelės matyti, kad įsibėgėjant automobilio maksimaliu pagreičiu, baterijų rekomenduojama iškrovimo srovė būtų žymiai viršyta. Toks režimas ypatingai kenkia baterijoms.

Reikalinga apskaičiuoti elektromobilio įsibėgėjimo greitį neviršijant rekomenduojamo baterijų iškrovimo srovės dydžio. Tokio elektromobilio baterijų bloko eksploatavimo trukmė greitai sutrumpėtų, jei kiekvieną kartą įsibėgėjant elektromobilio pagreitis būtų toks didelis, kad viršytų 4C baterijų srovę.

Tausojant baterijas, bus apskaičiuotas elektromobilio įsibėgėjimo greitis neviršijant rekomenduojamų srovės dydžių 4C (30s) ir 1C:

Kadangi elektromobilio maksimalus greitis, esant pastoviai iškrovimo srovei 40 A, yra 107 km/h, įsibėgėjimo greitį skaičiuosime iki 107 km/h greičio.

11 lentelė. Elektromobilio įsibėgėjimo charakteristikos.

Pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Naudojama galia, kW	Baterijų iškrovimo srovė, A
1	0 – 55,2	6,4	51,680	160
2	55,2 – 92,6	8,4	51,680	160

3	92,6 – 107	4,0	51,680	160
4	-	-	-	
5	-	-	-	

Baterijas iškraunant maksimalia iškrovimo srove 4C, elektromobilio įsibėgėjimo pagreitis mažesnis nei vidaus degimo varikliu varomo automobilio, tačiau padidinus baterijų kiekį, elektromobilio pagreitis susivienodintų su automobilio, bet padidėtų elektromobilio masė.

Pagrindinė elektromobilio problema - maksimalus greitis. Norint tausoti baterijas, didesniu greičiu nei 107 km/h važiuoti negalima, nes bus viršyta rekomenduojama baterijų iškrovimo srovė (40A).

Toliau bus apskaičiuota, kaip pasikeis elektromobilio įsibėgėjimo ir maksimalus greičiai padvigubinus baterijų skaičių. Dar vienas 95 baterijų blokas bus lygiagrečiai prijungtas prie jau skaičiavimuose naudoto, tokio pat – 95 baterijų bloko.

12 lentelė. 190 baterijų bloko parametrai.

Baterijos celių skaičius	190 vnt.
Nominali talpa	80 Ah
Nominali įtampa	324 V
Maksimali iškrovimo srovė (30s)	320 A (4C)
Ilgalaikė įkrovimo/iškrovimo srovė	80 A (1C)
Svoris	285 kg

Sumontavus 190 celių bateriją, bendras elektromobilio svoris, lyginant su automobilio svoriu, padidėjo 127 kg, tačiau pažiūrėjus į automobilio specifikaciją, maksimalus svoris nėra viršijamas. Atiduodama baterijų maksimali ir nominali srovė (tuo pačiu ir galia) padvigubėjo, o įtampa išliko tokia pati. Atlikus skaičiavimus, gauti tokie rezultatai:

13 lentelė. Elektromobilio įsibėgėjimo charakteristikos su dvigubai daugiau baterijų.

Pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Naudojama galia, kW	Baterijų iškrovimo srovė, A
1	0 – 55,2	3,4	103,360	320
2	55,2 – 92,6	4,2	103,360	320
3	92,6 – 140,2	9,7	103,360	320

4	-	-	-	
5	-	-	-	

Padvigubinus baterijų skaičių maksimalus greitis padidėjo nuo 107 iki 140,2 km/h greičio. Maksimalaus greičio skirtumas tik 33,2 km/h, kita vertus maksimalus leistinas greitis Lietuvoje šiltuoju metų periodu siekia tik 130km/h.

Važiuojant ištisai 140,2 km/h reikalinga elektros variklio galia yra – 25,840 kW.

Padvigubinus baterijų skaičių įsibėgėjimo laikas iki 140,2 gerokai padidėjo ir pralenkė automobilio, varomo vidaus degimo varikliu, įsibėgėjimo laiką (išskyrus pirma pavara).

14 lentelė. Elektromobilio ir automobilio įsibėgėjimo palyginimas.

Pavara	Greitis, km/h	Elektromobilio įsibėgėjimo laikas, s	Automobilio įsibėgėjimo laikas, s
1	0 – 55,2	3,4	3,32
2	55,2 – 92,6	4,2	6,8
3	92,6 – 140,6	9,8	14
4	140,6 – 191,3	-	27,7
5	191,3 – 233,4	-	55

Įdomu sužinoti kokį atstumą elektromobilis, sumontuota 190 celių baterija, gali nuvažiuoti. Norint nuvažiuoti kuo ilgesnį atstumą nereikia bėgėtis labai dideliu pagreičiu, bus priimta, kad elektromobilis pirma pavara iki 55,2 km/h įsibėgės per 5 sekundes, antra pavara iki 92,6 km/h per 7 sekundes. Priimama, kad elektromobilis įsibėgėjęs iki 92,6 km/h greičio nustoja bėgėtis ir palaiko šį pastovų greitį kol išsikrauna baterijų blokas.

15 lentelė. Nuvažiuojamas maksimalus atstumas vienu įkrovimu naudojant baterijas.

Pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Naudojama galia, kW	Sunaudota energija, Wh	Nuvažiuotas kelias, m
1	0 – 55,2	5	72,0	49,6	38
2	55,2 – 92,6	7	65,3	98,4	144
2	Const. – 92,6	-	9,5	25692	250100
Viso				25840	250289

Elektromobilis nuvažiuoja 250 km atstumą su pilnai įkrautu 190 baterijų bloku.

3.1.2. Elektromobilis su kombinuota baterijų ir superkondensatorių sistema

Elektromobilio dinaminėms savybėms pagerinti, lygiagrečiai baterijų blokui veiks superkondensatorių blokas. Superkondensatorių blokas atiduos energiją tik išibėgėjant ir stabdant. Elektromobilio maksimalus greitis - 106,6km/h.

Šiuo metu rinkoje esamų superkondensatorių energijos tankis yra iki 6 Wh/kg ir iki 6,9 kW/kg, tačiau parinkti superkondensatorių kiekį vadovaujantis šiuo galios tankio parametru negalima, kadangi išsireiškus šiuos skaičius į srovės dydį, maksimalus rekomenduojamas srovės dydis yra viršijamas kelis kartus.

16 lentelė. Maxwell firmos superkondensatoriaus BCAP3000 parametrai.

Talpa	3000 F
Vidinė varža	0.29 mΩ
Įtampa	2,7 V
Nominali srovė ($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)	210 A
Veikimo temperatūra	Nuo -40 iki 65°C
Galios tankis	5900 W/kg
Energijos tankis	6 Wh/kg
Eksploatavimo trukmė	10 m. (25°C)/1'000'000 įkrovimo/iškrovimo ciklų
Masė	510 g

Superkondensatorių blokas turi būti sukomplektuotas, kad vardinė superkondensatorių bloko įtampa atitiktų baterijų bloko įtampą. Superkondensatorių vardinė įtampa yra maža (2,7 V) dėl mažo atstumo tarp elektrodų. Dėl šios priežasties superkondensatorių blokas bus sudarytas iš daugiau nei pakankamo kiekio nuosekliai sujungtų superkondensatorių, dėl to išauga elektromobilio kaina ir padidėja bendras elektromobilio svoris, tačiau padidėja pagreitis. Užrašas $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ reiškia, kad esant 210 A srovei, superkondensatoriaus temperatūra padidėja 40°C . Reikia atkreipti dėmesį, kad superkondensatorių temperatūra nepakiltų aukščiau ribinės 65°C . Tam išvengti turi būti numatytas aušinimas.

17 lentelė. Superkondensatorių bloko parametrai.

Superkondensatorių skaičius	120 vnt.
Įtampa	324 V

Maksimali srovė ($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)	210 A
Maksimali galia (210 A)	68040 W
Sukaupta energija	367,2 Wh
Masė	61,2 kg

Prie esamos elektromobilio masės pridėjus superkondensatorių masę, elektromobilio svoris bus – 1375,7 kg.

18 lentelė. Apskaičiuotas elektromobilio su kombinuota sistema įsibėgėjimo greitis.

Pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Naudojama bendra galia, kW	Baterijų iškrovimo srovė, A	Superkondensatorių iškrovimo srovė, A
1	0 – 55,2	2,8	119,720	160	210
2	55,2 – 92,6	3,3	119,720	160	210
3	92,6 – 106,6	1,5	119,720	160	210
4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-

Teorinis skaičiavimas parodo, kad elektromobilis (119,7 kW) lenkia dinaminėmis charakteristikomis benzinu varomą automobilį (141 kW), tačiau dar reikėtų įvertinti galios nuostolius atsirandančius judėjimo iš vietos metu. Įdiegus superkondensatorius, elektromobilio svoris viršija automobilio gamyklinį svorį – 45,7 kg, nevertinant reikalingos įkrovimo, valdymo sistemos svorio.

Superkondensatorių panaudojimas tikslingas tik elektromobilyje, kurio maksimalus greitis yra iki 100 km/h. Jei elektromobilio maksimalus greitis didesnis, vadovaujantis baterijų gamintojo specifikacijomis LiFePO₄ bateriją galima 30 sekundžių iškrauti 4C dydžio srove, baterijų atiduodama galia pakankamai didelė įsibėgėti neviršijant baterijų rekomenduojamo srovės stiprio.

3.1.3. Elektromobilis su Maxwell superkondensatoriais

Bus palyginti du variantai: elektromobilis su šiuo metu rinkoje pardavinėjama superkondensatoriais ir naujausiomis technologijomis grįstais superkondensatoriais.

Maxwell firmos rinkoje pardavinėjamų BCAP3000 superkondensatorių panaudojimas.

Superkondensatorių blokas bus sudarytas iš 238 superkondensatorių. Du lygiagrečiai sujungti superkondensatorių blokai po 119 nuosekliai sujungtų superkondensatorių.

19 lentelė. 238 superkondensatorių bloko parametrai.

Superkondensatorių skaičius	238 vnt.
Įtampa	321,3 V
Maksimali srovė ($\Delta T=40^{\circ}C$)	420 A
Maksimali galia (410 A)	134946 W
Sukaupta energija	723,5 Wh
Masė	121,38 kg

20 lentelė. Apskaičiuotas elektromobilio su Maxwell superkondensatoriais įsibėgėjimo greitis.

Pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Naudojama galia, kW	Superkondensatorių iškrovimo srovė, A	Sunaudojama energija, Wh
1	0 – 55,2	2,2	134,946	420	41,7
2	55,2 – 92,6	2,7	134,946	420	78,7
3	92,6 – 140,6	6,0	134,946	420	177,4
4	140,6 – 191,3	12,2	134,946	420	362,3
5	191,3 – 195,3	2,6	134,946	420	63,4

Elektromobiliui bėgėjantis maksimaliu pagreičiu, vos įsibėgėjus iki 195,3 km/h greičio, superkondensatorių blokas išsikrauna. Padidinus superkondensatorių kiekį elektromobilio dinaminės savybės pagerėja, bet energijos tankio atžvilgiu charakteristikos labai prastos. Toks elektromobilis tikėtų nebent vadinamose „Drag“ lenktynėse, kuriose svarbu per kuo trumpesnę laiką įveikti 400 m atstumą.

Skaičiuojamas nuvažiuotas atstumas, jei elektromobilis įsibėgėtų lėtai ir palaikytų 92,6 km/h greitį.

21 lentelė. Nuvažiuojamas maksimalus atstumas vienu įkrovimu naudojant Maxwell superkondensatorius.

Pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Naudojama galia, kW	Sunaudota energija, Wh	Nuvažiutas kelias, m
1	0 – 55,2	5	62	42,7	38
2	55,2 – 92,6	7	57	85,5	144
2	Const. – 92,6	-	9	595,3	6126
Viso				723,5	6308

Taigi elektromobilis bėgėjantis vidutiniu pagreičiu, pilnai įkrautais superkondensatoriais nuvažiuoja tik 6,3 km sunaudodamas 723,5 Wh. Nors superkondensatorius galima pakrauti žymiai greičiau nei baterijas, tokio elektromobilio niekas nenorėtų. Nors Kinijoje naudojami autobusai varomi vien tik superkondensatoriais, tačiau superkondensatoriai yra įkraunami kiekvieną kartą sustojus autobusų stotelėje sumontuotais specialiai įkrovikliais.

3.1.4. Elektromobilis su grafeno superkondensatoriais

Vadovaujantis naujausių grafeno superkondensatorių skelbiamomis charakteristikomis bus atliktas skaičiavimas elektromobilio varomo vien tik grafeno superkondensatoriais.

22 lentelė. Grafeno superkondensatorių charakteristikos.

Specifinė talpa	100 –250 F/g
Įtampa	4 V
Srovės tankis	≤8 A/g
Galios tankis	≤9838 W/kg
Energijos tankis	≤90 Wh/kg

Superkondensatoriaus duomenys surinkti remiantis JAV 2012 m. publikuotu patentu. Kadangi realus produktas pagal patentą sukurtas nebuvo, o tik laboratorinis 13 mm skersmens monetos dydžio superkondensatorius, superkondensatorių bloko svorį ir įtampą parenkame pagal prieš tai naudotą BCAP3000 superkondensatorių bloką. Kadangi išilimo charakteristikos taip pat nėra iširtos, priimame, kad maksimali ilgalaikė srovė bus tokia pati kaip ir anksčiau skaičiuoto Maxwell superkondensatorių bloko:

23 lentelė. Grafeno superkondensatorių bloko charakteristikos.

Įtampa	321,3 V
Maksimali srovė	420 A
Maksimali galia (420 A)	134946 W
Sukaupta energija	10924,2 Wh
Masė	121,38 kg

Taigi šio superkondensatorių bloko skirtumas tik tas, kad labai didelis sukauptos energijos kiekis – 10924,2 Wh. Elektromobilio įsibėgėjimo laikas išlieka toks pat, kaip ir naudojant Maxwell

superkondensatorius, nes mes priėmėme, kad maksimali ilgalaikė srovė bus tokia pati, kaip ir Maxwell BCAP3000 superkondensatorių. Galima perskaičiuoti ir įsitikinti ar elektromobilis išvystys maksimalų 233 km/h greitį prieš išsikraunant superkondensatorių blokui:

24 lentelė. Apskaičiuotas elektromobilio su grafeno superkondensatoriais įsibėgėjimo greitis.

Pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Naudojama galia, kW	Superkondensatorių iškrovimo srovė, A	Sunaudojama energija, Wh
1	0 – 55,2	2,2	134,946	420	41,7
2	55,2 – 92,6	2,7	134,946	420	78,7
3	92,6 – 140,6	6,0	134,946	420	177,4
4	140,6 – 191,3	12,2	134,946	420	362,3
5	191,3 – 233,6	28,6	134,946	420	863,0

Elektromobilis, naudojantis grafeno superkondensatorius, išvystęs maksimalų greitį 233,6 km/h sunaudoja tik 13,9 % visos superkondensatoriuose sukauptos energijos. Važiuojant pastoviu 233,6 km/h greičiu reikalinga galia yra 101,7 kW. Elektros variklio ilgalaikė maksimali galia yra 75 kW, todėl norint pastoviai važiuoti 233 km/h greičiu, tektų parinkti galingesnę elektros variklį.

75 kW elektros varikliu galima važiuoti 209,8 km/h pastoviu greičiu, neviršijant nominalios elektros variklio galios.

Galima paskaičiuoti kokį atstumą nuvažiuos elektromobilis 92,6 km/h greičiu naudojant grafeno superkondensatorius:

25 lentelė. Nuvažiuojamas maksimalus atstumas vienu įkrovimu naudojant grafeno superkondensatorius.

Pavara	Greitis, km/h	Laikas, s	Naudojama galia, kW	Sunaudota energija, Wh	Nuvažiuotas kelias, m
1	0 – 55,2	5	62	42,7	38
2	55,2 – 92,6	7	57	85,5	144
2	Const. – 92,6	-	9	595,3	111098
Viso				723,5	111280

Taigi elektromobilis bėgėjantis vidutiniu pagreičiu, pilnai įkrautais grafeno superkondensatoriais nuvažiuoja 111,3 km. Tokiu elektromobiliu važinėti Lietuvos miestuose visiškai pakanka.

4. Tyrimo rezultatų aptarimas.

- Elektromobilis be superkondensatorių;

Elektromobilis, naudojantis 26 kW nominalios galios baterijų bloką be superkondensatorių, įsibėgėja iki 140,2 km/h maksimalaus greičio, ir palaiko pastovų greitį naudodamas 1C srovės stiprį.

Elektromobilio pagreitis, įsibėgėjant maksimalia 104 kW baterijų galia iki 140,2 km/h, yra didesnis nei automobilio, varomo 141 kW vidaus degimo varikliu.

Elektromobilis važiuodamas pastoviu 92,6 km/h greičiu, nuvažiuoja 250 km atstumą su pilnai įkrautu 190 baterijų bloku.

- Elektromobilis su kombinuota baterijų ir superkondensatorių sistema;

Elektromobiliui perpus sumažinus baterijų skaičių ir sumontavus 68 kW galios superkondensatorių bloką (bendras galingumas 119,7 kW), įsibėgėjimo pagreičiu lenkia benzinu varomą 141 kW galios automobilį. Taip pat įsibėgėjimo pagreitis didesnis ir už elektromobilį varomą vien baterijomis (26 kW), tačiau dėl dvigubai mažesnio baterijų skaičiaus elektromobilis įsibėgėja tik iki 107 km/h greičio.

- Elektromobilis su Maxwell superkondensatoriais;

Iš elektromobilio visiškai išmontavus baterijas ir padidinus superkondensatorių skaičių beveik du kartus iki 135 kW galios, elektromobiliui bėgėjantis maksimaliu pagreičiu, vos įsibėgėjus iki 195,3 km/h greičio, superkondensatorių baterijos išsikrauna. Šio elektromobilio įsibėgėjimo pagreitis yra didžiausias iš visų anksčiau minėtų, tačiau važiuodamas pastoviu 92,6 km/h greičiu nuvažiuoja tik 6,3 km.

- Elektromobilis su grafeno superkondensatoriais.

Elektromobilio įsibėgėjimo pagreitis toks pat, kaip ir elektromobilio, naudojančio Maxwell superkondensatorius, nes nėra duomenų apie grafeno superkondensatorių įšilimo charakteristikas.

Elektromobilis, naudojantis 135 kW galios grafeno superkondensatorių bloką, išvystęs maksimalų 233,6 km/h greitį sunaudoja tik 13,9 % visos superkondensatoriuose sukauptos energijos (11 kWh).

Skaičiuojant nuvažiuojamą maksimalų atstumą, elektromobilis važiuodamas tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir kiti elektromobiliai, pilnai įkrautais superkondensatoriais nuvažiuoja net 111 km.

26 lentelė. Elektromobilių su skirtingais energijos šaltiniais palyginimas.

Elektros energijos šaltinis	Nominali Galia, kW	Maksimali Galia, kW	Vidutinis pagreitis (0-92,6 km/h), m/s^2	Maksimalus greitis, km/h	Nuvažiuojamas kelias (92,6km/h), km	elektromobilio svoris, kg
Baterijos	26	103	3,4	140,6	250	1457
Baterijos ir Maxwell superkondensatoriai	13 (+68)	94	4,2	107	~130	1376
Maxwell superkondensatoriai	135	135	5,3	195,3	6,3	1253
Grafeno superkondensatoriai	135	135	5,3	233,6	111,3	1253

Išvados

1. Tyrime apžvelgti konkrečių produktų parametrai, straipsniai ir video reportažai apie baterijų ir superkondensatorių veikimo principus, laikymo sąlygas, iškrovimo ir įkrovimo srovės stiprius. Superkondensatorių ilgalaikis iškrovimo srovės stipris siekia 210 A per celę. Superkondensatoriaus yra įtampa tiesiogiai proporcinga įkrovimo lygiui. Naujausių superkondensatorių energijos tankis siekia iki 90Wh/kg (neskaitant pseudokondensatorių). Ličio jonų baterijų rekomenduojama pastovi maksimali iškrovimo srovė – 1C (40 A per celę), tačiau būtent ličio geležies fosfato baterijos 30 sekundžių gali būti iškraunamos 4C (160 A per celę) dydžio srovės stipriu. Baterijos įtampa iškraunant sumažėja iki 40%.

2. Kadangi iškraunant superkondensatorių įtampa mažėja tiesine priklausomybe, o baterijų įtampa išlieka beveik pastovi, kombinuotai baterijų ir superkondensatorių lygiagreto darbo įkrovimo/iškrovimo sistemai veikti naudojamas dvikryptis nuolatinės srovės reguliatorius leidžiantis visiškai iškrauti superkondensatorių bloką.

3. Atliekant skaičiavimus baterijų ir superkondensatorių iškrovimo srovė apribota gamintojų rekomendacijomis. Apskaičiavus ir palyginus elektromobilių įsibėgėjimo ir maksimalius greičius, nustatyta:

- Baterijomis varomas elektromobilis galintis įsibėgėti iki 140 km/h greičio, įsibėgėja greičiau, tačiau sveria 127 kg daugiau nei benzinu varomas automobilis. Kadangi pagreitis yra pakankamas superkondensatorių panaudojimas įsibėgėjimui – netikslingas.
- Baterijomis ir superkondensatoriais varomas elektromobilis galintis įsibėgėti iki 100 km/h greičio įsibėgėja greičiau, tačiau sveria 46 kg daugiau nei benzinu varomas automobilis. Šiuo atveju superkondensatoriai dengia viršijamą baterijų rekomenduojamos srovės dydį įsibėgėjimo metu. Priklausomai nuo važiavimo stiliaus baterijų ciklų skaičius padidėtų 150 – 500 ciklų. Taip pat šis elektromobilis geba kaupti energiją stabdant ir įsibėgėja greičiau už dvigubą baterijų kiekį turintį vien baterijomis varomą elektromobilį.
- Vien superkondensatoriais varomas elektromobilis gali įsibėgėti iki 195 km/h greičio, tačiau tik pasiekęs šį greitį superkondensatorių blokas išsikrauna. Šio elektromobilio įsibėgėjimo pagreitis $5,3 \text{ m/s}^2$ yra didžiausias. Maksimalus nuvažiuojamas atstumas yra 6 km. Toks elektromobilis gali būti skirtas tik specialiam naudojimui, pavyzdžiui trumpo atstumo lenktynėse.
- Vien grafeno superkondensatoriais varomo elektromobilio maksimalus greitis prilygsta benzinu varomo automobilio maksimaliam greičiui 233,6 km/h greičiui. Įsibėgėjimo pagreitis $5,3 \text{ m/s}^2$, o nuvažiuojamas maksimalus atstumas 111 km prilygsta ličio jonų baterijomis varomam

elektromobiliui. Toks elektromobilis būtų penkis kartus galingesnis ir nuvažiuotų tokį patį atstumą, kaip vien baterijomis varomas elektromobilis. Tačiau sukūrus realų standartus atitinkanti superkondensatorių, jo charakteristikos gali skirtis nuo patente [11] publikuoto.

Literatūra

- [1] – Galvaninio elemento paveikslas. Nuoroda į paveikslą: http://chemwiki.ucdavis.edu/@api/deki/files/6149/=ZnCu_detail.gif. [Peržiūrėta 2012-04-02];
- [2] – Ionic Liquids for Energy Storage Applications. Nuoroda į straipsnį: <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/ionic-liquids-for.html>. [Peržiūrėta 2012-04-02].;
- [3] – How to prolong lithium – based batteries. Nuoroda į straipsnį: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries. [Peržiūrėta 2012-04-02].
- [4] – Discharging at High and Low Temperatures. Nuoroda į straipsnį: http://batteryuniversity.com/learn/article/discharging_at_high_and_low_temperatures. [Peržiūrėta 2013-03-12].
- [5] – Fast and ultra-fast chargers. Nuoroda į straipsnį: http://batteryuniversity.com/learn/article/ultra_fast_chargers. [Peržiūrėta 2013-04-02].
- [6] – Supercapacitor. Nuoroda į straipsnį: <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>. [Peržiūrėta 2013-01-02].
- [7] – J. M. Boyea, R. E. Camacho, S. P. Turano and W. J. Ready, 2007. Carbon based supercapacitors: technologies and markets.
- [8] – Darbon nanotube. Nuoroda į straipsnį: http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube. [Peržiūrėta 2013-05-02].
- [9] – Aruna Zhamu, Zenning Yu, C, G. Liu, and Bor Z. Jang, „Spacer-Modified Nano Graphen Electrodes for Supercapacitors“ US. patent application Ser. No 12/655,247 (Dec. 28, 2009).
- [10] – Aruna Zhamu, Zenning Yu, C, G. Liu, and Bor Z. Jang, „Continuous Process for Producing Spacer-Modified Nano Graphene Electrodes for Supercapacitors“ US. patent application Ser. No 12/655,744 (Jan. 7, 2010).
- [11] – Zhenning Yu, David Neff, Chen-guang Liu, Bor Z. Jang, Aruna Zhamu, „Supercapacitor with a Meso-Porous Nano Graphene Electrode“ US. patent application Ser. No 12/804,911 (Aug. 2, 2010).
- [12] – General motors EV1. Nuoroda į straipsnį: http://en.wikipedia.org/wiki/General_Motors_EV1#Battery. [Peržiūrėta 2012-04-13].
- [13] – Nikel metal hidride battery. Nuoroda į straipsnį: http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_metal_hydride. [Peržiūrėta 2012-04-13].

- [14] – UCLA enhances their laser-scribed graphene supercapacitor technology, ready for commercialization. Nuoruoda į straipsnį: <<http://www.graphene-info.com/ucla-enhances-their-laser-scribed-graphene-supercapacitor-technology-ready-commercialization>>. [Peržiūrėta 2013-04-13].
- [15] – Kapton. Nuoruoda į straipsnį: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Kapton>>. [Peržiūrėta 2013-04-13].
- [16] – Juan W. Dixon, Micah E. Ortuzar, Ultracapacitors +DC-DC Converters in Regenerative Braking System, 2002.
- [17] – Bangimantas Starkus, Galios elektronikos kurso konspektas, 2003.
- [18] – BMW 3 Series Sedan (E36) 325i. Nuoruoda į straipsnį: <<http://www.autoevolution.com/engine/bmw-3-series-e36-sedan-1991-325i.html>>. [Peržiūrėta 2013-04-01].
- [19] – Engine specifications. Nuoruoda į straipsnį: <http://www.usautoparts.net/bmw/engines/m50.htm>. [Peržiūrėta 2013-03-20].
- [20] – Žydrūnas Kavaliauskas. Superkondnesatorių su anglies elektrodais, suformuotais iš elektrolankinio išlydžio argono -acitileno plazmos, tyrimas. 2010.
- [21] – Martin Hadartz, Martin Julander. Battery – Supercapacitor Energy Storage. 2008.

Priedai

Priedas Nr. 1

Oksidacijos – redukcijos laipsnis prie 25°C	E ⁰ (V)
$\text{Li}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Li}_{(\text{k})}$	-3.05
$\text{K}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{K}_{(\text{k})}$	-2.93
$\text{Ba}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Ba}_{(\text{k})}$	-2.90
$\text{Sr}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Sr}_{(\text{k})}$	-2.89
$\text{Ca}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Ca}_{(\text{k})}$	-2.87
$\text{Na}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Na}_{(\text{k})}$	-2.71
$\text{Mg}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Mg}_{(\text{k})}$	-2.37
$\text{Be}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Be}_{(\text{k})}$	-1.85
$\text{Al}^{3+}_{(\text{aq})} + 3 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Al}_{(\text{k})}$	-1.66
$\text{Mn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Mn}_{(\text{k})}$	-1.18
$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{H}_{2(\text{d})} + 2 \text{OH}^-_{(\text{aq})}$	-0.83
$\text{Zn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Zn}_{(\text{k})}$	-0.76
$\text{Cr}^{3+}_{(\text{aq})} + 3 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Cr}_{(\text{k})}$	-0.74
$\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Fe}_{(\text{k})}$	-0.44
$\text{Cd}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Cd}_{(\text{k})}$	-0.40
$\text{PbSO}_{4(\text{k})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Pb}_{(\text{k})} + \text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})}$	-0.31
$\text{Co}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Co}_{(\text{k})}$	-0.28
$\text{Ni}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Ni}_{(\text{k})}$	-0.25
$\text{Sn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Sn}_{(\text{k})}$	-0.14
$\text{Pb}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Pb}_{(\text{k})}$	-0.13
$2 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{H}_{2(\text{d})}$	0.00
$\text{Sn}^{4+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Sn}^{2+}_{(\text{aq})}$	+0.13
$\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Cu}^+_{(\text{aq})}$	+0.13
$\text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})} + 4 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{SO}_{2(\text{d})} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0.20
$\text{AgCl}_{(\text{k})} + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Ag}_{(\text{k})} + \text{Cl}^-_{(\text{aq})}$	+0.22
$\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Cu}_{(\text{k})}$	+0.34
$\text{O}_{2(\text{d})} + 2 \text{H}_2 + 4 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 4 \text{OH}^-_{(\text{aq})}$	+0.40
$\text{I}_{2(\text{k})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{I}^-_{(\text{aq})}$	+0.53
$\text{MnO}_4^-_{(\text{aq})} + 2 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{MnO}_{2(\text{k})} + 4 \text{OH}^-_{(\text{aq})}$	+0.59
$\text{O}_{2(\text{d})} + 2 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{2(\text{aq})}$	+0.68
$\text{Fe}^{3+}_{(\text{aq})} + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})}$	+0.77
$\text{Ag}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Ag}_{(\text{k})}$	+0.80

$\text{Hg}_2^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{Hg}(\text{sk})$	+0.85
$2 \text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}(\text{aq})$	+0.92
$\text{NO}_3^-(\text{aq}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 3 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{NO}(\text{d}) + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0.96
$\text{Br}_2(\text{sk}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{Br}^-(\text{aq})$	+1.07
$\text{O}_2(\text{d}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 4 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{MnO}_2(\text{k}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 14 \text{H}^+(\text{aq}) + 6 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 7 \text{H}_2\text{O}$	+1.33
$\text{Cl}_2(\text{d}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$	+1.36
$\text{Au}^{3+}(\text{aq}) + 3 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Au}(\text{k})$	+1.50
$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 8 \text{H}^+(\text{aq}) + 5 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 4 \text{H}_2\text{O}$	+1.51
$\text{Ce}^{4+}(\text{aq}) + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Ce}^{3+}(\text{aq})$	+1.61
$\text{PbO}_2(\text{k}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{PbSO}_4(\text{k}) + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.70
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.77
$\text{Co}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Co}^{2+}(\text{aq})$	+1.82
$\text{O}_3(\text{d}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{O}_2(\text{d}) + \text{H}_2\text{O}$	+2.07
$\text{F}_2(\text{d}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{F}^-(\text{aq})$	+2.87

Priedas Nr. 2

Įrašyta programa į Atmega32 mikrovaldiklį:

```
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

int main (void)
{
  DDRB |= (1 << 0); // | (1 << 1) | (1 << 2) | (1 << 3);

  ADCSRA |= (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0); // nustatau ADC dalikli 128.
  8MHz/128=62,5kHz (negali virsyti 200kHz)

  ADMUX |= (1 << REFS0); // Set ADC reference to AVCC
  ADMUX |= (1 << ADLAR); // padarau kad reiksme rasytu tik 8 bitu i ADCH registra (galima
  padaryti 10 bitu)
  ADMUX &= ~(1 << MUX4) | ~(1 << MUX3) | ~(1 << MUX2) | ~(1 << MUX1) | ~(1 << MUX0); //
  nustatau ADC0 koja
  // MUX nenustatineju nes MUX3-0 turi buti visi nuliai, jei pasirinkta koja ADC0.

  ADCSRA |= (1 << ADSC); // pradedu A2D nuiminet reiksmes
  ADCSRA |= (1 << ADIFSC); // nustatau ADC rezima free-running
  SFIOR &= ~(1 << ADTS2) | ~(1 << ADTS1) | ~(1 << ADTS0);
  ADCSRA |= (1 << ADEN); // ijungiu ADC
  for (;;)
  {
    ADCSRA |= (1 << ADSC); // pradedu A2D nuiminet reiksmes

    if (ADCH < 200)
    {
      PORTB |= (1 << 0);
      _delay_ms(2);
      PORTB &= ~(1 << 0);
    }
  }
}
```

```
_delay_ms(0.5);  
}  
else  
{  
PORTB &= ~(1 << 0);  
}  
}  
}
```

Priedas Nr. 3

Su 190 baterijų bloku

Duomenys:

rato spindulys:

$$r := 0.3 \quad \text{m}$$

aptakumo koeficientas

$$C_d := 0.26$$

riedėjimo trinties koeficientas

$$C_r := 0.01$$

Automobilio priekio paviršiaus plotas

$$A_v := 2.04 \quad \text{m}^2$$

laisvojo kritimo pagreitis

$$g := 9.81 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

oro tankis

$$\rho_{\text{oro}} := 1.29 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

elektros variklio aps. skaičius

$$\text{aps} := 2850$$

Automobilio pavarų dėžės
perdavimo skaičiai

$$b_1 := 4.23$$

$$b_2 := 2.52$$

$$b_3 := 1.66$$

vienos baterijos svoris

$$m_{\text{bat1}} := 1.5 \text{kg}$$

baterijų skaičius

$$N_{\text{bat}} := 95 \cdot 2 \quad \text{vnt}$$

baterijų įtampa

$$U_{\text{bat}} := 323 \quad \text{V}$$

$$I_{\text{bat}} := 80 \quad \text{A}$$

Maksimali galia

$$P_{\text{max}} := U_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}} \quad \text{W}$$

Elektros variklio svoris

$$m_{\text{variklio}} := 40 \quad \text{kg}$$

automobilio įsibėgėjimo greitis esant skirtingoms
pavaroms

$$t_1 := 3.32$$

$$t_2 := 6.8$$

$$t_3 := 14$$

$$t_4 := 27.7$$

$$b_4 := 1.22$$

$$t_5 := 55$$

$$b_5 := 1$$

Automobilio reduktoriaus
perdavimo skaičius

$$\text{reduk}_{\text{vdv.}} := 3.15$$

Perskaičiuotas elektromobilio
reduktoriaus perdavimo
skaičius

$$\text{reduk} := 1.38$$

$$m := 1330 - 198 + m_{\text{variklio}} + m_{\text{bat1}} \cdot N_{\text{bat}} = 1.457 \times 10^3 \quad \text{kg}$$

Skaičiuojami kiekvienos pavaros maksimalūs greičiai

$$\text{pirmas} := \frac{\text{aps}}{(b_1 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 55.218 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{antras} := \frac{\text{aps}}{(b_2 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 92.687 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{trecias} := \frac{\text{aps}}{(b_3 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 140.705 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{ketvirtas} := \frac{\text{aps}}{(b_4 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 191.451 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{penktas} := \frac{\text{aps}}{(b_5 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 233.571 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

elektromobilio perskaičiuotas reduktorius:

$$\text{pirmas} = \frac{\text{aps}}{(b_1 \cdot R_{\text{el}})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \text{ solve } , R_{\text{el}} \rightarrow 1.38000000000000025$$

Skaičiuojama galia ir energija

$$v_1 := 0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{pirmas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 5 \quad \text{s}$$

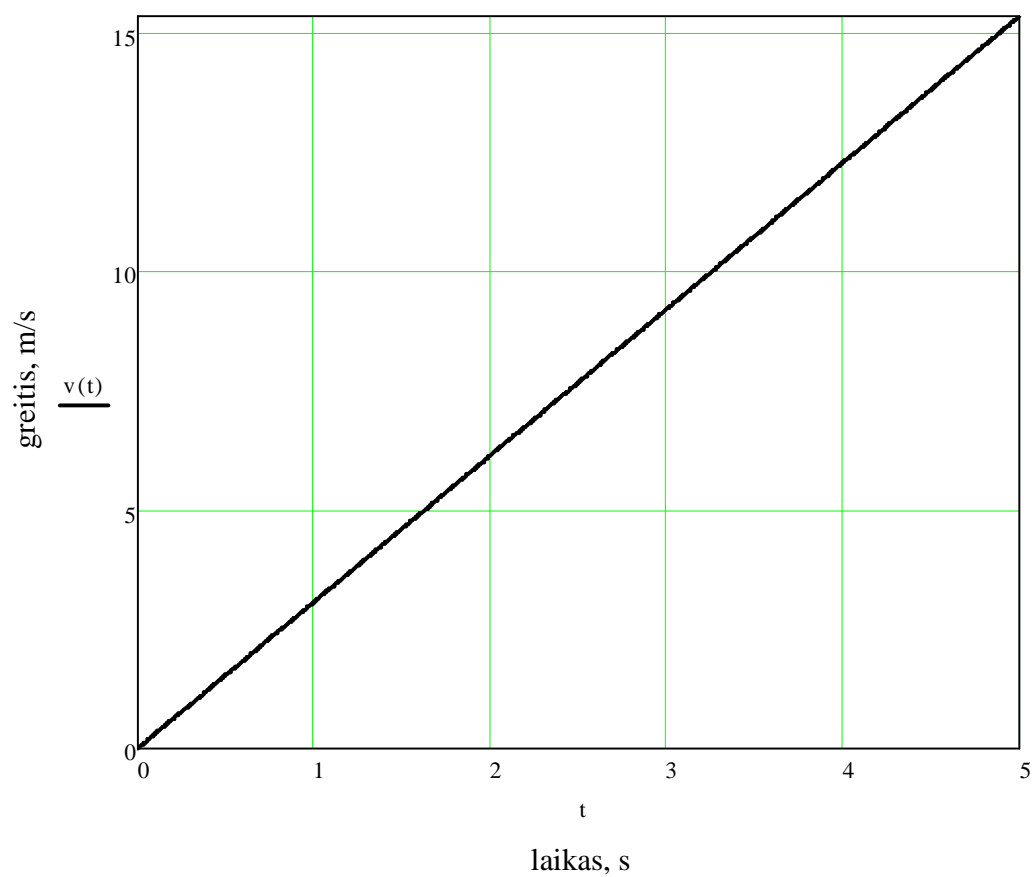
Greičio kitimas aprašomas tiesine funkcija

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 3.06764623384757222$$

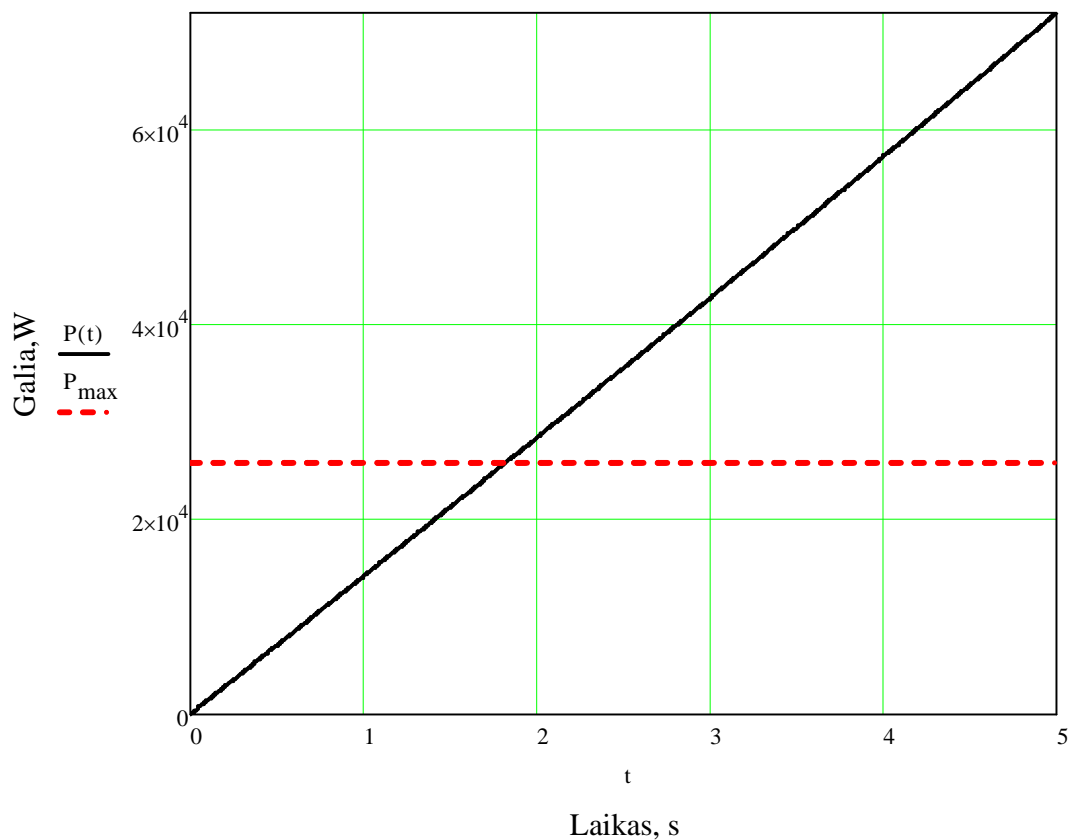
$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$



Skaičiuojam atiduodamą galią:

$$P := (m \cdot a + F_{\text{ar}} + F_{\text{rr}}) \cdot v^2 \quad \text{Bendroji formulė (skaičiavimas išjungtas)}$$

$$P(t) := m \cdot \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot v(t)$$



Matome, kad atiduoma galia yra didžiausia esant didžiausiam greičiui

$$P(\text{laikas}) = 71.985 \times 10^3 \quad \text{W}$$

Punkttyrinė linija rodo baterijų galią. Taigi kai man reikės apskaičiuoti energiją (kreivės integralą), turėsiu perteklinės energijos plotą atimti iš visos reikiamos energijos (P(t) integralo).

Randu funkcijos $P(t)$ susikirtimo tašką su P_{\max} tiese, tam kad žinočiau iki kurio laiko momento atiduodama galia viršija P_{\max} galią.

$$a := P(t) = P_{\max} \text{ solve } t \rightarrow \left(\begin{array}{c} 1.8219822934970834517 \\ -0.91099114674854172585 \ 37.840287286011114146 \\ -0.91099114674854172585 \ 37.840287286011114146 \end{array} \right)$$

$$b := \text{Re}(a_0) = 1.822$$

$$\text{susikirtimas} := \left\{ \begin{array}{l} c \leftarrow b \\ c \leftarrow 0 \text{ if } b < 0 \\ c \leftarrow \text{laikas} \text{ if } b > \text{laikas} \\ \text{return } c \end{array} \right.$$

Galios integralas laiko atžvilgiu yra energija.

Iš visos atiduodamos galios atimu galią, kuri viršija kW:

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) dt - \int_{\text{susikirtimas}}^{\text{laikas}} P(t) - P_{\max} dt$$

$$W = 105.633 \times 10^3 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$\frac{W}{3600} = 29.342 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Perteklinė :

$$W_{\text{pertekline}} := \int_{\text{susikirtimas}}^{\text{laikas}} P(t) - P_{\max} dt$$

$$W_{\text{pertekline}} = 7.278 \times 10^4 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$\frac{W_{\text{pertekline}}}{3600} = 20.217 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Elektromobilio išibėgėjimo greitis esant iškrovimo srovei 1C

Pirma pavara:

$$P_{\max} \cdot 4 = m \cdot \left(\frac{\text{pirmas} - 0}{3.6} \right) \cdot \frac{\text{pirmas}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{pirmas}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \frac{\text{pirmas}}{3.6} \text{ solve , t} \rightarrow 3.43014794199867169$$

Antra pavara:

$$P_{\max} \cdot 4 = m \cdot \left(\frac{\text{antras} - \text{pirmas}}{3.6} \right) \cdot \frac{\text{antras}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{antras}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{\text{antras}}{3.6} \right) \text{ solve , t} \rightarrow 4.16115312224717329$$

Trečia pavara :

$$z := 140.2$$

$$P_{\max} \cdot 4 = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{z}{3.6} - \frac{\text{antras}}{3.6} \right)}{t} \right] \cdot \frac{z}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{z}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{z}{3.6} \right) \text{ solve , t} \rightarrow 9.65813416653887638$$

Koki maksimalų greitį gali išvystyti elektromobilis atiduodamas 1C srovės dydį:

$$o(y) := \left[P_{\max} = m \cdot \left(\frac{y}{3.6} \right) \cdot \frac{y}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{y}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \frac{y}{3.6} \right]$$

$$h := o(y) \text{ solve , y} \rightarrow \begin{pmatrix} 140.24164615030064434 \\ -70.120823075150322168 \ 141.96082474936184388 \\ -70.120823075150322168 \ 141.96082474936184388 \end{pmatrix}$$

$$h_0 = 140.242 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Skaičiuojamas maksimalus nuvažiuojamas atstumas ir sunaudojama energija pirma pavara

$$v_1 := 0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{pirmas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 5 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 3.06764623384757222$$

$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

nuvažiuotas kelias:

$$s_1 := \int_0^{\text{laikas}} v(t) dt = 38.346 \quad \text{m}$$

Naudojama galia:

$$P(t) := m \cdot \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot v(t)$$

$$P(\text{laikas}) = 71.985 \times 10^3 \quad \text{W}$$

Sunaudota energija:

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) dt$$

$$W = 178.415 \times 10^3 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$W_1 := \frac{W}{3600} = 49.56 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Skaičiuojamas maksimalus nuvažiuojamas atstumas ir sunaudojama energija antra pavara

$$v_2 := \text{pirmas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{antras} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 7 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 1.48686934803836448$$

$$x(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

Nuvažiutas kelias:

$$s_2 := \int_0^{\text{laikas}} v(t) dt = 143.796 \quad \text{m}$$

Skaičiuojam reikalingą galią išsibėgėti:

$$P(t) := m \cdot \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot v(t)$$

$$P(\text{laikas}) = 65.308 \times 10^3 \quad \text{W}$$

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) dt$$

$$W = 354.211 \times 10^3 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$W_2 := \frac{W}{3600} = 98.392 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Skaičiuojamas maksimalus nuvažiuojamas atstumas ir sunaudojama energija trečia pavara

$$v_1 := 92. \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := v_1 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 1 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 0$$

$$\underline{\underline{v}}(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$\underline{\underline{P}}(t) := m \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot v(t)$$

$$P(1) = 9.512 \times 10^3$$

$$W_{\text{bat}} := P_{\text{max}} = 25.84 \times 10^3 \quad \text{Wh}$$

$$W_{\text{bat}} - W_1 - W_2 = 2.5692 \times 10^4 \quad \text{Wh}$$

$$t := \frac{W_{\text{bat}} - W_1 - W_2}{P(1)} = 2.701 \quad \text{h}$$

$$\underline{\underline{s}}_3 := t \cdot v_1 \cdot 1000 = 2.501 \times 10^5 \quad \text{m}$$

$$\frac{s_1 + s_2}{W_1 + W_2} = 1.231 \quad \frac{\text{m}}{\text{W} \cdot \text{h}}$$

Atstumai susumuojami

$$\underline{\underline{s}}_1 + s_2 + s_3 = 250.289 \times 10^3 \quad \underline{\underline{\text{m}}}$$

Priedas Nr. 4

Kombinuota baterijų ir superkondensatorių sistema

Duomenys:

rato spindulys:

$$r := 0.3 \quad \text{m}$$

aptakumo koeficientas

$$C_d := 0.26$$

riedėjimo trinties koeficientas

$$C_T := 0.01$$

Automobilio priekio paviršiaus plotas

$$A_v := 2.04 \quad \text{m}^2$$

laisvojo kritimo pagreitis

$$g := 9.81 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

oro tankis

$$\rho_{\text{oro}} := 1.29 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

elektros variklio aps. skaičius

$$\text{aps} := 2850$$

Automobilio pavarų dėžės
perdavimo skaičiai

$$b_1 := 4.2$$

$$b_2 := 2.5$$

vienos baterijos svoris

$$m_{\text{bat1}} := 1.5 \quad \text{kg}$$

baterijų skaičius

$$N_{\text{bat}} := 95 \quad \text{vnt}$$

baterijų įtampa

$$U_{\text{bat}} := 32 \quad \text{V}$$

baterijų rekomenduojama srovė

$$I_{\text{bat}} := 40 \quad \text{A}$$

Maksimali galia

$$P_{\text{max}} := U_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}} \quad \text{W}$$

Elektros variklio svoris

$$m_{\text{variklio}} := 40 \quad \text{kg}$$

automobilio įsibėgėjimo greitis esant skirtingoms
pavaroms

$$t_1 := 3.3$$

$$t_2 := 6.8$$

$$t_3 := 14$$

$$t_4 := 27.7$$

$$b_3 := 1.66$$

$$b_4 := 1.22$$

$$b_5 := 1$$

$$t_5 := 55$$

Automobilio redktoriaus
perdavimo skaičius

$$\text{reduk}_{vdv.} := 3.15$$

Perskaičiuotas elektromobilio
reduktoriaus perdavimo
skaičius

$$\text{reduk} := 1.38$$

Elektros variklio nominali galia

$$P_{\text{variklio}} := 7500 \quad \text{W}$$

Elektros variklio maksimali galia (60s)

$$P_{\text{variklioMAX}} := 16750 \quad \text{W}$$

Elektromobilio masė

$$m := 1376 \quad \text{kg}$$

Variklio nominali įtampa

$$U_{\text{variklio}} := 320 \quad \text{V}$$

Skaičiuojami kiekvienos pavaros maksimalūs greičiai

$$\text{pirmas} := \frac{\text{aps}}{(b_1 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 55.218 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{antras} := \frac{\text{aps}}{(b_2 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 92.687 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{trečias} := \frac{\text{aps}}{(b_3 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 140.705 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{ketvirtas} := \frac{\text{aps}}{(b_4 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 191.451 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{penktas} := \frac{\text{aps}}{(b_5 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 233.571 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

elektromobilio perskaičiuotas reduktorius:

$$55.172 = \frac{\text{aps}}{(b_1 \cdot R_{el})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \quad \text{solve } , R_{el} \rightarrow 1.38114138419440492$$

Skaičiuojama galia ir energija

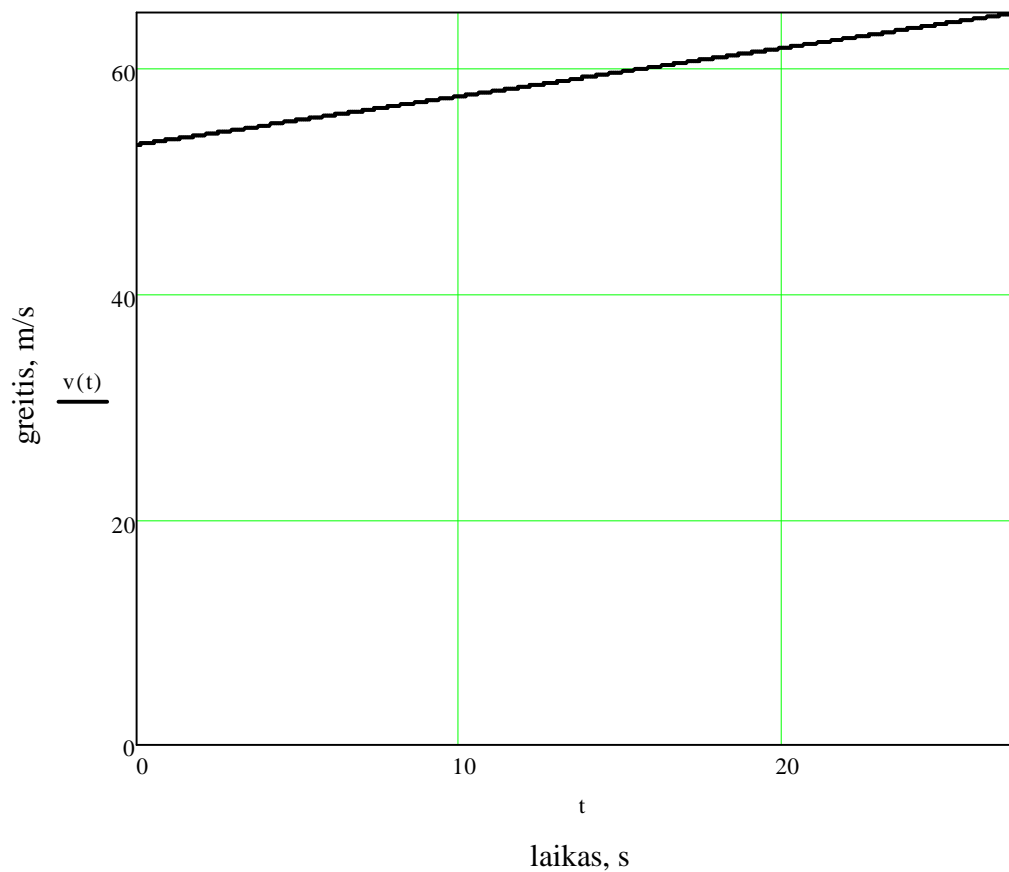
$$v_1 := \text{ketvirtas} \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{penktas} \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := t_5 - t_4 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 0.428564160394305657$$

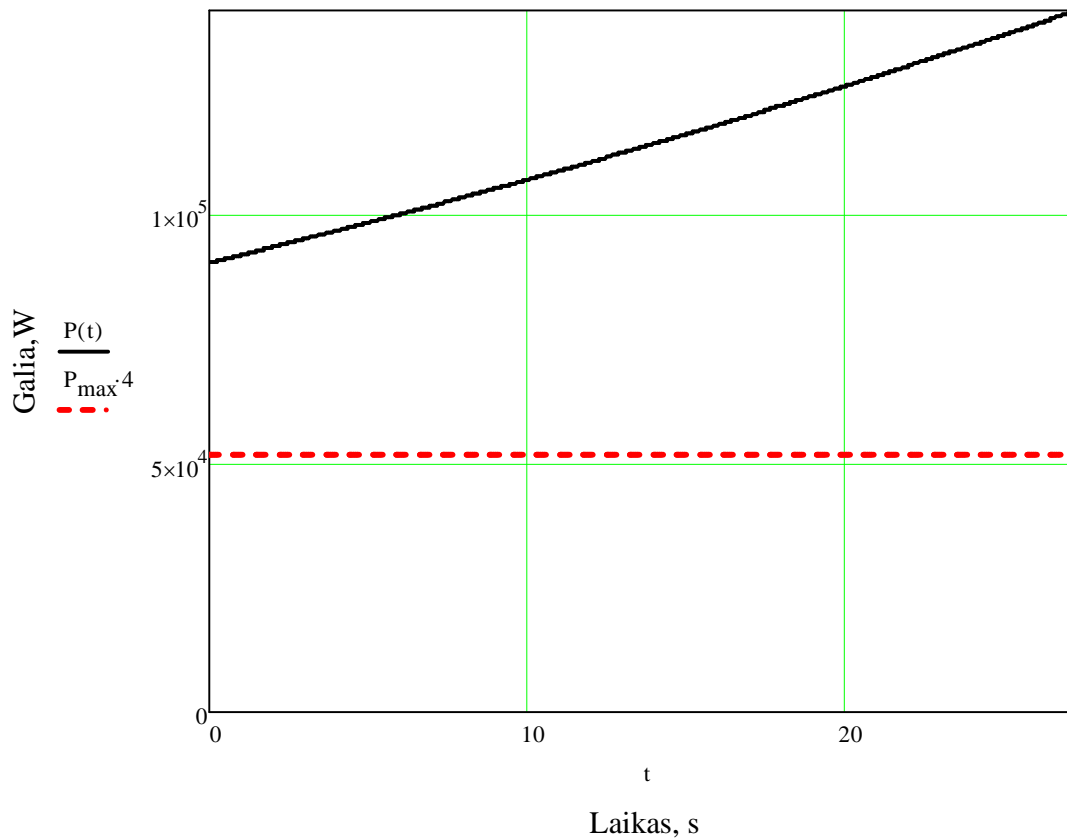
$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$



Skaičiuojam atiduodamą galią:

$$P := (m \cdot a + F_{ar} + F_{rr}) \cdot v \quad \text{Bendroji formulė (skaičiavimas išjungtas)}$$

$$P(t) := m \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{oro} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot v(t)$$



Matome, kad baterijų galios neužtenka įsibėgėti iki reikiamo greičio

$$P(\text{laikas}) = 140.671 \times 10^3 \quad \text{W}$$

Punktyrinė linija rodo baterijų maksimalią galią. Taigi kai man reikės apskaičiuoti energiją (kreivės integralą), turėsiu perteklinės energijos plotą atimti iš visos reikiamos energijos (P(t) integralo).

Randu funkcijos P(t) susikirtimo tašką su Pmax tiese, tam kad žinočiau iki kurio laiko momento atiduodama galia viršija Pmax galią.

$$a := P(t) = P_{\max} \text{ solve, } t \rightarrow \begin{pmatrix} -86.945112002356347816 \\ -142.663807635185641 \ 111.9888201139773266 \\ -142.663807635185641 \ 111.9888201139773266 \end{pmatrix}$$

$$b := \text{Re}(a_0) = -86.945 \times 10^0$$

$$\text{susikirtimas} := \begin{cases} c \leftarrow b \\ c \leftarrow 0 \text{ if } b < 0 \\ c \leftarrow \text{laikas} \text{ if } b > \text{laikas} \\ \text{return } c \end{cases}$$

Galios integralas laiko atžvilgiu yra energija.

Iš visos atiduodamos galios atimu galią, kuri viršija kW:

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) dt - \int_{\text{susikirtimas}}^{\text{laikas}} P(t) - P_{\max} dt$$

$$W = 352.716 \times 10^3 \quad W \cdot s$$

$$\frac{W}{3600} = 97.977 \times 10^0 \quad W \cdot h$$

Perteklinė :

$$W_{\text{pertekline}} := \int_{\text{susikirtimas}}^{\text{laikas}} P(t) - P_{\max} dt$$

$$W_{\text{pertekline}} = 2.76 \times 10^6 \quad W \cdot s$$

$$\frac{W_{\text{pertekline}}}{3600} = 766.579 \times 10^0 \quad W \cdot h$$

Kokį maksimalų greitį gali išvystyti elektromobilis atiduodamas 1C srovės dydį:

$$o(y) := \left[P_{\max} = m \cdot \left(\frac{y}{3.6} \right) \cdot \frac{y}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{y}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot \frac{y}{3.6} \right]$$

$$h := o(y) \text{ solve } , y \rightarrow \begin{pmatrix} 106.66915344920074318 \\ -53.334576724600371589 \ 116.77112491580219748 \\ -53.334576724600371589 \ 116.77112491580219748 \end{pmatrix}$$

$$h_0 = 106.669 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Skaičiuojami superkondensatorių bloko parametrai

$$I_{\text{kond}} := 210 \text{ A} \quad U_{\text{kond}} := 2.7 \text{ V} \quad N_{\text{kond}} := \frac{U_{\text{bat}}}{U_{\text{kond}}} = 119.63 \times 10^0 \quad \text{vnt} \quad m_{\text{kond}} := 0.51$$

$$N_{\text{kondv}} := \text{round}(N_{\text{kond}})$$

$$U_{\text{kondblok}} := N_{\text{kond}} \cdot U_{\text{kond}} = 324 \times 10^0 \quad \text{V}$$

$$P_{\text{kond1}} := 5900 \quad \frac{\text{W}}{\text{kg}} \quad W_{\text{kond1}} := 21600 \quad \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{kg}}$$

$$m_{\text{kondblok}} := m_{\text{kond}} \cdot N_{\text{kond}} = 61.2 \times 10^0 \quad \text{kg}$$

$$P_{\text{kond}} := I_{\text{kond}} \cdot U_{\text{kond}} \cdot N_{\text{kond}} = 68.04 \times 10^3 \quad \text{W}$$

$$W_{\text{kond}} := \frac{m_{\text{kondblok}} \cdot W_{\text{kond1}}}{3600} = 367.2 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

$$m := 1330 - 198 + m_{\text{variklio}} + m_{\text{bat1}} \cdot N_{\text{bat}} + m_{\text{kondblok}} = 1.376 \times 10^3 \quad \text{kg}$$

Pirma pavara:

$$\text{laikas1}(t) := P_{\max} \cdot t + P_{\text{kond}} = m \cdot \left(\frac{\text{pirmas}}{3.6} - 0 \right) \cdot \frac{\text{pirmas}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{pirmas}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot \frac{\text{pirmas}}{3.6}$$

$$\text{laikas1}(t) \text{ solve } , t \rightarrow 2.78018781011724705$$

Antra pavara:

$$\text{laikas2}(t) := P_{\max} \cdot 4 + P_{\text{kond}} = m \cdot \left(\frac{\frac{\text{antras}}{3.6} - \frac{\text{pirmas}}{3.6}}{t} \right) \cdot \frac{\text{antras}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{antras}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot \left(\frac{\text{antras}}{3.6} \right)$$

$\text{laikas2}(t) \text{ solve } , t \rightarrow 3.33939174276313018$

Trečia pavara (nepilnai):

$$\text{laikas3}(t) := P_{\max} \cdot 4 + P_{\text{kond}} = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{h_0}{3.6} - \frac{\text{antras}}{3.6} \right)}{t} \right] \cdot \frac{h_0}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{h_0}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot \left(\frac{h_0}{3.6} \right)$$

$\text{laikas3}(t) \text{ solve } , t \rightarrow 1.48239838127715138$

Priedas Nr.5

Su Maxwell superkondensatoriais

Duomenys:

rato spindulys:

$$r := 0.3 \quad \text{m}$$

aptakumo koeficientas

$$C_d := 0.2$$

riedėjimo trinties koeficientas

$$C_f := 0.01$$

Automobilio priekio paviršiaus plotas Variklio nominali įtampa

$$A_v := 2.0 \quad \text{m}^2$$

$$U_{\text{variklio}} := 320 \quad \text{V}$$

laisvojo kritimo pagreitis

$$g := 9.81 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Maksimali galia

$$P_{\text{max}} := 13494 \quad \text{W}$$

oro tankis

$$\rho_{\text{oro}} := 1.29 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Elektros variklio svoris

$$m_{\text{variklio}} := 40 \quad \text{kg}$$

elektros variklio aps. skaičius

$$\text{aps} := 2850$$

automobilio įsibėgėjimo greitis esant skirtingoms pavaroms

$$t_1 := 3.32$$

Automobilio pavarų dėžės perdavimo skaičiai

$$t_2 := 6.8$$

$$b_1 := 4.25$$

$$t_3 := 14$$

$$b_2 := 2.52$$

$$b_3 := 1.66 \quad t_4 := 27.7$$

$$b_4 := 1.22 \quad t_5 := 55$$

$$b_5 := 1$$

Automobilio reduktoriaus
perdavimo skaičius

$$\text{reduk}_{\text{vdv.}} := 3.15$$

Perskaičiuotas elektromobilio
reduktoriaus perdavimo
skaičius

$$\text{reduk} := 1.38$$

Skaičiuojami superkondensatorių bloko parametrai

Maksimali ilgalaikė srovė

$$I_{\text{kond}} := 210 \text{ A}$$

vieno superkondensatoriaus įtampa

$$U_{\text{kond}} := 2.7 \text{ V}$$

Kondensatorių skaičius

$$N_{\text{kond}} := \frac{U_{\text{variklio}}}{U_{\text{kond}}} = 118.519 \times 10^0$$

vieno superkondensatoriaus svoris

$$m_{\text{kond}} := 0.51 \text{ kg}$$

$$N_{\text{kond}} := \text{round}(N_{\text{kond}}) = 119 \times 10^0 \text{ vnt}$$

$$U_{\text{kondblok}} := N_{\text{kond}} \cdot U_{\text{kond}} = 321.3 \times 10^0 \text{ V}$$

$$W_{\text{kond}} := 3.0 \text{ Wh}$$

Geresnėms dinaminėms savybėms pasiekti, bus prijungtas dar vienas superkondensatorių blokas lygiagrečiai:

$$N_{\text{kondblok}} := N_{\text{kond}} \cdot 2$$

$$m_{\text{kondblok}} := m_{\text{kond}} \cdot N_{\text{kond}} = 121.38 \times 10^0 \text{ kg}$$

$$I_{\text{kondblok}} := I_{\text{kond}} \cdot 2$$

$$P_{\text{kond}} := I_{\text{kond}} \cdot U_{\text{kond}} \cdot \frac{N_{\text{kond}}}{2} = 134.946 \times 10^3 \quad \text{W}$$

$$W_{\text{kond}} := N_{\text{kond}} \cdot W_{\text{kond}} = 723.52 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Elektromobilio masė

$$m := 1132 + m_{\text{kondblok}} = 1.253 \times 10^3 \quad \text{kg}$$

Skaičiuojami kiekvienos pavaros maksimalūs greičiai

$$\text{pirmas} := \frac{\text{aps}}{(b_1 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 55.218 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{antras} := \frac{\text{aps}}{(b_2 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 92.687 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{trečias} := \frac{\text{aps}}{(b_3 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 140.705 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{ketvirtas} := \frac{\text{aps}}{(b_4 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 191.451 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{penktas} := \frac{\text{aps}}{(b_5 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 233.571 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

elektromobilio perskaičiuotas reduktorius:

$$55.172 = \frac{\text{aps}}{(b_1 \cdot R_{\text{el}})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \quad \text{solve}, R_{\text{el}} \rightarrow 1.38114138419440492$$

Skaičiuojama galia ir energija

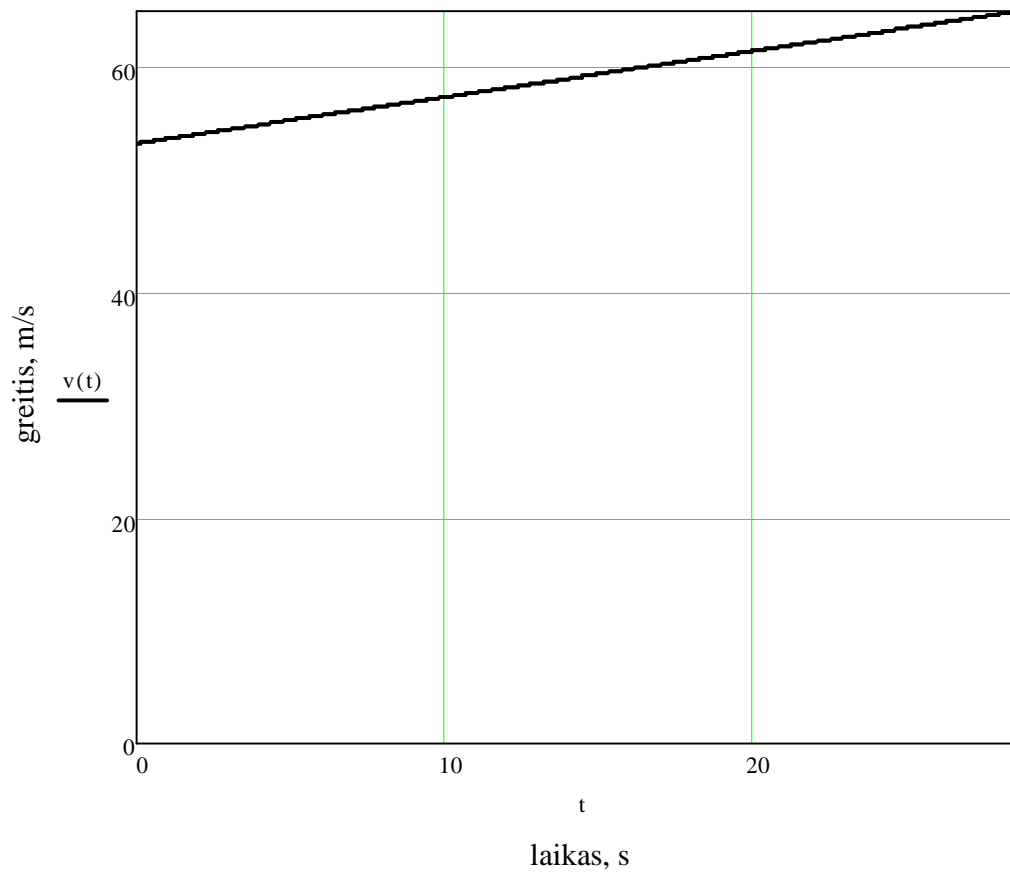
$$v_1 := \text{ketvirtas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{penktas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 28.6 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$x := \text{Find}(x) \rightarrow 0.409083971285473581$

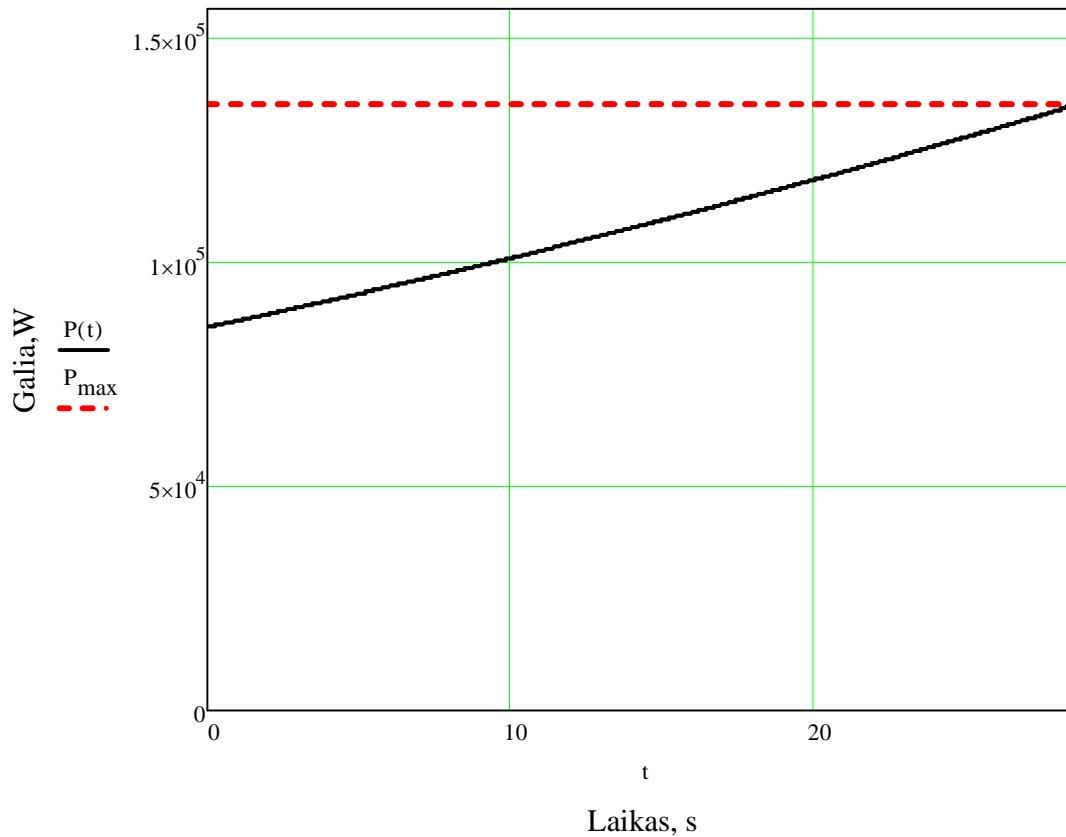
$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$



Skaičiuojam reikalingą galią įsibėgėti:

$$P := (m \cdot a + F_{\text{ar}} + F_{\text{rr}}) \cdot v \quad \text{Bendroji formulė (skaičiavimas išjungtas)}$$

$$P(t) := m \cdot \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot v(t)$$



Matome, kad pasipriešinimo galia yra didžiausia esant didžiausiam greičiui

$$P(\text{laikas}) = 134.897 \times 10^3 \quad \text{W}$$

Punktyrinė linija rodo kroviklio maksimalų perduodamos galios galingumą. Taigi kai man reikės apskaičiuoti energiją (kreivės integralą), turėsiu perteklinės energijos plotą atimti iš visos reikiamos energijos ($P(t)$ integralo).

Randu funkcijos $P(t)$ susikirtimo tašką su P_{\max} tiese, tam kad žinočiau iki kurio laiko momento atiduodama galia viršija P_{\max} galią.

$$a := P(t) = P_{\max} \text{ solve } t \rightarrow \begin{pmatrix} 28.624256953765455164 \\ -209.31212847688291463 \ 173.05774982562505166 \\ -209.31212847688291463 \ 173.05774982562505166 \end{pmatrix}$$

$$b := \operatorname{Re}(a_0) = 28.624 \times 10^0$$

$$\text{susikirtimas} := \begin{cases} c \leftarrow b \\ c \leftarrow 0 \text{ if } b < 0 \\ c \leftarrow \text{laikas} \text{ if } b > \text{laikas} \\ \text{return } c \end{cases}$$

Galios integralas laiko atžvilgiu yra energija.

Iš visos atiduodamos galios atimu galią, kuri viršija kW:

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) dt - \int_{\text{susikirtimas}}^{\text{laikas}} P(t) - P_{\max} dt$$

$$W = 3.11 \times 10^6 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$\frac{W}{3600} = 863.989 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Perteklinė :

$$W_{\text{pertekline}} := \int_{\text{susikirtimas}}^{\text{laikas}} P(t) - P_{\max} dt$$

$$W_{\text{pertekline}} = 0 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$\frac{W_{\text{pertekline}}}{3600} = 0 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Skaičiuojamas išbėgimo greitis

Pirma pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left(\frac{\frac{\text{pirmas}}{3.6} - 0}{t} \right) \cdot \frac{\text{pirmas}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{pirmas}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \frac{\text{pirmas}}{3.6} \text{ solve , t } \rightarrow 2.23688223711621671$$

Antra pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left(\frac{\frac{\text{antras}}{3.6} - \frac{\text{pirmas}}{3.6}}{t} \right) \cdot \frac{\text{antras}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{antras}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{\text{antras}}{3.6} \right) \text{ solve , t } \rightarrow 2.66714058316075927$$

Trečia pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{\text{trecias}}{3.6} - \frac{\text{antras}}{3.6} \right)}{t} \right] \cdot \frac{\text{trecias}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{trecias}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{\text{trecias}}{3.6} \right) \text{ solve , t } \rightarrow 5.95828432426969999$$

Ketvirta pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{\text{ketvirtas}}{3.6} - \frac{\text{trecias}}{3.6} \right)}{t} \right] \cdot \frac{\text{ketvirtas}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{ketvirtas}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{\text{ketvirtas}}{3.6} \right) \text{ solve , t } \rightarrow 12.229161865$$

Penkta pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{195.303}{3.6} - \frac{\text{ketvirtas}}{3.6} \right)}{t} \right] \cdot \frac{195.303}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{195.303}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{195.303}{3.6} \right) \text{ solve , t } \rightarrow 0.9894790809570$$

Ties penkta pavara visa sukaupta superkondensatorių energija yra išseikvojama,
Skaičiuojame kuriuo laiko momentu superkondensatoriai iškraunami:

$$\int_0^{2.6156} P(t) dt = 228.34 \times 10^3 \qquad 63.423600 = 228.312 \times 10^3$$

Greitis iki išsikraunant superkondensatoriams:

$$v(2.6156 \cdot 3.6 = 195.303 \times 10^0$$

Skaičiuojams maksimalus nuvažiuojamas atstumas ir sunaudota energija

$$x_1 := 0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad x_2 := \text{pirmas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 5 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 3.06764623384757222$$

$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

nuvažiuotas kelias:

$$s_1 := \int_0^{\text{laikas}} v(t) dt = 38.346 \times 10^0 \quad \text{m}$$

Naudojama galia:

$$P(t) := m \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot v(t)$$

$$P(\text{laikas}) = 62.098 \times 10^3 \quad \text{W}$$

Sunaudota energija:

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) dt$$

$$W = 153.697 \times 10^3 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$W_1 := \frac{W}{3600} = 42.694 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Skaičiuojama galia ir energija

$$v_1 := \text{pirmas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{antras} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 7 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 1.48686934803836448$$

$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

Nuvažiutas kelias:

$$s_2 := \int_0^{\text{laikas}} v(t) \, dt = 143.796 \times 10^0 \quad \text{m}$$

Skaičiuojam reikalingą galią įsibėgėti:

$$P(t) := m \cdot \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot v(t)$$

$$P(\text{laikas}) = 56.999 \times 10^3 \quad \text{W}$$

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) \, dt$$

$$W = 307.803 \times 10^3 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$W_2 := \frac{W}{3600} = 85.501 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

$$v_1 := 92. \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := v_1 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 1 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 0$$

$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$P(t) := m \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot v(t)$$

$$P(1) = 8.998 \times 10^3$$

$$t := \frac{W_{\text{kond}} - W_1 - W_2}{P(1)} = 66.158 \times 10^{-3} \quad \text{h}$$

$$s_3 := t \cdot v_1 \cdot 1000 = 6.126 \times 10^3 \quad \text{m}$$

$$\frac{s_1 + s_2}{W_1 + W_2} = 1.421 \quad \frac{\text{m}}{\text{W} \cdot \text{h}}$$

$$s_1 + s_2 + s_3 = 6.308 \times 10^3 \quad \text{m}$$

Priedas Nr. 6

Su grafeno superkondensatoriais

Duomenys:

rato spindulys:

$$r := 0.3 \quad \text{m}$$

aptakumo koeficientas

$$C_d := 0.2$$

riedėjimo trinties koeficientas

$$C_r := 0.01$$

Automobilio priekio paviršiaus plotas

$$A_v := 2.0 \quad \text{m}^2$$

laisvojo kritimo pagreitis

$$g := 9.81 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

oro tankis

$$\rho_{\text{oro}} := 1.29 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

elektros variklio aps. skaičius

$$\text{aps} := 2850$$

Automobilio pavarų dėžės
perdavimo skaičiai

$$b_1 := 4.2$$

$$b_2 := 2.5$$

$$b_3 := 1.6$$

Nominali elektros variklio galia

$$P_{\text{variklio}} := 7500 \quad \text{W}$$

Maksimali elektros variklio galia

$$P_{\text{variklioMAX}} := 16750 \quad \text{W}$$

Variklio nominali įtampa

$$U_{\text{variklio}} := 320 \quad \text{V}$$

Maksimali galia

$$P_{\text{max}} := 13494 \quad \text{W}$$

Elektros variklio svoris

$$m_{\text{variklio}} := 40 \quad \text{kg}$$

automobilio įsibėgėjimo greitis esant skirtingoms
pavaroms

$$t_1 := 3.3$$

$$t_2 := 6.8$$

$$t_3 := 14$$

$$t_4 := 27.7$$

$$b_4 := 1.22$$

$$t_5 := 55$$

$$b_5 := 1$$

Automobilio redktoriaus
perdavimo skaičius

$$\text{reduk}_{\text{vdv.}} := 3.15$$

Perskaičiuotas elektromobilio
reduktoriaus perdavimo
skaičius

$$\text{reduk} := 1.38$$

Skaičiuojami superkondensatorių bloko parametrai

$$I_{\text{kond}} := 210 \text{ A} \quad U_{\text{kond}} := 2.7 \text{ V} \quad N_{\text{kond}} := \frac{U_{\text{variklio}}}{U_{\text{kond}}} = 118.519 \times 10^0 \quad \text{vnt} \quad m_{\text{kond}} := 0.51$$

$$N_{\text{kondblok}} := \text{round}(N_{\text{kond}}) = 119 \times 10^0$$

$$U_{\text{kondblok}} := N_{\text{kond}} \cdot U_{\text{kond}} = 321.3 \times 10^0 \quad \text{V}$$

$$W_{\text{kond}} := 90 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$$

Geresnėms dinaminėms savybėms pasiekti, bus prijungtas dar vienas superkondensatorių blokas lygiagrečiai:

$$N_{\text{kondblok}} := N_{\text{kond}} \cdot 2$$

$$m_{\text{kondblok}} := m_{\text{kond}} \cdot N_{\text{kond}} = 121.38 \times 10^0 \quad \text{kg}$$

$$I_{\text{kondblok}} := I_{\text{kond}} \cdot 2$$

$$P_{\text{kond}} := I_{\text{kond}} \cdot U_{\text{kond}} \cdot \frac{N_{\text{kond}}}{2} = 134.946 \times 10^3 \quad \text{W}$$

$$W_{\text{kondblok}} := m_{\text{kondblok}} \cdot W_{\text{kond}} = 10.924 \times 10^3 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

$$m := 1132 + m_{\text{kondblok}} = 1.253 \times 10^3 \quad \text{kg}$$

Skaičiuojami kiekvienos pavaros maksimalūs greičiai

$$\text{pirmas} := \frac{\text{aps}}{(b_1 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 55.218 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{antras} := \frac{\text{aps}}{(b_2 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 92.687 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{trecias} := \frac{\text{aps}}{(b_3 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 140.705 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{ketvirtas} := \frac{\text{aps}}{(b_4 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 191.451 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{penktas} := \frac{\text{aps}}{(b_5 \cdot \text{reduk})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 233.571 \times 10^0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

elektromobilio perskaičiuotas reduktorius:

$$55.172 = \frac{\text{aps}}{(b_1 \cdot R_{el})} \cdot \frac{60}{1000} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \text{ solve } , R_{el} \rightarrow 1.38114138419440492$$

Skaičiuojama galia ir energija

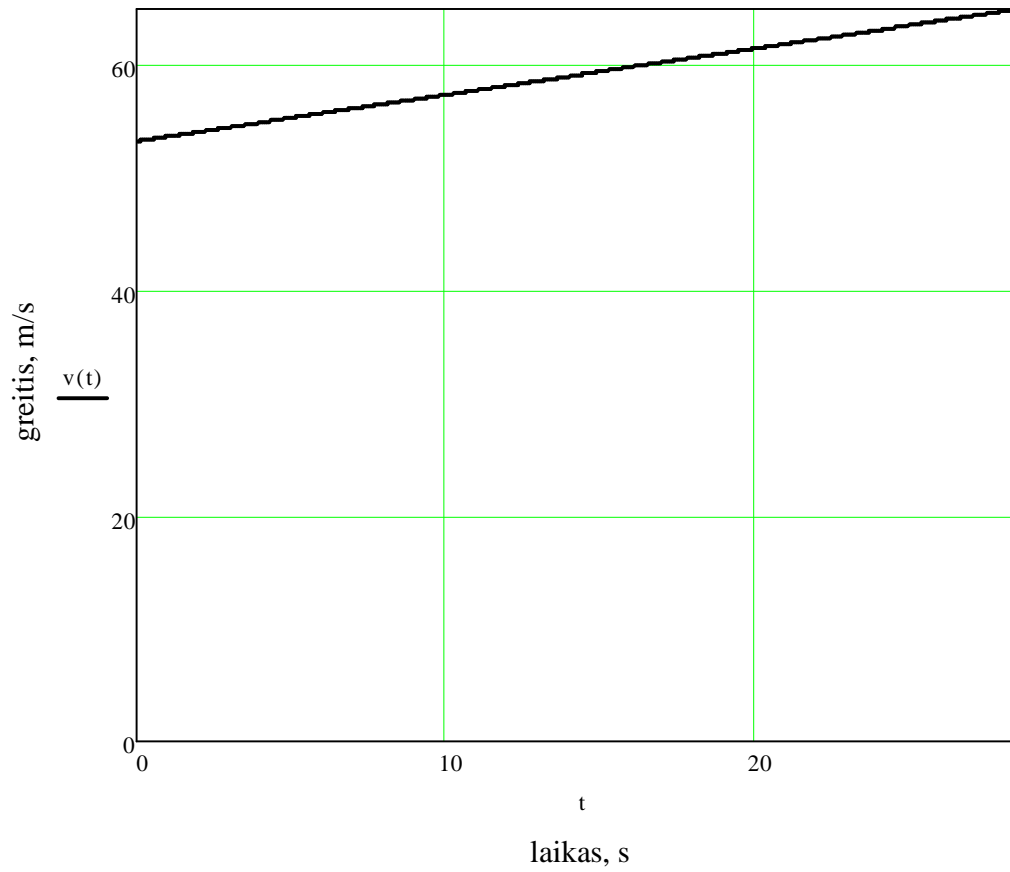
$$v_1 := \text{ketvirtas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{penktas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 28.55769118781913301$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 0.40969003768806523$$

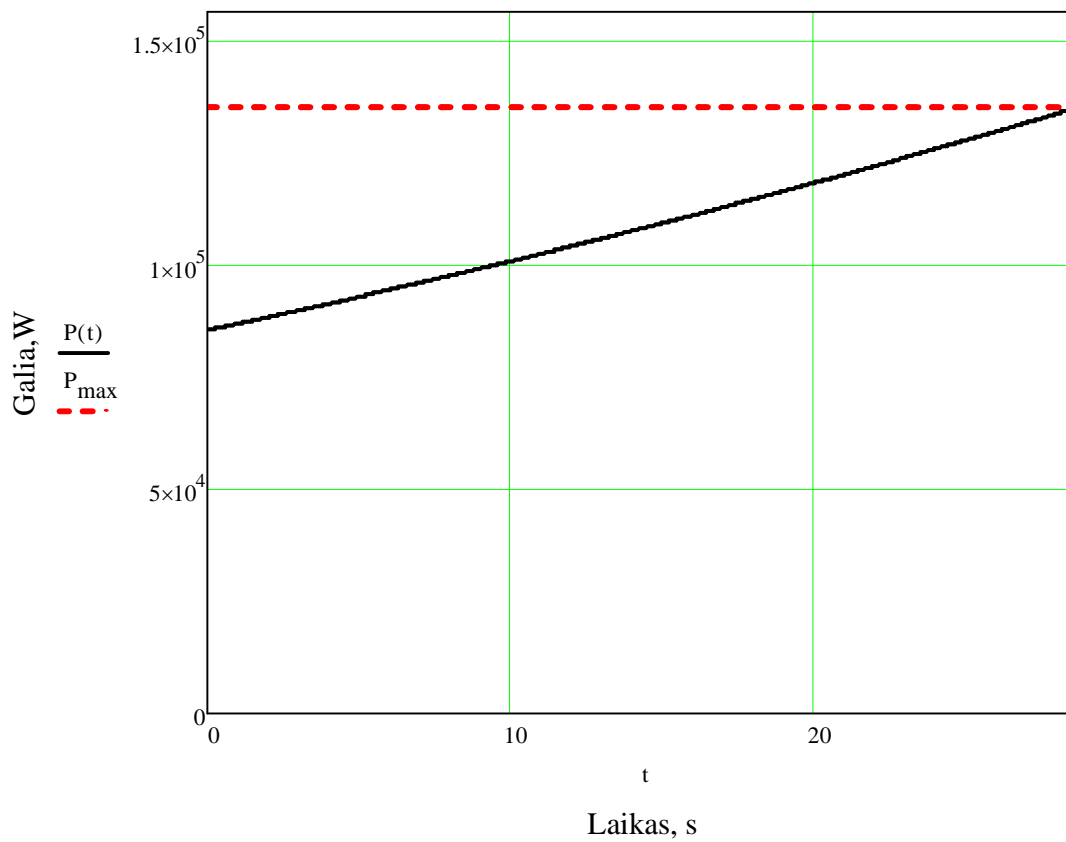
$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$



Skaičiuojam reikalingą galią įsibėgėti:

$$P := (m \cdot a + F_{ar} + F_{rr}) \cdot v \quad \text{Bendroji formulė (skaičiavimas išjungtas)}$$

$$P(t) := m \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{oro} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot v(t)$$



Matome, kad atiduoma galia yra didžiausia esant didžiausiam greičiui

$$P(\text{laikas}) = 134.946 \times 10^3 \quad \text{W}$$

Punktyrinė linija rodo kroviklio maksimalų perduodamos galios galingumą. Taigi kai man reikės apskaičiuoti energiją (kreivės integralą), turėsiu perteklinės energijos plotą atimti iš visos reikiamos energijos ($P(t)$ integralo).

Randu funkcijos $P(t)$ susikirtimo tašką su P_{\max} tiese, tam kad žinočiau iki kurio laiko momento atiduodama galia viršija P_{\max} galią.

$$a := P(t) = P_{\max} \text{ solve } t \rightarrow \begin{pmatrix} 28.557691187191330185 \\ -208.9903764153549213 \ 172.82327899090861103 \\ -208.9903764153549213 \ 172.82327899090861103 \end{pmatrix}$$

$$b := \operatorname{Re}(a_0) = 28.558 \times 10^0$$

$$\text{susikirtimas} := \begin{cases} c \leftarrow b \\ c \leftarrow 0 \text{ if } b < 0 \\ c \leftarrow \text{laikas} \text{ if } b > \text{laikas} \\ \text{return } c \end{cases}$$

Galios integralas laiko atžvilgiu yra energija.

Iš visos atiduodamos galios atimu galią, kuri viršija kW:

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) dt - \int_{\text{susikirtimas}}^{\text{laikas}} P(t) - P_{\max} dt$$

$$W = 3.107 \times 10^6 \quad W \cdot s$$

$$\frac{W}{3600} = 863.067 \times 10^0 \quad W \cdot h$$

Perteklinė :

$$W_{\text{pertekline}} := \int_{\text{susikirtimas}}^{\text{laikas}} P(t) - P_{\max} dt$$

$$W_{\text{pertekline}} = 0 \times 10^0 \quad W \cdot s$$

$$\frac{W_{\text{pertekline}}}{3600} = 0 \times 10^0 \quad W \cdot h$$

Skaičiuojamas išibėgėjimo greitis

Pirma pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left(\frac{\frac{\text{pirmas}}{3.6} - 0}{t} \right) \cdot \frac{\text{pirmas}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{pirmas}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \frac{\text{pirmas}}{3.6} \text{ solve , t } \rightarrow 2.23688223711621671$$

Antra pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left(\frac{\frac{\text{antras}}{3.6} - \frac{\text{pirmas}}{3.6}}{t} \right) \cdot \frac{\text{antras}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{antras}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{\text{antras}}{3.6} \right) \text{ solve , t } \rightarrow 2.66714058316075927$$

Trečia pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{\text{trecias}}{3.6} - \frac{\text{antras}}{3.6} \right)}{t} \right] \cdot \frac{\text{trecias}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{trecias}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{\text{trecias}}{3.6} \right) \text{ solve , t } \rightarrow 5.95828432426969999$$

Ketvirta pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{\text{ketvirtas}}{3.6} - \frac{\text{trecias}}{3.6} \right)}{t} \right] \cdot \frac{\text{ketvirtas}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{ketvirtas}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{\text{ketvirtas}}{3.6} \right) \text{ solve , t } \rightarrow 12.229161865$$

Penkta pavara:

$$P_{\text{kond}} = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{\text{penktas}}{3.6} - \frac{\text{ketvirtas}}{3.6} \right)}{t} \right] \cdot \frac{\text{penktas}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{\text{penktas}}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \left(\frac{\text{penktas}}{3.6} \right) \text{ solve , t } \rightarrow 28.5576911871$$

Kokį maksimalų greitį gali išvystyti elektromobilis atiduodamas 1C srovės dydį:

$$o(y) := \left[P_{\text{max}} = m \cdot \left(\frac{\frac{y}{3.6}}{\infty} \right) \cdot \frac{y}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{y}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot \frac{y}{3.6} \right]$$

$$h := o(y) \text{ solve , } y \rightarrow \begin{pmatrix} 257.94367227396274964 \\ -128.97183613698137482 \ 233.55584452558389325 \\ -128.97183613698137482 \ 233.55584452558389325 \end{pmatrix}$$

$$h_0 = 257.944 \times 10^0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Paskaičiuojame kokia galia yra reikalinga važiuojant pastoviu 233,6 km/h greičiu

$$o(n) := \left[n = m \left(\frac{233.6}{\infty} \right) \cdot \frac{233.6}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{233.6}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot \frac{233.6}{3.6} \right]$$

$$h := o(n) \text{ solve , } n \rightarrow 101666.319346291358 \quad \text{W}$$

Paskaičiuojame koki maksimalų greitį galima pasiekti neviršijant maksimalios ilgalaikės variklio galios - 75 kW:

$$o(y) := \left[P_{\text{variklio}} = m \left(\frac{y}{3.6} \right) \cdot \frac{y}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot \left(\frac{y}{3.6} \right)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot \frac{y}{3.6} \right]$$

$$h := o(y) \text{ solve , } y \rightarrow \begin{pmatrix} 209.764033950609472 \\ -104.882016975304736 \ 194.03051671541238191 \\ -104.882016975304736 \ 194.03051671541238191 \end{pmatrix}$$

$$h_0 = 209.764 \times 10^0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Skaičiuojams maksimalus nuvažiuojamas atstumas ir sunaudota energija

$$v_1 := 0 \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{pirmas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 5 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 3.06764623384757222$$

$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

nuvažiuotas kelias:

$$s_1 := \int_0^{\text{laikas}} v(t) \, dt = 38.346 \times 10^0 \quad \text{m}$$

Naudojama galia:

$$P(t) := m \cdot \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot v(t)$$

$$P(\text{laikas}) = 62.098 \times 10^3 \quad \text{W}$$

Sunaudota energija:

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) \, dt$$

$$W = 153.697 \times 10^3 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$W_1 := \frac{W}{3600} = 42.694 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Skaičiuojams maksimalus nuvažiuojamas atstumas ir sunaudota energija

$$v_1 := \text{pirmas} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := \text{antras} \quad \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad \text{laikas} := 7 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 1.48686934803836448$$

$$v(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

Nuvažiuotas kelias:

$$s_2 := \int_0^{\text{laikas}} v(t) dt = 143.796 \times 10^0 \quad \text{m}$$

Skaičiuojam reikalingą galią išibėgėti:

$$P(t) := m \cdot \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_f \cdot v(t)$$

$$P(\text{laikas}) = 56.999 \times 10^3 \quad \text{W}$$

$$W := \int_0^{\text{laikas}} P(t) dt$$

$$W = 307.803 \times 10^3 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

$$W_2 := \frac{W}{3600} = 85.501 \times 10^0 \quad \text{W} \cdot \text{h}$$

Skaičiuojams maksimalus nuvažiuojamas atstumas ir sunaudota energija

$$v_1 := 92. \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad v_2 := v_1 \quad \text{laikas} := 1 \quad \text{s}$$

Given

$$v_2 \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot \text{laikas} + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$x := \text{Find}(x) \rightarrow 0$$

$$x(t) := x \cdot t + v_1 \cdot \frac{1000}{3600}$$

$$P(t) := m \left(\frac{d}{dt} v(t) \right) \cdot v(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{oro}} \cdot A_v \cdot C_d \cdot v(t)^3 + m \cdot g \cdot C_r \cdot v(t)$$

$$P(1) = 8.998 \times 10^3$$

$$t := \frac{W_{\text{kond}} - W_1 - W_2}{P(1)} = 1.2 \times 10^0 \quad \text{h}$$

$$s_3 := t \cdot v_1 \cdot 1000 = 111.098 \times 10^3 \quad \text{m}$$

$$\frac{s_1 + s_2}{W_1 + W_2} = 1.421 \quad \frac{\text{m}}{\text{W} \cdot \text{h}}$$

$$s_1 + s_2 + s_3 = 111.28 \times 10^3 \quad \text{m}$$