

Baterijski paket za električno kolo

Rok Friš, Mitja Truntič

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor

E-pošta: rok.fris@um.si

Battery pack for electric bicycle

Abstract. This paper presents the process of design, implementation and testing of a battery pack for an electric bicycle. Our motivation was to design a battery pack for an electric bicycle, which will be used in a local competition. For a competitive performance, a battery pack requires sufficient capacity for a two-hour race and power capabilities for a short uphill race.

In the second section, we present the mathematical calculations used to anticipate all the drag forces acting on a cyclist and bicycle during driving. As a result, we calculated the required battery capacity and power.

In the following, the battery pack assembly is presented. For implementation on the bicycle frame, a custom case was fabricated to house the battery pack, BMS unit and all belonging electronics.

In the last section, full testing of battery pack performance is presented. The first test was a thermal analysis with a goal to identify any weak connections in the system. Another important test was a range test to determine bicycle range at different speeds.

1 Uvod

V tem prispevku je predstavljeno načrtovanje in izdelava baterijskega paketa za električno kolo. Cilj je bil izdelati električno kolo, ki presega zmožnosti komercialno prodanih različic in bo konkurenčno na Tekmovanju v izdelavi kolesa s pomožnim električnim pogonom in pedali, ki ga organizira Laboratorij za energetiko iz Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Tekmovanje je razdeljeno na štiri kategorije: ocenitev tehnične rešitve, vožnja v strmi klanec, dvournna vzdržljivostna vožnja in premagovanje poligona.



Slika 1. Električno kolo

V prispevku bodo najprej predstavljene uporabljene metode za določitev potrebne kapacitete in največje moči

baterijskega paketa. V nadaljevanju bo predstavljeno sestavljanje in montaža baterijskega paketa na kolo. Sledil bo preizkus delovanja baterijskega paketa in ocenitev dometa električnega kolesa.

2 Načrtovanje baterijskega paketa

Prvi korak pri načrtovanju baterijskega paketa je bila določitev nazivne napetosti, ki je bila pogojena z izbranim močnostnim pretvornikom. Ta je bil namenjen za povezavo na 48 V baterijski paket. Izbrana je bila tehnologija celic li-ion, saj nudi največjo energijsko gostoto na enoto teže za dostopno ceno. Ugotovljeno je bilo, da se iz celic nazivne napetost 3,6 V lahko sestavi baterijski paket z vezavo 13. celic zaporedno, ki bo imel nazivno napetost 46,8 V.

2.1 Izračun kapacitete baterijskega paketa

Postopek je nadaljevan z izračunom kapacitete baterijskega paketa, ki je potrebna za dvournno vzdržljivostno vožnjo. V tej kategoriji imajo ekipe na voljo dve uri časa, da prevozijo čim večjo razdaljo, brez poganjanja pedal kolesa. Tekmovanje poteka na hipodromu na utrjeni peščeni podlagi.

Za določitev hitrosti vožnje so bili uporabljeni rezultati zmagovalnih ekip iz preteklih tekmovanj. Ugotovljeno je bilo, da je ciljna hitrost kolesa 45 km/h. Potrebna kapaciteta je bila izračunana z enačbami (1) – (22). Upoštevan je bil zračni upor in kotalno trenje s podatki pridobljenimi iz [2]. V enačbah so bili uporabljeni spodnji podatki:

$$\rho = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - \text{gostota zraka,}$$

$$c_u = 1,1 - \text{koeficient zračnega upora,}$$

$$S = 0,5 \text{ m}^2 - \text{čelna površina kolesa in kolesarja,}$$

$$v = 45 \frac{\text{km}}{\text{h}} - \text{hitrost vožnje,}$$

$$t = 2 \text{ h} - \text{čas vožnje,}$$

$$c_t = 0,006 - \text{koeficient talnega trenja,}$$

$$m_1 = 80 \text{ kg} - \text{masa kolesarja,}$$

$$m_2 = 30 \text{ kg} - \text{masa kolesa,}$$

$$U = 46,8 \text{ V} - \text{nominalna napetost baterijskega sklopa.}$$

Na začetku so bile nekatere veličine prilagojene v ustreznejše oblike.

$$v = 45 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1)$$

$$m_1 = 80 \text{ kg} \rightarrow F_1 = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 80 \text{ kg} = 785 \text{ N} \quad (2)$$

$$m_2 = 30 \text{ kg} \rightarrow F_2 = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 30 \text{ kg} = 294 \text{ N} \quad (3)$$

V nadaljevanju je bil izračunan zračni upor F_{u1} pri izbrani hitrosti vožnje.

$$F_{u1} = \frac{1}{2} c_u \rho S v^2 = \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,1 \cdot 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,5 \text{ m}^2 \cdot \left(12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 50,9 \text{ N}$$

Dobljen rezultat velja v primeru brezvetrija. Ker tekmovanje poteka na progi ovalne oblike, se v primeru vetra sila zračnega upora na eni strani proge zmanjša, na drugi pa poveča. V primeru enakomernega vetra se v povprečju dodatne sile izničijo.

Pri izračunu sile kotalnega trenja F_{kl} je bila predvidena masa kolesarja 80 kg in kolesa 30 kg.

$$F_{k1} = c_t (F_1 + F_2) = 0,006 \cdot (785 \text{ N} + 294 \text{ N}) = 6,5 \text{ N} \quad (5)$$

V primeru slabe ocene skupne mase se izračunana vrednost bistveno ne spremeni. V primeru dodatnih 30 kg se bo F_{kl} povečal za 1,8 N.

Ker je tekmovalna podlaga makedam, je bilo izračunani sili trenja v (5) dodani še 50 % vrednosti. V (6) je predstavljena kot sila kotalnega trenja z rezervo F_{kr} .

$$F_{kr} = F_{k1} \cdot 150 \% = 6,5 \text{ N} \cdot 1,5 = 9,8 \text{ N} \quad (6)$$

Sile, ki delujejo med vožnjo dobljene iz (4) in (6) so bile seštete v skupno zaviralno silo F_{z1} .

$$F_{z1} = F_{u1} + F_{kr} = 50,9 \text{ N} + 9,8 \text{ N} = 60,7 \text{ N} \quad (7)$$

Potrebna moč elektromotorja P_1 , ki je potrebna za vzdrževanje zelene hitrosti, je bila izračunana v (8).

$$P_1 = F_{z1} v = 60,7 \text{ N} \cdot 12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 759 \text{ W} \quad (8)$$

Ker je na začetku bilo predpostavljeno, da je potrebna konstantno moč, lahko potrebno energijo W preprosto izračunamo na naslednji način.

$$W = P_1 \cdot t = 759 \text{ W} \cdot 2 \text{ h} = 1518 \text{ Wh} \quad (9)$$

Pri (9) niso upoštevane izgube celotnega sistema prenosa energije iz baterijskega paketa na pogonsko kolo. Zato je bil predpostavljen 85 % izkoristek sistema in to upoštevano pri izračunu realne potrebne energije W_{real} .

$$W_{real} = \frac{W}{85 \%} = \frac{1518 \text{ Wh}}{0,85} = 1786 \text{ Wh} \quad (10)$$

Zaradi varnostnega faktorja pred napačnimi predpostavkami v preračunih (2) – (10) je bilo k izračunani realni energiji W_{real} dodani še 20 % rezerve. Ta je bila poimenovana energija z rezervo W_{rez} .

$$W_{rez} = W_{real} \cdot 120 \% = 1786 \text{ Wh} \cdot 1,2 = 2143 \text{ Wh} \quad (11)$$

Dobljena energija z rezervo v (11) je bila pretvorjena v kapaciteto C_b , kar je tudi podan podatek pri nakupu baterijskih celic.

$$C_B = \frac{W_{rez}}{U} = \frac{2143 \text{ Wh}}{46,8 \text{ V}} = 45,8 \text{ Ah} \quad (12)$$

Končni rezultat tega preračuna je potrebna kapaciteta baterijskega paketa 45,8 Ah. Zaradi večjega števila uporabljenih predpostavk je dobljen rezultat natančen le do neke mere. Zato so bile med koraki računanja uporabljene večje rezerve.

2.2 Izračun toka baterijskega paketa

Za določitev ustreznih parametrov baterijskega paketa, je bil še potreben podatek o maksimalnem toku, ki ga mora zagotavljati. V tekmovalni kategoriji vožnja v klanec je

izziv premagati 200 m dolg klanec z naklonom 18 % v čim krajšem času. Kot izhodišče so bili ponovno uporabljeni rezultati tekmovanj iz prejšnjih let. Ugotovljeno je bilo, da je potrebna hitrost vožnje v klanec v_k 38 km/h ali 10,6 m/s.

Izračun maksimalne moči baterijskega paketa je bil začet z izračunom kota klanca α .

$$\alpha = \tan^{-1}(18 \%) = 10,2^\circ \quad (13)$$

Iz dobljenega podatka α je bila izračunana zaviralna sila na klanecu F_{zk} in sila podlage na kolo F_p .

$$F_{zk} = \sin \alpha \cdot F_g = \sin \alpha \cdot (F_1 + F_2) = \quad (14)$$

$$= \sin 10,2^\circ \cdot (785 \text{ N} + 294 \text{ N}) = 191 \text{ N}$$

$$F_p = \cos \alpha \cdot F_g = \cos \alpha \cdot (F_1 + F_2) = \quad (15)$$

$$= \cos 10,2^\circ \cdot (785 \text{ N} + 294 \text{ N}) = 1062 \text{ N}$$

Postopek je bil nadaljevan z izračunom sile zračnega upora F_{z2} , kjer je bil ponovljen preračun (4), in kotalnega trenja F_{k2} , kjer je bila kot sila podlage uporabljena F_p .

$$F_{u2} = \frac{1}{2} c_u \rho S v_k^2 = \quad (16)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,1 \cdot 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,5 \text{ m}^2 \cdot \left(10,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 36,6 \text{ N}$$

$$F_{k2} = c_{rr} \cdot F_p = 0,006 \cdot 1062 \text{ N} = 6,4 \text{ N} \quad (17)$$

Izračunane sile so bile seštete v skupno zaviralno silo F_{z2} . Dodana je bila še zaviralna sila na klanecu F_{zk} , ki deluje zaradi gravitacijskega pospeška.

$$F_{z2} = F_{u2} + F_{k2} + F_{zk} = \quad (18)$$

$$= 36,6 \text{ N} + 6,4 \text{ N} + 191 \text{ N} = 234 \text{ N}$$

V naslednjem koraku je bil izračunan navor M , ki ga mora zagotavljati pogonsko kolo za vzdrževanje izbrane hitrosti pri vožnji v klanec. Upoštevan je bil premer kolesa $R = 0,7 \text{ m}$.

$$M = F_{z2} \cdot \frac{R}{2} = 234 \text{ N} \cdot \frac{0,7 \text{ m}}{2} = 81,9 \text{ Nm} \quad (19)$$

Za izračun potrebne moči elektromotorja P_2 je bil zmnožen navor M in kotna hitrost ω kolesa.

$$P_2 = M \cdot \omega = 2 \cdot M \cdot \frac{v}{R} = \quad (20)$$

$$= 2 \cdot 81,9 \text{ Nm} \cdot \frac{10,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,7 \text{ m}} = 2480 \text{ W}$$

Pri dobljenem rezultatu potrebne moči motorja je bil še upoštevan izkoristek sistema 85 % za dobljen rezultat realne moči baterijskega paketa P_{real} .

$$P_{real} = \frac{P_2}{85 \%} = \frac{2480 \text{ W}}{0,85} = 2918 \text{ W} \quad (21)$$

Podatki o moči baterijskega paketa so bili pretvorjeni v potreben tok I_{real} , ki ga mora baterijski paket zagotavljati pri nazivni napetosti.

$$I_{real} = \frac{P_{real}}{U} = \frac{2918 \text{ W}}{46,8 \text{ V}} = 62,4 \text{ A} \quad (22)$$

Rezultat tega poglavja je maksimalni konstantni tok 62,4 A, ki ga mora baterijski paket zagotavljati. Ta podatek bo v nadaljevanju uporabljen za izbiro primernih baterijskih celic.

2.3 Izbira baterijskih celic

Z razvojem baterijske tehnologije li-ion so na trg prišle celice v različnih oblikah. Najpogosteje uporabljena je

celica z oznako 18650, kar pomeni premer 18 mm in dolžina 650 mm. Zaradi enostavne dostopnosti je bila izbrana ta velikost. V tabeli 1 so predstavljene štiri različne celice proizvajalca Samsung enakih velikosti.

Tabela 1. Primerjava baterijskih celic

| Model | C_B [mAh] | I_{MAX} [A] | I_{PULZ} [A] |
|--------------|-------------|---------------|----------------|
| INR18650-20R | 2000 | 22 | 38 |
| INR18650-25R | 2500 | 20 | 35 |
| INR18650-30Q | 3000 | 15 | 26 |
| INR18650-35E | 3500 | 8 | 13 |

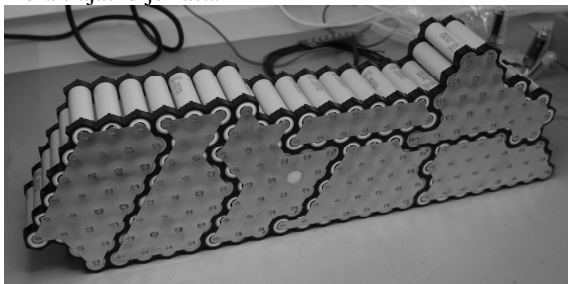
Kot prikazano, tokovne sposobnosti celic padajo z naraščanjem kapacitete. Zaradi tekmovalne kategorije vzdržljivostne vožnje je bil sprejet kompromis, da je v tem primeru pomembnejša kapaciteta baterijskega paketa kot velike tokovne sposobnosti. Izbrane so bile celice INR18650-35E s kapaciteto 3500 mAh.

Ciljna kapaciteta baterijskega paketa je 45,8 Ah, čemur se je mogoče približati z vezavo 13. celic vzporedno, kar znaša 45,5 Ah. Tokovne sposobnosti predlagane vezave so do 104 A konstantne obremenitve in 169 A kratkotrajne, kar presega zahteve določene v poglavju 2.2. Iz podatkovnega lista proizvajalca so bile pridobljene informacije o polnilnem toku predlagane vezave baterijskih celic. Ta je do 13,2 A za normalno polnjene in do 26 A za hitro polnjenje.

Na začetku poglavja 2 je bila določena vezava 13. celic zaporedno za doseganje zelene napetosti. Iz zahtevane kapacitete je bila nato določena še vezava 13. celic vzporedno in tako dobljen baterijski paket vezave 13S13P s 169 celicami.

3 Implementacija baterijskega paketa

Pri oblikovanju baterijskega paketa je bila oblika prostorsko omejena z obliko okvirja kolesa ter željo po optimalni razporeditvi teže. Tako je bil paket umeščen v sredino okvirja kolesa, pomaknjen čim bolj naprej. Pri sestavi paketa je bil uporabljen šest kotni distančnik za bolj kompaktno postavitve celic. To je posledično povzročilo slabšo hlajenje celotnega paketa, kar je bilo ocenjeno, da ne bo problematično, saj bo baterijski paket večino časa deloval s tokovi do 10 A. Višji tokovi pomenijo močno pospeševanje ali zelo hitro vožnjo, ki ne mora trajati dlje časa.



Slika 2. Sestavljen baterijski paket

Sestavljen baterijski paket prikazuje slika 2. Za povezavo celic so bile uporabljene lasersko izrezane plošče iz nikljeve zlitine, ki so bile točkovno privarjene na posamezne celice. Sestavljen paket je tehtal 8,2 kg.

Za zaščito baterijskega paketa in umestitev na kolo je bilo izdelano temu namenjeno ohišje iz tehnične plastike,

ki je prikazano na sliki 3. Na okvir kolesa je bilo pritrjeno na treh točkah z jeklenimi nosilci, ki hkrati podpirajo težo baterijskega paketa. Oblikovanje je bilo omejeno s širino ohišja, saj to ne sme ovirati kolesarja med poganjanjem koles s pedali. Zastavljena je bila omejitev na maksimalno dovoljeno širino 150 mm, končno ohišje je zoženo na 95 mm. Med baterijski paket in ohišje je bila dodana blažilna pena za enakomernejšo porazdelitev sil med vožnjo in blažitev tresljajev. Nad baterijskim paketom je nosilna plošča iz tanke pločevine na kateri je BMS enota in druga podporna elektronika. V primeru padca kolesa na stran, baterijski paket zadržijo stranski nosilci za pritržitev stranic ohišja, v primeru poskakovanja med vožnjo nudi oporo nosilna pločevina nad paketom. Stranice baterijskega paketa so bile na koncu oblepljene z izolacijskim papirjem za preprečitev morebitnih kratkih stikov pri delu.



Slika 3. Baterijski paket v ohišju

Končana implementacija baterijskega paketa na kolo z oddanim elektromotorjem v zadnjem kolesu in močnostnim pretvornikom je prikazana na sliki 1. Dodatek baterijskega paketa z ohišjem na kolo je dodal 15 kg mase. Po dodanem elektromotorju je skupna masa kolesa znašala 35,3 kg. Težiščna os je pri tem bila premaknjena za 3,9 cm nazaj, kar bistveno ne vpliva na vodljivost kolesa.

4 Testiranje delovanja

Pred prvo uporabo baterijskega sklopa za pogon električnega kolesa so bili izvedeni testi, ki so potrdili pravilno delovanje sistema. Testiranje je zajemalo termično analizo ob obremenitvi paketa z višjimi tokovi, delovanje izklopa v sili, izvedbo cikla polnjenja, meritev kapacitete in ocenitev dometa kolesa s kombinacijo terenskega in laboratorijskega testa.

4.1 Testiranje termike

Test termike je bil izveden s postopnim večanjem toka baterijskega paketa od 1 do 35 A čez daljše časovno obdobje. Ambientalna temperatura je bila 22 °C. Ob vsakem višanju toka je bilo stanje sistema preverjeno s toplotno kamero ob pozornosti na vroče točke, ki bi se pojavile ob slabem kontaktu. Večja pozornost je bila usmerjena v segrevanje točkovnih zvarov med baterijskimi celicami in ploščami iz nikljeve zlitine. Na sliki 4 je termalna slika sistema ob obremenitvi 35 A po 15 min delovanja v zadnji fazi testiranja.

Baterijske celice so dosegle temperaturo približno 40 °C, kar je zadovoljiv rezultat, saj je najvišja dovoljena

temperatura 60 °C. Povezovalne plošče med celicami so prikazane kot hladna mesta, vendar je zaznava kamere napačna zaradi svetleče odbojne površine. Ostale vroče točke nad baterijskim paketom na sliki 4 so releji pri delovni temperaturi.



Slika 4. Termalna slika obremenjene baterijske paketa

4.2 Cikel polnjenja

Prvi cikel polnjenja je bil izveden podobno kot termični test. Polnilni tok je bil postopoma povišan od 1 do 10 A in pri tem je bil sistem opazovan s termično kamero. Med delovanjem je bila spremljana napetost celic, ki je na začetku odstopala za 0,1 V, proti koncu pa le za nekaj milivoltov, saj je BMS izenačil napetosti vseh celic.

4.3 Meritev energije

Meritev energije je bila izvedena z namenom ugotovitve realne energije shranjene v baterijskem paketu. Oglasevana kapaciteta posamezne celice INR18650-35E je 3500 mAh, vendar ob pregledu podatkovnega lista [3] opazimo, da je minimalna zagotovljena 3350 mAh. Test je bil izveden po navodilih proizvajalca s praznjenjem vsake celice s konstantnim tokom 680 mA. Zaradi vezave 13. celic vzporedno je bil uporabljen praznilni tok 8,84 A.

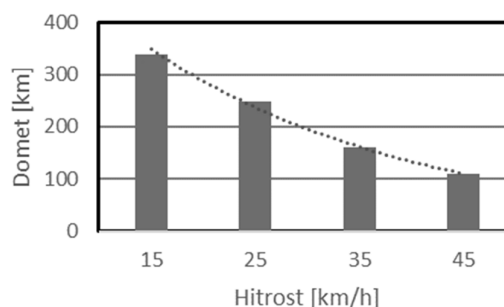
Izvedena sta bila dva testa. Prvič so bile uporabljene priporočene nastavitve za dolgo življenjsko dobo celic. To pomeni, da so bile njihove napetosti omejene med 4,1 V in 3,0 V. Izmerjeno je bilo 1646 Wh porabljene energije, kar je 77,3 % do teoretične energije 2129 Wh.

Drugi test je bil izveden z napetostnimi limitami med 4,2 V in 2,65 V, kar so mejne dovoljene vrednosti iz podatkovnega lista [3]. Izmerjeno je bilo 1956 Wh porabljene energije, kar je 18,8 % več kot pri prvem testu in je 91,9 % teoretične energije. Funkcija nastavljanja napetostnih limit bo posebej koristna na tekmovanju, saj bo mogoče iz baterijskega paketa dobiti več energije za ceno življenjske dobe celic.

Ker BMS enota zaščiti baterijski paket z odklopom, ko ena od celic doseže minimalno napetost, bo nekaj energije vedno ostalo neporabljene v preostalih celicah. To je možno potrditi s podatki izmerjenimi tik pred odklopom. Celica z najnižjo napetostjo je imela 2,663 V, medtem ko je celica z najvišjo napetostjo imela 2,774 V.

4.4 Testiranje dometa

Testiranje dometa je bilo izvedeno s kombinacijo terenskega in laboratorijskega testa. Iskan je bil podatek o dometu kolesa pri različnih hitrostih na ravni asfaltni površini. Zaradi večurnega trajanja vsakega testa je bila uporabljena kombinirana izvedba testa, predstavljena v nadaljevanju. Izbran je bil ravni del asfaltirane ceste z dolžino 2,5 km na katerem je bil izveden terenski del preizkusa. Vožnja je potekala s konstantnimi hitrostmi v obe smeri in pri tem je bila merjena potrebna moč elektromotorja. Z vožnjo v obe smeri je bil nekoliko izničen vpliv rahlega vetra in hribovitost ceste. Izračunana je bila povprečna moč pri vsaki vožnji in to je bilo uporabljeno za nadaljevanje laboratorijskega testa. Ta je potekal s priključitvijo baterijskega paketa na breme konstantne moči, ki je bilo nastavljen na prej izmerjeno moč. Rezultati so predstavljeni v sliki 5.



Slika 5. Domet kolesa pri različnih hitrostih

Dobljeni rezultati prikazujejo hitro padanje dometa z naraščanjem hitrosti vožnje. Ob analizi enačb (4) in (8) je razvidno, da se hitrost pojavi pod tretjo potenco, kar je razlog za eksponentno večanje zračnega upora pri naraščanju hitrosti. Vsi testi so bili izvedeni z limitami napetosti celic do 4,1 V do 3,0 V. Ob premiku limit na skrajne meje bi lahko domet še nekoliko izboljšali.

5 Zaključek

V tem prispevku je opisan proces načrtovanja baterijskega paketa za električno kolo, njegova implementacija in testiranje. S teoretičnimi preračuni so bile ocenjene potrebne karakteristike paketa in tudi upoštevane pri izdelavi. Ti so se izkazali za ustrezne saj je bila z izvedenimi testi potrjena ustreznost baterijskega paketa za konkurenčnost na omenjenem tekmovanju.

Literatura

- [1] Friš R. *Snovanje baterijskega sklopa in elektronike za električno kolo*, Maribor. FERi, 2021.
- [2] Gross A., Kyle C., Malewicki D., *The Aerodynamics of Human-powered Land Vehicles*. ZDA: Scientific American, 1983. Dostopno na: http://www.zzipper.com/documents/HPV_Paper.pdf [21.6.2022].
- [3] Samsung. Specification of product: INR18650-35E. Dostopno na: https://datasheetspdf.com/pdf-file/1266159/Samsung/INR_18650-35E/1 [27.6.2022].