

nadzor osvetljenosti možno spremljati in nadzorovati preko internetne povezave.

Za vodenje pretoka energije pri napajanju svetlobne table je bil razvit sklop stikalnega DC/DC pretvornika, ki skupaj z naprednim algoritmom skrbi za optimalno vodenje osvetlitve LED modulov. Pri tem se jakost osvetlitve panela spreminja v odvisnosti od različnih zunanjih okoliščin, kot so čas dneva/noči, jakost dnevne svetlobe, količina v bateriji shranjene energije, zunanja temperatura itd.

2 Baterijski hranilnik električne energije

Poglaviten poudarek v projektu je bil namenjen razvoju sodobnega, visokozmogljivega baterijskega hranilnika energije z nazivno kapaciteto 5,5 kWh. Glede na današnje trende razvoja v avtomobilski tehnologiji in preskrbe doma z energijo, je baterija s takšno kapaciteto zaradi svojih lastnosti uporabna tudi na drugih področjih. Cilj dela naše skupine je bil osvojitev tehnologije gradnje, oziroma sestavljanja baterij, zato smo se odločili za izdelavo prototipa baterije v svojem, laboratorijskem okolju. V ta namen je bila razvita in izdelana namenska avtomatizirana linija za točkovno varjenje paketov litij-ionskih celic.

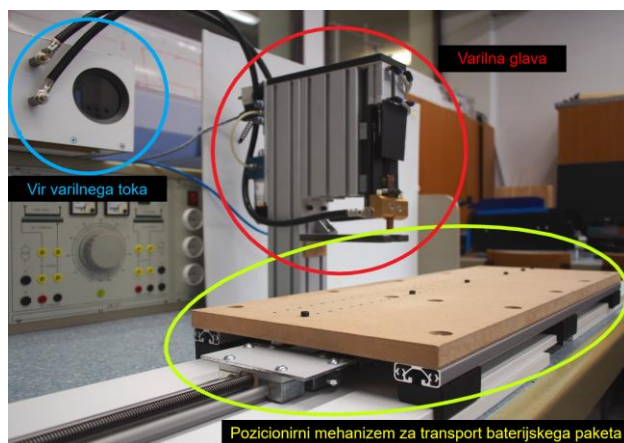
Tovrstna polnilna baterija je zaradi svojih lastnosti zato primerna tudi za uporabo v naslednjih aplikacijah, kot so:

- hišni hranilnik električne energije pri samooskrbnih sistemih (ang. home storage),
- hranilnik energije za uporabo v mikro omrežjih ali
- kot traksijska baterija za električna vozila.

Ključni parametri baterije, ki so potrebni v opisanem sistemu, so določeni z naslednjimi lastnostmi: energijska vsebnost 5,5 kWh, nazivna napetost 48 V, potrebna tokovna zmogljivost $I_n=120$ A in $I_{peak}=320$ A.

3 Avtomatizirana linija za povezovanje akumulatorskih celic s tehnologijo uporovnega točkovnega varjenja

V sklopu projekta je bila idejno razvita in izdelana prototipna avtomatizirana linija za spajanje Li-ionskih celic tipa 18650 (slika 2):



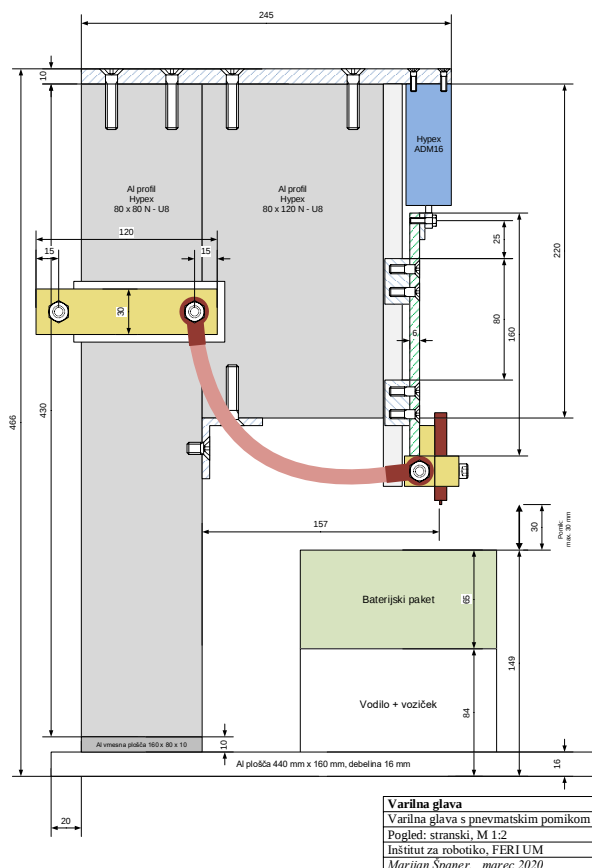
Slika 2: Avtomatizirana linija za točkovno varjenje litijevih celic

Glavni sestavni deli linije so: transportni mehanizem za premikanje sestavljenega baterijskega paketa, varilna glava in izvor varilnega toka.

3.1 Varilna glava

Varilna glava (slika 3) ima funkcijo, da varilni elektrodi pritisneta povezovalni nikljev trak na baterijski paket in s tem omogoči izvedbo varjenja. Uporovno točkovno varjenje je tehnološko zelo kompleksna operacija, zato se je potrebno držati določenih pravil. Glede na lastnosti materialov, ki se varijo, so pomembni predvsem naslednji parametri varilne naprave: premer konice varilne elektrode, amplituda in dinamika pritiskne sile elektrode, jakost in časovni profil pulza varilnega toka, oziroma količina energije, ki je potrebna za uspešno stalitev obeh materialov pri varjenju [2].

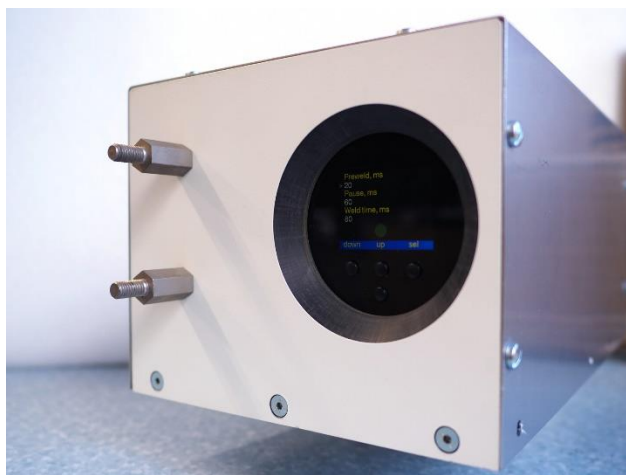
Glede na zasnovo celotne konstrukcije je varilna glava dimenzijsko prilagojena velikosti delovnega prostora transportnega mehanizma z vključenim baterijskim paketom. Izdelana je iz standardnih aluminijastih profilnih elementov, ki zagotavljajo potrebno togost konstrukcije ter poenostavijo izdelavo. Varilni elektrodi se lahko ločeno in neodvisno ena od druge vertikalno pomikata po linearnih vodilih. Prav tako ima vsaka elektroda svoj pogonski, oziroma potisni sklop, izveden z dvema dvosmernima pnevmatskima cilindroma. Vodenje pomikov aktuatorjev je izvedeno z elektromagnetnimi pnevmatskimi ventiloma z nastavljivim dušenjem, s čimer je mogoče nastavljanje hitrost premikanja delovnega bata.



Slika 3: Konstrukcija varilne glave

3.2 Izvor varilnega toka

Izvor varilnega toka (slika 4) je bil razvit v laboratoriju, namensko za to aplikacijo.

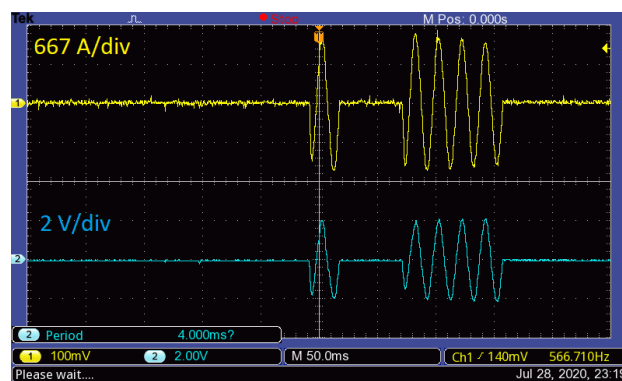


Slika 4: Izvor varilnega toka za točkovno varjenje

Zasnovan je tako, da se omrežna napetost preko močnostnega transformatorja pretvori na nizko vrednost (stopenjsko nastavljivo v območju med 1,5 in 3 V_{RMS}), kar je ob poznanih prehodnih/kontaktnih električnih upornostih zadostna napetost za doseganje primernih amplitud varilnih tokov v območju od 800 do 1200 A_{RMS}.

Naprava je izvedena kot samostojna zunanja enota in je na elektrode varilne glave priključena z vodniki velikega preseka (slika 6).

Izvoru varilnega toka je možno programsko nastavljati čas trajanja predhodnega in glavnega varilnega impulza z nastavitvijo števila polperiod omrežne napetosti (izmerjen tok in napetost pri varjenju prikazuje slika 5. Glede na to, da je v napravi uporabljen močnostni toroidni transformator z izrazito majhno ohmsko upornostjo primarnega navitja, je v izogib visokim tokovnim konicam ob vklopu uporabljeno omrežno sinhronizirano vklopno vezje, ki transformator vklopi na napetost vselej ob trenutku maksimalne (peak) vrednosti omrežne napetosti.



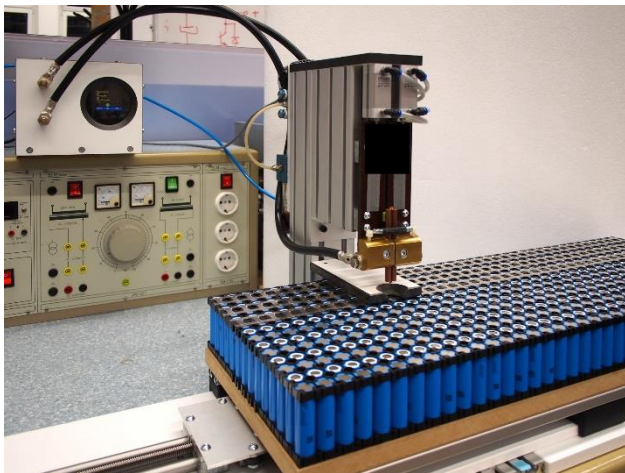
Slika 5: Varilni tok (zgornja krivulja) in napetost pri uporovnem točkovnem varjenju

Naprava se krmili preko signalnega vhoda za vklop varilnega toka.

3.3 Transportni mehanizem

Postopek varjenja se izvaja na način, da položajno voden pogonski sklop v vsakem koraku vzdolžno premakne baterijski paket do naslednje celice in varilna glava s pomočjo dveh pnevmatskih aktuatorjev pritiska varilni elektrodi ter s tem povezovalni nikljev trak na baterijske celice. Zatem se vklopi izvor varilnega toka in s postopkom uporovnega točkovnega varjenja se nikljev trak zavari na baterijske kontakte.

Program ciklično premika voziček z baterijskim paketom v korakih, ki ustrezajo rastru med posameznimi vrstami baterijskih celic. Ko se paket v vsakem koraku ustavi na končni poziciji, se preko digitalnega izhoda krmilnika sproži pnevmatski pomik varilne glave navzdol in takoj zatem še vklop varilnega toka, s čimer je varilni postopek sinhroniziran s premikanjem baterijskega paketa. Za vodenje celotnega procesa je uporabljen industrijski krmilnik gibanja (Motion Controller) proizvajalca TRIO z ustreznim uporabniškim programom za položajno vodenje.



Slika 6: Izvedba varilne linije

4 Izdelava prototipa baterije

V okviru projekta je bilo predvideno, da se bodo prvi prototipi izdelali v laboratorijskem okolju, zato smo se odločili za uporabo že uveljavljene in tržno dostopne tehnologije standardnih akumulatorskih celic tipa 18650. To so trenutno najbolj razširjena vrsta Litij-ionskih celic, ki se uporabljajo za zelo različne aplikacije (električni gospodinjski aparati, akumulatorska ročna orodja, UPS naprave, električna vozila, stacionarni hranilniki energije itd). Izpopolnjena tehnologija izdelave na osnovi varnostnih komponent [3] zagotavlja varnost med delovanjem in so zaščitene tudi ob nepravilni uporabi. Pri načrtovanju celic proizvajalci posebno pozornost posvečajo izdelavi priključnih kontaktov [4].

Ključne lastnosti litij-ionskih cilindričnih celic tipa 18650 so naslednje: premer $D=18$ mm in dolžina $L=65$ mm, tipična nazivna napetost $U_n=3,7$ V, vsebnost shranjene energije je do 10 Wh po celici. Glede na namen uporabe (stacionarna obremenitev nizke moči) smo izbrali osnovni »high-energy« model akumulatorske celice proizvajalca Samsung za aplikacije tipa »Long life, Storage, Low-Temp«.

Celica tipa INR18650-29E E7 ima osnovne lastnosti:

- kapaciteta 2500 mAh,
- tokovna obremenitev $I_n/I_{\max}=2,8/8,2$ A,
- $U_n=3,6$ V, $U_{\text{charge}}=4,125$ V, $U_{\text{cut-off}}=2,5$ V.

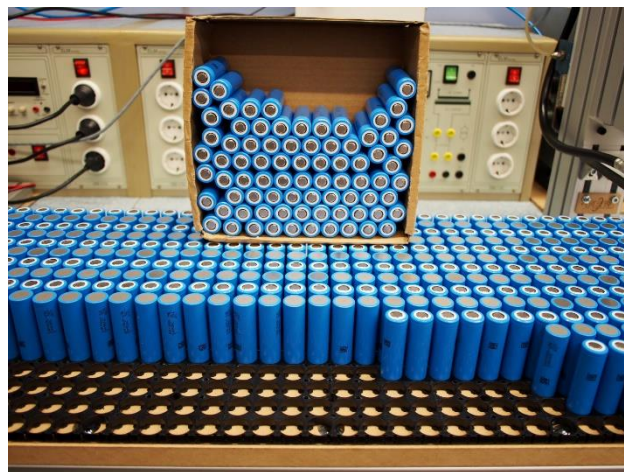
V primeru uporabe v aplikacijah z visokodinamičnimi obremenitvami so primernejše celice tipa »high-power« z manjšo notranjo upornostjo in možnostjo višjih tokovnih obremenitev, prav tako obstajajo cilindrične celice drugih dimenzij [5].

4.1 Zasnova baterijskega paketa

Glede na zahtevo po nazivni napetosti in toku ter skupni količini shranjene energije v vrednosti 5,5 kWh je bila določena električna konfiguracija 14S-40P s 560 celicami (električna vezava po 14 celic zaporedno in 40 celic

vzporedno). Glede na dejstvo, da niso zahtevane posebne dimenzije ohišja, je bila izbrana naravna razporeditev v obliki ploščate matrike velikosti 14 x 40 celic.

Vse medsebojne povezave med akumulatorskimi celicami so bile izvedene z namenskim nikljevim trakom debeline 150 μm , ki je točkovno zavarjen na sponke celic.



Slika 7: Sestavljanje baterijskega paketa iz 560 kosov akumulatorskih celic

Ključna pozornost pri izdelavi močnostnih povezav baterijskega sklopa je bila namenjena izvedbi kakovostnih povezav za enosmerno zbiralko z namenom doseganja čim nižje notranje impedance in posledično visoko tokovne zmogljivosti baterije.



Slika 8: Baterijski paket 14S-40P z močnostno tokovno zbiralko

V ta namen so bila za enosmerno zbiralko izdelana tokovna vodila velikega preseka iz masivnega elektrolitskega bakra, s čimer je zagotovljena tokovna zmogljivost energetskih povezav do 300 A. Tako je baterijski paket primeren tudi za uporabo v visokodinamičnih aplikacijah, kot je npr. preskrba z energijo v vozilih (slika 8).

4.2 Dodatne električne komponente baterijskega zalogovnika

Glede na električne lastnosti litij-ionskih baterijskih celic je v fazi polnjenja in praznjenja potreben nadzor napetosti vsake posamezne celice ter izenačevanje morebitnih odstopanj. Celoten nadzor delovanja baterijskega hranilnika je izveden preko BMS (Battery Management System), ki vključuje sisteme za meritev baterijskega toka, napetosti celic, vrednosti stanja napolnjenosti SOC (State of Charge) in temperature celic. Vgrajen je komercialni BMS sistem slovenskega proizvajalca REC-BMS [6].



Slika 9: Uporabniški program za komunikacijo z BMS sistemom

Preko uporabniškega programa je mogoče nastavljati tudi vse ključne parametre delovanja baterijskega izenačevalnega sistema pri polnjenju/praznjenju ter spremljati zgodovino delovanja baterije (slika 9).



Slika 10: Baterija z vgrajenimi zaščitnimi vezji, BMS sistemom, močnostnim vklopnikom in konektorji

BMS enota podpira komunikacijske protokole RS-485 in CAN ter je programsko podprta za povezavo z večino komercialnih naprav, kot so omrežni in solarni polnilci, močnostni pretvorniki za pogon motorjev v električnih vozilih, inverterji za pretvorbo enosmerne napetosti v izmenično itd. S pomočjo komunikacije ter izmenjavo informacij med baterijo, polnilnim sistemom in porabnikom je možno zagotoviti optimalno izrabo shranjene energije, sočasno pa tudi zaščititi baterijo ter ji

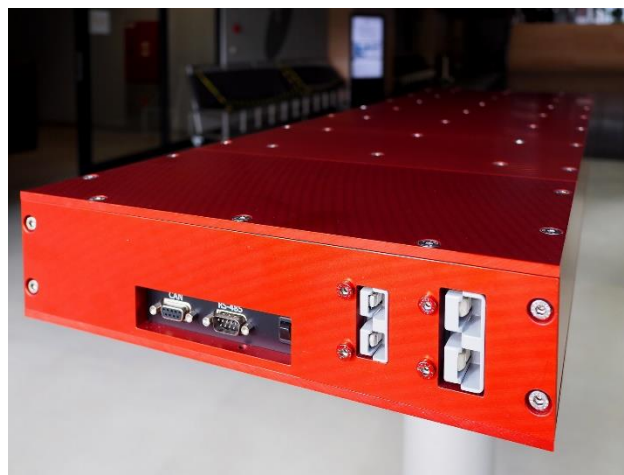
omogočiti delovanje v ugodnih delovnih pogojih ter posledično podaljšati življenjsko dobo.

Zaradi varnosti in prilagodljivosti pri uporabi ima baterijski zalogovnik vgrajene še nekatere dodatne komponente: močnostni vklopnik z optimizatorjem porabe, sistem za »mehki« vstop porabnika, dva ločena močnostna konektorja (enega za priključitev električnih porabnikov in drugega za polnjenje baterije), [7], zaščito vodov s hitrimi termičnimi varovalkami, funkcijo meritve toka pri polnjenju in praznjenju baterije, merilnik temperature baterijskih celic. Enota ima podatkovno komunikacijo z zunanji napravami (RS-485 in CAN).

Primarni vir energije za polnjenje baterije v opisanem projektu je fotonapetostna elektrarna, na katero je baterija priključena preko solarnega polnilnika. Uporabljen je namenski solarni polnilnik, ki deluje po principu iskanja točke najvišje moči (MPPT - maximum power point tracking) [8]. Močnostni polnilnik ima CAN komunikacijsko povezavo z baterijskim BMS modulom, odkoder dobiva vse potrebne informacije o stanju akumulatorske baterije in na osnovi podatkov je voden pretok energije za polnjenje.

4.3 Ohišje baterije

Baterijski paket je sestavljen iz 560 celic s skupno maso več kot 30 kg, ki so vstavljene v namenske matrične nosilce iz brizgane plastike (PC+PP+GP). Zaradi velike mase in mehanske občutljivosti akumulatorskih celic je bilo za vgradnjo paketa potrebno zagotoviti stabilno in mehansko trdno ohišje (slika 11).



Slika 11: Izgled prototipa baterijskega paketa 48 V, 5,5 kWh v aluminijastem ohišju

Ohišje je izdelano iz zlitine aluminija, magnezija in silicija (Al-Mg-Si), ki ga odlikuje visoka mehanska trdnost in nizka specifična teža. Površina plošč je brušena in dodatno zaščitena z eloksiranjem. Deli ohišja so medsebojno povezani z vijaki, pri čemer »sendvič« konstrukcija nosilnih in izolacijskih plošč v popolnosti stisne in fiksira baterijski paket. Značilnost uporabljenega materiala je odlična termična prevodnost, s čimer je, vsaj za večino aplikacij, zagotovljen zadosten prenos toplote v

okolico. Pri aplikacijah, kjer bi se pričakovale visoke močnostne obremenitve, je potrebno zagotoviti intenzivnejše hlajenje. V ta namen je že predvidena možnost vgradnje toplotnega izmenjevalnika v ohišje, v kombinaciji z zunanjo toplotno črpalko tipa »voda-zrak«.

Dimenzije ohišja, v katerega je nameščen celoten akumulatorski zalogovnik z vsemi dodanimi sklopi, znašajo 1000 mm x 315 mm x 80 mm, skupna teža naprave je 50 kg.

5 Sklep

Projekt razvoja samooskrbnega napajalnega sistema je bil uspešno zaključen: posamezni sklopi so bili preizkušeni in so delujoči, svetlobni panel ter celotna naprava delujeta po pričakovanjih.

Predvsem so bile za našo raziskovalno skupino koristne izkušnje pri izdelavi koncepta, razvoju tehnologije in gradnji prototipa baterijskega paketa. Na osnovi razvoja tega baterijskega paketa je bilo v nadaljevanju izdelanih še nekaj manjših baterijskih paketov za različne namene.

Ob uspešno izpeljanem projektu sodelujoči ugotavljamo, da sodelovanje med univerzitetno akademsko raziskovalno sceno na eni strani ter gospodarstvom na drugi strani predstavlja odlično kombinacijo v fazi razvoja inovativnih in visokotehnoloških izdelkov. Pri razvoju posameznih sklopov samooskrbnega napajalnega sistema smo prišli do mnogih novih spoznanj, predvsem na področju optimiranja in varčne rabe shranjene električne energije iz baterijskega hranilnika. Več podrobnosti je podano v zaključnem poročilu [1].

6 Literatura

- [1] M. Španer, Development of a universal PV power system as a power supply for illuminated advertising pylon, Technical reporting, 2020
- [2] M. Masomtob, R. Sukondhasingha, J. Becker, and D. U. Sauer, "Parametric Study of Spot Welding between Li-ion Battery Cells and Sheet Metal Connectors", *Eng. J.*, vol. 21, no. 7, pp. 457-473, Dec. 2017
- [3] B. Xu, L. Kong, G. Wen and M. G. Pecht, "Protection Devices in Commercial 18650 Lithium-Ion Batteries," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 66687-66695, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075972.
- [4] X. -Y. Yao and M. G. Pecht, "Tab Design and Failures in Cylindrical Li-ion Batteries," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24082-24095, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2899793.
Hybrid energy storage devices in off-grid PV energy systems, predstavitev projekta, spletna stran: <https://www.oisair.net/technology/index>
- [5] S. Hirota, K. Hara, M. Ochida and Y. Mishiro, "Energy storage system with cylindrical large formatted lithium ion batteries for industrial applications," 2015 *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Osaka, Japan, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/INTLEC.2015.7572365.

- [6] REC Q BMS, <https://www.rec-bms.com/rec-q-battery-management-system-16s/>
- [7] [Konektorji Anderson](#)
- [8] [MPPT solarni polnilec Victron](#)