

# Otvoreni hardver za realizaciju pogona električnog bicikla

Aleksandar R. Milić

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

[milic.aleksandar@etf.bg.ac.rs](mailto:milic.aleksandar@etf.bg.ac.rs)

**Rezime:** U ovom radu je predstavljen oblik sistemskog korišćenja otvorenog hardvera i slobodnog softvera u otvorenom obrazovanju u formi studentskog tima. Rad sadrži prikaz materijala dostupnih na *GitHub*-u i drugim lokacijama koji se koriste za rad studentskog tima i unapređenje nastave na završnim godinama studija Elektrotehničkog fakulteta - Univerziteta u Beogradu. Kao reprezentativni primer otvorenog hardvera u formiranom sistemu dat je aplikativni prikaz kroz realizaciju projekta pogona električnog bicikla kao i procedura za repliciranje istog. Na kraju su dati predlozi za aktivnije korišćenje otvorenih materijala u cilju poboljšanja performansi predstavljenog sistema. Pogon električnog bicikla prezentovan u radu projektovao je *H-Bridges* tim studenata Elektrotehničkog fakulteta iz Beograda tokom učešća na svetskom takmičenju u inovativnim rešenjima *IEEE International Future Energy Challenge 2019*.

**Ključne reči:** pogon; električni bicikl; slobodno obrazovanje; otvoreni hardver

## I. Uvod

Primena otvorenog hardvera i slobodnog softvera u svrhu otvorenog obrazovanja je sve šire zastupljena na prestižnim univerzitetima širom sveta [1]. Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu (ETF) u tom duhu pruža u okviru mnogobrojnih kurseva na različitim nivoima studija sveobuhvatnu otvorenu literaturu [2]. Da je trend otvorenog hardvera i softvera sve prisutniji u univerzitetskom obrazovanju pokazuje i činjenica da se sve više profesora, ali i studenata oslanja na deljenje stručne literature, ali i na druge prakse otvorenog obrazovanja. Na taj način studentima se pruža mogućnost da prate rad na projektima svojih kolega sa drugih univerziteta, kao na primer Univerziteta u Koloradu ili Virdžinija Teksa korišćenjem jednostavnih platformi kao što je *GitHub* [3], [4].

U duhu otvorene kulture, 2018. godine na ETF-u je osnovan tim studenata pod nazivom *H-Bridges*. Tim je osnovan sa ciljem da se studentima pruži drugačiji pristup obrazovanju iz različitih oblasti elektrotehnike. *H-Bridges* svake godine učestvuje na svetskom takmičenju u oblasti inovativnih i energetski efikasnih rešenja pod pokroviteljstvom IEEE organizacije (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) pod nazivom *IEEE Interantional Future Energy Challenge – IEEE IFEC* [5]. Glavni cilj takmičenja jeste deljenje hardverskih i softverskih rešenja između studenata sličnih profila na svetskom nivou. Ovo je rezultovalo formiranjem sistema otvorenog obrazovanja u okviru *H-Bridges*-a u cilju postizanja vrhunskih rezultata.

Osnovna aktivnost *H-Bridges* tima jeste rešavanje jednogodišnjeg multidisciplinarnog tehničkog zadatka

projektovanjem inovativnog hardvera i softvera. Pored tehničkog dela, studenti se tokom jednogodišnjeg rada u laboratoriji upoznaju se radom u timu i stiču niz organizacionih i *soft skills* veština kroz kontinualnu komunikaciju sa kompanijama (eng. *fundraising*) i medijima (eng. *public relations*). Od 2018. godine na ETF-u je na taj način započet trend otvorene kulture i formiranje drugačijeg pristupa tradicionalnom obrazovanju u različitim oblastima elektrotehnike kroz sistemsko korišćenje otvorenih materijala i prenos znanja sa generacije na generaciju. Tehnička i organizaciona rešenja svih generacija studentskog tima, kao i u radu predstavljeno rešenje električnog bicikla, integrisani su u sistem funkcionisanja u *H-Bridges*-u, a dodatno su dostupni svima na analizu i korišćenje.

Pogon za električni bicikl snage 700 W razvijen je u Laboratoriji za električna vozila na ETF-u. Tehničko rešenje, koje je timu donelo i prvu nagradu, predstavljeno je jula 2019. godine u poslednjoj fazi takmičenja u Viskonsinu, SAD. Rešenje je predstavljeno kroz aplikativnu realizaciju električnog bicikla, modifikacijom tradicionalnog *Off-Road* bicikla kompanije *Capriolo*. Realizovani prototip prikazan je na Slici 1.

Pored projekta električnog bicikla koji će u poglavlju III biti detaljnije predstavljen, projekti koji su takođe delom ili potpuno otvoreni nalaze se u Tabeli 1. To su projekat brzog punjača za baterije sa galvanskom izolacijom, sistem napajanja nanosatelita i drugi. Hardverska i softverska tehnička rešenja koja su nastala kao rezultat projekata navedenih u Tabeli 1 sistemski su integrisana u različite aktivnosti rada studentskog tima i kontinualno se koriste u nastavi.



Slika 1. Realizovani električni bicikl u okviru *H-Bridges* tima na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu sa osnovnim elementima: 1) električna mašina, 2) invertorska jedinica, 3) ručica za gas i 4) baterija

Tabela 1: Pregled delimično ili potpuno otvorenih projekata koji se mogu naći na [6] i sajtu [ddc.etf.rs](http://ddc.etf.rs)

Projekat	Nominalna snaga [W]
Sistem za brzo punjenje baterija sa galvanom izolacijom	1100
Monofazni ispravljač za priključenje obnovljivih izvora na mrežu	1300
Pogon za električni bicikl	700
Sistem za napajanje nanosatelita	80
Integrirani monofazni pogon sa asinhronom mašinom sa kaveznom rotorom	900

## II. H-Bridges studentski tim i otvoreno obrazovanje

Za svaki od projekata u Tabeli 1 postoje skupovi materijala koji su dostupni za studente ETF-a i druge korisnike. Jedan skup sadrži izvorni (eng. *source*) kod sa kontrolnim algoritmom, paket simulacija, spisak hardverskih elemenata, BOM (eng. *Bill Of Materials*) i gerber fajlove za projektovanje štampane ploče – PCB (eng. *Printed Board Circuit*). Otvoreni materijali koji su rezultat naučno - istraživačkog rada *H-Bridges* tima i proisteklih master i diplomskih radova mogu se pronaći na [6] i sajtovima [ddc.etf.rs](http://ddc.etf.rs) i [emp.etf.rs/rddc.htm](http://emp.etf.rs/rddc.htm) (pristupljeno 26. avgusta 2020).

Materijali predstavljaju hardverska i softverska tehnička rešenja za aplikacije navedene u Tabeli 1. Grupisani su uz prateće tekstualne zapise prema subjektivno definisanom težinskom faktoru i intezivno se koriste u okviru tri kursa na osnovnim i master studijama ETF-a. Na trećoj godini studenti korišćenjem skupova sa nižim težinskim faktorom obnavljaju i proširuju elementarna znanja. Skupove sa najvišim težinskim faktorom studenti koriste na master studijama za rešavanje kompleksnijih tehničkih problema u okviru zasebnih oblasti za istraživanje. Tehničke probleme najpre rešavaju korišćenjem otvorenih softverskih rešenja, a zatim na eksperimentalnim postavkama koje su rezultat prethodnih projekata. U realnom okruženju na dostupnom hardveru imaju priliku da se upoznaju sa nemodelovanim problemima koji se u teorijskim delovima kurseva uglavnom zanemaruju.

Pored upotrebe otvorenih hardverskih i softverskih rešenja u tradicionalnim nastavnim aktivnostima, ista su integrisana u sistemsku strukturu *H-Bridges* tima. Njihova upotreba može se grubo predstaviti kao:

- 1) Upotreba materijala pri formiranju novog tima
- 2) Upotreba materijala tokom izrade novog rešenja

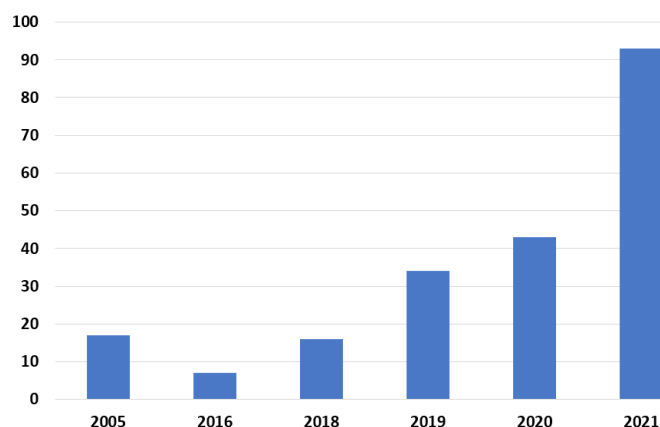
Tokom prvog meseca formiranja nove generacije tima, otvorena tehnička i organizaciona rešenja prethodnih timova se intezivno koriste kroz stručne obuke i treninge koje stariji članovi drže za mlađe. Prve četiri radne nedelje po formiranju novog tima nova generacija studenata ima zadatak da replicira kosture projekata prethodnih timova uz svakodnevne konsultacije sa starijim članovima, mentorom i korišćenjem otvorenih hardverskih i softverskih rešenja po ugledu na dobre prakse primene otvorene nauke u obrazovanju [7]. Na kraju četvrte nedelje za nove članove se organizuje KTW (eng. *Knowledge Transfer Weekend*). KTW predstavlja finale uvodnih obuka, na kojem studenti u roku od tri

dana posećuju 10 treninga i radionica. Prvih 8 treninga je posvećeno prethodnim projektima i rešavanju problema sa kojima su se susretale prethodne generacije uz korišćenje otvorenih tehničkih rešenja. Poslednja dva treninga služe kao uvod za naredni projekat i njih po pravilu drže predstavnici iz industrije.

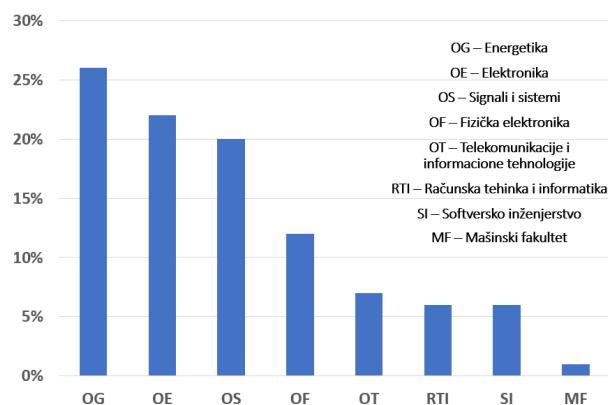
Nakon uvodnog meseca, tokom rešavanja aktuelnog zadatka za tekuću generaciju, studenti kontinualno koriste i pozivaju se na dostupna tehnička rešenja. Kroz ovakav sistemski pristup nove generacije studenata se upoznaju sa problemima sa kojima su se susretale njihove kolege, uče da rade zajedno na rešavanju istih i ubrzano stiču praktično iskustvo kroz ponavljanje ranijih projekata. Ovako se postiže velika efikasnost pri učenju i brzo savladavanje niza problema koji su u startu zajednički za sve generacije. Dodatno, prethodna otvorena rešenja postaju temelj za rešavanje aktuelnog zadatka.

Tokom aktivnog rada na projektu i korišćenja otvorenih rešenja, ista se redovno unapređuju, održavaju i spremaju za narednu generaciju. Formiranim sistemom znanje se prenosi kroz generacije preko studenata, odstranjujući potencijalni jaz na relaciji student – predavač. Rezultat predstavljenog sistema otvorenog obrazovanja koji odstupa od tradicionalnog rezultovao je brojnim svetskim nagradama i priznanjima za *H-Bridges* tokom prethodnih godina u konkurenciji najvećih svetskih univerziteta [5].

Drugi rezultat je broj studenata u timu koji raste iz godine u godinu, Slika 2. Poslednjoj generaciji tima pristupilo je rekordna 93 člana (39% studentkinja, 61% studenata) sa svih odseka ETF-a, što je u nivou najbrojnih odseka na Fakultetu.



Slika 2. Broj prijavljenih studenata za *H-Bridges* tim po generaciji



Slika 3. Raspodela prijavljenih studenata po odsecima 2020/21

Pregled novih članova tima po odsecima ETF-a u 2020. godini dat je grafički na Slici 3. Tokom izrade zadatka timu takođe u toku godine pristupi određeni broj studenata Mašinskog, Ekonomskog i Fakulteta organizacionih nauka Univerziteta u Beogradu. Broj studenata na izbornim predmetima na kojima se otvorena tehnička rešenja koriste takođe je u konstantnom porastu, ali statistički podaci neće biti izneti u ovom radu zbog mnogobrojnih dodatnih parametara koji na iste utiču.

### III. Otvoreni hardver za realizaciju pogona električnog bicikla

U nastavku je predstavljen jedan aplikativni prikaz otvorenog hardvera kroz tehničko rešenje električnog bicikla prikazanog na Slici 1. Dodatno, predstavice se metoda za repliciranje tehničkog rešenja električnog bicikla bez izmena u hardverskom i softverskom dizajnu.

U Tabeli 2 predstavljeni su svi elementi električnog bicikla i njihova cena. Osim invertorske jedinice (Slika 1 element broj 2) svi elementi se mogu kupiti i montirati prema uputstvu proizvođača. Za projektovanje invertorske jedinice, postoji otvoreno hardversko rešenje sa svim potrebnim materijalima: gerber fajlovi, BOM, izvorni kod i 3D model za projektovanje kućišta [6]. U nastavku svaki element električnog bicikla biće ukratko predstavljen kao i procedura za repliciranje invertorske jedinice. Korisnik navedene elemente može montirati na tradicionalni bicikl koji već ima u vlasništvu ili na drugi proizvoljni model. Sistem je organizovan tako da je adaptivan za montiranje na bicikl proizvoljnih dimenzija.

Bicikl na Slici 1 na sebi ima *Brushless DC* električnu mašinu snage 3000W. Prednja strana električne mašine integriše Holov senzor koji prosleđuje invertorskoj jedinici informacije o realizovanoj vučnoj sili. Zadnja strana integriše 1:6 mehanički reduktor koji ima za cilj da visoke brzine na kojima radi električna mašina spusti na brzine potrebne prosečnom korisniku, od 0 do 100 obrtaja u minutu. Mašina je dostupna u slobodnoj prodaji sa integrisanim elementima i sistemom sa nošenje [8].

Na guvernali bicikla postavljena je ručica za gas kojom korisnik kontroliše vučnu silu na obodu točka. Ručica za gas sa uputstvom za moniranje dostupna je za kupovinu u slobodnoj prodaji [9].

Na realizovan prototipu korišćene su litijum polimer baterije kapaciteta 250 Wh, 55 V, 10 A. Pri kupovini elemenata, baterije, električne mašine i gas ručice, preporučuju se elementi navedeni u otvorenom BOM-u. Predložene baterije pružaju korisniku dovoljnu autonomiju u gradskim uslovima i potrebne karakteristike iz ugla elektro parametara za odgovarajući rad invertorske jedinice. Varijacije u izboru baterije mogu dovesti do neželjenih pojava i kvara pri trajnom radu. Uz kupovinu predloženih baterija korisnik dobija odgovarajući punjač za njihovo brzo punjenje koje može iskoristiti na običnoj monofaznoj utičnici. Uz kupljeni baterijski paket dolazi i torba za njihovo postavljanje na bicikl.

Razvijeni prototip invertorske jedinice prikazan je na Slici 4. Razvijena invertorska jedinica sa prilagodnim kućištem predstavlja glavni doprinos u naučno – istraživačkom radu u okviru predstavljenog projekta. Za razvoj invertorske jedinice u prvom koraku, bez

otvorenih materijala, bilo bi neohodno odraditi inicijalni dizajn hardvera i softvera, simulacije karakterističnih režima i problema, odabir svih hardverskih elemenata, projektovanje štampane ploče i kontrolnog algoritma, itd. Sa otvorenim, dostupnim i organizovanim materijalima, procedura projektovanja ovakvog rešenja je dosta pojednostavljena i ubrzana. Kako se materijali konstantno unapređuju u cilju korišćenja istih od strane korisnika sa elementarnim znanjima iz elektrotehnike, projektovanje ovakvog tehničkog rešenja od strane posrednih korisnika koji ranije nisu imali prilike da se susretnu sa tematicom postaje izvodljivo. U nastavku su navedeni koraci koje je neophodno sprovesti do repliciranja predstavljenog rešenja za električni bicikl.

U prvom koraku neophodno je izraditi štampanu ploču, što se po niskoj ceni može izvesti od strane podizvođača iz NR Kine [10]. Dokumentacija potrebna za izradu iste je dostupna u vidu gerber fajlova [6]. Paralelno je potrebno poručiti sve elemente iz BOM-a koji sadrže pored elementa za invertorsku jedinicu i električnu mašinu sa sistemom za nošenje, baterijski paket i ručicu za gas. Nakon prikupljanja svih elemenata potrebno je zalemiti iste na štampanoj ploči. Na ploči svaki element ima svoju jedinstvenu oznaku koja odgovara jednom od elemenata u BOM-u. Nakon lemljenja potrebno je odgovarajući izvorni kod spustiti na procesor koji se nalazi u okviru invertorske jedinice. Za ovaj korak, postoji intuitivna procedura u vidu tekst dokumenta, ali je poželjno učešće stručnog tehničkog lica. Po postavljanju invertorske jedinice u kućište, pobrojani elementi se mogu montirati na proizvoljni tradicionalni bicikl. Na kraju je potrebno povezati izlaze svih elemenata za jednoznačno obeležene ulaze na invertorskoj jedinici.

Nakon ispravnog povezivanja sistema u okviru invertorske jedinice se izvršava kontrolni algoritam, bez posredstva korisnika, koji na bazi prikupljenih informacija (sa baterije, ručice za gas i električne mašine) na obodu točka korisniku pruža željenu vučnu silu.



Slika 4. Razvijeni otvoreni prototip invertorske jedinice u okviru *H-Bridges* tima za električni bicikl

Invertorska jedinica na sebi poseduje *Bluetooth* modul uz koji je pridružena jednostavna Android aplikacija otvorenog koda za telefon. Aplikacija pruža korisniku informacije o translatornoj brzini, trenutnom kapacitetu baterije, srednjoj brzini i prosečnoj potrošnji baterije.

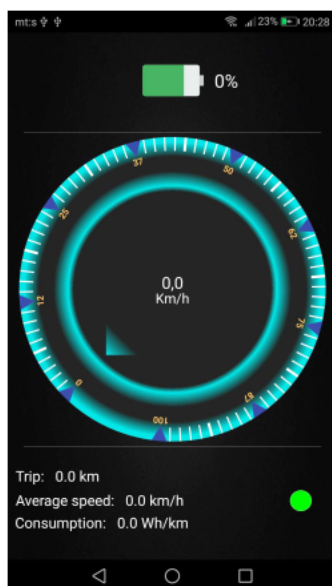
Tabela 2: Cena elemenata sistema za pravljenje replike električnog bicikla izražena u dolarima

Elementi sistema	Cena [\$]
Električna mašina sa sistemom za monitrinje, dostavom i carinom	350
Izrada štampanih ploča sa dostavom i carinom	60
BOM i usluga lemljenja	200
Izrada kućišta i monitrinje sistema	30
Baterija 250 Wh sa adekvatnim punjačem	200
Android aplikacija	0
Proizvoljni tradicionalni bicikl	200

Korisnički interfejs razvijene aplikacije prikazan je na Slici 5. Pri prvom korišćenju aplikacije korisnik unosi svoj jedinstveni nalog, naziv bicikla i lozinku, nakon čega samo vlasnik bicikla može da upravlja istim. Pored osnovnih opservabilnih funkcija aplikacije, korisnik ima mogućnost da definiše ograničenja po snazi, brzini i vučnoj sili pogona. Na ovaj način pruža se prilika korisniku da definiše ograničenja pri vožnji u slučaju da bicikl koristi osoba za koju je potrebna posebna pažnja, kao što su deca niskog uzrasta. Fajl za instaliranje aplikacije je takođe otvoren [6].

Razvijeni algoritam za kontrolu u okviru invertorske jedinice omogućava korisniku da biciklom upravlja bez korišćenja pedala, odnosno da brzinu kretanja diktira isključivo pomoću ručice za gas. Takođe, zbog implementiranog „clutch“ sistema u okviru reduktora na električnoj mašini, ovakav adaptivni sistem korisnik može da koristi i kao tradicionalni bicikl bez učešća elektromotornog pogona u vožnji. Potrebno je jedino isključiti pogon pomoću opcije u aplikaciji nakon čega se inercija pogona neće osećati pri vožnji.

Iako je navedeni postupak na prvi pogled jednosmeran, prosečan korisnik pri pokušaju realizacije navedenog rešenja može naići na mnogobrojne probleme.



Slika 5. Korisnički interfejs razvijene Android aplikacije u okviru projekta električnog bicikla *H-Bridges* tima

Deo problema pri realizaciji predstavljenog tehničkog rešenja ogleda se pri lemljenju invertorske jedinice gde može doći do niza problema usled nestručnog rukovanja. Takođe, pri motiranju sistema za nošenja električne

mašine takođe može doći do neželjenih mehaničkih problema pri režimima polaska, kada korisnik pokreće svoj bicikl iz režima mirovanja. Ovi problemi se mogu otkloniti dodatnom automatizacijom procedura za projektovanje i montiranje sistema formiranjem materijala za potrebe korisnika sa skromnijim tehničkim znanjem.

## IV. Zaključak

U radu je dat aplikativni prikaz otvorenog hardvera i slobodnog softvera kroz realizaciju pogona električnog bicikla. Ukratko je predstavljena procedura za izradu prototipa. Predstavljen je sistemski pristup za korišćenje otvorenih hardverskih i softverskih rešenja na proizvoljnom broju studenata u formi studentskog tima. Predstavljeni su statistički rezultati u formi odziva kod studenata za učešće u predstavljenom sistemu. Nedovoljna vidljivost predstavljenih rešenja može se promeniti većim korišćenjem materijala u okviru različitih kurseva na ETF-u. Na ovaj način bi i studenti koji nisu aktivno uključeni u *H-Bridges* tim mogli da raspolazu sa različitim hardverskim i softverskim rešenjima. Na kraju, veći podsticaj za studente da nastave sa naučno – istraživačkim radom na predstavljenim projektima bi sigurno doveo do bogatijeg sadržaja istih i bolje organizacije dostupnih materijala.

## Zahvalnica

Autor je zahvalan prof. dr Nadici Miljković za veliku podršku i vredne komentare tokom pisanja rada. Posebnu zahvalnost autor duguje svim studentima koji su prošli kroz *H-Bridges* tim od 2018. godine i što su velikom željom, požrtvovanjem i disciplinom gradili sistem koji danas postoji. Zahvalnost u ime svih članova tima upućena je i svim kompanijama koje su prepoznale predstavljenu ideju iza *H-Bridges* tima i nesebično je podržale.

**Dostupnost podataka:** Podaci su dostupni na GitHub stranici (<https://github.com/Mostovi>).

## Literatura

- [1] [https://ocw.mit.edu/ans7870/global/05\\_Prog\\_Eval\\_Report\\_Final.pdf?](https://ocw.mit.edu/ans7870/global/05_Prog_Eval_Report_Final.pdf?) [pristupljeno sep. 3, 2020]
- [2] N. Miljković, "Otvoreni nastavni materijali: Interna iskustva," *Primena slobodnog softvera i otvorenog hardvera PSSOH 2018*: 16.
- [3] <https://github.com/jackdski/ifec> [pristupljeno avg. 25, 2020]
- [4] <https://github.com/jhensal33/IFEC> [pristupljeno avg. 25, 2020]
- [5] <http://energychallenge.weebly.com/> [pristupljeno avg. 25, 2020]
- [6] <https://github.com/Mostovi> [pristupljeno sep. 1, 2020]
- [7] J. R. Wagge, M. J. Brandt, L. B. Lazarevic, N. Legate, C. Christopherson, B. Wiggins, J. E. Grahe, "The collaborative replications and education project," *Frontiers in psychology*, vol 10, pp. 247, 2019
- [8] <https://lunacycle.com/cyclone-mid-drive-3000w-planetary-kit/> [pristupljeno avg. 25, 2020]
- [9] <https://www.amazon.com/slp/electric-throttle/f4ppa4356yddvbt> [pristupljeno avg. 25, 2020]
- [10] <https://jlcpcb.com/> [pristupljeno avg. 25, 2020]