

Merilnik moči kolesarja

Aljoša Berk

Srednja tehniška in poklicna šola Trbovlje

Izvleček

Sodobni kolesarski šport postaja čista znanost. Za zagotavljanje minimalne prednosti pred tekmeci so bistveni aerodinamika, telemetrija in denar. V članku je opisan srednješolski projekt izdelave merilnika moči pedaliranja kolesarja. Merilnik je zasnovan na osnovi uporovnih lističev v platformi na pedalih ter z uporabo mikrokontrolerov Arduino. Opisani sta izdelava merilnikov sile in kadence pedaliranja ter izdelava prikazovalnika treh fizikalnih količin: sile, frekvence in moči. V zaključku so podane možnosti nadgradnje in izboljšav izdelka.

Ključne besede: navor, frekvenca, moč, uporovni listič, Arduino

Cycling Power Meter

Abstract

Modern cycling is evolving into the science of aerodynamics, telemetry, and money to achieve marginal gains. The article explains a student project to build a functional strain gauge-based cycling power meter with a cadence sensor and a handlebar-mounted display. Different Arduino microcontrollers were used to control force and frequency measurement, wireless connection, and an LCD. The conclusion provides some ideas regarding the improvement and upgrade of the device.

Keywords: torque, frequency, power, strain gauge, Arduino.

1 Uvod

Pri izvajanju pouka fizike ne smemo pozabiti na nadarjene dijake, ki zmorejo veliko več od učenja fizike za odlično oceno, le možnost in primeren izziv jim moramo ponuditi. Poleg nadarjenih moramo zaposliti tudi preostale dijake. To lahko naredimo z diferenciacijo pouka. Večina dijakov izdeluje plakate na določeno temo ter izvaja preproste račune in poskuse, najboljši pa načrtujejo in uresničijo nek projekt, programirajo programske kode ter izrišejo 3D-modele in skice vezij. Dijaki višjih letnikov iz programa elektrotehnik so morali izdelati merilnik moči kolesarja. V članku bom opisal, kako so se te naloge lotili. Naročil sem jim, naj izdelajo merilnik samo z opremo in komponentami, ki jih že imamo na šoli v elektro- in fizikalnem laboratoriju.

2 Cestno kolesarstvo v številkah

V zadnjih petnajstih letih je kolesarstvo vse bolj povezano z aerodinamiko in testiranjem v vetrovniku, z aerodinamičnimi oblačili iz povsem novih materialov in s čim lažjimi komponentami koles. Vse pomembne parametre merijo ter analizirajo z računalnikom. Iz karbonskih vlaken so narejeni okvirji in skoraj vse komponente kolesa. Zavore so hidravlične in menjalniki prestav brezžični. Kolesar-

stvo je postalo visoka znanost in tehnologija. Za analizo podatkov treninga ali dirke je najpomembnejši podatek, koliko časa lahko kolesar vzdržuje neko povprečno moč. Moč kolesarja se časovno spreminja glede na teren in dogajanje v glavnini ter ni konstantna. V ciljnem sprintu glavnine lahko tekmovalci v časovnem intervalu, dolgem do 15 s, dosežejo hitrosti do 70 km/h. Pri tem poganjajo pedale s povprečno močjo do 1200 W z vrhovi maksimalne moči do 1500 W [1]. Absolutna proizvedena moč pa ni najboljši pokazatelj pripravljenosti in napredka kolesarja, temveč je to razmerje moči in mase v enotah W/kg. Za kolesarje sprinterje vemo, da so med težjimi kolesarji. Vzemimo 80-kilogramskega kolesarja, ki je v 15-sekundnem sprintu dosegel povprečno moč 1200 W. Dobiemo razmerje moči in mase $1200 \text{ W} / 80 \text{ kg} = 15 \text{ W/kg}$. Na ovalnem dirkališču v dvorani lahko najmočnejši tekmovalci dosežejo maksimalno moč do 2000 W, vendar za njimi ni peturne etape, dolge 200 km, pač pa le trije krogi sprinta. Najboljši cestni kolesarji lahko na posamičnem kronometru, dolgem največ eno uro, vzdržujejo vrednost 5,6 W/kg ali več [2]. Za kolesarja mase 65 kg to pomeni, da lahko do 60 minut vzdržuje povprečno moč okoli 360 W. V osmi etapi Dirke po Franciji leta 2020 je Tadej Pogačar med vzponom na Col de Peyresourde 24 minut vzdrževal vrednost 6,5 W/kg [3], kar pri

njegovih takratnih 66 kg pomeni povprečno moč $66 \text{ kg} \times 6,5 \text{ W/kg} = 429 \text{ W}$. Zadnji Pogačarjev napad pod vrhom vzpona je trajal 17 sekund in v tem času je Tadej razvil maksimalno moč 880 W, kar je 13,3 W/kg, povprečna moč pa je bila 643 W, kar je 9,7 W/kg. Razlika med sprinterji in gorskimi kolesarji je torej ta, da lahko sprinter za kratek čas, od 10 do 15 s, vzdržuje zelo visoko vrednost do 15 W/kg, lažji gorski kolesar pa lahko 60 minut vzdržuje razmerje do 5,6 W/kg. Vsaka odvečna masa se pokaže kot slabost pri vožnji v klanec. Na ravninskih cestnih dirkah je pomembnejša absolutna proizvedena moč tekmovalca, zato imajo tu težji in bolj mišičasti kolesarji prednost pred lahkimi. Pri vožnji v klanec pa je odločilno razmerje W/kg in na takem terenu so najhitrejši čim lažji tekmovalci.

3 Moč pri vrtenju

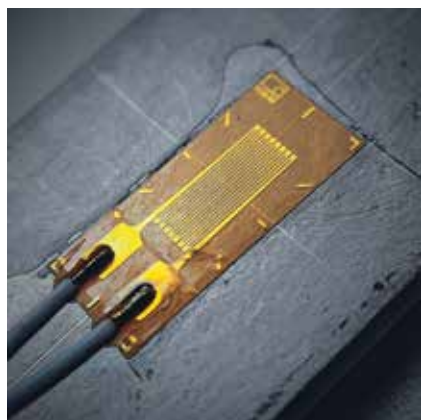
Meritev moči pri pedaliranju (vrtenju) zahteva natančno merjenje sile na pedal in natančno merjenje frekvence vrtenja gonilke, imenovane kadenca. Moč P je enaka kvocientu opravljenega dela A na enoto časa t . Pri zasuku gonilke dolžine r za kot φ okoli osi naredi pedal lok dolžine $s = \varphi r$. Kotna hitrost vrtenja gonilke je enaka kvocientu zasuka v radianih in časa $\omega = \frac{\varphi}{t}$. Ko s silo F delujemo na pedal, povzročimo z gonilko navor $M = Fr$. Opravljeno delo sile je enako produktu sile in premika $A = Fs$. Ko vstavimo vse količine v enačbo za moč in upoštevamo, da je kotna hitrost enaka $\omega = 2\pi\nu$, dobimo enačbo za moč pri vrtenju:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = \frac{F\varphi r}{t} = M\omega = 2\pi Fr\nu.$$

Iz enačbe vidimo, da moramo za merjenje moči pedaliranja poznati dolžino gonilke r , potisno silo noge na pedal F in frekvenco pedaliranja ν .

4 Izvedbe merilnika moči

Vse komercialne izvedbe merilnika moči temeljijo na merjenju sile z uporovnimi lističi (Slika 1). Te z močnim dvokomponentnim lepilom nalepimo na nosilec, ki se pod vplivom delovanja sile F krči, razteza, upogi-

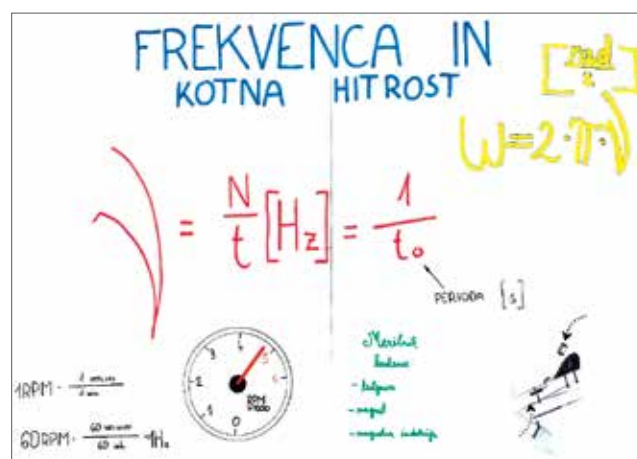


Slika 1: Uporovni listič, nalepljen na nosilec [4].

ba ali torzijsko zvija. Deformacija nosilca se prenese na spremembo dolžine uporovnega lističa in posledično se spremeni njegova električna upornost. Pri podaljšanju nosilca (in z njim uporovnega lističa) se upornost lističa poveča, pri krčenju pa zmanjša. Spremenjena upornost pomeni spremembo napetosti v mostičnem vezju, kamor smo vezali uporovni listič. Merjena napetost je premo sorazmerna z delujočo silo in s tem posredno, prek napetosti, merimo potisno silo kolesarja. Podrobno je to opisano v sedmem poglavju. V praksi lahko najdemo izvedbe merilnika v pestu pogonskega kolesa, na gonilki, na osi pedala, na verižniku in na gonilni osi. Merilniki na gonilki ali na osi pedala so lahko eno- ali dvostranski (leva, desna gonilka). Vsi merilniki merijo silo, kadenco in kot zasuka gonilke ter podatke brezžično prenašajo v kolesarki računalnik z zaslonom, ki je pritrjen na krmilo kolesa.

5 Teoretično delo dijakov

Dijaki so morali najprej usvojiti teoretične osnove s pomočjo učbenikov in spleta. Delali so v skupinah, vsaka skupina je dobila svojo temo, povezano s projektom. Skupine so bile izbrane tako, da je bil v vsaki skupini

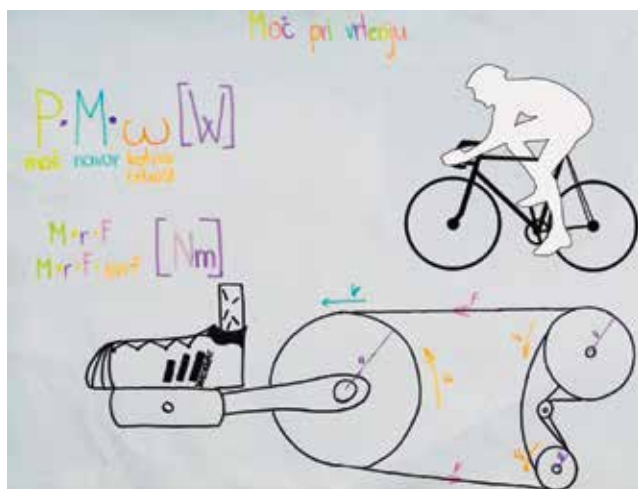


Slika 2: Frekvenca in kotna hitrost.

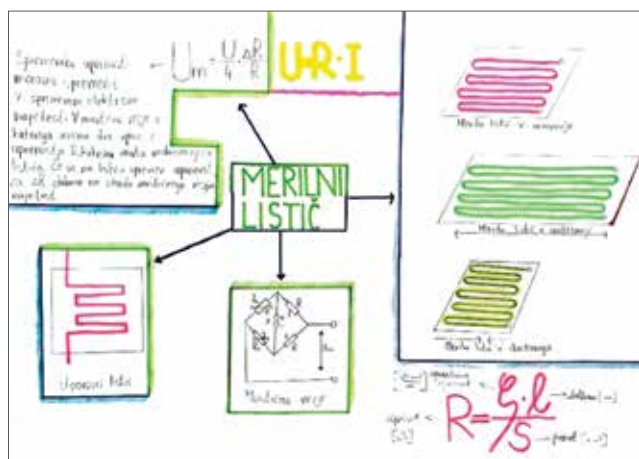


Slika 3: Definicija navora in ravnovesja navorov.

vodja nekdo izmed boljših dijakov. Skupine so definirale osnovne fizikalne pojme: navor, frekvenca, kotna hitrost, moč pri vrtenju, uporovni listič in Wheatstonov mostič. Izdelali so različne plakate ter svoja dognanja na koncu frontalno predstavili sošolcem v obliki govornega nastopa in pridobili ustne ocene (Slike 2–5). Nadarjeni dijaki iz programa elektrotehnik so pri pouku in na fizikalnem krožku izdelali načrte, skicirali vezja, zapisali programske kode, izbrali in testirali opremo ter uresničili projekt.



Slika 4: Definicija moči pri vrtenju.

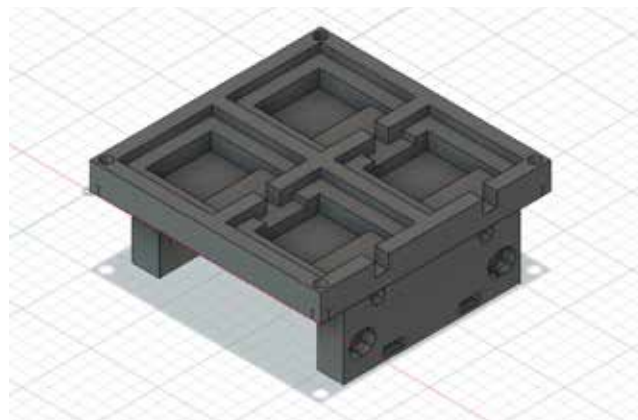


Slika 5: Delovanje uporovnega lističa.

6 Izdelava platforme s 3D-tiskalnikom

Dijaki so se odločili za izvedbo merilnika moči v obliki platforme na pedalu (Slika 6). To si lahko preprosto predstavljamo. Na eno stran pedala so namestili miniaturno digitalno tehtnico, ki bo merila silo noge in ta podatek brezžično prenašala v glavno krmilno enoto. Dijaki so za projekt dobili stare pedale, ki so jih uporabili za izdelavo platforme. Delno so jih razstavili, izmerili dimenzije, narisali načrt ter s 3D-tiskalnikom natisnili plastično ohišje, v katerem bodo štirje merilniki sile, krmilnik Arduino NANO, vir napetosti 9 V ter modul NRF24L01 za brezžični prenos signalov. Vsak modul

Arduino je narejen tako, da večjo napetost vira sam stabilizira na svojo delovno napetost 5 V. Podatke o platformi Arduino najdemo na njihovi spletni strani [5]. Z nje lahko brezplačno prenesemo in naložimo razvojno programsko opremo. Merilnik sile je nameščen samo na levi pedal, zaradi simetrije pa so dijaki izdelali dve enaki ohišji, kar omogoča nadgradnjo na obojestranski merilnik za levo in desno nogo (Slika 7). Na zgornjem delu platforme je pritrjena kovinska plošča, ki poskrbi, da se pritisk sile noge enakomerno porazdeli na štiri merilnike sile tik pod ploščo.



Slika 6: Konstruiranje 3D-modela platforme pedala.



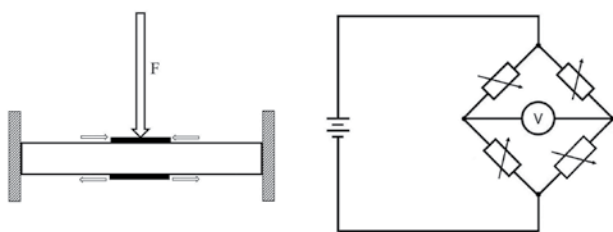
Slika 7: Spodnji del platforme brez merilnikov (desno) in zgornji del platforme s štirimi dualnimi uporovnimi lističi (strain gauge) vezanimi v mostič (levo).

7 Merjenje sile

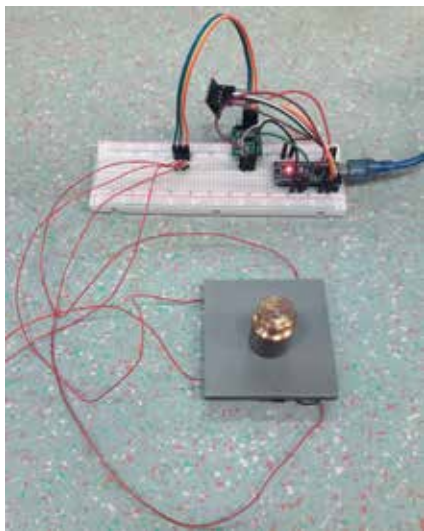
Digitalno tehtnico so dijaki povezali z Arduino NANO in analogno-digitalnim pretvornikom, napisali kodo ter jo naložili v Arduino. Nato so z znanimi masami uteži, od majhnih do velikih, obremenili platformo in beležili podatke. Odvisnost sile in izhodne napetosti je linearna. Ker so spremembe napetosti zaradi delovanja sile zelo majhne, direktna ali absolutna meritev upornosti ni mogoča. Uporovne lističe moramo vezati v mostično vezje, kar je relativna ali primerjalna metoda merjenja. Če so

1 Strain gauge: merilnik mehanske napetosti in deformacije togega telesa zaradi delovanja sile, ki deluje po principu spremembe dolžine in električne upornosti tanke žice (uporovni listič), ki rezultira v spremembo merjene električne napetosti.

vsi upori v mostiču enaki in neobremenjeni, je izhodna napetost U enaka nič. Zaradi delovanja sile F se uporovni listič skrči ali razteza in njegov upor se zmanjša ali poveča. Mostično vezje meri neravnovesje razmerja dveh vej uporov, ko se eden ali več uporov spremeni zaradi delovanja mehanske sile. Spremenjen upor povzroči spremembo izhodne napetosti U . Da bi dobili čim večjo izhodno napetost, so dijaki uporabili štiri enake dualne senzorce, vezane v mostič (Slika 7). Vsak od njih je sestavljen iz dveh uporovnih lističev, nalepljenih na nosilec tako, da se ob pritisku s silo F na senzor zgornji skrči, spodnji pa razteza. Tako z ustrezno vezavo osmih uporovnih lističev dobimo največjo mogočo spremembo upora in s tem napetosti, kar pomeni največjo mogočo natančnost meritve (Slika 8). Izhodno napetost na koncu še ojačimo. V ta namen so dijaki uporabili čip HX711, ki je 24-bitni analogno-digitalni pretvornik z diferenčnim ojačevalnikom (Slika 9).



Slika 8: Levo: delovanje dualnega uporovnega lističa na obremenjenem nosilcu (zgoraj krčenje, spodaj raztezanje). Desno: shema mostičnega vezja štirih spremenljivih uporov [6].



Slika 9: Umerjanje merilnika sile z znanimi masami uteži: testna plošča (protoboard), Arduino NANO z LED-diodo in AD-pretvornik HX771.

8 Merjenje frekvence

Merilnik kadenca so dijaki sestavili iz magneta, prilepljenega na gonilko, ter čipa s Hallovo sondo, prilepljenega na okvir kolesa (Slika 10). To je najpreprostejše merje-

nje frekvence s štetjem pulzov inducirane napetosti na časovno enoto. Čip s Hallovo sondo so dijaki po okvirju kolesa žično povezali z Arduino UNO na krmilu. Sonda je statična, premika se le magnet, in tako so dijaki porabili en krmilnik Arduino NANO manj, saj je v bližini magneta zelo malo prostora za krmilnik in brezžični oddajnik. Pri merjenju sile noge na pedal žični prenos informacij ni mogoč, saj se merilnik sile neprestano vrti. Sodobni kolesarski računalniki z vsemi perifernimi merilniki (moč, kadenca, hitrost, radar, luči) komunicirajo brezžično s protokoloma ANT+ ali Bluetooth.



Slika 10: Merjenje frekvence pedaliranja. Pritrditev trajnega magneta na gonilko in Hallovega senzorja na okvir.

9 Prikazovalnik na krmilu

Dijaki so s programom izrisali in nato s 3D-tiskalnikom izdelali ohišje ter ga pritrdili na krmilo. V ohišju so kontrolnik Arduino UNO, sprejemni modul NRF24L01 ter OLED-zaslon (128×64 znakov) za prikaz merjenih količin: frekvence (RPM – vrtljaji na minuto), sile (N) in moči (W). Dimenzije rdeče škatle so $8 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$. V notranjosti je krmilnik Arduino UNO (Slika 11).



Slika 11: Prikazovalnik sile, kadenca in povprečne moči na krmilu.

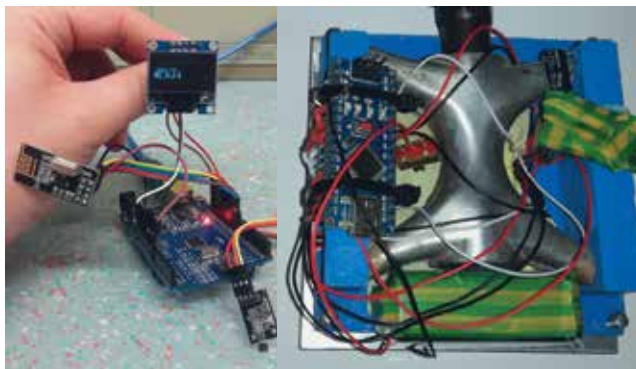
10 Programske kode za Arduino

Arduino je odprtokodni razvojni sistem z mikrokontrolerji. To pomeni, da lahko uporabnik na spletu poišče in uporabi del že napisane kode, ki jo potrebuje za svoj

projekt, a pod pogojem, da navede avtorja izvirne kode, označi svoje spremembe in kodo deli naprej pod enakimi pogoji. Kodo lahko poljubno modificira, da ustreza njegovemu projektu, in jo objavi na spletu. Dijaki so na spletu poiskali podoben projekt [7] in pridobili programske kode za brezžični prenos podatkov, za štetje impulzov in preračun v vrtljaje na minuto, za krmiljenje digitalne tehtnice in za krmiljenje zaslona. Program so nato prilagodili in vnesli nove parametre, ki so ustrezali njihovem projektu. Prezamudno bi namreč bilo pisati vsako kodo znova, saj je morda podobna koda že narejena in prosto dostopna, moramo jo le prilagoditi svoji opremi, vezju in vhodnim podatkom. Prilagodili so parametre za merilnik napetosti mostiča, da so dobili berljive podatke o potisni sili. Z modulom NRF24L01 so vzpostavili brezžično komunikacijo med pedalom in kontrolno enoto na krmilu. Koda za modul NRF24L01 vsebuje parametre komunikacije (hitrost, kanal, oddajna moč) in CRC-algorem za odkrivanje napak med prenosom ter za njihovo odpravljanje. Na zaslonu izpisana moč je povprečna moč $\bar{P}$, saj so posamezne meritve moči zaradi šuma preveč razpršene. Povprečno vrednost moči izračunamo kot aritmetično sredino večjega števila meritev v nekem časovnem intervalu $\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}$.

11 Testne vezave komponent

Ko so bile vse kode za krmiljenje Arduina napisane in prek USB-povezave naložene v krmilnik, so dijaki električna vezja preverili in testirali na testni plošči (Slika



Slika 12: Levo: testiranje delovanja komponent pred vgradnjo na kolo (OLED-zaslon, NRF-oddajnik, Hallov senzor in Arduino UNO). Desno: spodnji del platforme z vgrajenimi komponentami.



Slika 13: Testiranje delovanja merilnika moči na trenažerju (levo) in testna vožnja v telovadnici (desno).

12). S tem so odpravili težave in napake v vezju ali v kodi še pred vgradnjo. Na koncu, ko je vse brezhibno delovalo, so komponente zvezali na levi pedal, na okvir in v prikazovalnik na krmilu ter delovanje testirali najprej na trenažerju in na koncu z vožnjo v telovadnici (Slika 13).

12 Možnosti izboljšave

Skupaj z dijaki vidimo več možnosti izboljšave, ki pa so povezane s finančnimi sredstvi ali z znanjem programiranja:

a) Kontrolna ali referenčna meritev moči

Da bi videli, kako natančno naš merilnik sploh meri in kakšno mersko napako ima, bi morali naš sistem primerjati z enim od komercialnih. Najlažje bi bilo, če bi si izposodili ali kupili levo gonilko z vgrajenim merilnikom moči ter na isto gonilko nato namestili še pedal z našo platformo in preostale opisane merilnike sistema. Tako bi lahko v realnem času primerjali podatke. Žal do komercialnega merilnika nismo imeli dostopa.

b) Obojestranska meritev moči

Naš merilnik je enostranski, saj meri moč samo na levi nogi in privzame, da je skupna moč kolesarja dvakratnik moči leve noge. Prednost obojestranskega merilnika (leva in desna gonilka) bi bila odprava nesorazmerij v poganjanju z levo in desno nogo, saj iz prakse vemo, da obe nogi nista enako močni in da skupna moč ni nujno dvakratnik moči ene noge.

c) Meritev kota zasuka gonilke

Iz teorije vemo, da smer sile noge in gonilka nista vedno pravokotni ter da se sila spreminja med obračanjem gonilke tudi po velikosti, zato moč v intervalu enega obrata ni konstantna. V tisti polovici obrata gonilke, ko se noga vrača iz spodnjega v zgornji položaj in moč zagotavlja nasprotna noga, je sila noge na pedal enaka nič. Sodobni komercialni merilniki, ki poleg sile in frekvence merijo še kot zasuka gonilke, lahko s pomočjo dobljenih podatkov in programske opreme natančno izmerijo in izpišejo trenutno in maksimalno moč. S pomočjo programskih algoritmov v kolesarskem računalniku nato izračunajo povprečno in normalizirano moč na nekem intervalu, običajno na 3 ali na 5 sekund.

d) Vir napetosti, velikost naprave in komunikacija s senzorji

Vse sodobne naprave in senzorji so, za razliko od naših, precej miniaturni. Za vir napajanja uporabljajo akumulatore, ki se polnijo prek USB-priključkov. Nekatere manjše periferne senzorje pa še vedno napajajo kar gumbne baterije CR2032, ki jih je treba ob pogosti uporabi senzorjev redno menjati. Vse sodobne komercialne naprave prek protokolov ANT+ ali Bluetooth brezžično komunicirajo z vsemi perifernimi senzorji, kot so merilnik srčnega utripa, senzor hi-

trosti, senzor kadence, radar, merilnik moči, pametne kolesarske luči. V našem projektu je bilo merjenje kadence izvedeno prek žične povezave.

13 Zaključek

Fizikalni principi projekta so dokaj enostavni, zato jih lahko obravnavajo vsi dijaki v razredu kot novo snov ali kot ponovitev snovi (sila, navor, kroženje, frekvenca, kotna hitrost, moč, Ohmov zakon, uporovni listič ...) V parih ali skupinah lahko definirajo nove pojme, izdelajo plakate in prezentacije ter izvajajo preproste fizikalne poskuse v povezavi z obravnavano teorijo. Za končno realizacijo projekta izberemo ekipo nadarjenih dijakov, ki obvladajo programiranje, znajo upravljati 3D-tiskalnik, so spretni pri vezavah in spajkanju, so iznajdljivi in prilagodljivi, znajo poiskati ter interpretirati ustrezne vire, razumejo vezavne sheme ... Vidimo, da izvedba projekta zahteva široko paleto kompetenc, za katere so najprimernejši dijaki, ki se izobražujejo za elektrotehnike. Z izbiro in pridobivanjem elektronskih komponent dijaki

niso imeli težav, saj imamo na šoli sodobno opremljen elektrolaboratorij s sodobnim 3D-tiskalnikom, kjer so dijaki našli vse potrebno za projekt. Naš merilnik deluje, saj avtomatizirano prikazuje tri parametre: silo, vrtljaje na minuto ter povprečno moč. Predstavlja šolsko didaktično in nekomercialno izvedbo merilnika. Najpomembnejše pa je, da so se dijaki samostojno organizirali in sami poiskali prave informacije ter rešitve. Kadar so bili v zagati, so za mnenje vprašali profesorja. Največ težav jim je povzročalo usklajevanje in povezovanje različnih programskih kod v delujočo celoto. Zaradi popravkov nekaterih parametrov in konstant programa je to včasih še težje in zamudnejše od pisanja celotnega programa na novo. Težave pri takem projektu se lahko pojavijo še pri načrtovanju merilne metode z uporovnimi lističi in njene avtomatizacije (izbira ustreznih elektronskih komponent in zapis programske kode). Na koncu je dijakom brez večjih finančnih vložkov uspelo. Dokazali so, da so izvrstni pri timskem delu in da je projektni način dela mnogo bolj zanimiv, dinamičen ter izzivalen kakor klasičen frontalni pouk.

Viri in literatura

- [1] <https://sportsscientists.com/2014/07/profile-sprint-take-win-sprint-stage/> (12. 2. 2023).
- [2] Cycling Power to Weight Ratio Calculator - Data Cranker (12. 2. 2023).
- [3] <https://www.cyclingnews.com/features/tour-de-france-power-analysis-tadej-pogacars-record-breaking-ascent-of-the-col-de-peyresourde/> (12. 2. 2023).
- [4] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Strain_gauge_.jpg (12. 2. 2023).
- [5] <https://www.arduino.cc/> (25. 1. 2023).
- [6] https://vaje.fpp.uni-lj.si/tm/02_Mosti%C4%8Dki.pdf (20. 2. 2023).
- [7] <https://www.instructables.com/Homemade-Cycling-Powermeter/> (30. 1. 2023).