

# **Integracija senzorja navora v sredinski motor kolesa**

**Domen Pihler, Aleksander Polutnik**  
**Emsiso d.o.o., Zagrebška cesta 20, 2000 Maribor**  
**domen.pihler@emsiso.com, aleksander.polutnik@emsiso.com**

## ***Torque sensor integration in the center motor of eBike***

Everyday trend in using bicycle as a mean of transportation to work has given us an idea to improve user experience by using mid-drive electric motor and implemented torque sensor for measuring torque that is provided by user. We have focused on creating an electric motor that provides its power proportionally to the torque provided by user to the pedals. More torque user provides to the pedals, more power provides the electric motor. Therefore user and electric bicycle work in coherence. Our system takes away the downside of cheap eBikes where user gets tired while driving and also by working in coherence we extend the range of the eBike. We have installed a simple torque sensor in the mid-drive electric motor. This sensor measures the torque provided by user by measuring inductance. We cut the last gear of the electric motor into two pieces that move in concentric motion. The distance between two parts is relative to the torque provided by user, since we have inserted rubber like material that compresses under stress. One part of the gear is in our perspective stationary and on it is mounted printed circuit board with a coil, while on the other part of the gear is mounted a screw. The approaching and moving away motion of the screw from the coil changes the inductance in the coil. This enables us to assess the torque that is provided by user. For purposes of this project we have constructed a dedicated controller and torque sensor for this electric bicycle.

## ***Kratek pregled prispevka***

S pojavljanjem vedno večjega trenda uporabe kolesa kot prevozno sredstvo za prevoz v službo smo se odločili, da ustvarimo elektromotor, ki predstavlja uporabniku prijazno rešitev ter omogoča čim daljši domet, prav tako pa zmanjša možnost utrujenosti uporabnika. Osredotočili smo se na izvedbo elektromotorja, ki bi dodajal moč sorazmerno z uporabnikom. Več navora uporabnik podaja na pedala kolesa, več moči dodaja elektromotor. Naš sistem odvzame možnost, da bi uporabnik postal utrujen, prav tako pa z zveznim podajanjem moči podaljšamo domet električnega kolesa. V srednje nameščen elektromotor smo namestili preprost merilnik navora, ki meri navor, ki ga podaja uporabnik preko merjenja induktivnosti. Zadnji zobnik zobniške prestave v elektromotorju smo prerezali in preuredili v dva dela, ki se gibata koncentrično. Razdalja med deloma pa je odvisna od navora, ki ga podaja uporabnik preko pedala. En del zobnika je iz naše perspektive miren in je nanj pritrjeno vezje na katerem se nahaja dušilka, na drugi del zobnika pa je pritrjen vijak. Približevanje in oddaljevanja vijaka od dušilke povzroča spreminjanje induktivnosti v dušilki. Le to nam omogoča ocenjevanje navora, ki ga podaja uporabnik. V okviru projekta smo razvili namenski krmilnik za električno kolo in senzor za navor.

## 1 Vodenje električnih koles

Poznamo tri različne načine vodenj elektromotorjev, ki so vgrajeni na električna kolesa. In sicer s potenciometrom, s senzorjem kadence in s senzorjem navora. Potenciometer nam omogoča nadzorovanje moči, ki nam jo podaja e-motor preko ročice, vendar ta način ni podoben kolesu, ampak mopеду. Prav tako so v večini takšnih implementacij uporabljeni podhranjeni e-motorji, zaradi česar uporabniki večinoma potenciometer privijejo do največje točke in tako hitreje praznijo akumulator.

S senzorjem kadence je gibanje in delovanje e-kolesa bolj podobno kolesarjenju. Izvedeno je z magnetom na pedalu in senzorjem na okvirju kolesa, ki zazna kdaj je uporabnik zavrtel pedala in takrat e-motor požene. Težava je v krčevitem podajanju moči, saj pri začetku vrtenja pedalov e-motor požene z največjo močjo in le to šele kasneje omeji na moč, ki je določena s hitrostjo vrtenja pedalov. Prav tako je problem pri vožnji v hrib, ko uporabnik zaradi pomanjkanja moči kolesari z nižjo frekvenco vrtenja pedalov in tako e-motor podaja tudi manj moči.

Tretja možnost pa je uporaba senzorja navora, za katero smo se odločili mi. V tem primeru se zdi kolo kot hibrid med uporabo pedal in e-motorja. Ta način je možen le preko uporabe senzorja navora, ki ga proizvaja uporabnik na pedala. Tako senzor navora izmeri navor, ki ga proizvaja uporabnik in temu e-motor dodaja sorazmerno količino navora. Tako se navor uporabnika in e-motorja sorazmerno povečuje. To sodelovanje uporabnika in e-motorja omogoči, daljši domet akumulatorja z enim polnjenjem.

## 2 Možnosti e-motorjev

Na tržišču je na voljo več različnih izvedb električnih motorjev, ki jih lahko uporabimo za izgradnjo električnega kolesa.

Najpogosteje se uporabljajo HUB motorji, ki se vgradijo v zadnje kolo. Pomanjkljivost takšnih motorjev je, da brez razširitve okvirja

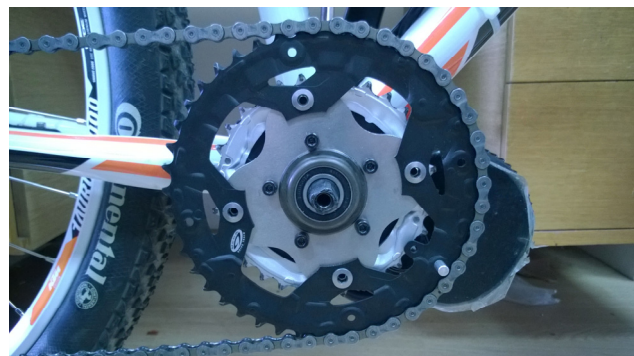
kolesa ne moremo uporabljati zadnjega menjalnika. To pomeni, da elektromotor ne deluje vedno v območju optimalnega izkoristka.

HUB motorje je možno vgraditi tudi v prednje kolo, vendar se v tem implementaciji pojavi problem zaradi velike vrtljive mase v prednjem kolesu in je tako kolo težje krmiliti in voditi skozi ovire.

Tretja najpogostejša rešitev pa je MID-drive e-motor, ki se vgradi na sredino kolesa in nadomesti obstoječo gonilko kolesa. Ta rešitev omogoča uporabo obstoječih menjalnikov na kolesu in dovoljuje e-motorju delovanje v območju optimalnega izkoristka.

## 3 Srednje nameščen e-motor

V aplikaciji smo uporabili srednje nameščen elektromotor, saj ponuja najboljše razmerje med izkoristkom in zmogljivostjo. Prav tako pa je takšen motor nameščen nižje od HUB – motorjev kar nam zniža in izboljša težišče in izboljša vodenje kolesa tudi v kamnitem področju, kjer se je potrebno izogibati oviram. V primerjavi s hub motorji so srednje nameščeni e-motorji boljša rešitev, saj omogočajo uporabo menjalnika kolesa in je tako možno delovanje e-motorja neprestano v območju optimalnih vrtljajev e-motorja. Z optimalnim delovanjem e-motorja se nam omogoči uporabo manjše kapacitete akumulatorjev, s čimer ne samo, da znižamo ceno kolesu, ampak tudi znižamo težo.



Slika 1: Prikaz implementacije e-motorja na kolesu z uporabo prednjega menjalnika.

### 3.1 Bafang BBS02



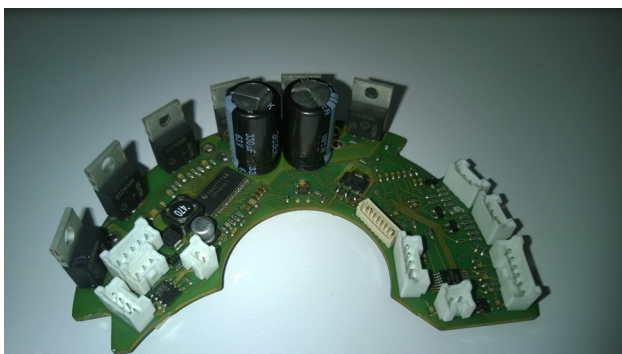
Slika 2: E-motor s kontrolno enoto.

Uporabili smo elektromotor Bafang BBS02, ki ima nazivno moč 750 W pri napetosti 48 V. [2] Vendar smo uporabili 36 V akumulator in pri tej napetosti motor razvije moč okoli 500 W z namenskim krmilnikom. E-motor na kolesu nadomesti obstoječo gonilko in deluje v sodelovanju z uporabnikom.

E-motor ima 8 polovih parov in podaja navor preko dveh parov zobnikov. Kjer je prestavno razmerje med končno stopnjo in e-motorjem 1:22.

Fazna induktivnost elektromotorja v našem primeru znaša  $131.5 \mu\text{H}$ , fazna upornost  $0,071 \Omega$  in fazni zamik  $35^\circ$ .

## 4 Emsiso Universal BLDC controller



Slika 3: Namenski krmilnik

Za e-kolo smo razvili namenski krmilnik, ki ga je možno vgraditi v obstoječe ohišje, prav tako pa je združljiv z e-motorjem.

Krmilnik je zmožen krmiliti elektromotorje do napajalne napetosti 60 V pri nazivnem faznem toku 35 A in najvišjem faznem toku 50 A.

Na krmilniku se nahajajo zraven vhodov za Hall senzorje položaja in senzor temperature motorja, še 3D akcelerometer in žiroskop.

Možni zunanji vhodi na krmilnik so zavora, potenciometer za hitrost in Hall senzor za hitrost, ki ga je možno namestiti na zadnje kolo, za zaznavanje hitrosti vrtenja.

Notranji vhodi so:

- analogni vhod za senzor navora (0-5V)
- dodatni RS232 Rx za prejetje digitalne vrednosti položaja/senzor navora
- možnost priključitve enkoderja na glavni vod (5 V vir napetosti, primer Avago AEDR-8300)

Na vezje je nameščen senzor temperature za nadziranje temperature MOSFET-ov.

Na krmilniku sta prisotna EEPROM in FLASH za shrambo nastavitvev in dnevnika delovanja.

Za komunikacijo z zunanjimi napravami in periferijo so na voljo RS232 komunikacija za povezavo z LCD zaslonom in FW posodobitev. Na krmilniku je implementiran CAN vmesnik, ki podpira CANopen protokol.

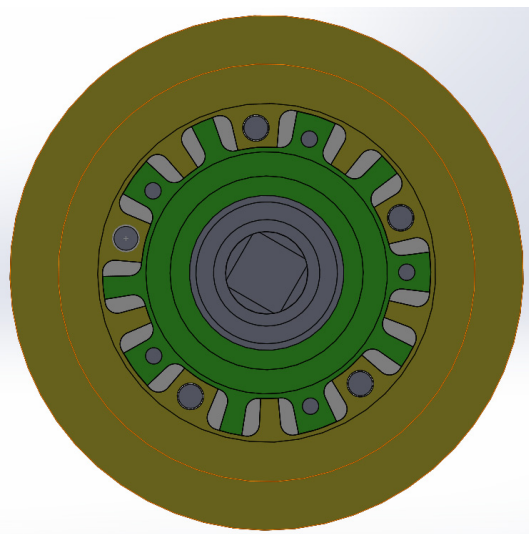
Za zajemanje podatkov in meritve pa je dodan še Bluetooth modul.

## 5 Senzor navora

V našem primeru smo se odločili za senzor navora, ki deluje na deformacij v pogonskem zobniku e-motorja, ki se giblje z isto hitrostjo ko verižnik kolesa.

Ker pa smo ugotovili, da se zobnik zaradi svoje velike trdnosti (kaljeno jeklo) zelo malo deformira, smo zobnik razžagali v dva dela. Notranji del je uležajen na gred pedalov in ga poganjajo pedali preko račne, medtem ko je zunanji del preko vijakov pritrjen na verižnike

prednjega menjalnika. E-motor je na zobnik povezan preko zunanjega ozobljenja zunanjega dela prežaganega zobnika.



Slika 4: Zobnik, ki je sestavljen iz dveh delov notranjega in zunanjega z ozobljenjem.

V prostore med zunanji in notranji del zobnika smo vbrizgali maso, ki se deformira in nam omogoča večje pomike pri manjših obremenitvah, ki jih povzroča uporabnik. Uporabili smo dvokomponentno maso Elastopur 60. Masa je visoko elastična in odporna na trganje in abrazijo ter kemično in temperaturno obstojna do 120°C. [3]

S strani proizvajalca je trdota podana 60 – 65 po Shore A lestici, gostota  $1,10 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , in natezna trdnost  $>350 \text{ N/cm}^2$ .

## 6 Različice obstoječih senzorjev navora

Poznamo več različnih možnosti implementacije senzorja navora na e-kolo.

Senzor je lahko vgrajen v gonilko kolesa.

Senzor je lahko narejen okoli verige kolesa, kjer meri napetost verige in preko tega ocenjuje uporabnikov navor.

Možno je izvesti z uporovnim merilnim lističem, ki je vgrajen v zadnji HUB motor.

Senzor vgrajen na verižnik, kjer je potrebno namensko izdelati verižnik.

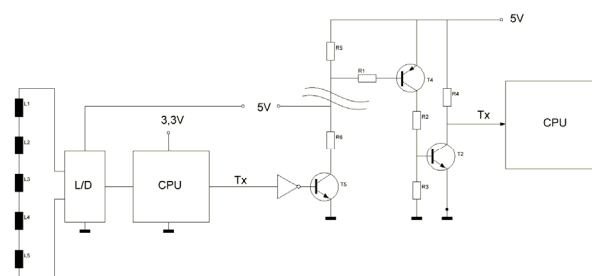
Senzor navora, ki se ga pritrudi na zadnji menjalnik, kjer je okvir potrebno modificirati –

odrezati del okvirja, kjer se okvir oslabi, v režo po kateri poteka oslabitev pa se vstavi senzor, ki temelji na podlagi vzmeti in preko nje ocenjuje uporabnikov navor.

## 7 Implementacija merilnika majhnih premikov

Senzor navora smo izvedli na podlagi sprememb v induktivnosti dušilke. Uporabili smo SMD dušilke, ki so pritrjene na PCB. Le ta je pritrjen na notranji del zobnika. Na zunanji del zobnika pa smo privijačili kovinske čepe, ki so oddaljeni 1 mm stran od dušilke. Premiki čepov v smeri proti ali stran od dušilke spremenijo induktivnost v dušilki preko česar lahko merimo oddaljenost in posledično estimiramo navor, ki ga je uporabnik proizvedel. Pri naših meritvah smo izmerili najmanjši premik  $300 \mu\text{m}$ , kjer se je pojavljal šum  $1\text{-}3 \mu\text{m}$ . Takšna občutljivost predstavlja zadovoljive rezultate za našo aplikacijo. Za izvedbo senzorja navora smo uporabili 5 dušilk, saj bi se lahko, če bi imeli uporabljeno samo 1 dušilko pojavil premik, ki ni torzijski – v radialni smeri okoli pogonske osi, in bi se izničil efekt spremembe induktivnosti. S pomočjo petih dušilk pa se ta problem kompenzira.

Ker pa se vezje na katerem se nahajajo senzorji navora vrti skupaj z zobnikom, verižnikom in pedali, je bilo potrebno najti rešitev za dovajanje energije in komunikacijo s centralnim krmilnikom, ki krmili e-motor. Napajanje smo rešili tako, da +5 V potencial dovajamo preko krtačk, masa pa je speljana preko zobnikov in ohišja.

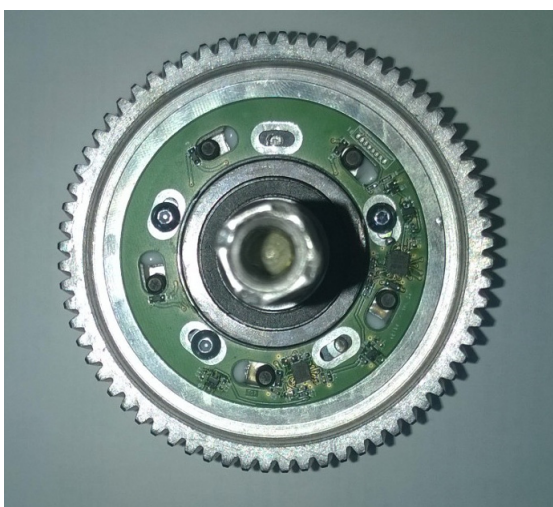


Slika 5: Shematski prikaz komunikacije med senzorskim vezjem in centralnim krmilnikom.

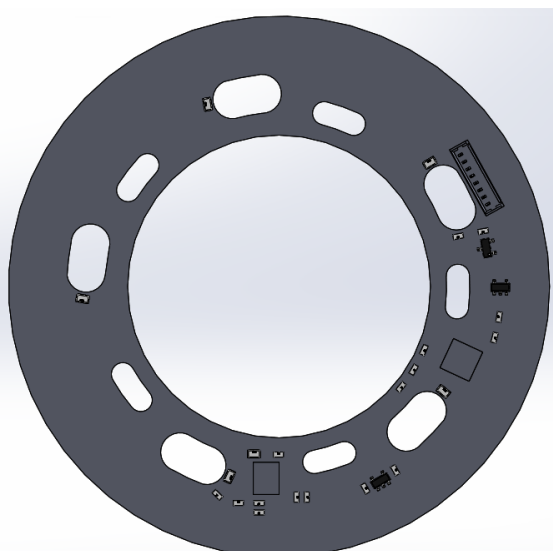


Komunikacijo med centralnim krmilnikom in senzorskim vezjem smo izvedli preko iste povezave preko katere se dovaja +5 V potencial za napajanje vezja.

Kakor je tudi na shemi prikazano, komunikacija poteka samo v eno smer, in sicer od senzorskega vezja k centralnemu vezju. Na to linijo je povezan shunt upor, ki povzroči padec napetosti, vzporedno z njim pa tranzistor, ki je ob neaktivni komunikaciji zaprt. Ko želi senzorsko vezje komunicirati s centralnim krmilnikom, le to dvigne porabo, tranzistor se odpre in tvori logično 1.



Slika 6: Sestavljen zobnik z vstavljenim vezjem na katerega so vgrajeni senzori.



Slika 7: PCB na katerem so dušilke za merjenje oddaljenosti.

Šum ki se je pojavljal pri meritvah je bil v območju med 1-3um kar predstavlja pri premiku 300um, zadovoljive rezultate za namene uspešnega vodenja našega elektromotorja in celotnega sistema.

## 8 Sklep

Uspešno smo razvili namenski krmilnik, ki ga je možno uporabiti tudi v namene drugih aplikacij, prav tako pa razvili nov način merjenja navora, ki ga proizvaja uporabnik ja pedala kolesa. Odmik referenčnega čepa od dušilke, ki ga proizvede uporabnik pri pritisku na pedal, predstavlja zadovoljivo količino, s katero lahko ocenjujemo proizveden navor in na podlagi tega vodimo elektromotor.

## 9 Literatura

- [1] <http://emsiso.com/>.
- [2] <https://www.electricbike.com/bafang-bbso2-750w-mid-drive/>.
- [3] <http://www.samson-kamnik.si/sl/elastopur-60---tekoca-trda-guma>.

Projekt je sofinanciran s strani Ministrstva za gospodarski razvoj in tehnologijo in Evropskega sklada za regionalni razvoj:



REPUBLIKA SLOVENIJA

MINISTRSTVO ZA GOSPODARSKI  
RAZVOJ IN TEHNOLOGIJO



Naložba v vašo prihodnost  
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA  
Evropski sklad za regionalni razvoj