

KONCEPT HIBRIDNE ROBOTSKE KOSILICE

THE CONCEPT OF A HYBRID ROBOTIC LAWNMOWER

Martin De Bona, Denis Kotarski

Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, Hrvatska

SAŽETAK

U ovom radu prikazan je koncept hibridne robotske kosilice. Razmotrene su komponente sustava pri čemu je naglasak stavljen na kompatibilnost, a cilj je pravilno odabrati komponente u svrhu postizanja funkcionalnosti prototipa kosilice. Analizom troškova, utvrđeno je da je moguće izvesti prototip koji je jeftiniji od komercijalnih robotskih kosilica za primjenu košnje većih površina. Prikazan je princip rada robota s diferencijalnom konfiguracijom pogona i osnovni parametri modela. Temeljem odabranih komponenti i konfiguracije pogona, provedeno je projektiranje sustava i konstruiranje dijelova sustava. Za odabrane komponente konstruirani su ključni mehanizmi za prijenos energije koji se sastoje od remenskog prijenosa za prijenos energije na reduktor s nožem te istovremeno pokretanje generatora sustava, te lančanog prijenosa diferencijalne konfiguracije. U fazi prototipiranja kosilice, konstruirani dijelovi omogućuju izradu i sastavljanje prototipa.

Ključne riječi: *hibridna robotska kosilica, diferencijalna konfiguracija pogona, projektiranje sustava, CATIA*

ABSTRACT

This paper presents the concept of a hybrid robotic lawnmower. The system components are considered with an emphasis on compatibility, and the goal is to properly select the components in order to achieve the functionality of the mower prototype. Cost analysis has shown that it is possible to design a prototype that is cheaper than commercial robotic lawnmowers for mowing larger areas.

The principle of operation of differential drive configuration robots and basic model parameters are presented. Based on the selected components and drive configuration, the system design and construction of system parts were performed. For selected components, key energy transmission mechanisms have been constructed, consisting of a belt transmission for energy transmission to the reducer with a knife and the simultaneous start of the system generator, and a chain transmission of the differential configuration. In the prototyping phase of the robotic mower, the constructed parts enable the production and assembly of prototypes.

Keywords: *hybrid robotic lawnmower, differential drive, system design, CATIA*

1. UVOD

1. INTRODUCTION

Prošao je dug vremenski period razvoja uređaja za košenje trave, od naprava u vidu ručnih kosa pa sve do sofisticiranih uređaja koji se u današnje vrijeme nalaze na tržištu, poput autonomnih robotskih kosilica. Industrija kosilica za travu doživjela je ekspanziju proizvodnjom prvih laganih aluminijskih motora od strane tvrtke Briggs & Stratton koji su korišteni za pogon rotacijskih kosilica [1]. Sljedeća faza razvoja kosilica vezana je uz automatizaciju i robotizaciju sustava. Električnu daljinski upravljaju kosilicu, koja energiju dobiva od baterije te koja ima mogućnost automatiziranog upravljanja, patentirao je Lawrence Bellinger [2]. U razvoj robotskih kosilica uključila se i industrija te je tvrtka Husqvarna predstavila 1995. godine Solar Mower, model kosilice koji se sastoji od modula za solarnu energiju u svrhu pogona i okretanja noža.

Korak dalje učinjen je 1998. godine kada ista tvrtka razvija robotsku kosilicu naziva Automower s punjivom baterijom te mogućnošću rada u raznovrsnim vremenskim prilikama.

Današnji modeli robotiziranih kosilica mogu se upravljati na različite načine poput upravljanja mobilnim aplikacijama. Za razliku od modela koji su se koristili u prošlosti, moderne kosilice ne trebaju fizičke granice uz rub parcele koju trebaju pokositi već koriste senzorske sustave koji uključuju GPS, kamere, senzore udaljenosti i ostale tipove senzora.

Uz pomoć paketa senzora određuju radno područje namijenjeno košnji te izbjegavaju i zaobilaze prepreke uz ostale značajke, poput noćnog rada, koje čine autonomni rad. Modeli komercijalnih robotskih kosilica veće snage namijenjeni su za travnjake veće površine (do 5000 m²) s nagibom terena do 45%. Iz podataka se mogu detektirati nedostaci u vidu vremena rada koje je do 100 min, a koje je povezano s potrošnjom i kapacitetom baterije, te relativno mala širina košnje (do 28 cm). Uz to je važno napomenuti relativno visoku cijenu (nekoliko desetaka tisuća kuna) [3].

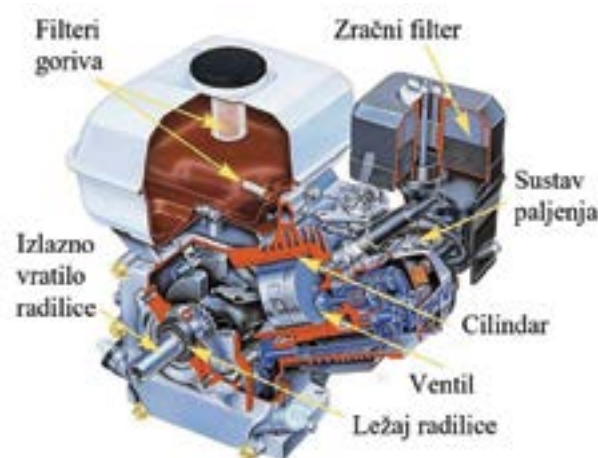
Cilj ovog istraživanja je predstaviti koncept hibridne robotske kosilice temeljen na benzinskom motoru koji se koristi za okretanje noža kosilice te alternatora preko kojeg se električnom energijom pune akumulatori. Kopneni mobilni roboti, gdje spadaju i robotizirane kosilice, kao mehanizam lokomocije uglavnom koriste više aktivno pogonjenih kotača. Za pogonski sklop kojim se ostvaruje gibanje kosilice, razmotrena je diferencijalna konfiguracija pogona [4], izvedena s dva elektromotorna pogona i četiri kotača. S obzirom da se razmotreni koncept namjerava koristiti na većim površinama (voćnjak), prednost hibridnog sustava je veća autonomija, a veći radni zahvat (širina košnje) povećava učinkovitost u odnosu na komercijalne robotske kosilice. Još jedna prednost je cijena komponenti i rada na kosilici gdje je cilj postići višestruko nižu cijenu kosilice u odnosu na komercijalne izvedbe.

2. OPIS SUSTAVA ROBOTSKO KOSILICE

2. DESCRIPTION OF A ROBOTIC LAWNMOWER SYSTEM

Prototip daljinski upravljane kosilice, koja se razmatra u prvoj fazi testiranja koncepta, zamišljen je kao hibridni sustav koji se sastoji od mehaničkih i električnih komponenti. Razmotren je i odabran benzinski motor s vodoravnom izlaznom osovinom na koju su montirane remenice. Preko remena se pokreće reduktor za okretanje noža kosilice koji preusmjerava rotaciju oko vertikalne osi. Drugi remen pokreće alternator koji proizvodi električnu energiju za punjenje baterija i za napajanje električnih komponenti kosilice. U fazi izrade prototipa će se temeljem odabranih i nabavljenih komponenti sustava izraditi projektna dokumentacija potrebna za izradu dijelova šasije.

Glavni izvor energije, kako za vožnju tako i za pokretanje noža kosilice, dolazi iz benzinskog goriva koje koristi motor s unutarnjim izgaranjem. U suštini, motor pretvara kemijsku energiju goriva u kinetičku energiju izlazne osovine radilice. Pomoću električne iskre svjećice, u cilindru benzinskog motora pali se mješavina goriva, u ovom slučaju bezolovni 95-oktanski benzin koji se koristi i za pogon automobila. Razmotren je klon motora Honda GX200 prikazan na slici 1, čijim se radom upravlja pomoću servomotora. Za odabrani motor potrebno je projektirati montiranje i elemente remenskog prijenosa.



Slika 1 3D prikaz benzinskog motora Honda GX200 s glavnim komponentama

Figure 1 3D view of a gasoline engine Honda GX200 with main components

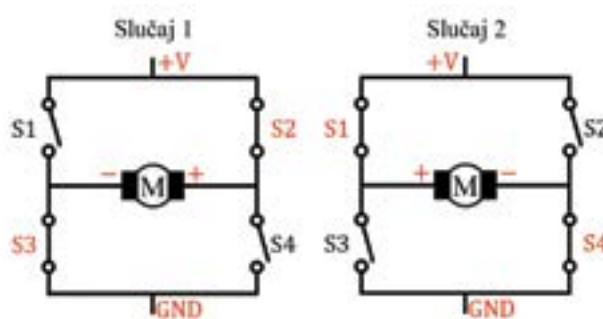
Remenski prijenos prenosi sile i momente između benzinskog motora i sklopa s reduktorom te sklopa alternatora. Razmotrena su dva zupčasta klinasta remena širine 13 mm, modeli AVX 13x1100, te AVX 13x670. Remeni su dio sklopa remenskog prijenosa koji se sastoji od remenica koje se mogu proizvesti različitim tehnologijama. Najčešće se lijevaju (sivi lijev, čelični lijev), mogu se proizvesti obradom odvajanjem čestica (laki metali, čelični poluproizvodi), te za male snage aditivnim tehnologijama. Remenice razmotrene u ovome konceptu izrađene su od sivog lijeva. Prijenosni omjer remenskog prijenosa između benzinskog motora i reduktora noža je 1:1, dok je omjer prijenosa između benzinskog motora i alternatora 2:1. Razmotren je linearni aktuator koji će se koristiti u sklopu za predzatezanje remena. Elektro-mehanički sklop pretvara kružno gibanje elektromotora u linearno gibanje osovine. Elektromotor je upravljani elektroničkim regulatorom brzine (engl. Electronic Speed Controller-ESC) koji upravlja brzinom, posljedično količinom snage.

Reduktor predstavlja mehanički sklop za prijenos kinetičke energije pri čemu je ulazni dio sklopa remenica, a izlazni adapter noža kosilice. Prijenos kinetičke energije omogućen je unutarnjim dijelovima samog reduktora koji vrtnju osovine motora preko remenskog prijenosa prenose na okretanje noža oko vertikalne osi kosilice, slijedi da je kut reduktora 90° . Na izlaznu osovinu reduktora montira se adapter noža pri čemu nož kosilice predstavlja mehanički metalni komad s oštrim rubovima. Nož rotira oko vertikalne osi te svojim prolaskom kroz travu i raslinje, uz pretpostavku da postoji oštrica, siječe biljke. S obzirom da se radi o rotacijskom gibanju, centrifugalne sile izbacuju pokošene biljke izvan područja noža.

Alternator je elektro-mehanički pretvarač kinetičke u električnu energiju. Ima dva glavna zadatka, opskrbu električnom energijom električnih komponenti te punjenje akumulatora. Razmatra se alternator koji daje struju do 35 A, napona 24 V. Akumulator je elektro-kemijska komponenta koja može električnu energiju pohraniti u kemijsku energiju, a koja se po potrebi pretvara u električnu. Razmatra se korištenje dva akumulatora spojena u seriju s ukupnim naponom od 24 V.

U prototipu je važno integrirati sigurnosne elemente.

Aktuatori koji se koriste za gibanje robotizirane kosilice sastoje se od upravljačke jedinice i elektromotora s prijenosom gibanja na kotače. Upravljačka jedinica razmotrena u ovom konceptu predstavlja regulator brzine vrtnje pulсно širinskom modulacijom (PWM), s funkcijom naprijed i natrag (engl. H-bridge). Takav elektromehanički sklop često se koristi u robotici s obzirom da istosmjerni kolektorski motori mogu obavljati rad u oba smjera vrtnje [5]. Na slici 2 shematski je prikazan pojednostavljen princip rada upravljačke jedinice motora, razmotrene su jedno-kanalne jedinice.



Slika 2 Prikaz rada upravljačke jedinice motora

Figure 2 Demonstration of motor driver unit operation principle

Za pogon diferencijalne konfiguracije sustava robotske kosilice koriste se dva elektromotora. Električna energija pretvara se u kinetičku energiju u obliku rotacije izlazne osovine motora. Razmotreni elektromotori su kolektorskog tipa, s nazivnim brojem okretaja 3000 te s ugrađenim reduktorom omjera 9,7:1, maksimalne snage od 350 W. Na izlaznu osovinu montira se projektirani dvostruki lančanik kao dio lančanog prijenosa. Na svaki lančanik je spojen lanac pomoću kojeg se sinkronizirano prenosi kinetička energija na lančanike montirane na sklop prednjeg i stražnjeg kotača pojedine strane. U ovome konceptu potrebna su četiri lanca jednakih dužina koji povezuju manji lančanik elektromotora s većim lančanikom koji se montira na osovinu kotača. Razmotren je lanac oznake 415H, a omjer zuba lančanika je 10:32.

Procjena troškova svih komponenti, materijala i usluga potrebnih za izradu šasije prototipa robotske kosilice, dana je u tablici 1.

Tablica 1. Procjena troškova**Table 1.** Cost estimation

Komponente i radovi	Procjena troškova (kn)
Elektromotori i upravljačke jedinice	2100
Lanac i lančanici	900
Set ležajeva	250
Set kotača	650
Benzinski motor s pripadnim odbojnicima i servomotorom	1100
Remenice i remenje	500
Linearni aktuator s pripadnim ESC-om	300
Alternator	600
Akumulatori	300
Set kablova, osigurača, prekidača, pretvarača napona, releja i sklopki	550
Kutni reduktor, kardanska spojka, adapter noža i nož	1400
Čelične šipke	350
Čelična pločevina i usluge laserskog izrezivanja	1400
Usluge tokarenja i zavarivanja	1200
Zatici, pera, vijci, matice i ostali spojni materijal	400
Ukupno:	12000

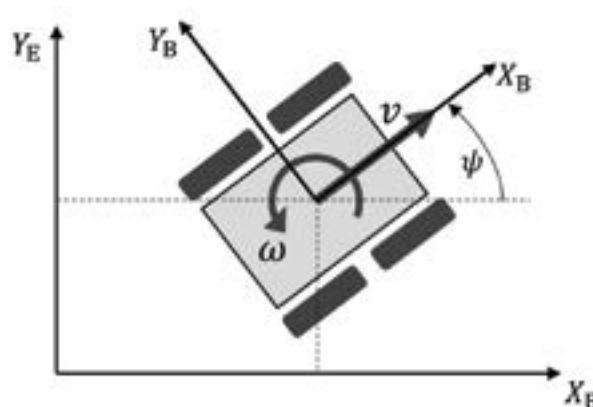
3. PRINCIP RADA ROBOTA S DIFERENCIJALNOM KONFIGURACIJOM POGONA

3. THE WORKING PRINCIPLE OF A ROBOT WITH A DIFFERENTIAL DRIVE CONFIGURATION

Sve navedene cijene dane su na osnovi ponuda ili cijena koje su vidljive na web shopu te su uračunati troškovi dostave. Cijene su kalkilirane prema tržištu kraja 2020. i početka 2021. godine.

Postoje brojne izvedbe pogonskih konfiguracija kopnenih mobilnih robota koje ovise prvenstveno o namjeni robota. U prikazanom konceptu razmotren je diferencijalni pogon koji se sastoji od para kotača na svakoj strani konfiguracije. Diferencijalna konfiguracija omogućuje rotaciju u mjestu pri čemu je kut zakreta robota određen razlikama brzina kotača. Može se pretpostaviti da robotska kosilica egzistira u dvodimenzionalnom prostoru te ima tri stupnja

slobode gibanja. Kinematika robota opisana je u odnosu na dva Kartezijeva koordinatna sustava: inercijski koordinatni sustav (\mathcal{F}^E) i koordinatni sustav mobilnog robota (\mathcal{F}^B). Stanje robota u \mathcal{F}^E predstavljeno je pozicijom (x, y) i orijentacijom (ψ) robota koje definiraju vektor $\epsilon = [x \ y \ \psi]^T$.

**Slika 3** Shematski prikaz robota**Figure 3** Schematic representation of a robot

Brzine robota u \mathcal{F}^B ovise o translacijskoj (\mathbf{v}) i rotacijskoj (ω) brzini robota s obzirom na \mathcal{F}^B , a definirane su sljedećim izrazima:

$$\dot{x} = v \cos \psi, \quad \dot{y} = v \sin \psi, \quad \dot{\psi} = \omega \quad (1)$$

Translacijskom i rotacijskom brzinom predstavljeno je gibanje robota u 2D prostoru. Translacijske i rotacijske brzine robota ovise o kutnim brzinama diferencijalnih aktuatora

$\Omega = [\omega_L \quad \omega_R]^T$. Kod diferencijalnog pogona, broj stupnjeva slobode gibanja je veći od broja aktuatora stoga postoje ograničenja u izvedbi gibanja. Brzine robota definirane su sljedećim izrazima:

$$\mathbf{v} = \frac{r(\omega_R + \omega_L)}{2}, \quad \omega = \frac{r(\omega_R - \omega_L)}{L} \quad (2)$$

Gdje je r polumjer kotača, a L razmak između pogonskih kotača. Može se definirati vektor brzine robota $\mathbf{v}^B = [v \quad \omega]^T$ pomoću matrice alokacije pogona robota Γ_R

$$\mathbf{v}^B = \Gamma_R \Omega = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ -\frac{r}{L} & \frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

Kod autonomnih robota je zapravo potrebno određivanje kutnih brzina lijevog i desnog kotača

$\Omega = [\omega_L \quad \omega_R]^T$ na temelju referentnog stanja robota. S obzirom na definirane izraze za brzine robota, mogu se izvesti izrazi za rotacijske brzine diferencijalnih aktuatora s obzirom na translacijsku i rotacijsku brzinu robota

$$\omega_L = \frac{2v - \omega L}{2r}, \quad \omega_R = \frac{2v + \omega L}{2r} \quad (4)$$

4. PROJEKTIRANJE DIFERENCIJALNE POGONSKE KONFIGURACIJE

4. DESIGN OF DIFFERENTIAL DRIVE CONFIGURATION

Za potrebe izvedbe prototipa, projektirani su i konstruirani dijelovi prototipa u programskom paketu CATIA. Odabrani pogon robotske kosilice sastoji se od četiri pogonska kotača u diferencijalnoj konfiguraciji. Jednu stranu diferencijalnog pogona kosilice čine dva kotača, pogonske osovine, parovi ležaja, prirubnice i lančanici koji su spojeni na sklop elektromotornog aktuatora.

Sklop kotača sastoji se od osovine promjera 22 mm koja je s kotačem spojena pomoću zatika. Uz osovinu dolaze dva ležaja, model UCFL204, koji se montiraju M12 vijcima na nosače ležaja. U ovoj fazi potrebno je odrediti raspored i dimenzije prihvata ležajeva prednje i zadnje osovine. S obzirom da je kućište ležaja u odnosu na noseći dio šasije smješten na visini od 77 mm, potrebno je konstruirati vertikalne nosače pri čemu treba uzeti u obzir dimenzije i oblik kućišta ležajeva osovine kotača. U fazi izrade prototipa, koristit će se lasersko rezanje konstrukcijskog čelika debljine 5mm.

Pogonske osovine kotača su pomoću lančanog sklopa povezane s osovinama elektromotora. Budući da je razmotren diferencijalni pogon kod kojeg su po jednoj strani sinkronizirana dva kotača, potrebno je projektirati dvostruki lančanik osovine elektromotora. Razmotren je dvostruki lančanik koji se sastoji od 410H lančanika s 10 zubi. Lančanici osovine kotača i elektromotora povezani su 415H lancima, koji zajedno čine sklop lančanog prijenosa, ukupno dva za svaku stranu. Na slici 4 prikazan je CAD model jedne strane diferencijalnog pogonskog sklopa robotske kosilice.



Slika 4 3D model jedne strane diferencijalnog pogona

Figure 4 3D model of one side of a differential drive

Kod razmotrene izvedbe diferencijalnog pogona, pogonske osovine sva četiri kotača opterećene su jednakim silama/momentima. Takva konfiguracija je pogodna za izvedbu, jer u slučaju proklizavanja, postoje dva kotača po jednoj strani koji se okreću jednakom brzinom. Nadalje, diferencijalni pogon omogućuje okretanje oko vlastite osi.

Na slici 5 prikazan je 3D model pogonskog sklopa diferencijalnog pogona prototipa robotske kosilice.



Slika 5 3D model pogonskog sklopa

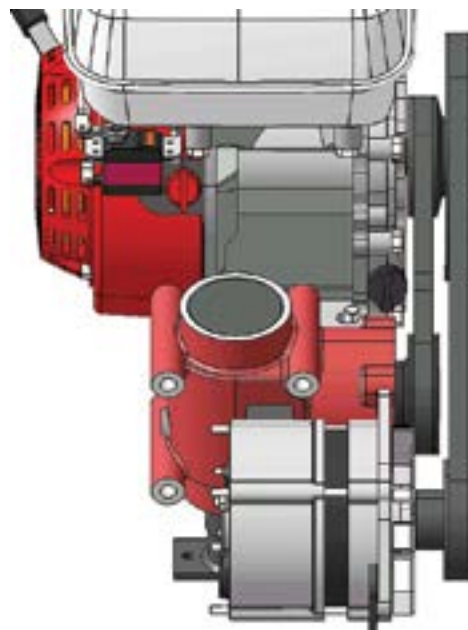
Figure 5 3D model of the drive assembly

5. PROJEKTIRANJE HIBRIDNOG POGONSKOG SKLOPA

5. HYBRID POWERTRAIN DESIGN

Za odabrani remenski prijenos pogona alternatora i središnjeg kutnog reduktora potrebno je konstruirati dijelove koji zajedno s komponentama čine sklop kosilice. Prvi korak je određivanje položaja komponenti, odnosno udaljenosti između benzinskog motora i alternatora te motora i reduktora. Kako bi se omogućio pravilan rad sklopa, potrebno je centrirati remenje. Prototip remenskog prijenosa sastoji se od dvostruke remenice benzinskog motora, remenice alternatora i remenice kutnog reduktora.

Na glavni dio šasije kosilice montira se benzinski motor, sklop alternatora te sklop reduktora. Sklop alternatora čine sam alternator i postolje koje ima dodatnu funkciju u vidu zatezanja remenskog sklopa (slika 6). Sklop reduktora sastoji se od samog reduktora te nosača koji osim funkcije montiranja na šasiju kosilice ima i funkciju pomicanja reduktora po vertikalnoj osi. Na taj način je moguće podesiti visinu noža kosilice. U fazi izrade prototipa glavni dio šasije kosilice će se laserski izrezati od konstrukcijskog čelika koji je u obliku ploče debljine 5 mm.



Slika 6 3D model hibridnog pogonskog sklopa

Figure 6 3D model of a hybrid powertrain

Na kućište se spajaju ostali konstrukcijski elementi (nosači) MIG postupkom zavarivanja. Na slici 7 prikazan je 3D model prototipa robotske kosilice za travu.



Slika 7 3D model prototipa hibridne robotske kosilice

Figure 7 3D model of a prototype hybrid robotic lawnmower

6. ZAKLJUČAK

6. CONCLUSION

U ovom radu prikazan je koncept hibridne robotske kosilice za koju je moguće dobiti komponente te izvesti prototip. Projektiranje je provedeno s obzirom na namjenu kosilice, koja se prvenstveno namjerava koristiti za košnju voćnjaka i većih travnatih površina. Na temelju koncepta moguće je izvesti prototip kosilice koji u odnosu na komercijalne robotske kosilice ima veći zahvat košnje, dulje vrijeme operiranja te nižu cijenu izvedbe.

Opisana je izvedba glavnih sklopova i mehanizama koncepta te je pojašnjen princip rada diferencijalne pogonske konfiguracije. U fazi projektiranja kosilice, kroz proces konstruiranja 3D modela dijelova, prikazani su temeljni sklopovi sustava. U daljnjem radu planira se nabava komponenti te izrada dijelova sklopa kosilice.

7. REFERENCE

7. REFERENCES

- [1.] Eades K.M.; Gould M; Hill J.; (2017), Briggs & Stratton, Inc.; Darden Business Publishing Cases. DOI: 10.1108/case.darden.2016.000050
- [2.] UNITED STATES PATENTS United States Patent Inventor Spencer Lawrence Bellinger Sunnyvale, Calif. (<https://patents.google.com/patent/US3550714A/en>)
- [3.] Gagliardi L.; Sportelli M.; Frascioni C.; Pirchio M.; Peruzzi A.; Raffaelli M.; Fontanelli M.; Evaluation of Autonomous Mowers Weed Control Effect in Globe Artichoke Field; Applied Sciences, Vol. 11, 2021; DOI: 10.3390/app112411658
- [4.] Piljek P.; Kotarski D.; Neizrazito upravljanje mobilnim robotom za slučaj izbjegavanja prepreka; 7th International Conference "Vallis Aurea", Focus on: Research & Innovation, ed. Katalinić B., pp.509-518, ISBN 978-3-902734-26-6; Požega 2020.
- [5.] Aung W.P.; Analysis on Modeling and Simulink of DC Motor and its Driving System Used for Wheeled Mobile Robot; International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, 2007; DOI: 10.5281/zenodo.1330777

AUTORI · AUTHORS

• Martin De Bona

Završio je preddiplomski stručni studij mehatronike 2017. na Veleučilištu u Bjelovaru te postao stručni prvostupnik inženjer mehatronike. Zatim je završio specijalistički stručni studij strojarstva 2021. na Veleučilištu u Karlovcu te postao stručni specijalist inženjer strojarstva. Trenutno je zaposlen kao asistent na istraživačkom projektu „Istraživanje i razvoj specijaliziranih multirotornih bespilotnih letjelica“.

• Denis Kotarski

Diplomirao je 2011. i doktorirao 2020. na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Od 2015. do 2019. radio je kao asistent, a od 2019. radi kao predavač na Veleučilištu u Karlovcu. Osim u nastavi, koordinator je istraživačkih aktivnosti na projektu „Istraživanje i razvoj specijaliziranih multirotornih bespilotnih letjelica“. Područja njegovog znanstveno-istraživačkog interesa jesu projektiranje multirotornih bespilotnih letjelica i mobilnih robota te upravljanje robotima i bespilotnim letjelicama.

Korespondencija · Correspondence

denis.kotarski@vuka.hr