

VENTIL

ISSN 1318 - 7279

Letnik 31 / 2025 / 5 / Oktober

Mehatronske sistemi
s pnevmatičnimi
aktuatorji

Uporaba avtonomno
vodenega vozila

Večkriterijska
optimizacija
električnih strojev

Avtomatizirano
obdelovanje
kmetijskih površin

EPSON

DAX



SCARA LS50-CA04S

DOSEG 1000 mm NOSILNOST 50 kg

www.dax.si

ŠIROK IZBOR VENTILOV

ZA HIDRAVLICNE POGONE VOZIL IN NJIHOVA HIDRAVLICNA ORODJA



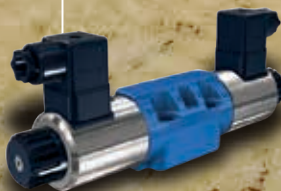
Izmenjevalni
ventil



Ventil za hidravlično
zaporo koles



4/3 Potni
ventil



6/2 Potni
ventil



ZASNOVANI IN PROIZVEDENI V SLOVENIJI



Poclain Hydraulics d.o.o.
Industrijska ulica 2, 4226
Žiri, Slovenija
+386 (0)4 51 59 100

www.poclain-hydraulics.com



DOBRI NAMENI



V zadnjem času je v ospredju razprava o uvedbi obvezne božičnice. Za mnoge zaposlene, ki se soočajo z visokimi življenjskimi stroški in občutkom nepravilne porazdelitve dobička, se zdi ukrep upravičen in dobrodošel. Na drugi strani pa delodajalci opozarjajo na dodatno obremenitev poslovanja in vprašljivo dolgoročno vzdržnost. Čeprav je težko z gotovostjo presoditi, ali gre za dober ukrep, je težko spregledati namen povečanja priljubljenosti v javnosti. Opozicija seveda ukrepu nasprotuje in izraža zaskrbljenost za javne finance in gospodarsko stanje, a ko so bile vloge zamenjane, so bila tudi njihova stališča ravno nasprotna. Današnji predlagatelji božičnice so bili v času epidemije močno zaskrbljeni ob uvedbi enkratnih solidarnostnih dodatkov za študente in upokojece. Enaka skrb se je zdaj porodila takratnim izvajalcem teh ukrepov, a šele, ko so se znašli v opoziciji.

Iskreno verjamem, da uvedba zgoraj navedenih ukrepov za povečanje priljubljenosti temelji na dobrih namenih predlagateljev obeh ideoloških polov. Ne želim soditi, ali je uvedba božičnice upravičen ukrep ali ne, dejstvo pa je, da predlogi ukrepov katerihkoli vodij izhajajo iz njihove ideološke podstat, saj s tem mobilizirajo podpornike. S tem načeloma ni nič narobe, če je rešitev tudi strokovna, da ne povzroči več

škode kot koristi. Pri upoštevanju mnenj strokovnjakov pa se običajno zaplete.

Iz zgodovine poznamo vrsto primerov ukrepov, ki imajo osnovo v ideologiji in so bili uvedeni z dobrimi nameni. Rooseveltov »New Deal« za odpravo velike depresije je temeljil na keynesianizmu, ki zagovarja poseg države v zasebni sektor, kadar ta odpove, ter socialnem liberalizmu, ki države nima samo za branika pravic in svoboščin, ampak tudi skrbi za dostojno življenje državljanov. Podoben primer je tudi nastanek Evropske unije, ki je imela ideološko podlago v antinacionalizmu, miru in gospodarskem povezovanju. Oba primera sta zgled uspešnih ukrepov, pri katerih je imela politika resda močno ideološko podlago, a je bila strateško usmerjena, pragmatična ter odprta za dokaze in argumente strokovnjakov.

Žal pa je uspešnih primerov manj kot neuspešnih, med katerimi najdemo kar nekaj prav bizarnih, ki so običajno rezultat ideološke zaslepljenosti. Ameriška prohibicija je temeljila na protestantski etiki, ruralnih konservativnih vrednotah in moralnem paternalizmu, po katerem se cilj doseže s prepovedmi, rezultat pa je bilo hudo povečanje korupcije in kriminala. Na Kitajskem so v sklopu »Velikega skoka naprej« želeli dohiteti Veliko Britanijo po količini pridelanega jekla in s tem industrializirati pretežno agrarno družbo, zato so vsaki vasi in komuni zapovedali izdelavo lastnega jekla. Ker so v vaških pečeh kmetje pretopili tudi svoje kovinske izdelke, kot so posoda, plugi in drugi kmetijski pripomočki, so zaradi neznanja namesto jekla pridelali ogromne količine krhkega in neuporabnega litega železa. Ker poti nazaj v kmetovanje ni bilo več, so bile posledice katastrofalne. V istem času so uvedli tudi kampanjo proti štirim škodljivcem (podganam,

muham, komarjem in vrabcem), ki je sprva delovala obetavno, a so se z odstranitvijo vrabcev, ki naj bi domnevno pojedli preveč žita, namnožile kobilice do te mere, da so opustošile polja. Ignoriranje mnenj strokovnjakov, prikrivanje dejanskega stanja in prikazovanje učinkov na način, da zadovoljijo avtoritarnega reformatorja, so samo podaljšala agonijo prebivalstva.

Poenostavljene rešitve kompleksnih problemov se vpeljujejo tako v avtoritarnih kot demokratičnih režimih. Ko so v Sovjetski zvezi vpeljevali lisenkoizem in kljub znanju genetike sejali pšenico v hladnem podnebju, misleč, da se bo rastlina sama naučila tam rasti, so nasprotnike zatirali represivno. A splošni učinek je povsem enak kot v Nixonovi vojni proti drogam v ZDA, prepovedi knjig LGBTQ+ v šolah ali proticepilski kampanji, kjer je mnenje strokovnjakov potisnjeno ob stran. Ukrepi, spodbujeni z dobrimi nameni, morda trčijo ob nasprotna mnenja, ki so ravno tako izražena z dobrimi nameni. Posledice uvedbe božičnice ali solidarnostnih dodatkov nikaikor niso primerljive s katastrofami navedenih zgodovinskih primerov, a dilema ob uveljavljanju dobronamerne ideje ostaja. Kako presoditi, kdo ima prav glede ravnanja z medvedi in glede umeščanja energetskih objektov v prostor?

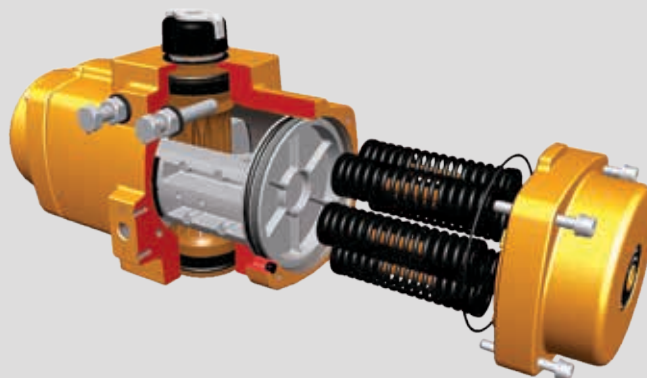
Ambiciozni vodje, bodisi na državni ravni bodisi v podjetjih ali institucijah, pogosto uvajajo hitre in drastične spremembe iz lastnega ideološkega prepričanja, a spregledajo, da je pot v peklo tlakovana z dobrimi nameni. Zgodovina kaže, da je brez dobre strokovne podpore ta lahko dosežen relativno kmalu in da je popravljanje stanja nato še bistveno težavnejše.

Miroslav Halilović

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0



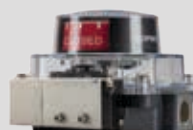
EL Matic™



BETTIS™



FISHER®



Dantorque

HYTORK®

Shafer®

ppt commerce

HIDRAVLIKA IN PROCESNA TEHNIKA
PRODAJA • PROJEKTIRANJE • SERVIS

PPT commerce, d.o.o.

Celovška cesta 334, 1210 Ljubljana – Šentvid

tel. 01/ 514 23 54, fax 01/ 514 23 55, gsm 041 639 008

e-mail: info@ppt-commerce.si

www.ppt-commerce.si

DOGODKI • POROČILA • VESTI

Jubilejna mednarodna konferenca Fluidna tehnika 2025	254
Mednarodna konferenca ICAMPP 2025	262

NOVICE • ZANIMIVOSTI 265

OKROGLA MIZA

Prihodnost izmenjave znanja in mreženja na področju fluidne tehnike	268
---	-----

MEHATRONSKI SISTEMI

Željko Šitum, Filip Čavić, Vid Pavlović, Lovro Zoričić, Ante Ivanković, Bernarda Galić, Antonio Varović	
Application-Oriented Mechatronic Systems with Pneumatic Actuation	272

AVTOMATIZACIJA PROIZVODNIH PROCESOV

Maria Yakimovska, Vinko Drev	
Uporaba avtonomno vodenega vozila za oskrbo robotskih celic z izdelki	280

OPTIMIZACIJA ELEKTRIČNIH STROJEV

Mitja Garmut, Martin Petrun	
Metodološki pristop k večkriterijski optimizaciji električnih strojev s praktičnim primerom	286

TRAJNOSTNE TEHNOLOGIJE

Domen Šeruga, Primož Poredoš, Dominik Kozjek, Aleš Gosar, Marko Nagode, Jernej Klemenc	
Obratovalna zmogljivost avtomatiziranega obdelovanja kmetijskih površin pri spremenljivi razpoložljivosti solarne energije v različnih časovnih obdobjih	294

AKTUALNO IZ INDUSTRIJE

Novi narebričeni vijaki iz SUPER tehničnega polimera: DT.464 in DT.653-AV (ELESA+GANTER)	299
Zanesljive rešitve za papirno in celulozno industrijo (GIA-S)	300

PODJETJA PREDSTAVLJAJO

80 % manjši ogljični odtis: igus pri seriji energijskih verig E2.1 prehaja na recikliran material (HENNLICH)	302
Izkoriščanje odpadne toplote pri vijačnih kompresorjih (OMEGA AIR)	305

JUBILEJNA MEDNARODNA KONFERENCA FLUIDNA TEHNIKA 2025

30 let od prve konference Fluidna tehnika

Darko Lovrec

Med strokovnimi dogodki, ki potekajo v jesenskem času, je za vse, ki se ukvarjajo s hidravliko in pnevmatiko, mednarodna konferenca Fluidna tehnika (Fluid Power) zagotovo na prvem mestu. Konferenca je pravi pokazatelj stanja te tehnike pri nas, v tem delu Evrope in po svetu. Letošnja Fluidna tehnika (Fluid Power 2025) je bila jubilejna, potekala pa je 17. in 18. septembra 2025 v Kongresnem centru Habakuk v Mariboru.



Otvoritev jubilejne mednarodne konference Fluidna tehnika 2025

Konference Fluidna tehnika prirejamo pod okriljem Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru že od leta 1995 dalje in so največje in najodmevnejše bi- enalno znanstveno in strokovno srečanje strokovnjakov s področja hidravlike in pnevmatike v Sloveniji in v tem delu Evrope. Letos smo praznovali

lep jubilej: 30. obletnico od prve izvedbe. Jubilej je bil še toliko pomembnejši, saj letos praznujemo tudi 30-letnico ustanovitve Fakultete za strojništvo in 50-letnico ustanovitve Univerze v Mariboru. Temu primerno slavnostna je bila tudi konferenca.

Prof. dr. Darko Lovrec, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0

Ideja oz. potreba po znanstveno-strokovni konferenci se je dejansko rodila jeseni leta 1993, ko sva se s kolegom Edvardom Detičkom vračala z mednarodne konference Hidravlika in pnevmatika v nemškem Dresdnu, idejo pa sta podprli Združenje za fluidno tehniko Slovenije in Slovensko društvo za



Prof. dr. Katharina Schmitz: Trajnost in energetska učinkovitost na področju fluidne tehnike - napredek na področju raziskav in industrije

fluidno tehniko. Po dobrem letu, 2. junija 1995, je že bila organizirana prva mednarodna konferenca s sedanjim imenom Fluidna tehnika, njeno poslanstvo pa ohranjano in nadgrajevano do današnjih dni.

Skladno z geslom konference »Vedno v toku dogodkov« smo se tudi letos posvetili aktualnemu stanju na področju te stroke v svetu in v Evropi ter vplivom na našo branžo, trendom razvoja fluidne tehnike, predstavili novosti in spoznanja ter inovativne dosežke in izvirne rešitve s tega področja, kot tudi izmenjali mnenja in izkušnje.

V prvem uvodnem predavanju smo se seznanili s ključnimi izzivi, s katerimi se sooča slovenska industrija, in z njenim vključevanjem v okvir EU. Mag. Aleš Bizjak (Gospodarska zbornica Slovenije, Združenje kovinske industrije) je predstavil trenutne kazalnike gibanj na trgu in izpostavil ogroženo konkurenčnost EU. Izpostavil je, da je Evropa sicer (še) vodilna na področju številnih tehnologij elektrifikacije, ironično pa je, da ameriške in kitajske tovarne te tehnologije pogosto uvajajo hitreje kot Evropa sama. Zato moramo zapolniti vrzel v naložbah in podjetjem omogočiti vlaganje, širitev in posodobitev.

V drugem uvodnem predavanju smo se posvetili trendom razvoja na področju hidravlične in pnevmatične pogonsko-krmilne tehnike. Prof. dr. Katharina Schmitz (IFAS – Inštitut za fluidnotehnične pogone in sisteme, RWTH Aachen, Nemčija) je izpostavila vidika trajnosti in razogljičenja, ki sta

pogosto povezana z energetske učinkovitostjo in zmanjševanjem izgub energije. Predstavila je različne nove pristope in spoznanja na področju raziskav ter njihovo uporabo v industriji, digitalna orodja pa pri tem omogočajo nove dosežke in dodatno metodologijo za nadaljnji razvoj.

V nadaljevanju konference se je v obeh dneh zvrstilo 30 prispevkov, razvrščenih v pet tematskih sklopov: Snovanje, aplikacije in vodenje sistemov fluidne tehnike, Pnevmatika in mehatronski sistemi, Simulacije in testiranje, Hidravlične tekočine in izkoristek strojev in naprav ter Fluidna tehnika na področju hidroelektrarn. Slednji sklop je bil na letošnji konferenci prvič obravnavan kot samostojen tematski sklop, saj ga premalo poznamo, je pa izrednega strateškega pomena za trajno, zanesljivo in varno delovanje tovrstnih objektov. Na posebnosti hidravlike na energetskih objektih so se navezovali tudi prispevki, predstavljeni v drugih tematskih sklopih.

Konference se je udeležilo skupno več kot 60 udeležencev, strokovnjakov z ožjega področja stroke, iz devetih držav, pri čemer je bilo razmerje med neposrednimi uporabniki te tehnike iz industrije ter udeleženci z inštitutov, univerz ali razvojnih centrov 60 : 40. Glede števila udeležencev je bila Fluidna tehnika 2025 v primerjavi z drugimi svetovnimi konferencami kar dobro obiskana (npr. v primerjavi s skandinavsko konferenco s 75 udeleženci in ameriško –glede na velikost področja – z ok. 30). Tudi to je bil vzrok, da smo se problematiki konferenc in prenosu spoznanj v sedanji obliki posvetili tudi

v okviru razprave na okrogli mizi, ki je bila organizirana ob koncu prvega dne konference: Oblikovanje prihodnosti izmenjave znanja in mreženja na področju fluidne tehnike. Sogovorniki so izpostavili, da so danes na voljo različne možnosti pridobivanja informacij, ki ne pogojujejo potovanja in odsotnosti z delovnega mesta, kar kot oviro pogosto izpostavljajo tudi delodajalci. Žal pa pri virtualnih srečanjih ni osebnega stika med udeleženci, še posebej med predstavniki podjetij proizvajalcev in ponudnikov opreme fluidne tehnike, udeleženci pa prepoznajo, da ravno osebni stik omogoča hitreje reševanje izzivov na tržišču in uvajanje novih rešitev, ki so ga tudi dodobra izkoristili. Povezovanje na vseh področjih, tako na tržno-industrijskem kot tudi na razvojnem je za Evropo sedaj in bo tudi v bodoče ključnega pomena.

Plenarna in tematska strokovna predavanja, priložnostna razstava, okrogla miza, podelitev zlate diplome za najboljša zaključna dela s področja fluidne tehnike ... in še kaj je samo nekaj spremljevalnih dogodkov dvodnevne dogajanja na konferenci Fluidna tehnika 2025.

Pomembnost konference, na kateri sta v ospredju prenos znanja in povezovanje stroke, je prepoznala tudi Inženirska zbornica Slovenije. Udeleženci konference so zato z udeležbo na konferenci pridobili 5 kreditnih točk iz izbirnih vsebin skladno s Splošnim aktom o stalnem poklicnem usposabljanju pooblaščenih in nadzornih inženirjev.

Podrobnejše informacije o dogajanju na konferenci in podrobnejši program s prispevki kot tudi vse druge informacije so na voljo na domači spletni strani konference: <https://ft.fs.um.si/html/uvod.html>.

Vsi, ki jih zanimajo posamezni prispevki, pa lahko do njih dostopajo po spletni povezavi izdajatelja zbornika recenziranih prispevkov UM Press, kjer je v elektronski obliki na voljo celoten zbornik: <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/1042>.

Izvedba takšnega dogodka, kot je mednarodna konferenca Fluidna tehnika, je za organizatorje vedno velik izziv. Konference ne bi bilo mogoče izvesti brez naših sponzorjev iz industrije, ki so vedno

prepoznali in cenili naša prizadevanja. Zato se zahvaljujemo vsem, ki so nas podprli tako letos kot v vsem 30-letnem obdobju. Brez pomoči pokroviteljev konferenc Fluidna tehnika ne bi bilo. Hvala vsem za vašo podporo! Podjetja in organizacije, ki so prepoznali vrednost strokovnega povezovanja in prenosa znanja ter pomen osebnega povezovanja, so navedeni na spletni povezavi: <https://ft.fs.um.si/html/pokrovitelji.html>. Hvala vam!

Glede na vse bolj prisoten trend neosebne, virtualne prisotnosti na strokovnih dogodkih, previdnost in varčevanje, zaostrene razmere v podjetjih, pričakovano krizo, racionalno poročanje o rezultatih razvoja in nova spoznanja konkurence, ... lahko ob koncu rečemo, da je bila Fluidna tehnika 2025 tradicionalna in popolnoma v toku dogodkov, tako letošnja kot vse dosedanje v tridesetletnem obdobju.

Napredek, razen na ožjem področju tehnike, tudi pomeni, da se kaj, če ni več aktualno, zaključi ali morda nadaljuje v drugačni različici, boljši in primernejši za trenutne razmere. Tako je pogosto kaj že preživelega potrebno ukiniti, da se lahko rodi novo, da se lahko ideja in oblika nadgradi, prilagodi novi vsebini, novim pogojem in potrebam. Nekako tak mejnik je bila tudi konferenca Fluidna tehnika 2025, na kateri sem svoje mesto kot predsednik programskega in znanstvenega odbora ter organizacijskega odbora konferenc predal nasledniku izr. prof. dr. Vitu Tiču. Vito Tič je pri soustvarjanju konferenc Fluidna tehnika sodeloval že od leta 2009 dalje in pozna vse njene izzive, delo, obseg in prizadevanja. Je vztrajen, profesionalen in uspešen, z novo ekipo pa bo zagotovo ohranil poslanstvo in uveljavljeno ime Fluidna tehnika (Fluid Power) tudi v naslednjem obdobju.

Zahvaljujem se vsem, ki s(m)o bili pobudniki za konferenco v Sloveniji, vsem, ki so pripomogli, da je v letih prerastla v prepoznavno mednarodno konferenco, vsem, ki so kakorkoli prispevali k uspehu konference: avtorjem, udeležencem, sodelavcem, podjetjem, in vsem, ki so prepoznali potrebo po strokovnem druženju na področju hidravlike in pnevmatike oziroma na kakršenkoli način pripomogli, da smo previharili teh trideset let.

POSVET

AVTOMATIZACIJA STREGE IN MONTAŽE 2025 - ASM '25

04. decembra 2025
na Gospodarski zbornici Slovenije v Ljubljani

aktualne novice o posvetu so na voljo na www.posvet-asm.si

11. ŠTUDENTSKA TEHNIŠKA KONFERENCA – ŠTEKAM 2025

Za dosego kakovostnega znanja je poleg predavanj in učbenikov odločilnega pomena aktivno raziskovalno delo, saj vodi k novim spoznanjem in odkritjem. Zato je pomembno, da sta na vseh stopnjah izobraževanja, še posebej pa na univerzitetnem nivoju, poleg rednega učenja in študija omogočena raziskovalno delo in predstavitev dosežkov raziskav.

V ta namen Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani vsako leto pripravi Študentsko tehniško konferenco (ŠTeKam), ki je namenjena študentom vseh stopenj študija ter dijakom v zaključnih letnikih. Za organizacijo konference ŠTeKam že od samega začetka skrbi uredniški odbor v sestavi doc. dr. Tomaž Berlec, izr. prof. dr. Miha Brojan in asist. dr. Boštjan Drobnič.

Letos je potekala že enajsta tehniška konferenca ŠTeKam, na kateri smo lahko prisluhnili predstavitev prispevkov, v katere so udeleženci vložili ogromno dela, truda in pri tem osvojili veliko novega znanja. Oddanih je bilo 42 prispevkov, predstavljenih pa jih je bilo 31. Med udeleženci so bili dijaki in študenti z Gimnazije Bežigrad, Gimnazije Jesenice ter s trinajstih fakultet Univerze v Ljubljani in Univerze v Mariboru. Med njimi so Fakulteta za strojništvo (UL in UM), Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (UM), Fakulteta za elektrotehniko (UL), Fakulteta za računalništvo in informatiko (UL), Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (UL), Fakulteta za matematiko in fiziko (UL), Biotehniška fakulteta (UL), Medicinska fakulteta (UL), Pedagoška fakulteta (UL), Filozofska fakulteta (UL) ter Ekonomska fakulteta (UL). Mednarodno dimenzijo dogodku sta dodali Tehniška univerza v Münchnu in Institut "Jožef Stefan".

Po uvodnih besedah dekana prof. dr. Jerneja Klemenca so ne-



Udeleženci in organizatorji konference ŠteKam

kaj besed udeležencem namenili tudi člani uredniškega odbora. Po skupnem uvodu je konferenca potekala v dveh vzporednih sekcijah, kjer so v desetih minutah udeleženci konference predstavili svoje prispevke. Po zaključku predstavitev so udeleženci glasovali za najboljši prispevek v vsaki sekciji. Nagrajena sta bila naslednja prispevka: Julije Genorio – Alginatni hidrogelni substrat: potencialna rešitev za pomanjkanje ugodnih kmetijskih površin ter Filipa Umerja – Rešitev upogiba ribiške palice z uporabo eliptičnih integralov.

Prispevki so objavljeni v konferenčnem zborniku, ki obsega 331 strani in je skupaj s posameznimi prispevki vpisan v sistem Cobiss pod tipologijo Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci

(1.08). Študenti bodo lahko sodelovanje na konferenci uveljavljali kot izjemen dosežek, kar je eden izmed pogojev za pridobitev Zoisove štipendije. Z vpisom članka v Cobiss pa bodo vsi udeleženci pridobili uradno dostopno referenco o znanstvenem raziskovanju.

Konferenca je ponovno pokazala, da mnogi študentje in dijaki želijo pridobiti znanje in izkušnje z raziskovalnim delom, rezultate svojega dela pa znajo tudi odlično predstaviti javnosti. Poleg tega je konferenca tudi priložnost za pridobivanje novih stikov in razvoj novih idej.

Uredniški odbor Študentske tehniške konference ŠTeKam

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0

IZJEMNO USPEŠNO STIČIŠČE ZNANOSTI IN GOSPODARSTVA NA MOS 2025

Na letošnjem dogodku, ki je potekal od 17. do 21. septembra v Celju, je bilo v okviru Stičišča znanosti in gospodarstva, ki je projekt Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in inovacije, predstavljenih več kot 50 inovacij s področja visokih tehnologij in novih poslovnih modelov. Predstavitev je bila letos osredotočena na digitalizacijo, digitalne transformacije, nove poslovne modele in industrijo 4.0 ter prihajajočo industrijo 5.0.



Stičišče znanosti in gospodarstva (MOS 2025)

Stičišče znanosti in gospodarstva na MOS 2025. Foto: Ekipa Stičišča znanosti in gospodarstva

Letos je bilo Stičišče znanosti in gospodarstva umeščeno tudi v jubilejni 10. mesec znanosti. Celjski sejem d. d. je najuspešnejšim podelil sejemska priznanja, in sicer je Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in inovacije prejelo dvoje priznanj, posebno priznanje za predstavitev visokotehnoloških inovacij. Za to priznanje so zaslužni: FERi Univerze v Mariboru, Institut Jožef Stefan, FE Univerze v Ljubljani, FS Univerze v Ljubljani in Janez Škrlec za visokotehnološko inovacijo BHMT – Bionsko hibridno, multimodalno tehnološko platformo. Zlato prizna-

nje pa je letos prejel Kemijski inštitut, prav tako pod okriljem MVZI – Stičišče znanosti in gospodarstva.

Na MOS 2025 se je FERi UM predstavil z naborom najnovejših tehnoloških dosežkov. Obiskovalcem so predstavili INNOVUM – Center odličnosti za ftonske, mikro- in nanoelektronske tehnologije, ki predstavlja strateško naložbo v prihodnost znanosti in inovacij. Poleg tega so izpostavili mednarodni projekt HybridNeuro, v okviru katerega skupaj z evropskimi partnerji razvijajo nove pristope k ocenjevanju

senzomotoričnega sistema in izboljšanju gibanja. Predstavili so tudi Slovenski kompetenčni center za čipe in polprevodniške tehnologije KC, ki krepi slovenski ekosistem na strateškem področju razvoja čipov in odpira vrata vključevanju v evropski in svetovni trg polprevodniške industrije. V predstavitev so bila vključena naslednja področja: mehatronika, avtomatika, robotika, elektronika, bionika, biomimetika, fotonika, energetika, IKT, vesoljske tehnologije, mikrotehnologije, nanotehnologije, novi materiali in drugo. Stičišče znanosti in gospodarstva je zajemalo predstavitve novih tehnologij, novih tehnoloških procesov, visokotehnoloških inovacij ter novodobnih poklicev in sodobnih izobraževalnih programov. Svoje delo in znanstvena dognanja pa so predstavile vse poglavitne slovenske raziskovalne in izobraževalne institucije ter visokotehnološka podjetja.

Cilj predstavitve na Stičišču znanosti in gospodarstva, ki ga že od leta 2016 vodi Janez Škrlec, je bil predvsem prikaz dosežkov slovenske znanosti in visokotehnoloških podjetij s poudarkom na inovacijah, novih tehnologijah in dobrih primerih prakse sodelovanja znanosti in gospodarstva.

Letos je v okviru Stičišča znanosti in gospodarstva, ki je projekt Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in inovacije, sodelovalo več kot 20 partnerjev, med izstopajočimi so bili: Kemijski inštitut iz Ljubljane, FERi Univerze v Mariboru, Institut Jožef Stefan, Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, Biotehniška fakulteta v Ljubljani, ARIS, SIS EGIS, SRIP Zdravje in medicina, Kompetenčni center za čipe in polprevodniške tehnologije, IZUM, Podjetje SkyLabs d. o. o., RLS d. o. o., Makro Team d. o. o., PS d. o. o. iz Logatca, Miel d. o. o., NANOTUL d. o. o. (Spin off IJS), Mebius (Spin off KI), Mebius (Spin off KI), ReCatalyst (Spin off KI), Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto, Visoka šola za bioniko na Ptuj, Visoka šola za proizvodno inženirstvo v Celju in številni drugi. Medijski pokrovitelji so bili: Ventil, revija UL FE, revija IRT 3000 in Finance Portal industrija (Tovarna leta).

Vir: MVZI

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0



JAKŠA

MAGNETNI VENTILI

od 1965

- **vrhunska kakovost izdelkov in storitev**
- **zelo kratki dobavni roki**
- **strokovno svetovanje pri izbiri**
- **izdelava po posebnih zahtevah**
- **širok proizvodni program**
- **celoten program na internetu**



www.jaksa.si

Jakša d.o.o., Šlandrova 8, 1231 Ljubljana
T (0)1 53 73 066, F (0)1 53 73 067, E info@jaksa.si







CERTIFIKAT HL 008
ISO 9001

ISO 9001
CERTIFIED
QUALITY SYSTEM

CLASSIFIED
UL

30 LET MENEDŽMENTA IN INOVATIVNIH TEHNOLOGIJ – MIT 2025

Konferenca in delavnica Menedžment in inovativne tehnologije (MIT) je letos praznovala svojo 30. obletnico, hkrati pa je bila izvedena že 18. zapored. Septembrski dogodek v Portorožu je ponovno združil akademike, raziskovalce in industrijske strokovnjake, ki so razpravljali o ključnih vprašanjih sodobnega menedžmenta, vlogi inovacij in mednarodnem povezovanju. Poleg bogatega programa je dogodek nosil tudi simbolni pomen, saj so se udeleženci ozrli v preteklost treh desetletij, hkrati pa iskali vizijo za prihodnost.



Na delavnici se na vsake dve leti zbere prijetna družina kolegov in prijateljev v sproščenem vzdušju

Plenarna sekcija – umetna inteligenca med etiko, ustvarjalnostjo in družbenimi posledicami

Osrednji poudarek letošnjega MIT-a je bila plenarna sekcija, ki je na provokativen način odprla razpravo o umetni inteligenci kot orodju prihodnosti, a tudi kot viru številnih etičnih in družbenih dilem. Uvodna zgodba, ki je opisovala srečanje osamljene starejše gospe z umetno inteligentnim spremljevalcem na božični večer, je sprožila burno razpravo o tem, kje se konča podpora tehnologije in kje se začne nujnost pristne človeške bližine. Udeleženci so razpravljali o tem, ali lahko umetna inteligenca resnično nadomesti človeško toplino in odnose, ter izpostavili, da se v različnih generacijah že kažejo razlike v stopnji zaupanja in sprejemanja teh tehnologij.

Širša debata je opozorila na vpliv umetne inteligence na ustvarjalne industrije, kjer stroški in učinkovi-

tost pogosto prevladajo nad skrbjo za avtentičnost in ohranitev človeškega ustvarjalnega dela. Primer literarnega društva, ki se je soočilo z vprašanjem, ali zamenjati umetniške ilustracije z umetno generiranimi podobami, je jasno pokazal, kako hitro lahko tehnologija spremeni delovna razmerja in vrednotenje človeškega prispevka. Prav tako so bile osvetljene varnostne pomanjkljivosti, ki odpirajo prostor za zlorabe in širjenje dezinformacij. Razprava se je dotaknila tudi področja zdravstva in skrbi za starejše, kjer umetna inteligenca prinaša pomembne rešitve za spremljanje in podporo, a hkrati odpira vprašanja o postopni izgubi človeškega stika.

V izobraževalnem prostoru so udeleženci razmišljali o tem, ali lahko umetna inteligenca izboljša kakovost znanja ali pa jo pretirana avtomatizacija osiromaši. Razprave so nakazale, da prihodnost ne bo zgolj tehnološko vprašanje, temveč predvsem družbeni dogovor o tem, kako uravnotežiti gospodarske pritiske, etične standarde in človekovo dostojanstvo.



V okviru prispevka Music as Memory: Human Influence Hidden in the Latent Space of AI je G.C. Deac preko spleta predstavil spletno radijsko postajo, kjer se vrti glasba generirana z umetno inteligenco (radioai.pro). Udeleženci smo ga prosili, če lahko generira glasbo, ki opeva našo konferenco. Ob zaključku konference, nam je predvajal popevko, ki opeva konferenco MIT (<https://shorturl.at/lvOy3>)

Tehnične sekcije – raziskave na stičišču tehnologije in prakse

Tehnične sekcije so ponudile pregled raziskav na področjih, ki segajo od prometne varnosti in pametnih proizvodnih sistemov do uporabe umetne

inteligence v inženirskem oblikovanju ter od robotike do raziskav obdelovalnih procesov materialov. Prispevki so pokazali, kako širok in interdisciplinaren je raziskovalni spekter, saj so bile obravnavane tako družbeno-tehnološke rešitve, kot je izboljšanje odnosov med kupci in proizvajalci v pametnih tovarnah, kot tudi povsem inženirska vprašanja, denimo optimizacija večrobotskih sistemov v zahtevnih okoljih ali razumevanje vpliva različnih metod obdelave na lastnosti materialov. Skupni imenovalec vseh prispevkov je iskanje odgovorov na konkretne industrijske in družbene izzive s pomočjo inovativnih tehnologij in interdisciplinarnega pristopa.

Povezovanje tradicije in prihodnosti

Ob praznovanju 30-letnice je MIT 2025 ponovno dokazal, da ostaja referenčna točka za raziskave in industrijsko prakso na stičišču menedžmenta, inovacij in tehnologij. Združevanje širokega spektra tem – od etičnih razsežnosti umetne inteligence do naprednih inženirskih raziskav – potrjuje, da je moč konference prav v interdisciplinarnosti in povezovanju ljudi z različnih področij. Dogodek je s svojo tradicijo in aktualnimi vsebinami privabil številne udeležence iz Slovenije in tujine ter utrdil svoj status drugačne konference na tem področju.

Izr. prof. dr. Joško Valentinčič,
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0

RAZVIT IN IZDELAN V SLOVENIJI

GP20

YASKAWA

GLAVNE PREDNOSTI

- Vitka in robustna zasnova
- Uporaba v različnih robotskih aplikacijah
- 20 kg nosilnosti
- Velik polmer dosega: 1.802 mm
- Hiter / visoki pospeški in pojemki
- Enostaven zagon, uporaba in vzdrževanje

YASKAWA Slovenija d.o.o. www.yaskawa.si



Controlled by
YRC1000

MEDNARODNA KONFERENCA ICAMPP 2025: PORTOROŽ KOT STIČIŠČE RAZISKOVALCEV IN INDUSTRIJE ADITIVNIH TEHNOLOGIJ

Joško Valentinčič

V začetku septembra 2025 je v Portorožu potekala prva *Mednarodna konferenca o aditivnih tehnologijah in naknadni obdelavi (ICAMPP 2025)*, ki jo je organizirala Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani v okviru evropskega projekta *SEAMAC (Strengthening the Excellence of Additive Manufacturing Capabilities)*. Portorož, kot eno najbolj prepoznavnih slovenskih obmorskih mest, je s svojo dostopnostjo in sproščenim vzdušjem nudil odlično kuliso za srečanje raziskovalcev, industrijskih partnerjev in študentov. Dogodek je trajal od 7. do 9. septembra in privabil 70 udeležencev iz Evrope, Azije in Amerike.



Udeleženci tridnevne konference so se zbrali iz vseh koncev sveta

Glavni cilj konference je bil povezati raziskovalno sfero in industrijo na področjih, ki so ključna za prihodnost proizvodnje. Med osrednjimi temami so

izstopali razvoj aditivnih tehnologij in njihove trajnostne uporabe, spremljanje in nadzor procesov, inovacije v materialih s poudarkom na funkcijsko gradientnih materialih, razvoj metod večfizikalnega modeliranja, napredki v 4D-tisku ter široka paleta aplikacij od orodjarstva do letalstva, ortopedije in medicine. Posebna pozornost je bila namenjena tudi naknadni obdelavi aditivno izdelanih komponent, s katero se izboljšujejo mehanske lastnosti,

Izr. prof. dr. Joško Valentinčič, univ. dipl. inž.,
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0



Plenarna sekcija, ki jo je moderiral prof. Edvard Govekar. Od leve proti desni: prof. Andreas Otto (TU Wien), Andrej Suhadolc (CGS plus d.o.o.), prof. Lukas Löber (Hochschule Esslingen), prof. Igor Drstvenšek (Univerza v Mariboru), dr. Dominic Bartels (Bayerisches Laserzentrum GmbH), Uroš Milost (Hidria).

mikrostruktura, dimenzijska stabilnost in površinska kakovost.

Program konference je bil razgiban in bogat. Poleg številnih predstavitev raziskovalnih prispevkov je vključeval tudi štiri plenarne sekcije, ki so dale dogodku poseben pečat. Prva sekcija je gostila *dr. Mario Tereso Pérez-Prado (IMDEA Materials Institute, Španija)*, ki je predstavila inovativne pristope pri 3D-tisku kovin za energetsko učinkovite aplikacije. V svojem predavanju je poudarila, kako aditivne tehnologije omogočajo izjemno svobodo oblikovanja in prinašajo nove možnosti za trajnostno proizvodnjo, posebej v kontekstu električnih motorjev in lahkih nosilnih struktur. Drugo plenarno predavanje je imel *dr. Dominic Bartels (FAU Erlangen-Nürnberg, Nemčija)*, ki je predstavil potencial oblikovanja laserskega snopa v aditivni proizvodnji kovin. Njegova predstavitev je osvetlila, kako lahko napredne tehnike oblikovanja snopa bistveno skrajšajo čas izdelave ter izboljšajo kakovost končnih izdelkov. Tretjo sekcijo je vodil *dr. Jan Haubrich (German Aerospace Center, Nemčija)*, ki je podrobneje spregovoril o razvoju toplotnih obdelav za aditivno izdelane zlitine, predvsem za letalske aplikacije. Poudaril je, da lastnosti materialov v natisnjenem stanju pogosto ne zadostujejo zahtevnim pogojem uporabe, zato je optimizacija z ustreznimi toplotnimi obdelavami ključna za doseganje potrebne žilavosti in trdnosti. Zadnjo, četrto plenarno sekcijo je oblikoval *prof. Andreas Otto (TU Wien, Avstrija)*, ki je predstavil večfizikalno modeliranje procesov v lasersko podprti aditivni proizvodnji. Njegovo predavanje je prikazalo, kako simulacije omogočajo razumevanje procesov taljenja, strjevanja in dinamike taline ter s tem bistveno pospešijo razvoj novih pristopov.

Ob plenarnih predavanjih je bil velik poudarek na raziskovalnih prispevkih, objavljenih v zborniku konference. Med izstopajočimi je bila študija špan-

skih raziskovalcev o utrjevalnih postopkih z laserskim žarkom pri zlitini Ti-6Al-4V, kjer so prikazali izboljšanje trajno dinamične trdnosti ob uporabi omenjene toplotne obdelave. Skupina z Univerze v Ljubljani je predstavila delo na področju koaksialnega spremljanja taline pri selektivnem laserskem taljenju, s katerim so dokazali možnosti za izboljšanje nadzor procesa in večjo ponovljivost izdelave. Veliko zanimanja je vzbudila tudi raziskava o uporabi strojnega učenja pri napovedovanju trdote titanovih zlitin, prav tako v primeru selektivnega laserskega taljenja, kjer so algoritmi umetne inteligence pokazali presenetljivo natančnost. Drugi pomemben prispevek je bila raziskava o triboloških lastnostih aditivno izdelanih jekel in vplivu procesnih parametrov na mikrostrukturo in obrabo, ki nakazuje možnosti za daljšo življenjsko dobo orodij. S področja keramičnih kompozitov je bila predstavljena študija španskih raziskovalcev o aditivni izdelavi kovinsko-keramičnih materialov, kjer so poudarili vpliv mikrostrukture na mehanske lastnosti in možnosti uporabe v zahtevnih okoljih. V ospredju zanimanja so bile tudi raziskave o naknadni obdelavi, od plazemsko elektrolitičnega poliranja do laserskega poliranja, pri čemer so bili predstavljeni obetavni rezultati izboljšanja površinske hrapavosti in mehanskih lastnosti.

Pomemben del konference sta bili tudi dve okrogli mizi, ki sta ponudili prostor za poglobljeno razpravo med akademiki in industrijo. Prva, z naslovom Prihodnost raziskav na področju aditivnih tehnologij in uvajanja v industrijo, je povezala predstavnike podjetij in akademske sfere v dialog o tem, kako pospešiti prenos raziskovalnih dosežkov v industrijsko prakso. Predstavniki industrije so izpostavili ovire, kot so visoki stroški uvajanja tehnologij, pomanjkanje standardizacije ter potreba po večji zanesljivosti in ponovljivosti procesov. Raziskovalci so na drugi strani poudarili pomen dolgoročne-

ga sodelovanja, razvoja novih materialov in metod spremljanja procesov ter nujnost mednarodnih projektov, ki omogočajo hitro validacijo rezultatov. V razpravi se je jasno pokazalo, da sta odprt dialog in skupno reševanje izzivov ključna za širšo implementacijo aditivnih tehnologij.

Druga okrogla miza Izzivi naknadne obdelave se je nanašala na eno od osrednjih tem konference – naknadno obdelavo aditivno izdelanih komponent. Udeleženci so se strinjali, da ravno naknadna obdelava pogosto odločilno vpliva na mehanske lastnosti, mikrostrukturo in funkcionalnost izdelkov. Predstavniki industrije so izpostavili praktične težave pri zagotavljanju ponovljivosti in ekonomske učinkovitosti postopkov, raziskovalci pa so predstavili najnovejše trende, kot so plazemsko elektrolitsko poliranje, kombinacije toplotnih obdelav in avtomatizirani pristopi z uporabo umetne inteligence. Skupni zaključek razprave je bil, da bo prihodnost uspešne uporabe aditivnih tehnologij tesno povezana z razvojem robustnih in stroškovno učinkovitih rešitev.

Na konferenci smo podelili tudi dve nagradi. Nagrado za najboljši prispevek sta prejela *Jure Kajbič* in *Jernej Klemenc* (Univerza v Ljubljani) za članek *Metal wire as a strain-sensing element in 3D-printed thermoplastics*. V njem sta avtorja pokazala, kako je mogoče v 3D-natisnjene termoplastične strukture vgraditi kovinske žice in jih uporabiti kot senzorje napetosti, kar odpira nove možnosti za razvoj

pametnih materialov. Nagrado za najboljšo žensko predstavitev je prejela *Diana Popescu* (National University of Science and Technology Politehnica Bucharest, Romunija) za prispevek *3D Printing – A Skillful Tailor for Comfort*, pripravljen v soavtorstvu z *Mariano-Cristiano Iacob*. Avtorici sta predstavili inovativne pristope k uporabi 3D-tiska pri razvoju personaliziranih izdelkov, namenjenih izboljšanju udobja uporabnikov.

Dogodek so obogatili tudi razstavljalci. Podjetja *Solid World d. o. o.*, *Sipra d. o. o.* in *CGS d. o. o.* so predstavila najnovejše tehnološke rešitve na področju 3D-tiska in programske opreme. Razstavniki prostor je bil živahno stičišče strokovnjakov, ki so imeli priložnost v živo preizkusiti orodja in tehnologije, ki že danes spreminjajo proizvodno prakso v industriji.

Skupno je konferenca z 70 udeleženci z različnih celin dokazala, da obstaja močna potreba po forumu, ki združuje raziskave in industrijo na področju aditivnih tehnologij. Pozitivni odzivi udeležencev so potrdili, da je ICAMPP uspešno zapolnila vrzel med raziskovalnimi laboratoriji in industrijsko prakso, zato smo organizatorji že napovedali, da bo naslednja izvedba potekala čez dve leti. Naš cilj je, da ICAMPP postane stalno mednarodno stičišče za izmenjavo znanja, izkušenj in idej, ki bodo krojile prihodnost aditivnih tehnologij in naknadne obdelave.

Zanesljivi partner

vaše proizvodnje



Olma d.o.o., Poljska pot 2, 1000 Ljubljana,
tel.: (01) 58 73 600, faks: 54 63 200,
e-pošta: order@olma.si, <http://www.olma.si>



PROF. DR. MITJAN KALIN JE POSTAL PRVI EVROPEJEC PO LETU 2004, KI JE PREJEL PRESTIŽNO NAGRADO ASME MAYO D. HERSEY – NAJVIŠJE AKADEMSKO PRIZNANJE NA PODROČJU TRIBOLOGIJE V SVETOVNEM MERILU.

Nagrada Mayo D. Hersey se podeljuje posameznikom kot priznanje za izjemne in trajne prispevke k razvoju znanosti in inženirstva tribologije. Ti prispevki so lahko rezultat pomembnih izvirnih raziskav na področju mazanja, odličnosti in ustvarjalnosti v inženirski praksi ali pa vztrajnih prizadevanj za širjenje razumevanja teorije in prakse mazanja.



Prof. dr. Mitjan Kalin ob prejemu nagrade ASME Mayo D. Hersey

Prof. dr. Kalin je tudi prejemnik nagrade ASME Burt L. Newkirk za vrhunske dosežke v tribologiji pred dopolnjenim 40. letom starosti, kar ga uvršča med redke posameznike – le deset jih je doslej prejelo obe najvišji tribološki nagradi ASME. Poleg tega je prejel Zoisovo priznanje, Zoisovo nagrado, zlato plaketo Univerze

v Ljubljani ter je član Evropske akademije znanosti in umetnosti, Inženirske akademije Slovenije, Mednarodne inženirske akademije ter častni član združenja tribologov STLE.

Trenutno deluje v vodstvih obeh svetovnih triboloških organizacij – kot član odbora direktorjev pri

Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE) ter kot član izvršilnega odbora in namestnik predsednika pri International Tribology Council (ITC).

Več kot desetletje je glavni urednik znanstvene revije Lubrication Science (SCI) pri založbi Wiley ter ustanovitelj mednarodne serije konferenc Polytrib.

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je opravljal funkcije prodekana za znanstveno-raziskovalno delo, prodekana za magistrski in doktorski študij, v letih 2017–2021 pa je bil dekan fakultete. Od leta 2011 vodi Laboratorij za tribologijo in površinsko nanotehnologijo.

Iskrene čestitke prof. dr. Mitjanu Kalinu ob prejemu prestižne nagrade ASME Mayo D. Hersey!

www.fs.uni-lj.si

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0



DR. DOMINIK KOZJEK PREJEL PRESTIŽNI ERC-PROJEKT ZA ZAČETEK SAMOSTOJNE RAZISKOVALNE POTI

Doc. dr. Dominik Kozjek je bil uspešen na enem najprestižnejših raziskovalnih razpisov ERC za začetek samostojne kariere. Gre za sredstva, ki jih Evropski raziskovalni svet (ERC) podeljuje vrhunskim raziskovalcem v zgodnji fazi samostojne kariere. Sredstva v višini 1,5 milijona evrov bodo omogočila petletno izvajanje prebojnih raziskav in vzpostavitev vrhunske raziskovalne skupine na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani.

Financiranje ERC je doc. dr. Kozjek prejel za inovativni projekt MeltingWell, ki se osredotoča na odpravo ene ključnih omejitev 3D-tiska kovin s postopkom selektivnega laserskega taljenja (SLM) – nekontroliranih variacij procesnih pogojev taljenja. Te nepredvidljive spremembe povzročajo napake in slabšajo materialne lastnosti natisnjenih kovinskih kosov, kar ovira širšo industrijsko uporabo te napredne tehnologije.

Selektivno lasersko taljenje omogoča izdelavo kovinskih komponent kompleksnih oblik in visokozmogljivih lastnosti, ki jih z drugimi postopki ni mogoče doseči. Prinaša lažje izdelke, manjšo porabo materiala, krajše dobavne verige in manjši okoljski odtis.

»Ta projekt je izjemna priložnost za raziskovanje novih obzorij na področju 3D-tiska kovin. Verjamem, da bo naš pristop omogočil pomemben preboj in pospešil uvajanje te tehnologije v industrijsko proizvodnjo,« je poudaril doc. dr. Kozjek.

V okviru projekta MeltingWell bodo raziskovalci razvijali metode umetne inteligence za napovedovanje in odpravljanje variacij procesnih pogojev taljenja. Rešitev temelji na kombinaciji napovednega krmljenja procesov, izboljšane koaksialnega merjenja globine taline in podatkovno vodenega modeliranja. Če bo metoda uspešna, ima potencial postati globalni standard za krmljenje SLM-procesov.

Raziskave bodo potekale v *Laboratoriju za mehatroniko, proizvodne sisteme in avtomatizacijo (LAMP)* na Fakulteti za strojništvo UL pod vodstvom doc. dr. Dominika Kozjeka. Ožjo raziskovalno ekipo sestavljajo strokovnjaki za optiko in pirometrijo, raziskovalec s področja laserskih in mehatronskih sistemov ter poddoktorski raziskovalec, specializiran za FEM- in CFD-simulacije.

Projekt predvideva tudi sodelovanje z *Laboratorijem za sinergetiko (LASIN)*, *Katedro za tehnologijo materialov* in *Skupnim laboratorijem za 3D-tisk kovin*. Del eksperimentalnega dela bo predvidoma izveden v Argonne National Laboratory (ZDA),



Doc. dr. Dominik Kozjek

pri čemer bodo sodelovali tudi znanstveniki z Northwestern University (AMPL Laboratory). Poleg akademskih partnerjev se bo raziskovalna skupina povezovala še s podjetjem DMG MORI in drugimi industrijskimi akterji.

Doc. dr. Dominik Kozjek je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za strojništvo UL, kjer od leta 2023 deluje kot docent. Njegova raziskovalna pot se poteka na presečišču strojništva in podatkovne znanosti, zlasti umetne inteligence, z izjemnim poudarkom na prenosu znanstvenih dosežkov v industrijsko prakso. Svojo kariero je začel kot delavec v proizvodnji – kot operater CNC-strojev in laboratorijski tehnik, kar mu je omogočilo dragocen vpogled v realne proizvodne procese in njihove izzive. Iz teh izkušenj je zgradil trdno osnovo za razisko-

valno delo, ki danes povezuje vrhunsko znanost z industrijo. Med letoma 2021 in 2023 je kot podoktorski raziskovalec na Northwestern University v ZDA razvil prelomne pristope h krmiljenju procesov 3D-tiska kovin. Njegovi dosežki so objavljeni v vodilnih svetovnih znanstvenih revijah, kar ga uvršča med vidnejše raziskovalce na področju naprednih proizvodnih tehnologij. Kljub številnim ponudbam za prestižne položaje v ZDA se je zavestno odločil vrniti v Slovenijo, kjer svoje znanje in izkušnje usmerja v razvoj domačega znanstvenega in gospodarskega okolja.

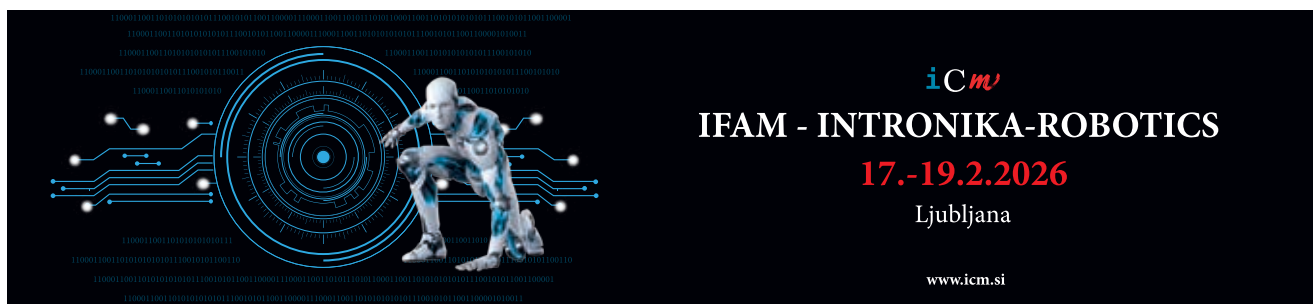
Prestižno priznanje ERC Starting Grant, ki ga je prejel doc. dr. Dominik Kozjek, je na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani pospremil z navdušenjem tudi dekan fakultete prof. dr. Jernej Klemenc. Ob tem je poudaril, da gre za izjemen dosežek, ki potrjuje, da fakulteta ustvarja okolje, kjer se rojeva-

jo prebojne ideje in svetovni dosežki: »Takšni uspehi nas navdihujejo in motivirajo, da z raziskovalno odličnostjo še naprej premikamo meje mogočega.«

Podobno zadovoljstvo ob uspehu je izrazil tudi rektor Univerze v Ljubljani prof. dr. Gregor Majdič, ki je izpostavil širši pomen projekta za univerzo: »Na Univerzi v Ljubljani z velikim veseljem pozdravljamo še en projekt Evropskega raziskovalnega sveta (ERC) za našo univerzo. Projekti ERC so najprestižnejši evropski projekti in uspešnost pri pridobivanju tovrstnih projektov v zadnjih letih kaže na mednarodno prebojnost naših raziskovalcev in raziskovalcev. Nosilcu projekta Dominiku Kozjeku iskreno čestitam in mu želim veliko vznemirljivih rezultatov pri njegovem raziskovalnem delu.«

www.fs.uni-lj.si

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0



iCm
IFAM - INTRONIKA-ROBOTICS
17.-19.2.2026
 Ljubljana
www.icm.si



Mednarodni industrijski sejem

14.-17. APRIL 2026

Ključne teme:

- Industrija prihodnosti: AI, digitalizacija, robotika in človek
- Prihodnost varjenja in rezanja
- Pametno industrijsko vzdrževanje in industrijsko čiščenje
- Energetika v industriji
- Logistika in oskrbovalne verige
- Grafika, pakiranje in označevanje
- Reciklaža, trajnostni materiali in industrijski odpadki
- Industrijska elektronika, senzorika in avtomatizacija

Celjski sejem

PRIHODNOST IZMENJAVE ZNANJA IN MREŽENJA NA PODROČJU FLUIDNE TEHNIKE

Okrogla miza na mednarodni konferenci Fluidna tehnika 2025,
Maribor, 17. 9. 2025

Nejc Novak, Jan Bartolj, Franc Majdič

Na dvodnevni mednarodni strokovni konferenci, ki je potekala v septembru v mariborskem hotelu Habakuk, je bila prvi dan zanimiva okrogla miza. Ta je združila akademske in industrijske glasove, ki so razpravljali o prihodnosti fluidne tehnike, globalnem položaju Evrope in vlogi konferenc pri izmenjavi znanja. Pogovor je izpostavil izzive, kot so demografski premiki, upad udeležbe na konferencah in ravnovesje med odprtimi raziskavami in industrijsko zaupnostjo. Kljub različnim perspektivam so vsi govorci poudarili pomen sodelovanja, prilagajanja in ohranjanja dogodkov, kjer se ljudje lahko srečujejo, izmenjujejo ideje in skupaj oblikujejo prihodnost.

Ista vprašanja z okrogle mize so bila kasneje zastavljena tudi umetni inteligenci (ChatGPT), njene ugotovitve pa so predstavljene v tem prispevku.

Povezovalac okrogle mize je bil *izr. prof. dr. Franc Majdič* (Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani) glavni govorci pa so bili *prof. dr. Katarina Schmitz* (IFAS v RWTH Univerza v Aachnu, Nemčija), *g. Anže Čelik* (Poclain Hydraulics Slovenija), *g. Kristian Les* (HAWE Hydraulics Slovenija) in *doc. dr. Mihael Cipek* (Fakulteta za strojništvo in ladjedelništvo, Univerza v Zagrebu, Hrvaška).

F. Majdič: »Pred približno letom in pol se je na konferenci IFK v Dresdnu pojavila ideja, da je nujno potrebno tesnejše sodelovanje med evropsko industrijo in raziskovalnimi ustanovami na področju fluidne tehnike. Prof. Schmitz, ali lahko na kratko opišete, kaj se trenutno dogaja na tem področju v kontekstu globalizacije in nekoliko 'zaspane Evrope'?«

K. Schmitz: »V času od omenjene konference v Dresdnu smo ustanovili vseevropsko združenje, ki povezuje industrijo in akademski svet. Zaposleni v industriji pogosto razpravljajo o akademskih zadevah, akademiki pa se prav tako lotevajo industrijskih izzivov. Zato smo imeli idejo, da bi ustanovili

dve združenji – eno na strani industrije in eno na strani akademskega sveta – in ju nato povezali. Med akademiki je že potekalo glasovanje za prvi upravni odbor, katerega vloga bo, da stvari premakne in zagotovi dobro strukturiranje dejavnosti. Prevezla sem odgovornost vodenja tega novega evropskega združenja – Združenja za fluidno tehniko – za naslednja tri leta in z veseljem bom to pobudo pospešila.«

F. Majdič: »Kakšno je vaše mnenje o Evropi in trenutnih spremembah ter kako lahko Evropa okrepi svoj položaj v primerjavi z ZDA, Kitajsko in drugimi svetovnimi velesilami?«

A. Čelik: »Z mojega vidika je eden največjih izzivov demografski. Sem prihaja vedno več ljudi, ki niso Evropejci, večinoma v iskanju boljšega in varnejšega življenja. Vprašanje je, kako dobro se integrirajo in kako bodo prispevali k izgradnji boljše družbe. To je v veliki meri lokalno vprašanje, vendar ima širše posledice. Druga točka je bolj tematska in je bila prav tako izpostavljena danes zjutraj: Evropa se trudi, da bi se pozicionirala v primerjavi s Kitajsko in ZDA. Kitajci imajo precej drugačno miselnost in na več področjih prehitevajo Evropo in druge regije. Evropa pa je v mnogih pogledih precej omejena – vključno z našimi demokratičnimi procesi, ki so sicer dragoceni, a lahko tudi upočasnijo konkurenčnost. Če želimo ostati konkurenčni, moramo graditi na svojih prednostih. Imamo veliko inovacij in znanja, vendar se trženje, končni razvoj in komercializacija prepogosto izvajajo drugje. Na koncu izgublamo delavce in zamudimo priložnosti za

Nejc Novak, Jan Bartolj, *izr. prof. dr. Franc Majdič*, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0



Utrinek z Okrogle mize

pretvorbo znanja v izdelke. Zato je moje mnenje: uporabimo tisto, kar že imamo. Mobilizirajmo svoje znanje, osredotočimo se na izvedbo in z njim naredimo nekaj konkretnega, namesto da pustimo, da drugi prevzamejo vodstvo.»

K. Les: »Zavzel bi bolj pragmatičen pogled in pogledal zgodovino. Vedno je obstajala točka, ko je ena regija ali država imela središče moči: najprej Velika Britanija, nato Evropa, kasneje ZDA in nekaj časa celo Japonska. Zdaj je nedvomno napočil čas Kitajske. Proti temu se ne moremo boriti ali ga preprečiti. Spremembe so neizogibne. Namesto tega je pravo vprašanje: kako se odzvati? Evropa ne bo izginila, vendar moramo najti svoje mesto in razviti jasno strategijo. Zame to pomeni ustvariti okolje, kjer so ljudje z znanjem in veščinami motivirani, da ostanejo in prispevajo. Gradnja zidov ne bo pomagala – noben zid ne more ustaviti globalnih sprememb. Kar Evropo dela močno, je prav njena raznolikost: veliko različnih ljudi z različnimi perspektivami, ki živijo tukaj skupaj. Če lahko to raznolikost izkoristimo s komunikacijo in sodelovanjem, lahko ustvarimo nekaj pomembnega za prihodnost.«

M. Cipek: »Kot sem že omenil, je Evropa velika in jo sestavlja veliko različnih ljudi. Ta raznolikost nam omogoča, da se lažje prilagajamo spremembam. Zaradi te prilagodljivosti verjamem, da ima Evropa svetlo prihodnost.«

Umetna inteligenca – ChatGPT: »Z mojega vidika je izziv Evrope v tem, da svojo raznolikost spremeni v kohezijo, ne da bi pri tem izgubila bogastvo različnih kultur. ZDA imajo koristi od obsega in enotnega trga, Kitajska od hitrosti in centralizacije, medtem ko se Evropa včasih bori z razdrobljenostjo. Da bi okrepila svoj položaj, mora Evropa vlagati v tri stvari:

1. Ohranjanje talentov – ustvarjanje pogojev za mlade raziskovalce in inovatorje, da ostanejo in uspevajo.
2. Strateška neodvisnost – zmanjšanje odvisnosti od zunanjih sil na področju energetike, digitalne infrastrukture in obrambe.
3. Globalno zaupanje – bolj odločno pripovedovanje lastne zgodbe, namesto da bi se odzivala na zgodbe drugih.

Če bo Evropa lahko uskladila svoje demokratične vrednote z močnejšo sposobnostjo kolektivnega delovanja, ji morda ne bo treba 'tekmovati' pod enakimi pogoji kot Kitajska ali ZDA, temveč bo vodstvo opredelila na svoj način – s trajnostjo, inovacijami in socialno kohezijo kot svojimi edinstvenimi prednostmi.«

F. Majdič: »Naslednje vprašanje bo povezano z upadom udeležbe na konferencah. Udeležba na med-

narodnih tehniških konferencah se je v primerjavi s preteklimi leti zmanjšala. Vse težje je privabiti obiskovalce, še posebej vas, industrijske partnerje. Kaj menite, kakšni so razlogi za to? Zakaj se takšnih konferenc ne udeležuje več industrijskih partnerjev? Kakšno dodano vrednost so konference nekoč zagotavljale v primerjavi z danes?» Za K. Schmitz: »Ali je v Nemčiji kaj drugače?«

K. Schmitz: »Ne, zagotovo ne. Popolnoma enaka situacija je v Nemčiji in, verjamem, po vsem svetu. Skupnost za fluidno tehniko je zelo majhna in to je del problema. Pravzaprav imamo preveč konferenc za tako majhno skupino strokovnjakov. Obstajajo konference o splošni fluidni tehniki, pa tudi manjše o specifičnih temah, kot so mobilna hidravlika, digitalna hidravlika ali tesnila. Ko jih seštejete skupaj čez leto, postane zelo težko udeležiti se jih vseh in kljub temu imeti smiselne nove razprave. Iskreno povedano: vsaki dve leti ni dramatičnih sprememb na tem področju – zagotovo ne iz meseca v mesec. Zato prepogosta srečanja zmanjšajo vpliv. Druga težava so stroški in čas. Za industrijske partnerje je pošiljanje ljudi na več konferenc vsako leto zelo drago. Za mlajše strokovnjake je tudi težko biti odsoten od doma, zlasti zaradi družinskih obveznosti, kot je npr. prevzem otrok iz vrtca ali šole. Zaradi tega je mladim manj privlačno preživeti dodatne dni na konferencah, tudi če vidijo strokovno korist. Na kratko: izziv je, da je naša skupnost majhna, število dogodkov pa preveliko. Zaradi tega je težje ohranjati visoko udeležbo in močan občutek dodane vrednosti, ki so ga nekoč zagotavljale konference.«

A. Čelik: »Glede na to, kar vidim med svojimi kolegi, se večina od njih preprosto ne udeležuje več konferenc. Po osemurni izmeni si ljudje želijo le iti domov in se sprostiti. Udeležba na konferenci ni samo prisostvovanje – običajno zahteva najprej pripravo prispevka in nato še predstavitev, kar pomeni dodatno delo poleg že tako dolgih 8- do 10-urnih delovnih dni. Za mnoge to ni privlačno. Torej je po mojem mnenju pomanjkanje zanimanja posledica časovnega pritiska in ravnovesja med poklicnim in zasebnim življenjem. Ljudje raje preživijo ta dodatni čas zunaj dela z družino, kot pa da bi več ur posvetili konferencam.«

K. Les: »Včasih se počutim kot dinosaver, saj še vedno resnično uživam v konferencah. Zame je že samo mreženje vredno truda. Hkrati se strinjam, da se njihov vpliv zmanjša, če se konference odvijajo prepogosto. Stvari se spreminjajo in mlajša generacija te dogodke dojema drugače. Težko natančno presodim, zakaj je temu tako, vendar čutim, da njihov pogled na profesionalno mreženje in učenje ni enak tistemu, kar sem doživel jaz v svoji dosednji karieri.«

M. Cipek: »Strinjam se z že povedanim. Danes lahko ljudje dostopajo do ogromne količine interaktivnih digitalnih informacij na spletu. Mnogi ne čutijo več

potrebe, da bi šli na konferenco, da bi si ogledali najnovejši razvoj. Pred desetimi leti je bilo to zelo drugače – konference so bile ena redkih priložnosti, da se resnično naučimo, kaj se dogaja na tem področju. V današnjem času je na voljo ogromno digitalnih informacij, zato se je zaznana vrednost udeležbe v živo zmanjšala. Mislim, da je ta premik verjetno del razloga, zakaj se je udeležba zmanjšala, zlasti ko gre za industrijske partnerje.«

Umetna inteligenca – ChatGPT: »Z mojega vidika obstaja več prekrivajočih se razlogov za upad. Prvič: informacijska krajina se je popolnoma spremenila. Veliko tega, kar je bilo nekoč izključno na voljo na konferencah – referati, predstavitve, demonstracije – je zdaj skoraj v trenutku dostopno na spletu. Zaradi tega je tradicionalna vloga konferenc pri »prenosu znanja« manj privlačna. Drugič: časovni in stroškovni pritiski so veliki, zlasti za industrijo. Potovalni proračuni so omejeni, strokovnjaki pa so pod večjim pritiskom, da uskladijo delo z zasebnim življenjem. Priprava referata ali predstavitve zahteva precejšen trud poleg že tako dolgega delovnega časa, kar odvrča od sodelovanja. Tretjič: menim, da prihaja do generacijskega premika v navadah mreženja. Za mnoge mlajše inženirje ali raziskovalce spletne platforme in virtualne skupnosti delno nadomestijo mreženje, ki je bilo nekoč organizirano na konferencah. Cenijo fleksibilnost in krajše, bolj osredotočene formate namesto tedenskih dogodkov. Kljub temu menim, da imajo konference še vedno edinstveno vrednost – interakcijo iz oči v oči, spontane razprave in dolgoročno sodelovanje je težko ponoviti na spletu. Če se konference prilagodijo – na primer s ponudbo hibridnih formatov, močnejših povezav z industrijskimi projekti ali bolj interaktivnih in praktičnih sej – lahko ponovno pridobijo na veljavi. Skratka: upad ni znak, da so konference zastarele, temveč signal, da se morata njihova oblika in namen razviti, da bi izpolnile nova pričakovanja.«

F. Majdič: »Glede prilagojenih sej, osredotočenih na industrijo: kakšno je vaše mnenje o produktivnih in celovitih študijah primerov iz industrije brez strokovno pregledanih člankov? Prosim, delite svoje misli v kratki izjavi in na koncu podajte tudi vaše zaključne besede.«

K. Schmitz: »To je zelo dobro vprašanje. Na IFK smo, vse odkar sta profesor Murrenhoff in profesor Helduser ustanovila to konferenco, vedno vključevali industrijske seje s prispevki, ki niso bili recenzirani. To je dolgo časa delovalo zelo dobro in udeležencem iz industrije dajalo platformo za izmenjavo vpogledov in študij primerov. Vendar pa smo v zadnjih letih opazili upad števila industrijskih predstavitev. Eden od razlogov je, da so podjetja vse bolj previdna pri odprtem deljenju znanja. Pred dvajsetimi leti ste bili, če ste nekaj pokazali na diapozitivu, lahko prepričani, da so to videli le ljudje v dvorani. Danes lahko z mobilnimi napravami in takojšnjo iz-

menjavo vse, kar je predstavljeno, hitro zakroži po vsem svetu. Ta skrb postane še večja, ko so prisotni mednarodni udeleženci, tudi zunaj Evrope. Podjetja so zaskrbljena, da se bodo dragocene informacije skoraj takoj razširile po vsem svetu. Zaradi tega so mnogi industrijski partnerji zdaj bolj zadržani pri predstavitvi svojih ugotovitev ali strategij na javnem forumu. Čeprav so industrijske seje še vedno dragocene, je za podjetja vse težje odkrito sodelovati. To je eden velikih izzivov, s katerimi se soočamo, ko zremo v prihodnost takšnih konferenc.»

A. Čelik: »Zame je najpomembnejše, da se srečamo in skupaj sedimo, da s pomočjo razprave oblikujemo konferenco. Ta interakcija iz oči v oči je neprecenljiva. Strinjam se, da podjetja pogosto niso pripravljena predstaviti zaupnih informacij, in to je razumljivo. Vendar pa je še vedno mogoče deliti znanje na način, ki je predstavljen, ne da bi pri tem razkrili občutljive ali lastniške podrobnosti. Torej: čeprav so podjetja morda previdna, vedno obstaja način, kako smiselno prispevati h konferenci, ne da bi pri tem razkrili ključne informacije. Gre za iskanje pravega ravnovesja med odprtostjo in zaščito intelektualne lastnine.«

K. Les: »Tokrat, če govorim z vidika industrije, se zavedam, da obstajajo informacije, ki jih preprosto ne želimo javno deliti. Vendar moramo priznati, da se tisto, kar se deli, pogosto izkaže bolj kot oglas ali promocija. Kljub temu je pomembno, da te predstavitve izpolnjujejo določen standard kakovosti. Prispevki industrije so lahko še vedno dragoceni, če so strukturirani, ustrezni in informativni, tudi če so nekatere občutljive podrobnosti izpuščene.«

M. Cipek: »Če gre za akademsko raziskavo, potem bi morala biti recenzirana. Če pa gre za predstavi-

tev, s katero želi podjetje predstaviti svoje delo, je to drugače. V teh primerih lahko podjetja predstavijo svoje delo in včasih ponudijo vpogled, ki so neposredno uporabni v praksi. Najpomembnejši vidik je, da takšne konference udeležencem omogočajo navezovanje stikov in gradnjo mrež, kar ostaja ključna vrednost predstavitev, osredotočenih na industrijo.«

Umetna inteligenca - Chat GPT: »Verjamem, da imajo seje, osredotočene na industrijo, dva različna namena in oba sta dragocena. Prvič: če je cilj razširjanje raziskav, je medsebojni pregled pomemben za zagotavljanje natančnosti, verodostojnosti in ponovljivosti. To ohranja znanstveno integriteto konference. Drugič: če je cilj prenos praktičnega znanja ali predstavitev industrijskih inovacij, medsebojni pregled ni nujno potreben. V teh primerih lahko podjetja predstavijo aplikacije iz resničnega sveta, pridobljene izkušnje ali inovativne procese, ne da bi pri tem razkrila občutljivo intelektualno lastnino. Tudi če so nekatere informacije promocijske, lahko te seje še vedno zagotovijo konkretne vpogled, spodbudijo sodelovanje in pomagajo udeležencem pri vzpostavljanju koristnih strokovnih stikov. Zaključna opomba: Na splošno je ključno ravnovesje. Konference bi morale še naprej podpirati visokokakovostne raziskave, hkrati pa industriji zagotavljati prostor za izmenjavo praktičnih izkušenj. Ta hibridni pristop ohranja znanstveno verodostojnost, hkrati pa spodbuja mreženje, sodelovanje in inovacije – s čimer zagotavlja, da konference ostanejo relevantne in dragocene v današnjem hitro razvijajočem se tehničnem okolju.«

F. Majdič: »Hvala vsem za vaše dragocene vpogled. Prepričan sem, da bodo pomagali oblikovati prihodnjo organizacijo konferenc.«



Vitka proizvodnja.

item. Your ideas are worth it.®

Sistem item Lean Production združuje preprosto rokovanje in visoko stabilnost konstrukcije. S profilnim sistemom D30 nastajajo rešitve, ki jih lahko preprosto prilagajamo na licu mesta.

INOTEH
www.inoteh.si **A BIBUS GROUP COMPANY**
Inoteh d.o.o. K železnici 7 2345 Bistrica ob Dravi

APPLICATION-ORIENTED MECHATRONIC SYSTEMS WITH PNEUMATIC ACTUATION

Željko Šitum, Filip Čavić, Vid Pavlović, Lovro Zoričić, Ante Ivanković, Bernarda Galić, Antonio Varović

Abstract:

This paper introduces six novel mechatronic systems driven by pneumatic actuators, developed as instructional models aimed at enhancing the education of mechanical engineering students in pneumatic power systems and automatic control. The initial system presented is an autonomous vehicle prototype powered entirely by compressed air, utilizing pneumatic artificial muscles for propulsion. Subsequently, the article presents three robotic manipulators actuated pneumatically: a delta robot equipped with a vacuum gripper, a robotic arm with a flexible gripper, and a conveyor-based manipulator capable of obstacle avoidance. The final section focuses on two systems with potential industrial applications: a pneumatic screw drive mechanism and an automated pneumatic sorting machine designed for bean classification. Together, these six systems offer practical demonstrations of pneumatic technology in automation, providing effective hands-on learning platforms for mechatronics and control engineering education.

Keywords:

mechatronics, pneumatic actuators, robotic educational manipulators, automatic control, industrial automation

1 Introduction

Mechatronics is experiencing rapid advancement through the integration of mechanical engineering, electronics, computer science, and intelligent control systems. Contemporary mechatronic designs increasingly incorporate flexible and adaptive elements that facilitate the precise and autonomous execution of complex operations [1]. Among various actuation methods, pneumatic actuation is notable for its simplicity, cost efficiency, and superior power-to-weight ratio, making it suitable for both industrial implementations and educational purposes [2]. Current developments in robotics emphasize compliant, bio-inspired actuators such as pneumatic artificial muscles (PAMs), which enhance safety in human-robot collaboration and offer improved performance

relative to traditional rigid actuators [3]. The emergence of Industry 4.0 has accelerated the integration of smart, networked automation systems, where pneumatic components are often combined with sensors and controllers to enable real-time monitoring and adaptive control [4]. At the same time, engineering education increasingly demands hands-on, project-based learning approaches. Pneumatically driven educational platforms allow students to engage practically with fundamental topics including fluid dynamics, control strategies, sensor fusion, and system optimization in an interactive and tangible manner [5]. This article presents six novel mechatronic systems developed to illustrate the effective application of pneumatic actuation within automation and robotic contexts.

2 Compressed-air-driven autonomous vehicle using PAMs

Autonomous mobile vehicles represent a rapidly advancing interdisciplinary field, integrating mechanical, electronic, and software engineering disciplines to address the increasing global demand for efficient, safe, and sustainable transportation solutions. These vehicles operate without human intervention, utilizing sophisticated sensor arrays, advanced control algorithms, and artificial intelligence to navigate complex and dynamic environments. The spectrum of autonomy ranges from ba-

Željko Šitum, prof. dr. sc. / full professor,
University of Zagreb, Faculty of Mechanical
Engineering and Naval Architecture;
Filip Čavić, Vid Pavlović, Lovro Zoričić, Ante
Ivanković, Bernarda Galić and Antonio
Varović are students at the University of Zagreb,
Faculty of Mechanical Engineering and Naval
Architecture



© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-5.08>

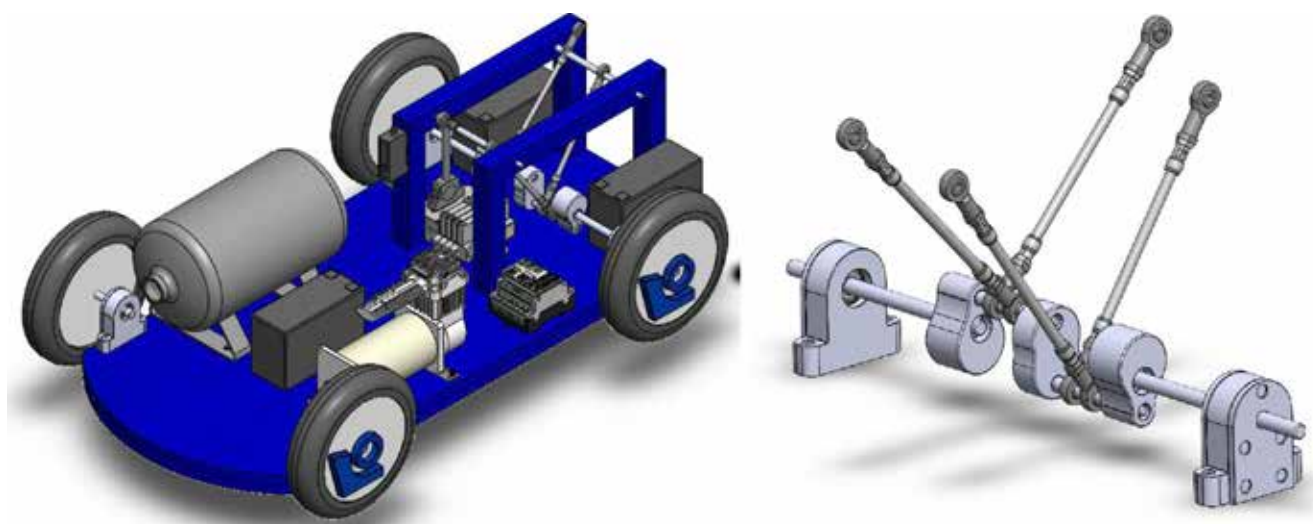


Figure 1 : CAD model of the vehicle and V-configuration crankshaft

sic driver assistance systems to full self-governance, with applications spanning logistics, passenger transport, domestic support, and the exploration of hazardous or remote areas such as underwater or extraterrestrial environments. Despite notable progress, several challenges persist, including high system costs, limited reliability of navigation in unfamiliar surroundings, complexity of system integration, susceptibility to sensor or algorithmic failures, and significant energy consumption associated with advanced onboard technologies. In this project, a hybrid propulsion system integrating both electric and pneumatic power sources was developed to improve overall energy efficiency. The system incorporates Festo block valves and pneumatic artificial muscles actuated by an electric compressor. Compressed air is stored within a 5-liter steel tank, with flow regulated according to actuator demands (*Figure 1*). Control functions are implemented using a Controllino MAXI Power PLC, based on the ATmega2560 microcontroller, powered

by a sealed lead-acid battery (Yuasa NP7-12, 12 V, 7 Ah capacity) equipped with integrated protection circuitry. Pressure sensors and a relay ensure safe operation of the compressor. This hybrid configuration presents an innovative approach to propulsion systems for autonomous platforms, with the integration of renewable energy sources.

The mechanical subsystem was fabricated through a combination of 3D printing and conventional machining techniques. Preliminary testing employed a radial-drive configuration consisting of three pneumatic muscles arranged at 120° intervals around a crankshaft, which demonstrated limited motion due to insufficient contraction length and geometric constraints. The final design adopts a V-shaped arrangement featuring four pneumatic muscles (two per crank arm, oriented 180° apart), enabling complete crankshaft rotation via sequential muscle activation. The frame was constructed from wood to simplify manufacturing and reduce overall weight.



Figure 2 : Autonomous vehicle actuated by PAMs

Source: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:9221> [6]

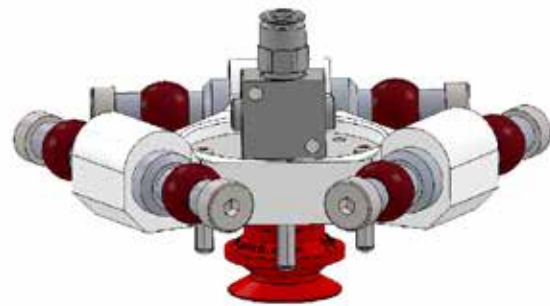
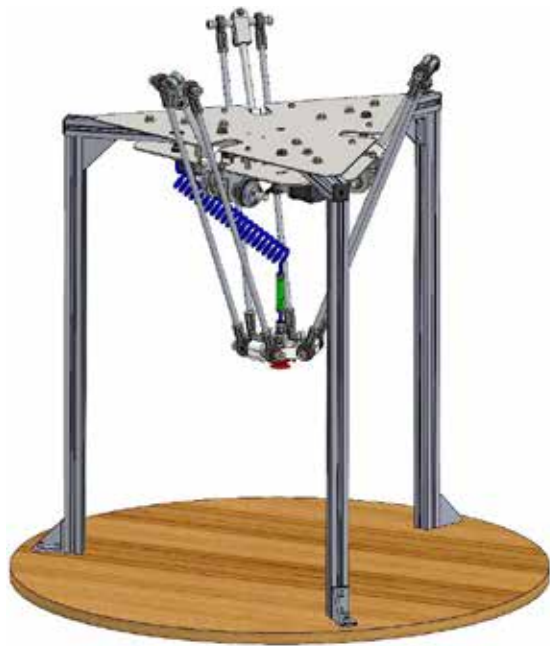


Figure 3 : CAD model of the delta robot structure and robot gripper with vacuum ejector

The crankshaft assembly includes flywheels, custom-designed 3D-printed bearing housings, and wheel rims, complemented by steel half-axes, M6 threaded rods, and standard solid tires secured with conventional screws. The fully assembled vehicle is depicted in *Figure 2*.

factured by Camozzi, controls the vacuum ejector (PIAB piINLINE MICRO Ti). The gripper is secured with alignment pins. A Python-based GUI allows .txt-based program execution. Experimental tests under a 0.56 kg load confirmed repeatable performance, with torques remaining below 0.5 Nm and consistent vacuum grip across all trajectories.

3 Robotic manipulators with pneumatic drive

3.1 Delta robot with a vacuum gripper

This project presents the design and realization of a delta robot prototype optimized for high-speed pick-and-place tasks (*Figure 3*). The robot employs a parallel kinematic architecture comprising three independently actuated arms connected to a shared end-effector, enabling low inertia and rapid responsiveness. The kinematic model incorporates analytical inverse kinematics and numerically computed forward kinematics. Workspace evaluation is performed through Matlab simulations by iterating over actuator angles. Dynamic modeling, based on virtual work principles and Jacobian matrices, estimates actuator torques for specific trajectories. The robot is built using aluminium profiles and steel plates, with stepper motors (Nema 17HS19) driving the joints via 1.76:1 belt transmission (*Figure 4*). Bearings support the shafts, and adjustable motor mounts ensure proper belt tension. The ESP32 microcontroller, paired with DRV8825 drivers, controls motion, while limit switches handle homing. The system supports joint-space and Cartesian motion profiles. Motion commands are received via a serial interface, with real-time joint limit and collision monitoring. A 3/2 electro-pneumatic valve, manu-

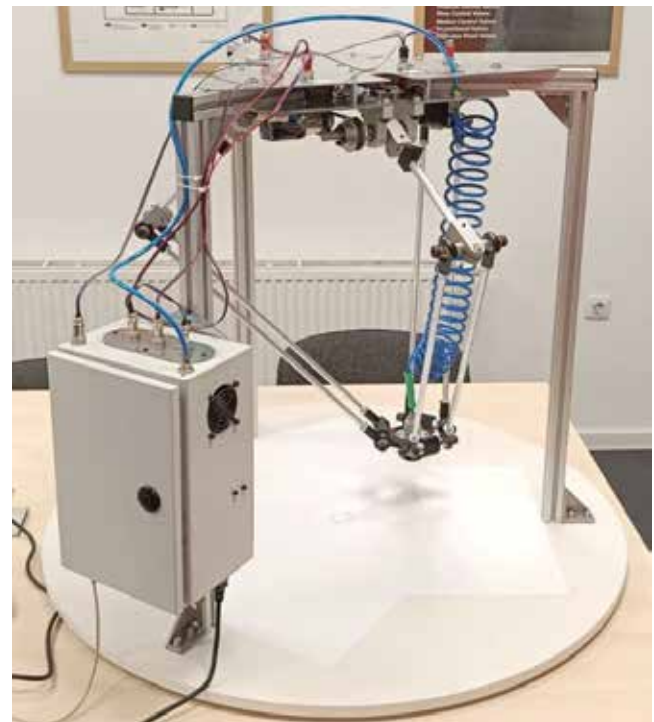


Figure 4 : Assembled delta robot with frame, end-effector, and control interfaces

Source: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:11268> [7]

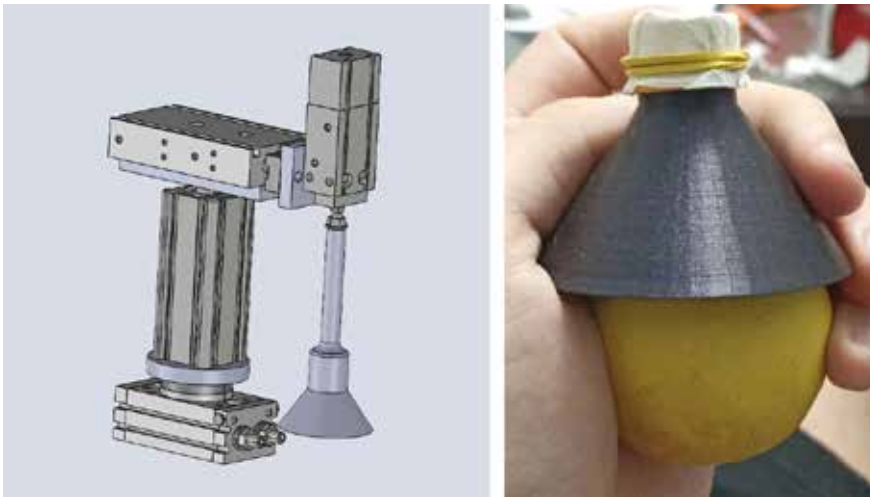


Figure 5 : CAD model of the pneumatic robotic manipulator and the adaptive gripper

3.2 Pneumatic robotic manipulator with flexible gripper

This section describes the development of a pneumatic robotic manipulator featuring three degrees of freedom and an adaptive soft gripper, designed for repetitive handling of irregularly shaped objects. The design integrates the compliance characteristic of soft robotics with the robustness of pneumatic actuation. The manipulator adopts an RTT (Rotational-Translational-Translational) configuration, comprising one rotary and two linear actuators (Figure 5). Rotational movement is provided

ed by the SMC MSQB10A actuator, offering up to 190° of rotation via a rack-and-pinion mechanism. Translational motions are achieved through two pneumatic cylinders: the SMC CQ2Z32 for horizontal displacement and the SMC CXSM20 for vertical positioning, the latter also supporting the gripper's weight. The gripper functions on the granular jamming principle, utilizing a latex balloon filled with ground coffee that conforms to the object's shape under compression. Upon applying a vacuum inside the balloon, the particles lock together, creating a rigid structure capable of securely grasping the object. The vacuum is generated by an SMC ZH10B-06-06 ejector utilizing the Venturi effect, with actuation control provided by an SMC ZCDUKC20-10D vacuum cylinder. To prevent contamination, a coffee filter is placed inside the balloon. The gripper housing, including the flange and funnel, is 3D printed to reduce weight and facilitate integration. Power is supplied via a KSE 06024N AC/DC converter, delivering stabilized 24 V DC to the control system. Each actuator is controlled by compact SMC VQD1121 solenoid valves arranged in a 4/2 configuration, with flow control check valves employed to regulate actuator speed and optimize airflow efficiency.



Figure 6 : Final assembly of the manipulator with the flexible gripper

Source: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:9628> [8]

The system is controlled by a Controllino MINI PLC, programmed via the Arduino IDE. The PLC executes real-time logic for actuator sequencing and gripper control using digital I/O. The resulting prototype combines mechanical, pneumatic, and electronic elements into a compact, modular system suited for reliable manipulation and ease of adaptation for various applications (Figure 6).

3.3 Pneumatic manipulator for obstacle avoidance on conveyor belt

This section presents an experimental system designed to demonstrate obstacle detection and real-time response using a pneumatic manipulator (Figure 7). The primary function of the system is

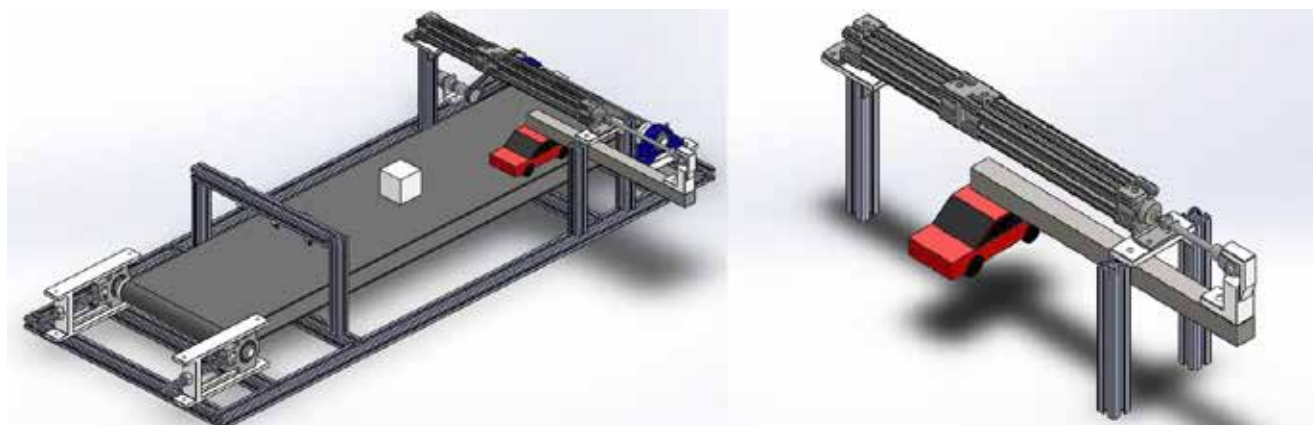


Figure 7 : CAD model of the manipulator for obstacle avoidance

to detect obstacles placed by a user on a conveyor belt and reposition a small cart via pneumatic actuation to prevent collisions. By integrating mechanical design, sensor input, and control logic, the system forms a compact prototype suitable for simulating automated obstacle avoidance scenarios, such as those encountered in road transport systems. The system consists of two main components: a conveyor belt transport mechanism and a pneumatic manipulator. Objects are conveyed along the belt and detected by infrared (IR) sensors. When an obstacle is identified, the manipulator, powered by a dual-stroke pneumatic cylinder, repositions the cart to a predefined lane. The manipulator enables movement to three discrete positions (0 mm, 100 mm, and 200 mm), allowing dynamic path adjustment.

Structurally, the system is built using aluminum profiles for ease of assembly and modularity. The

conveyor consists of a PVC belt looped around two shafts, with custom 3D-printed components ensuring alignment and tensioning. The transport mechanism is powered by a DSMP320-12-0014-BF DC motor equipped with an integrated planetary gearbox, connected to the conveyor via a toothed belt and flexible coupling. The cart and actuator linkage are constructed from steel tubing and 3D-printed brackets, combining structural integrity with design flexibility.

The pneumatic system includes a SMC CP96S-DL32-100C-XC11 dual-stroke actuator, controlled by two 5/2 solenoid valves (SMC SY3120), mounted on a valve manifold. A throttle check valve ensures smooth motion. The control logic is implemented using a Controllino MINI PLC, which processes input from three HW-201 IR sensors. Each sensor is equipped with an LM393 voltage comparator and a range-adjustable potentiometer. When an object is detected, the PLC activates the appropriate valve combination to shift the cart. An electronic position sensor (SMC D-M9BL) confirms actuator status to ensure reliable execution. This prototype demonstrates a modular, sensor-driven system for automated object handling and path correction. Due to its compact design and educational value, it is well-suited for instructional purposes or as a foundation for further development into more advanced sorting or robotic automation applications (Figure 8).



Figure 8 : Pneumatic manipulator for obstacle avoidance on conveyor belt

Source: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:9736> [9]

4 Automation systems with pneumatic drive for industrial tasks

4.1 Screw spindle mechanism with pneumatic drive

This section presents the design and operation of a pneumatic spindle mechanism based on a ball screw drive, developed for experimental linear positioning tasks (Figure 9). In contrast to con-

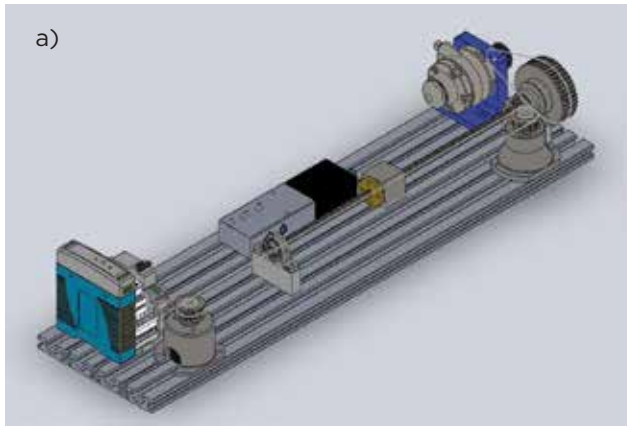


Figure 9 :

a) CAD model of the pneumatic spindle drive mechanism with ball screw,

b) GAST pneumatic motor (model 1AM-NRV-63A)

ventional systems driven by electric motors, this configuration employs a pneumatic vane motor, offering advantages such as a high power-to-weight ratio, thermal robustness, and simplified maintenance. The system serves as a test platform for investigating the potential of pneumatic control in precision mechatronic applications. The mechanical structure is built on an aluminum profile frame, ensuring both stability and modularity. At its core is a 400 mm Tr8 trapezoidal leadscrew, supported at both ends by bearings.

Rotary motion is generated by a GAST 1AM-NRV-63A pneumatic vane motor, coupled to the spindle via a belt and pulley transmission with a gear reduction ratio greater than 1, thereby enhancing torque output. The motor is compact and reversible, converting compressed air into continuous rotary motion through internal rotor vanes. Linear motion is produced by the translation of the nut along the leadscrew as it rotates. To provide accurate position feedback, a rotary encoder is connected to the spindle nut via a secondary belt drive, enabling direct measurement of linear displacement. The pneumatic motor is controlled by a Festo MPYE-5-1/8-HF-010-B proportional valve,

which modulates airflow based on control input. An additional on/off valve (SMC SY7420) ensures safe engagement and shutdown of the pneumatic circuit. The complete pneumatic screw spindle mechanism is illustrated in *Figure 10*.

The control system is implemented on a Controllino MAXI Automation PLC, which supports both analog output for valve control and digital inputs for processing encoder signals. The encoder provides pulse signals proportional to spindle nut displacement, with dual output channels enabling direction detection. A PID control algorithm minimizes tracking error between the reference input and actual position, enabling real-time adjustments. Various motion profiles, including step, sinusoidal, and random inputs, were tested. The system demonstrated fast response, stable positioning, and reliable tracking performance, particularly under step and sinusoidal excitation, confirming its suitability for educational use and prototyping in the field of linear actuation and pneumatic control.

4.2 Automated pneumatic machine designed to sort beans



Figure 10 : Screw spindle mechanism with pneumatic drive

Source: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:9627> [10]

This section presents an automated pneumatic system for sorting and removing defective bean grains to ensure consistent product quality. The system integrates mechanical, electronic, and software components to enable precise classification and reliable ejection of non-compliant grains. At the core of the system is a transport mechanism developed through iterative 3D modeling, featuring 3D-printed PLA rollers driven by a DC motor. The rollers are stabilized using a threaded rod, bearings, and a belt-based tensioning system (*Figure 11*).

A wooden hopper, with a capacity of up to 14 kg of beans, also serves to shield the optical inspection chamber from ambient light interference. A dosing unit with four cylindrical channels, driven by a Nema 17 stepper motor, dispenses beans in pulses, forming four aligned rows on the conveyor for in-



Figure 11 : CAD model of the sorting system and examples of defective bean grains



Figure 12 : Final fabricated prototype of the bean grain sorting machine

Source: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:10352> [11]

spection. An ultrasonic sensor monitors grain levels to ensure continuous flow.

The sensing subsystem consists of an infrared sensor, an incremental rotary encoder (KY-040), and an Arducam CMOS AR0134 camera equipped with a global shutter and 12-bit raw output, enabling high-resolution imaging suitable for real-time defect detection.

Conveyor motion is transmitted via a toothed belt with a 2:1 reduction ratio to optimize speed and control. System logic is controlled by a Controllino Maxi PLC programmed via Arduino IDE. Faulty grains identified through image processing are removed by a high-speed Matrix pneumatic valve, ensuring precise and timely ejection. This modular prototype provides an efficient and adaptable platform for automated agricultural product sorting, demonstrating a practical application of pneumatic actuation and embedded vision systems in quality control (*Figure 12*).

5 Conclusion

This study has presented six pneumatically actuated mechatronic systems developed as educational platforms to enhance hands-on learning in mechanical engineering curricula. Through the integration of mechanical design, control systems, and pneumatic technologies, these prototypes effectively illustrate fundamental concepts in automation, fluid dynamics, and sensor-based control. Ranging from bio-inspired mobile robots to industrial automation models, the systems showcase the adaptability and effectiveness of pneumatic actuation across diverse applications. By bridging theoretical instruction with practical implementation, the work aligns with contemporary pedagogical approaches such as project-based learning and supports the competencies required by Industry 4.0. Overall, the work underscores the value of pneumatic systems in modern engineering education and highlight their potential for scalable application in real-world industrial environments.

Sources

- [1] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2024). The Integration of Advanced Mechatronic Systems into Industry 4.0 for Smart Manufacturing. *Sustainability*, 16(19), 8504. <https://doi.org/10.3390/su16198504>.
- [2] Zhao, S., Nguyen, C. C., Hoang, T. T., Do, T. N., & Phan, H.-P. (2023). Transparent pneumatic tactile sensors for soft biomedical robotics. *Sensors*, 23(12), 5671. <https://doi.org/10.3390/s23125671>.
- [3] Kalita, G. R., Faruque, R. K., Saha, S., & Ghosh, S. K. (2023). A Review on the Development of Pneumatic Artificial Muscle Actuators: Force Model and Application. *Actuators*, 11(10), 288. <https://doi.org/10.3390/act11100288>.
- [4] Even, S., Zheng, T., Lin, H., & Ozkan-Aydin, Y. (2023). Stable real-time feedback control of

- a pneumatic soft robot. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). <https://doi.org/10.1109/IROS55552.2023.10342212>.
- [5] Durocher, A., & Morin, P. (2019). Project-based learning in mechatronics education using low-cost pneumatic systems. *Int. Journal of Mechanical Engineering Education*, 47(2), 126–140.
- [6] Čavić, F. (2023). Mobile vehicle with pneumatic muscle engine. Undergraduate thesis (in Croatian), University of Zagreb, Fac. of Mech. Eng. and Naval Arch.
- [7] Pavlović, V. (2024). Design and manufacturing of delta robot with a vacuum gripper. Master's thesis, (in Croatian), University of Zagreb, Fac. of Mech. Eng. and Naval Arch.
- [8] Zoričić, L. (2023). Pneumatic robotic manipulator with flexible gripper. Undergraduate thesis (in Croatian), University of Zagreb, Fac. of Mech. Eng. and Naval Arch.
- [9] Ivanković, A. (2023). Pneumatic manipulator for obstacle avoidance on conveyor belt. Undergrad. thesis (in Croatian), University of Zagreb, Fac. of Mech. Eng. and Naval Arch.
- [10] Galić, B. (2023). Screw spindle with pneumatic drive. Undergraduate thesis (in Croatian), University of Zagreb, Fac. of Mech. Eng. and Naval Arch.
- [11] Varović, A. (2024). Machine for separating bad beans. Undergraduate thesis (in Croatian), University of Zagreb, Fac. of Mech. Eng. and Naval Arch.

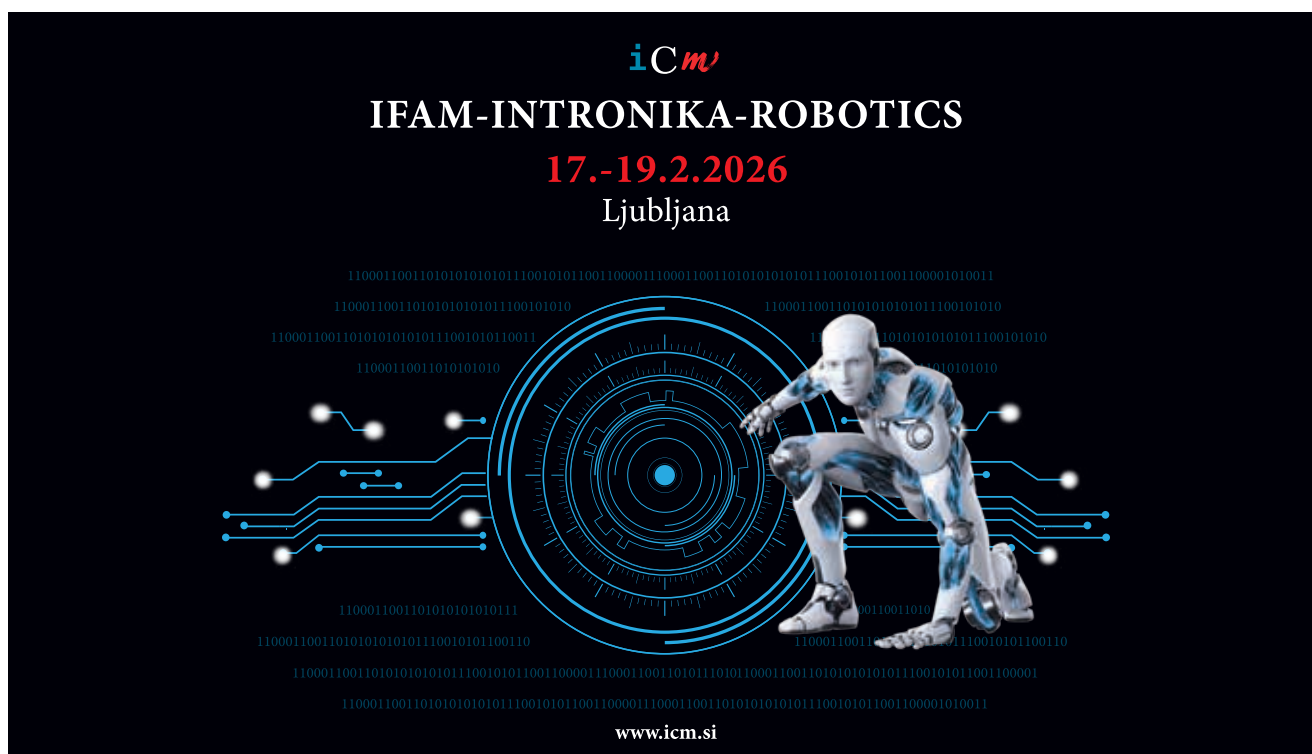
Uporabniško usmerjeni mehatronski sistemi s pnevmatičnimi aktuatorji

Povzetek:

Članek predstavlja šest novih mehatronskih sistemov, ki jih poganjajo pnevmatski aktuatorji, razvitih kot učni modeli, namenjeni izboljšanju izobraževanja študentov strojništva na področju pnevmatskih energetskih sistemov in avtomatskega krmiljenja. Začetni predstavljeni sistem je prototip avtonomnega vozila, ki ga v celoti poganja stisnjen zrak in za pogon uporablja pnevmatske umetne mišice. Nato članek predstavlja tri pnevmatsko krmiljene robotske manipulatorje: delta robota, opremljenega z vakuumskim prijemalom, robotsko roko s fleksibilnim prijemalom in manipulator na osnovi tekočega traku, ki se lahko izogiba oviram. Zadnji del se osredotoča na dva sistema s potencialno industrijsko uporabo: pnevmatski vijačni pogonski mehanizem in avtomatiziran pnevmatski sortirni stroj, zasnovan za razvrščanje zrn. Teh šest sistemov skupaj ponuja praktične demonstracije pnevmatske tehnologije v avtomatizaciji in zagotavlja učinkovite praktične učne platforme za izobraževanje na področju mehatronike in krmilnega inženirstva.

Ključne besede:

mehatronika, pnevmatski aktuatorji, robotski izobraževalni manipulatorji, avtomatsko krmiljenje, industrijska avtomatizacija



UPORABA AVTONOMNO VODENEGA VOZILA ZA OSKRBO ROBOTSKIH CELIC Z IZDELKI

Maria Yakimovska, Vinko Drev

Izvleček:

Prispevek prikazuje uporabo avtonomno vodenega vozila (AGV, angl. Automated Guided Vehicle) za oskrbo robotskih celic z izdelki v podjetju LTH Castings d. o. o., ki že vrsto let uspešno širi svoje poslovanje ter pri tem velik poudarek namenja vlaganjem v avtomatizacijo proizvodnih procesov. Čeprav je stopnja avtomatizacije že danes visoka, so nadaljnje investicije na tem področju nujne, saj hiter razvoj industrije zahteva stalno nadgrajevanje in optimizacijo. Znotraj oddelka Avtomatizacija procesov, ki se nahaja v obratu Ljubljana, smo v zadnjih letih postavili in zagnali trenutno največjo skoraj popolnoma avtomatizirano linijo. Ta vključuje štiri robotske celice z osmimi obdelovalnimi stroji ter paletno linijo, ki skrbi za distribucijo izdelkov od robotskih celic, skozi pralni sistem do čiste sobe za nadaljnjo obdelavo. Do pred kratkim so bile robotske celice oskrbovane ročno s pomočjo ročnih viličarjev, danes ta naloga poteka avtomatizirano – z uvedbo avtonomno vodenega vozila.

AGV-sistem omogoča učinkovit in samodejen transport materiala med vmesnim skladiščem in robotskimi celicami, kar zmanjšuje potrebo po ročnih posegih, povečuje produktivnost in hkrati izboljšuje varnost v proizvodnem okolju. Njegova glavna naloga je prevoz namenskih zabojnikov z različnimi tipi izdelkov iz skladišča do robotskih celic ter vračanje praznih zabojnikov nazaj na namenska mesta v skladišču. Na ta način dosegamo visoko raven avtonomije in zagotavljamo nemoten potek proizvodnih procesov. V prispevku bodo podrobneje predstavljeni celoten potek implementacije ter ključne prednosti in omejitve uvedenega sistema.

Ključne besede:

avtonomno vodeno vozilo (AGV), avtomatizacija proizvodnje, robotske celice, optimizacija proizvodnje, industrijska avtomatizacija, notranja logistika

1 Uvod

V industriji ima avtomatizirana oskrba proizvodnih celic pomembno vlogo pri povečanju produktivnosti, zmanjševanju potrebe po ročnem delu in izboljšanju učinkovitosti celotnega procesa. V našem podjetju avtonomno vodena vozila (AGV) uporabljamo že vrsto let pri različnih nalogah v proizvodnji. Do sedaj so bila v uporabi predvsem manjša avtonomna vozila, namenjena premikanju manjših vozičkov med posameznimi celicami v livarni. Z novim projektom smo prvič uvedli večje avtonomno vozilo, namenjeno transportu zabojnikov za oskrbo robotskih celic.

Glavni cilj projekta je bil vzpostaviti zanesljiv in nemoten pretok materiala, zmanjšati potrebo po človeškem posredovanju ter povečati fleksibilnost in prilagodljivost logističnega procesa.

Sistem deluje na osnovi AGV-ja, ki na podlagi informacij o zalogah in potrebah proizvodnje izvaja transport zabojnikov do robotskih celic. Vozilo je povezano z glavnim krmilnikom proizvodne linije, ki komunicira tudi z vsemi ostalimi krmilniki na posameznih celicah, tako da AGV ve, kdaj in kam se mora premakniti.

2 Opis sistema

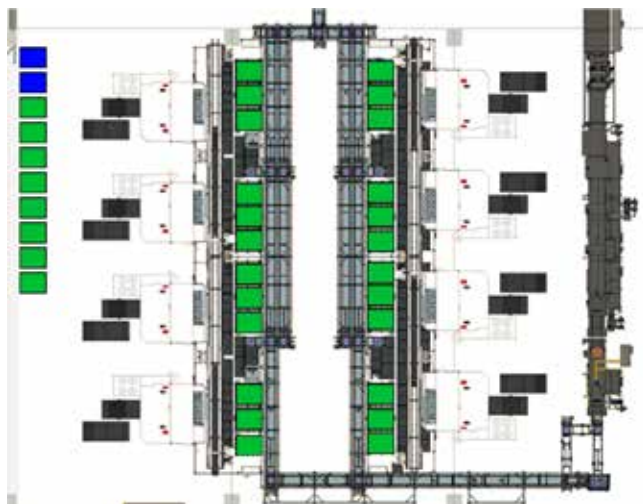
Proizvodna linija (*slika 1*), ki jo bomo oskrbovali z avtonomno vodenim vozilom (AGV), je zasnovana iz štirih robotskih celic, pri čemer vsaka celica vključuje dva obdelovalna stroja SW BA06. Skupno torej linija obsega osem obdelovalnih strojev, razporejenih tako, da zagotavljajo optimalen potek proizvodnje. Vsaka robotska celica je razdeljena na

Maria Yakimovska, univ. dipl. inž., Vinko Drev, univ. dipl. inž., oba LTH Castings d. o. o., Škofja Loka



© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-5.09>



Slika 1 : Model linije in robotskih celic z označenimi pobiralnimi in odlagalnimi mesti

dve postaji, pri čemer ima vsaka postaja tri pobiralno-odlagalna mesta za zabojnike.

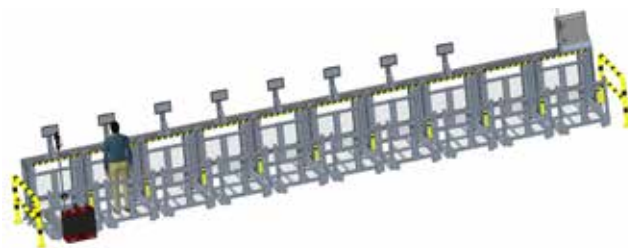
Pobiralno-odlagalna mesta imajo vgrajena vodila, ki so na začetku malo bolj odprta (razširjena), kar omogoča večjo toleranco pri odlaganju zabojnikov v celico.

2.1 Vmesno skladišče zabojnikov

Za zagotovitev nemotenega pretoka materiala je za vsako postajo v istem prostoru vzpostavljeno vmesno skladišče (slika 2). V njem je za vsako postajo rezervirano eno mesto za polne zabojnike, ki jih AGV prevaža iz vmesnega skladišča do posamezne celice. Ker linijo sestavljajo štiri robotske celice in vsaka vsebuje dve postaji, to pomeni skupaj osem postaj in s tem osem mest za polne zabojnike v vmesnem skladišču (osem zelenih kvadratov na levi strani na sliki 1).

Poleg tega sta v vmesnem skladišču predvideni še dve dodatni mesti za prazne zabojnike (dva modra kvadrata na levi strani na sliki 1), ki jih AGV vrača iz celic nazaj v vmesnem skladišču po zaključeni obdelovalni operaciji. Nad vsakim skladiščnim mestom za polne zabojnike je nameščen prikazovalnik (uporabniški grafični vmesnik), ki operaterjem prikazuje ključne informacije o stanju posameznega zalogovnika in pripadajočih robotskih celic.

Za skladiščna mesta, namenjena praznim zabojnikom, smo dodali opozorilni sistem v obliki zvočne sirene. Ta se aktivira v primeru, ko sta obe mesti zasedeni, kar pomeni, da prazni zabojniki še niso bili odstranjeni in prostor za nove še ni na voljo. V takšnem primeru AGV ne more odložiti praznega zabojnika, kar lahko povzroči zastoj v oskrbi ro-



Slika 2 : Model vmesnega skladišča

botskih celic, zato opozorilo omogoča pravočasno ukrepanje.

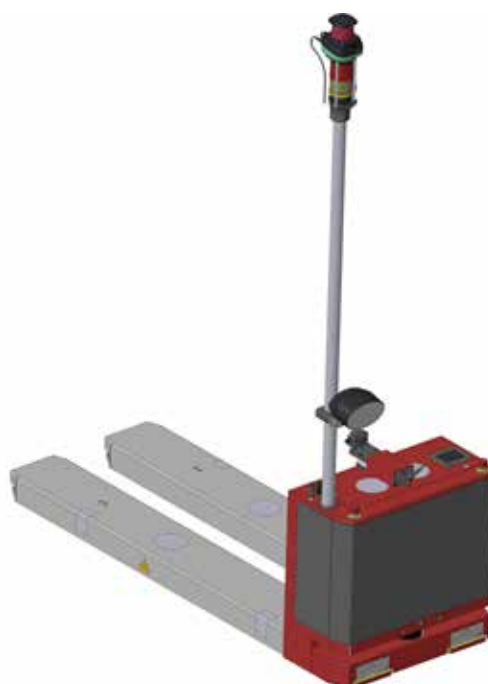
Tako zasnovan sistem zagotavlja učinkovito in avtomatizirano oskrbovanje proizvodnih celic, pri čemer AGV zagotavlja hitro in natančno dostavo zabojnikov med skladiščem in robotskimi celicami.

3 Uporabljena oprema

3.1 AGV

Jedro avtomatiziranega sistema je paletni AGV G130 (slika 3) proizvajalca Melkus Mechatronics. Vozilo uporablja lasersko navigacijo na osnovi tehnologije SLAM, ki omogoča delovanje brez potrebe po dodatni infrastrukturi, kar poveča prilagodljivost in fleksibilnost pri načrtovanju poti znotraj proizvodnega okolja.

AGV se premika vsesmerno, kar zagotavlja visoko manevrsko sposobnost tudi v omejenih prostorih.



Slika 3 : Avtonomno vodeno vozilo (AGV)

Gre za nizkodvižni viličar, ki omogoča avtonomno nalaganje palet ter zagotavlja učinkovito manipulacijo z zabojniki v proizvodnih celicah. Največja višina dviga vilic znaša *130 mm*, kar povsem ustreza zahtevam našega sistema glede na zasnovo in višino transportnih zabojnikov.

3.2 Industrijski računalnik

Za nadzor in izvajanje nalog AGV-ja je uporabljen industrijski računalnik *SHUTTLE BOX-PC BPCAL02-i5*, na katerem je nameščena programska oprema, ki omogoča definiranje mape proizvodnega okolja, prevzemnih in odlagalnih mest ter različnih vrst nalog, kot so: pobiranje zabojnika, odlaganje, premik na določeno lokacijo ali premik na polnilno postajo.

3.3 Siemensov krmilnik

V sistem je vključen Siemensov krmilnik, ki komunicira z AGV-jem in mu glede na stanje v robotskih celicah dodeljuje naloge. Krmilnik je povezan z glavnim krmilnikom linije, ki preko vmesnikov za izmenjavo podatkov pridobiva informacije iz vseh robotskih celic. Tako je omogočen celovit nadzor nad celotnim proizvodnim procesom.

Na podlagi združenih podatkov o stanju linije in trenutnih potrebah posameznih celic se naloge za AGV sprožijo samodejno. Krmilnik nato poskrbi, da se vozilo premakne na ustrezno lokacijo – bodisi za dostavo polnega zabojnika bodisi za odvzem praznega zabojnika. Na ta način sta zagotovljeni optimalna razporeditev nalog ter zmanjšana možnost zastojev v proizvodnji.

3.4 Uporabniški grafični vmesniki

Kot podporo operaterjem uporabljamo osem prikazovalnikov (*Raspberry Pi touchscreen*), ki služijo kot uporabniški grafični vmesniki. Ti so nameščeni nad vmesnim skladiščem – vsak je namenjen eni postaji. Na teh vmesnikih (*slika 4*) so operaterjem na voljo ključni podatki, kot so:

- ▶ trenutno aktivna koda izdelka, ki se obdeluje na posameznem obdelovalnem stroju,
- ▶ način delovanja celice (avtomatski ali ročni način),
- ▶ status zahteve s strani celice (če je bila sprožena zahteva za zabojnik),
- ▶ način oskrbovanja celice (oskrba z AGV-jem ali ročnim viličarjem),
- ▶ informacija o prisotnosti zabojnika na posameznem mestu v vmesnem skladišču.

Prisotnost zabojnika preverjamo s pomočjo senzorjev, ki so nameščeni na vsako skladiščno mesto. V primeru, da senzor na določenem mestu ne zazna zabojnika, se naloga za AGV ne sproži, kar preprečuje napačne premike oziroma vožnje brez zaboj-



Slika 4 : Primer prikazovalnika nad vmesnim skladiščem

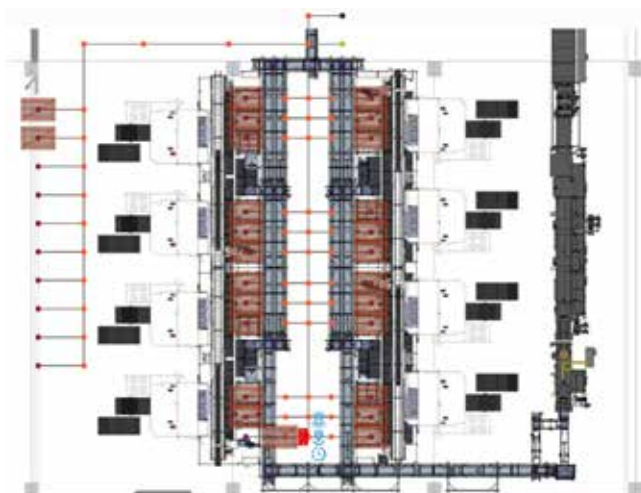
nika. Vsi podatki, razen kode izdelka, so logičnega tipa (*angl. bool*) in jih beremo neposredno iz krmilnika za linijo. Dodatno na vsakem prikazovalniku v spodnjem levem kotu prikazujemo tudi morebitne aktivne alarme, kar omogoča operaterjem hiter pregled nad stanjem sistema ter pravočasno ukrepanje v primeru napak ali morebitnih zastojev.

4 Implementacija sistema

Uvedba avtomatiziranega oskrbovanja robotskih celic z AGV-ja je potekala v več fazah, ki so vključevale najprej testiranje AGV-ja v delavnici, priprava potrebne opreme, načrtovanje in izdelava konstrukcije za vmesno skladišče, načrtovanje in izdelava elektroopreme, prilagoditev programske opreme ter preizkušanje oz. testiranje celotnega sistema. Večino nalog smo sprva preizkusili v delavnici, kjer



Slika 5 : AGV v proizvodnji



Slika 6 : Simulacija AGV-ja v programskem okolju TCS

smo simulirali pobiranje in odlaganje zabojnikov ter spremljali natančnost gibanja vozila.

Med testiranjem smo se soočili predvsem z izzivi glede natančnosti pri pobiranju in odlaganju zabojnikov. Čeprav je predvidena toleranca pri pozicioniranju znašala $\pm 1\text{ cm}$, smo v praksi pogosto zaznali večja odstopanja, kar je povzročalo težave pri pravilnem pobiranju in odlaganju zabojnikov na predvidena mesta. Za izboljšanje natančnosti smo večkrat izvedli kalibracijo navigacijskega sistema, saj smo ugotovili, da se položaj vozila lahko zaradi manjših premikov ali sprememb v okolju nekoliko spremeni. Z rednim kalibriranjem in prilagajanjem nastavitev smo dosegli boljšo natančnost pri pozicioniranju AGV-ja, kar je bistveno izboljšalo uspešnost pobiranja in odlaganja zabojnikov.

Po uspešno izvedenih kalibracijah in dodatnih prilagoditvah algoritmov smo nadaljevali s testiranjem v dejanskem proizvodnem okolju (slika 5). AGV se je po uvedbi izkazal za zanesljivega in učinkovitega pri oskrbovanju robotskih celic, pri čemer je dosegel zadostno natančnost pri premikih in nalogah, kar je omogočilo nemoten avtomatiziran proces proizvodnje.

Prostorske prilagoditve v proizvodnji so vključevale označevanje poti, definiranje točk za pobiranje in odlaganje zabojnikov ter določitev pozicij vmesnega skladišča (slika 6). Za zagotavljanje varnosti v proizvodnem okolju smo uvedli dodatne talne oznake, varnostne cone in signalizacijo. Po prilagoditvi prostora smo nadaljevali z integracijo AGV-ja v obstoječi proizvodni sistem.

Programska oprema omogoča tudi dinamično dodeljevanje nalog glede na stanje v celicah. Sistem je konfiguriran tako, da se naloge izvajajo v skladu s potrebami linije, kar pomeni, da krmilnik AGV-ju sproži nalogo šele, ko prejme povratno informacijo o stanju zalog iz celice.

5 Postopek dodeljevanja nalog

Dodeljevanje nalog AGV-ju temelji na vnaprej določenih pogojih, ki zagotavljajo varno in zanesljivo delovanje v proizvodnem okolju. Pred vsako nalogo sistem najprej preveri stanje baterije AGV-ja. V primeru, da je stanje baterije nižje od 10 %, AGV naloge ne prevzame, temveč se nemudoma usmeri na polnilno postajo. Če je stanje baterije med 10 % in 20 %, sistem najprej preveri, ali obstaja aktivna naloga. Če naloge ni, gre AGV prav tako na polnilec. V vseh ostalih primerih, ko je stanje baterije ustrezno ali je naloga nujna, AGV nadaljuje z izvajanjem naloge.

Pri dodeljevanju nalog ločimo dva glavna postopka: *prevzem praznega zabojnika iz celice* in *dostavo polnega zabojnika v celico*.

5.1 Prevzem praznega zabojnika iz celice

Ko AGV prejme nalogo za prevzem praznega zabojnika iz celice, ga najprej usmerimo na lokacijo pred celico (slika 7). Ko se nahaja na poziciji, zaradi varnostnih zahtev začasno izklopimo varnostni skener, nameščen v notranjosti celice. AGV se nato zapelje v celico, pobere prazen zabojnik in se premakne nazaj pred skener, kjer čaka, da se ta ponovno vklopi. Šele po ponovni aktivaciji skenerja nadaljuje pot do vmesnega skladišča, kjer zabojnik odloži na za to določeno prazno mesto.



Slika 7 : Primer prevzema zabojnika iz celice

5.2 Prenos polnega zabojnika v celico

V primeru dostave polnega zabojnika sistem najprej preveri, ali je na pripadajočem skladiščnem mestu že pripravljen poln zabojnik za dostavo. Če je, AGV prejme nalogo in se odpravi do skladišča, kjer pobere zabojnik. Nato se premakne pred celico, kjer počaka pred varnostnim skenerjem. Ko izklopimo skener, AGV nadaljuje vožnjo v celico, kjer odloži zabojnik. Po končani nalogi se vozilo vrne pred skener in počaka na njegov ponovni vklop. Po izvedeni nalogi AGV čaka na morebitno novo dodelitev. Če v roku 20 sekund ne prejme nove naloge, sistem preveri stanje baterije. Če je ta pod 80 %, se AGV usmeri na polnilno postajo, v nasprotnem primeru na parkirno mesto, kjer čaka na naslednjo aktivacijo.

Po uspešni integraciji in konfiguraciji smo izvedli serijo testov za preverjanje delovanja sistema. Najprej smo uvedli delovanje sistema samo na eni celici v eni izmeni, kjer smo potem sistem razširili na vseh ostalih celicah v eni izmeni ter na koncu še v vseh treh izmenah.

Preizkusi so vključevali simulacijo različnih scenarijev oskrbe celic, spremljanje natančnosti premikov in odzivnosti sistema na spremembe v proizvodnji. Posebej smo preverjali pravilnost zaznavanja zalog, pravočasno pošiljanje ukazov AGV-ju ter natančnost pri pobiranju in odlaganju zabojnikov.

6 Sklep

Ker gre za projekt, ki smo ga prvič uvedli v takem obsegu, smo se med implementacijo soočili z več

izzivi, predvsem tehnične narave. Ena od pogostejših težav je bila povezana s pozicioniranjem AGV-ja, kjer so se pojavljala odstopanja pri natančnosti ustavljanja na določenih točkah, kar je vplivalo na zanesljivost pobiranja in odlaganja zabojnikov. Dodatno smo imeli težave pri vzpostavljanju kontakta s polnilno postajo, kar je v teh primerih povzročalo težave pri samodejnem polnjenju vozila.

Z uvedbo AGV-ja smo dosegli krajši čas oskrbe, saj ni več potrebnega dodatnega čakanja na razpoložljivost operaterja – AGV nalogo izvede takoj po prejemu ukaza. S tem smo operaterje razbremenili ročnega dela, zmanjšali obseg ročnih posegov ter izboljšali pretočnost linije, kar pred uvedbo ni bilo mogoče.

Za dodatno nadgradnjo bi sistem lahko opremili s kamero za vizualno zaznavanje točnih pozicij, kar bi še izboljšalo natančnost pri delovanju. Prav tako bi vpeljali brezstično (brezkontaktno) polnilno postajo, ki bi poenostavila in pospešila postopek polnjenja brez potrebe po mehanskem priklopu.

Kot nadaljnje korake načrtujemo nadgradnjo sistema z uporabo tehnologije RFID, kjer bo vsak zabojnik opremljen s čipom, AGV pa s čitalcem RFID. Takšna rešitev bi omogočila avtomatsko prepoznavanje zabojnikov in še večjo sledljivost materiala.

Kljub začetnim izzivom se je uvedba sistema izkazala za uspešno, zato že razmišljamo o razširitvi uporabe AGV-jev tudi na druge proizvodne linije – povsod tam, kjer pogoji in procesi omogočajo uvedbo takega sistema. V prihodnosti načrtujemo postopno nadgradnjo in optimizacijo obstoječega sistema z namenom povečanja učinkovitosti in širše uporabe v podjetju.

Use of Automated Guided Vehicle for Supplying Robotic Cells with Products

Abstract:

This paper presents the use of an Automated Guided Vehicle (AGV) for supplying robotic cells with products at LTH Castings d.o.o., a company that has been successfully expanding its business for many years while placing strong emphasis on investments in the automation of the production processes. Although the current level of automation is already high, further investments in this area are essential, as the rapid development of industry requires continuous upgrading and optimization. Within the Process Automation Department, located at the Ljubljana plant, we have in recent years designed and commissioned the company's largest and nearly fully automated production line. This line includes four robotic cells with eight machining centers, as well as pallet conveyor system that ensures the distribution of products from the robotic cells, through the washing system, to the cleanroom for further processing. Until recently, the robotic cells were supplied manually using hand pallet trucks, today, this task has been automated with the introduction of an Automated Guided Vehicle (AGV).

The AGV system enables efficient and fully automated material transport between the intermediate warehouse and the robotic cells, reducing the need for manual intervention, increasing productivity, and at the same time improving safety in the production environment. Its main task is to transport dedicated containers with different product types from the warehouse to the robotic cells and to return empty containers back to their designated storage locations. In this way, a high level of autonomy is achieved, ensuring the uninterrupted flow of the production processes. The paper will present in detail the entire implementation process, as well as the key advantages and limitations of the introduced system.

Keywords:

automated guided vehicle (AGV), production automation, robotic cells, production optimization, industrial automation, internal logistics

Strojne noge iz SUPER-termoplasta

Inovacija v naši ponudbi



Izdelane iz SUPER-termoplasta, polimera najnovejše generacije, z naslednjimi lastnostmi:

- visoka mehanska trdnost, izjemna odpornost na korozijo in kemikalije, odlične toplotne lastnosti;
- nizka masa, za gospodarnejši transport, skladiščenje in manipuliranje;
- stroškovna ugodnost v primerjavi z običajnimi rešitvami;
- različne dolžine, velikosti navojev od M8 do M12;
- največja statična obremenitev od 2700 N pri najmanjših izvedbah do 7000 N pri največjih.



elesa-ganter.si



ELESA + GANTER je internacionalno skupno podjetje, ustanovljeno z namenom ponudbe najširše palete standardnih strojnih elementov za industrijo. Izredno zanesljivi izdelki, edinstvenega dizajna predstavljajo kodeks kakovosti ELESA + GANTER.

elesa-ganter.si   



**DESIGNED
FOR ENGINEERING**

METODOLOŠKI PRISTOP K VEČKRI- TERIJSKI OPTIMIZACIJI ELEKTRIČNIH STROJEV S PRAKTIČNIM PRIMEROM

Mitja Garmut, Martin Petrun

Izvleček:

V prispevku predstavljamo metodološki pristop k večkriterijski optimizaciji električnih strojev, ki vključuje opredelitev problema, izbiro ključnih kazalnikov uspešnosti ter omejitve, določitev prostora možnih rešitev, oblikovanje kriterijskih funkcij, modeliranje in pridobitev rešitev. Na primeru sinhronskega stroja s trajnimi magneti smo prikazali možnost hkratnega povečanja moči in zmanjšanja stroškov glede na referenčno zasnovo. V rezultatih smo prikazali učinkovitost pristopa, ki omogočajo izbiro optimalne zasnove glede na zahteve aplikacije.

Ključne besede:

električni stroj, ključni kazalniki uspešnosti (KPI-ji), večkriterijska optimizacija, Paretova krivulja

1 Uvod

Električni stroji so eden od temeljev sodobne družbe, saj proizvajajo električno energijo in poganjajo gospodinske aparate, električna orodja, električna vozila in industrijsko opremo [1, 2]. V zadnjih letih je bila velika pozornost namenjena sinhronskim strojem s trajnimi magneti (SSTM), ki izstopajo po svoji visoki gostoti moči in učinkovitosti [3]. Zmogljivost električnih strojev se meri s pomočjo ključnih kazalnikov uspešnosti (ang. Key Performance Indicators – KPI), kot so moč, izkoristek, stroški, masa, ... KPI-ji zagotavljajo celovit pregled nad delovanjem stroja in predstavljajo glavno vodilo pri izboljšavah obstoječih zasnov ali pri načrtovanju novih električnih strojev [4].

Da bi dosegli čim boljšo obstoječo zasnovo glede na izbrane KPI-je, je treba izvesti večkriterijsko optimizacijo, kot to prikazujejo [5, 6]. V takšnem postopku moramo obravnavati več kriterijev hkrati, vključevati različne omejitve in z ustrezno izbranimi parametri celovito zajeti prostor možnih rešitev.

Pomembno je zagotoviti povezavo med kriteriji v skladu s KPI-ji in geometrijskimi parametri v obliki kriterijskih funkcij. Najbolj natančen način za izra-

čun KPI-jev predstavlja numerični izračun z metodo končnih elementov (MKE), dopolnjen z različnimi postopki naknadne obdelave pridobljenih podatkov [7, 8]. Takšen pristop je mogoče razširiti tudi z vključitvijo termičnih in mehanskih modelov, kar omogoča večfizikalno oz. večdomensko vrednotenje in s tem celostno analizo električnih strojev [9, 10]. Ker pa je podrobna analiza modela MKE računsko zelo zahtevna, neposredna uporaba takšnih modelov v večkriterijski optimizaciji pogosto ni izvedljiva. Zato se v praksi uporabljajo nadomestni modeli oz. metamodeli, ki na podlagi omejenega števila analiz modela MKE omogočajo hitro oceno KPI-jev v danem prostoru možnih rešitev ter s tem bistveno pohitijo proces optimizacije [5, 11–13].

V nadaljevanju smo sistematično predstavili postopek priprave večkriterijske optimizacije električnih strojev, ki je na koncu ponazorjen s primerom optimizacije SSTM ter analizo pridobljenih rezultatov.

2 Optimizacija

Optimizacija je ključno orodje pri razvoju električnih strojev, saj omogoča doseganje najboljših možnih izkoristkov, moči in drugih ključnih lastnosti stroja [3, 14]. V nadaljevanju predstavljamo osnovne korake za uspešno optimizacijo električnega stroja:

- A. splošna opredelitev optimizacijskega problema,
- B. določitev KPI-jev in omejitev [15],
- C. formulacija optimizacijskega problema [16],
- D. določitev prostora možnih rešitev,
- E. modeliranje in
- F. pridobitev rešitve.

dr. Mitja Garmut, mag. inž. el, **izr. prof. dr. Martin Petrun**, univ. dipl. inž. el., oba Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko



© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-5.10>

Predstavljeni koraki si v splošnem sledijo eden za drugim, vendar se skozi postopek oblikovanja celotnega optimizacijskega problema iterativno nadgrajujejo in izboljšujejo.

2.1 Korak A – opredelitev optimizacijskega problema

V prvem koraku optimizacijskega postopka najprej podamo splošen pregled in jasno opredelimo glavni cilj problema. S tem postavimo trdne temelje za smiselno načrtovanje in učinkovito izvedbo vseh nadaljnjih korakov. Ker je ta korak tesno povezan s specifično naravo posameznega problema, ga moramo v vsakem primeru posebej prilagoditi. V poglavju 3 podrobno predstavimo obravnavani optimizacijski problem, pri čemer se osredotočimo na električni pogon – natančneje na zasnovo SSTM v kombinaciji z vodenjem pogona.

Primarni cilj optimizacije je izboljšati dva ali več KPI-jev, na primer povečati moč stroja in hkrati zmanjšati stroške. V praksi se večkriterijska optimizacija pogosto omeji na dva kriterija. Že pri dveh kriterijih se zahtevnost reševanja problema v primerjavi z enokriterijsko optimizacijo občutno poveča, pri več kot dveh pa eksponentno rasteta računska zahtevnost in čas optimizacije. Sekundarni cilj je oblikovati nabor optimalnih rešitev v obliki t. i. Paretove krivulje, ki prikazuje kompromisne rezultate med izbranimi KPI-ji. Tak pristop daje načrtovalcu strojev večjo fleksibilnost pri odločanju in možnost izbire najbolj primerne zasnove stroja glede na konkretne zahteve aplikacije.

2.2 Korak B – določitev KPI-jev in omejitve

Določitev ustreznih KPI-jev in omejitev je ključnega pomena za uspešno izvedbo optimizacijskega postopka. KPI-ji morajo zajemati tiste lastnosti stroja, ki najbolj odražajo njegovo zmogljivost, učinkovitost, zanesljivost in ekonomsko upravičenost. Pri tem jih je treba jasno definirati in natančno ovrednotiti, tako da celovito opisujejo obnašanje stroja v vseh relevantnih delovnih režimih. V kontekstu optimizacije električnih strojev so med najpogostejše uporabljeni KPI-ji naslednji [17]:

- ▶ m – skupna masa stroja, ki vpliva na skupno težo končnega izdelka,
- ▶ C – strošek uporabljenih materialov stroja, ki določa proizvodne stroške in konkurenčnost na trgu,
- ▶ η – izkoristek pretvorbe energije,
- ▶ P – termično stabilna moč, ki določa največjo termično stabilno izhodno moč,
- ▶ τ_e – povprečni elektromagnetni navor, ki vpliva na zmogljivost stroja pri določeni hitrosti in
- ▶ τ_Δ – valovitost navora, ki povzroča mehanske vibracije, hrup in pospešuje obrabo komponent.

Na drugi strani pa so za učinkovito optimizacijo enako ključne jasno opredeljene omejitve. Brez njih bi bil optimizacijski problem preveč kompleksen in pogosto nerešljiv. Omejitve na eni strani določajo fizikalne, tehnološke ali varnostne meje, znotraj katerih mora rešitev ostati, kar bistveno prispeva k realnosti in uporabnosti dobljenih rezultatov. Hkrati pa je treba že vnaprej ustrezno omejiti obseg problema, da zagotovimo njegovo rešljivost. V praksi to pomeni, da se optimizacija pogosto osredotoči le na izbrane podsisteme – na primer zgolj na električni stroj znotraj celotnega pogona – medtem ko druge fizikalne podsisteme, kot so hlajenje, baterijsko napajanje ali mehanski prenos, obravnavamo kot vnaprej definirane oziroma kot robne pogoje.

2.3 Korak C – formulacija optimizacijskega problema

Ko smo določili KPI-je in omejitve, smo pripravljeni oblikovati optimizacijski problem. Zaradi nasprotujočih si ciljev, kot sta večja moč in nižja cena, smo uporabili pristop večkriterijske optimizacije.

Večkriterijska optimizacija namesto ene funkcije obravnava več funkcij, pri čemer zagotovi množico optimalnih rešitev – t. i. Paretovo krivuljo. Večkriterijsko optimizacijo predstavimo z naslednjo formulacijo, dano z (1)

$$\min_{\mathbf{x}} F_i(\mathbf{x}), i = 1, \dots, N_F$$

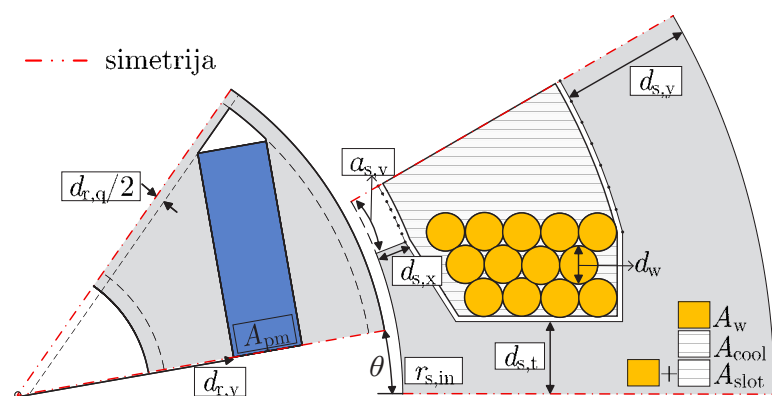
$$\text{ob upoštevanju} \begin{cases} G_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = 1, \dots, N_G \\ H_k(\mathbf{x}) = 0, k = 1, \dots, N_H \\ \mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u \end{cases} \quad (1)$$

kjer so $F_i(\mathbf{x})$ kriterijske funkcije, ki zagotavlja povezavo med KPI-ji in konstrukcijskimi parametri stroja $\mathbf{x}$, ki definirajo zasnovo stroja. $G_j(\mathbf{x})$ so funkcije nenakostnih omejitev in $H_k(\mathbf{x})$ so funkcije enakostnih omejitev. Prostor možnih rešitev je določen s spodnjo $\mathbf{x}_l$ in zgornjo mejo $\mathbf{x}_u$ konstrukcijskih parametrov stroja $\mathbf{x}$.

Večkriterijski optimizacijski pristop zahteva naprednejše optimizacijske algoritme, saj vključuje dodatna ovrednotenja kriterijskih in omejitvenih funkcij. Posledično so časi izračuna bistveno daljši v primerjavi z enokriterijskim pristopom. Zato je zmanjšanje časa, potrebnega za vrednotenje kriterijskih in omejitvenih funkcij, ključno v kontekstu večkriterijske optimizacije.

2.4 Korak D – določitev prostora možnih rešitev

Za uspešno optimizacijo moramo prostor možnih rešitev natančno določiti in ustrezno omejiti. Če je preozek, lahko spregledamo globalni optimum. Če je preširok, pa se čas računanja močno poveča. Pri optimizaciji električnih strojev se najpogostejše



Slika 1: Parametrični model referenčnega SSTM

osredotočamo na spreminjanje geometrije preseka železnega jedra statorja in rotorja, kot prikazuje slika 1, čeprav lahko vključimo tudi druge konstrukcijske parametre, kot je navitje.

Najpogostejše uporabimo parametrično geometrijo, kjer sta obliki oz. zasnovi rotorja in statorja opisani s pomočjo parametrov. Pri tem je pomembno, da ohranimo čim manjše število parametrov, ki pa še vedno omogočajo dovolj raznolikih rešitev, in zagotovimo, da sprememba posameznega parametra ne vpliva nekontrolirano na druge parametre.

Zelo priporočljivo je izvesti analizo občutljivosti, saj ta pokaže, kako posamezni parametri vplivajo na vrednosti KPI-jev in omejitev. Na podlagi rezultatov lahko nato izberemo najprimernejše parametre, ki se med optimizacijo spreminjajo [5, 18].

Neparametrična optimizacija geometrije pa predstavlja alternativo, kadar geometrija stroja ni vnaprej določena ali ko raziskujemo nove topologije. Ti pristopi temeljijo na strukturnih parametrih namesto na klasičnih geometrijskih dimenzijah ter pogosto uporabljajo metode, kot so binarna optimizacija [19].

2.5 Korak E – modeliranje

Za optimizacijo električnih strojev uporabljamo eksperimentalno preverjene modele, ki povezujejo parametre x z vrednostmi KPI-jev [20, 21]. V praksi pogosto uporabimo večfizikalne oz. večdomenske modele z ločeno elektromagnetno, termično in mehansko obravnavo [8, 22–24]. Šibka sklopitev ali vzporedna uporaba fizikalnih podsistemov omogoča dobro ravnovesje med točnostjo in računsko učinkovitostjo, kar omogoča njihovo uporabo v optimizacijskih algoritmihih – v nasprotju z močno sklopljenimi večfizikalnimi modeli, ki so pogosto preveč računsko zahtevni.

V številnih primerih se osredotočimo le na elektromagnetni podsistem, medtem ko termične in me-

hanske omejitve upoštevamo posredno, na primer omejitev največjega dovoljenega toka. Elektromagnetno analizo izvajamo z MKE, saj omogoča točno modeliranje nasičenja, izračun elektromagnetnega navora ter oceno izgub v železu, medtem ko so analitični modeli pogosto manj točni [25]. Termično analizo pogosto izvedemo z analitičnimi pristopi, kot so modeli s koncentriranimi parametri, kadar je primarni fokus na elektromagnetnem podsistemu [9]. Uporabiti je mogoče tudi termični MKE, združen z modeli fluidne dinamike, vendar je tak pristop računsko zelo zahteven in zato pogosto neprimeren za optimizacijske postopke.

Za celovito oceno električnega pogona je treba analizirati stroj skupaj z vodenjem in razsmernikom [26]. Čeprav neposredna povezava razsmernika z elektromagnetnim MKE omogoča visoko točnost, je tak pristop za optimizacijske namene pogosto preveč zahteven. Zato pri optimizaciji raje uporabimo MKE, ki vključuje vplive vodenja in razsmernika na delovanje stroja v poenostavljeni obliki.

2.6 Korak F – pridobitev rešitve

Pri iskanju optimalne rešitve uporabljamo deterministične (npr. gradientne metode) ali stohastične metode (npr. genetski algoritmi, diferencialna evolucija) [27]. Zaradi izrazite nelinearnosti pri analizi električnih strojev so stohastične metode pogosto primernejša izbira, saj se lahko izognejo lokalnim minimumom.

Metodologija načrtovanja poskusov (angl. Design of Experiments – DOE) se pogosto uporablja za oceno vpliva vhodnih parametrov x na vrednosti KPI-jev. Čeprav ne ponuja neposredne rešitve optimizacijskega problema, služi kot osnovna podatkovna zbirka za učenje nadomestnih modelov, ki so kasneje vključeni v optimizacijo [3, 11, 15].

Ker kriterijske funkcije običajno vključujejo računsko zahtevne simulacije MKE, za izboljšanje računске učinkovitosti uporabimo različne pristope:

- ▶ Simetrije: Z izkoriščanjem geometrijskih in elektromagnetnih simetrij zmanjšamo število potrebnih simulacij in velikost modelov MKE [8].
- ▶ Nadomestno modeliranje: Nadomestni modeli, trenirani na manjšem številu podatkov (pogosto pridobljenih z MKE), omogočajo hitro ocenjevanje vrednosti KPI-jev.
- ▶ Interpolacija: S pomočjo interpolacije ocenjujemo obratovalne točke, ki niso bile neposredno ovrednotene z analizo MKE [28].
- ▶ Paralelno računanje: Razdelitev računskih nalog na več jeder ali računalnikov bistveno pospeši optimizacijski proces ali zbiranje podatkov za treniranje nadomestnih modelov.

3 Rezultati

3.1 Predstavitev problema

Korak A

V okviru optimizacije smo obravnavali vektorsko voden SSTM, ki uporablja trifazno koncentrirano navitje, razporejeno v šest statorskih utorov, kot je prikazano na sliki 1. V rotorju so vgrajeni štirje notranji trajni magneti, kar omogoča generiranje tako magnetnega kot reluktančnega navora.

Stroj je bil sestavni del kompleksnega mehatronskega sistema, ki vključuje baterijo, napetostni pretvornik, vodenje s povratnima zankama za tok in položaj rotorja, mehanski reduktor ter hladilni sistem [29]. Zaradi visoke kompleksnosti celotnega sistema smo se pri optimizaciji osredotočili zgolj na izbrane podsisteme – torej na stroj v kombinaciji z njegovim vodenjem. Ker je bil sistem že vnaprej dobro definiran in uravnotežen, smo ključne parametre ohranili nespremenjene: delovno območje stroja (navor in hitrost) smo ustrezno omejili, hladilni podsistem smo ohranili, prav tako pa smo nespremenjen ohranili tudi napetostni nivo baterijskega napajanja.

Korak B, C in D

Glavni cilj optimizacije je bil povečati izhodno moč stroja P ob hkratnem znižanju stroškov C . Sekundarni cilj je bil pridobiti nabor optimalnih rešitev v obliki Paretove krivulje, ki omogoča izbiro med različnimi kompromisi med močjo in ceno.

Večkriterijsko optimizacijo smo formalno definirali z (2)

$$\min_x \begin{cases} -P(x) \\ C(x) \end{cases} \quad (2)$$

ob upoštevanju $\begin{cases} \frac{A_{\text{cool}}(x)}{A_{\text{cool,ref}}} - 1 \leq 0.1 \\ x_l \leq x \leq x_u \end{cases}$

kjer smo hkrati minimizirali negativno vrednost največje izhodne moči stroja ter skupno ceno vseh aktivnih delov stroja (stator, rotor, magnet in navitje). Neenakostna omejitev je bila uporabljena z namenom zagotoviti, da hladilni presek A_{cool} pri optimalnih izvedbah stroja ne preseže 10 % referenčne vrednosti $A_{\text{cool,ref}}$. Ta omejitev skupaj z največjim dovoljenim statorskim tokom $I_{s,\text{max}}$ zagotovi termično stabilne zasnove. Slika 1 in Tabela 1 prikazujeta 8 parametrov x , ki so določili prostor možnih rešitev optimizacijskega problema in so parametrično spreminjali celotno geometrijo prereza statorskega in rotorskega jedra ter posledično navitje. $r_{s,\text{in}}$ je notranji premer statorja, $d_{r,q}$ je debelina mostička v q-osmi rotorja, $d_{r,y}$ določa pozicijo magnetov v rotorju, A_{pm} je površina trajnega magnetov, $d_{s,y}$ in $d_{s,t}$ sta debelini jarma in zoba statorja, $d_{s,x}$ je višina pola statorskega zoba in $\alpha_{s,v}$ je kot odprtine utora.

Tabela 1 : Parametri, ki definirajo presek železnega jedra statorja in rotorja SSTM

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$r_{s,\text{in}}$	$d_{r,q}$	$d_{r,y}$	A_{pm}	$d_{s,y}$	$d_{s,t}$	$d_{s,x}$	$\alpha_{s,v}$

Korak E in F

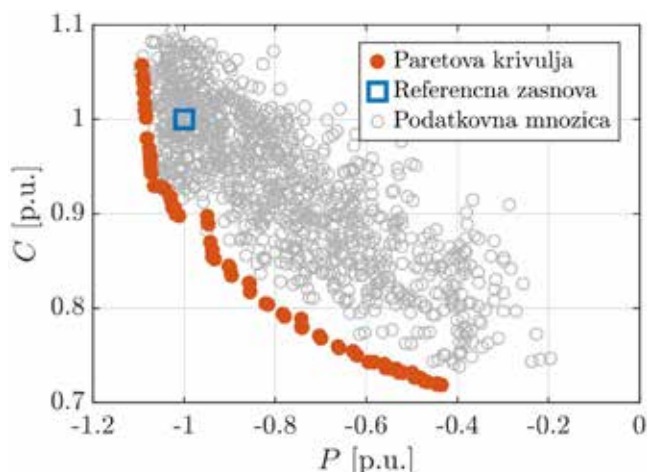
Povezavo med parametri x in KPI-ji smo vzpostavili s pomočjo MKE. Geometrijo stroja smo prilagajali s parametri x , analiza na osnovi MKE pa je omogočala izračun magnetnih sklepov in navora v različnih delovnih točkah. Pridobljene vrednosti smo nato uporabili v analitičnih modelih za oceno največje izhodne moči stroja P . Stroški C in hladilni presek A_{cool} so bili neposredni rezultati parametričnega modela. Glavno orodje za oceno obratovanja stroja je bila analiza MKE, podrobnosti implementacije pa lahko najdete v [11, 14].

Za izvedbo optimizacije na osebнем računalniku smo uporabili več pristopov za zmanjšanje računskih zahtev. Najprej smo izkoristili geometrijsko simetrijo stroja in v modelih MKE simulirali le polovico modela. Nato smo za eno delovno točko analizirali zgolj 1/6 električne periode pri petih različnih električnih kotih, s čimer smo dodatno zmanjšali število potrebnih simulacij modelov MKE. Nadalje smo razvili nadomestne modele, osnovane na nevronske mrežah, ki smo jih trenirali z naborom podatkov, pridobljenih iz analiz MKE. Optimizacijo smo nato izvedli na nadomestnih modelih, ki so bili hkrati natančni in računsko učinkoviti, kar je omogočilo izvedbo večkriterijske optimizacije znotraj razumnega časa izvajanja. Model MKE je bil implementiran v simulacijskem orodju Ansys Maxwell, medtem ko so bile vse ostale naloge: od upravljanja modela in postprocesiranja do zbiranja podatkov, gradnje nadomestnih modelov in izvedbe optimizacije izvedene v Matlabu. Skupno je bilo za učenje nadomestnih modelov zbranih približno 1500 zasnov strojev. Ovrednotenje posamezne zasnove je trajalo približno 2–3 minute, kar pomeni okoli tri dni zbiranja podatkov na standardnem računalniku, pri čemer se lahko zbrani podatki ponovno uporabijo.

Uporabili smo večkriterijski genetski algoritem NSGA-II, ki omogoča hkratno iskanje kompromisnih rešitev med več kriteriji [30]. Največje število generacij smo določili na 250, velikost populacije na generacijo pa na 100. Sama optimizacija z nadomestnimi modeli je trajala približno 2–3 ure.

3.2 Rezultati optimizacije

Slika 2 prikazuje dobljeno Paretovo krivuljo optimalnih rešitev za predstavljeno večkriterijsko optimizacijo, dano z enačbo (2) skupaj z referenčno zasnovo in naborom podatkov, uporabljenih za treniranje nadomestnih modelov. Ciljna funkcija $-P$ je dala razpon rešitev, pri katerih se je moč povečala



Slika 2 : Oranžne točke predstavljajo Paretoovo krivuljo, tj. optimalne rešitve, ki so v obeh kriterijih ali vsaj v enem boljše od referenčne zasnove (modri kvadrat). Sivi krogi prikazujejo vrednosti KPI-jev zasnov strojev, ki smo jih uporabili za treniranje nadomestnih modelov.

za približno 9 % oziroma zmanjšala za več kot 55 % glede na referenčno zasnovo. Strošek C se je med rešitvami tudi spreminjal: povečal se je za 5,5 % ali zmanjšal za 18 %.

Vse rešitve na Paretovi krivulji niso izboljšale obeh kriterijev hkrati – nekatere so povečale moč, druge zmanjšale strošek, tretje pa so ponujale izboljšave v obeh kriterijih. Iz *slike 2* je jasno viden kompromis med obema ciljima funkcijama: povečanje moči pogosto vodi k višjim stroškom, medtem ko znižanje stroškov pomeni nižjo moč. Skrajne točke na fronti prikazujejo zasnove z minimalnimi stroški ali največjo močjo, medtem ko srednji del fronte predstavlja uravnotežene kompromisne rešitve. V primerjavi z referenčno zasnovo številne zasnove na fronti ponujajo očitne izboljšave, kar potrjuje učinkovitost uporabljenega optimizacijskega postopka.

Tovrstna analiza omogoča projektantu izbiro rešitve glede na prioritete, če je cilj povečanje moči, so ustrezne rešitve na levi strani fronte, če je cilj minimizacija stroškov, so bolj primerne rešitve na desni.

4 Zaključek

Metodološki pristop k večkriterijski optimizaciji električnih strojev, ki smo ga predstavili, omogoča sistematično obravnavo problema od izbire KPI-jev in omejitev do oblikovanja kriterijskih funkcij, določitve prostora možnih rešitev, modeliranja in pridobitve rešitev.

Na praktičnem primeru SSTM smo prikazali, da predstavljena metodologija omogoča učinkovito iskanje optimalnih rešitev. Z dobljeno Paretovo krivuljo smo pokazali, da se moč stroja lahko poveča za

približno 9 % ali pa zmanjša strošek do 18 %. Hkrati pa smo pridobili nabor rešitve, ki hkrati izboljšajo oba KPI-ja v primerjavi z referenčno zasnovo

Viri

- [1] I. Husain et al., "Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1039–1059, 2021-06-01 2021, doi: 10.1109/jproc.2020.3046112.
- [2] S. Zheng, X. Zhu, Z. Xiang, L. Xu, L. Zhang, and C. H. T. Lee, "Technology trends, challenges, and opportunities of reduced-rare-earth PM motor for modern electric vehicles," *Green Energy and Intelligent Transportation*, vol. 1, no. 1, p. 100012, 2022/06/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100012>.
- [3] G. Bramerdorfer, J. A. Tapia, J. J. Pyrhonen, and A. Cavagnino, "Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices," (in English), *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7672–7684, Oct 2018, doi: 10.1109/Tie.2018.2801805.
- [4] V. Parekh, D. Flore, and S. Schops, "Deep Learning-Based Prediction of Key Performance Indicators for Electrical Machines," *Ieee Access*, vol. 9, pp. 21786–21797, 2021-01-01 2021, doi: 10.1109/access.2021.3053856.
- [5] X. Sun, Z. Shi, G. Lei, Y. Guo, and J. Zhu, "Multi-Objective Design Optimization of an IPMSM Based on Multilevel Strategy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 139–148, 2021-01-01 2021, doi: 10.1109/tie.2020.2965463.
- [6] V. Parekh, D. Flore, and S. Schops, "Variational Autoencoder-Based Metamodeling for Multi-Objective Topology Optimization of Electrical Machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 9, pp. 1–4, 2022-09-01 2022, doi: 10.1109/tmag.2022.3163972.
- [7] M. Garmut, S. Steentjes, and M. Petrun, "Optimization of an IPMSM for Constant-Angle Square-Wave Control of a BLDC Drive," *Mathematics*, vol. 12, no. 10, p. 1418, 2024-05-07 2024, doi: 10.3390/math12101418.
- [8] G. Y. Sizov, D. M. Ionel, and N. A. O. Demerdash, "Modeling and Parametric Design of Permanent-Magnet AC Machines Using Computationally Efficient Finite-Element Analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 6, pp. 2403–2413, 2012-06-01 2012, doi: 10.1109/tie.2011.2163912.
- [9] E. A. Grunditz, T. Thiringer, J. Lindström, S. Tidblad Lundmark, and M. Alatalo, "Thermal capability of electric vehicle PMSM with different slot areas via thermal network analysis," *eTransportation*, vol. 8, p. 100107, 1 May 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100107>.
- [10] M. Garmut, S. Steentjes, and M. Petrun, "Eva-

- luating the thermal stability of an interior permanent magnet synchronous machine through iterative multi-physics simulation," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 37, no. 5, 2024-09-01 2024, doi: 10.1002/jnm.3294.
- [11] M. Garmut, S. Steentjes, and M. Petrun, "Computationally efficient multi-objective optimization of an interior permanent magnet synchronous machine using neural networks," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 160, p. 111753, 2025-11-01 2025, doi: 10.1016/j.engappai.2025.111753.
- [12] W. D. Zhao, X. J. Wang, C. Gerada, H. Zhang, C. Liu, and Y. L. Wang, "Multi-Physics and Multi-Objective Optimization of a High Speed PMSM for High Performance Applications," (in English), *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 11, Nov 2018, doi: Artn 810640510.1109/Tmag.2018.2835504.
- [13] S. Doi, H. Sasaki, and H. Igarashi, "Multi-Objective Topology Optimization of Rotating Machines Using Deep Learning," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 6, pp. 1-5, 2019-06-01 2019, doi: 10.1109/tmag.2019.2899934.
- [14] M. Garmut, "Integrating Multi-Physics Modeling within Multi-Objective Optimization to Enhance the Performance and Efficiency of Permanent Magnet Synchronous Machines," Doctoral dissertation, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, University of Maribor, Maribor, 2025. [Online]. Available: <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=91651&lang=slv>
- [15] V. Parekh, D. Flore, and S. Schöps, "Deep Learning-Based Meta-Modeling for Multi-Objective Technology Optimization of Electrical Machines," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 93420-93430, 2023-01-01 2023, doi: 10.1109/access.2023.3307499.
- [16] W. Li, T. Zhang, R. Wang, S. Huang, and J. Liang, "Multimodal multi-objective optimization: Comparative study of the state-of-the-art," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 77, p. 101253, 2023-03-01 2023, doi: 10.1016/j.swevo.2023.101253.
- [17] G. Bramerdorfer, A. Cavagnino, and S. Vaschetto, "Cost-optimal machine designs fulfilling efficiency requirements: a comparison of IMs and PMSMs," (in English), 2017 *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000426933000065.
- [18] G. Bramerdorfer and A.-C. Zavoianu, "Surrogate-Based Multi-Objective Optimization of Electrical Machine Designs Facilitating Tolerance Analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 8, pp. 1-11, 2017-08-01 2017, doi: 10.1109/tmag.2017.2694802.
- [19] S.-W. Jung, J. Ro, and H.-K. Jung, "A Hybrid Algorithm Using Shape and Topology Optimization for the Design of Electric Machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 3, pp. 1-4, 2018-03-01 2018, doi: 10.1109/tmag.2017.2764753.
- [20] B. Bilgin et al., "Modeling and Analysis of Electric Motors: State-of-the-Art Review," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 3, pp. 602-617, 1 September 2019, doi: 10.1109/tte.2019.2931123.
- [21] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, *Design of rotating electrical machines*. Chichester, West Sussex, United kingdom: John Wiley & Sons, 2013.
- [22] S. P. Wu, X. J. Huang, C. C. Tian, and P. J. Zhang, "Multi-Physical Field Optimization Analysis of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Based on NSGA-II Algorithm," (in English), *Int C Electr Mach Sy*, pp. 879-884, 2019. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000537504800166.
- [23] D. A. Staton and A. Cavagnino, "Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 10, pp. 3509-3516, 1 October 2008, doi: 10.1109/tie.2008.922604.
- [24] I. Kleilat, K. E. K. Benkara, G. Friedrich, S. Vivier, N. Moubayed, and R. Dib, "Comparison of Two Analytical Methods for Calculating the Maximum Mechanical Stress in the Rotor of High-Speed-Assisted Synchronous Reluctance Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 2, pp. 1344-1353, 2021-03-01 2021, doi: 10.1109/tia.2020.3040946.
- [25] M. Nell et al., "Complete and accurate modular numerical computation scheme for multi-coupled electric drive systems," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 259-271, 2020-05-01 2020, doi: 10.1049/iet-smt.2019.0413.
- [26] M. Garmut, S. Steentjes, and M. Petrun, "Parameter identification for MTPA control based on a nonlinear d-q dynamic IPMSM model," *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 846-860, 20 June 2023, doi: 10.1108/compel-09-2022-0331.
- [27] S. Touati, R. Ibtouen, O. Touhami, and A. Djerdir, "Fast multi objective optimization of an automotive PMSM using mixed BEM with genetic algorithms," in 2010 *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-3 Sept. 2010 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/VPPC.2010.5728995.
- [28] G. Weidenholzer, S. Silber, G. Jungmayr, G. Bramerdorfer, H. Grabner, and W. Amrhein, "A flux-based PMSM motor model using RBF interpolation for time-stepping simulations," in 2013 *International Electric Machines & Drives Conference*, Westin O'Hare, Chicago, IL, 12-15 May 2013: IEEE, doi: 10.1109/iemdc.2013.6556323. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6556323>.
- [29] M. Garmut, S. Steentjes, and M. Petrun, "A Comparative Study of Meta-Modeling Appro-

aches for IPMSM Performance Prediction with Neural Networks," in 2025 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2025-05-18 2025: IEEE, pp. 152-156, doi: 10.1109/iemdc60492.2025.11061145.

[30] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE T Evolut Comput, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002, doi: 10.1109/4235.996017.

Methodological Approach to Multi-Objective Optimization of Electrical Machines with a Practical Case Study

Abstract:

This paper introduces a structured approach to the multi-objective optimization of electrical machines. The process covers the key steps: defining the problem, identifying the most relevant key performance indicators and constraints, setting the design space, formulating objective functions, and then modeling and evaluating the results. Using a permanent magnet synchronous machine as an example, the study shows that it is possible to achieve up to 9% higher output power or reduce the overall cost by as much as 18% compared with the reference design. These results highlight the value of the proposed method and provide a solid basis for choosing the most suitable design for a given application.

Keywords:

electrical machine, key performance indicators (KPIs), multi-objective optimization, Pareto front

Zahvala

To delo je bilo podprto s strani Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru projekta P2-0115 in projekta J7-3152



SPLAČA SE BITI NAROČNIK



ZA SAMO 50€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 (10 številke)
- strokovne vsebine na več kot 140 straneh
- vsakih 14 dni e-novice IRT3000 na osebni elektronski naslov
- možnost ugodnejšega nakupa strokovne literature
- vsak novi naročnik prejme majico in ovratni trak



ZA SAMO 20€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 (4 številke)
- strokovne vsebine na več kot 200 straneh
- vsakih 14 dni e-novice IRT3000 na osebni elektronski naslov
- možnost ugodnejšega nakupa strokovne literature
- vsak novi naročnik prejme majico in ovratni trak

Revija v
hrvaškem
jeziku

DIGITALNA NAROČNINA



Na voljo tudi naročnina na digitalno različico revije za uporabo V BRSKALNIKU in NA MOBILNIH NAPRAVAH

BUTIK IRT3000



Naša ekskluzivna spletna trgovina kakovostnih izdelkov s prepoznavnim dizajnom vaše priljubljene revije za inovacije, razvoj in tehnologije.

NAROČITE SE!



051 322 442



info@irt3000.si



www.irt3000.si/narocilo-revije

WWW.IRT3000.COM

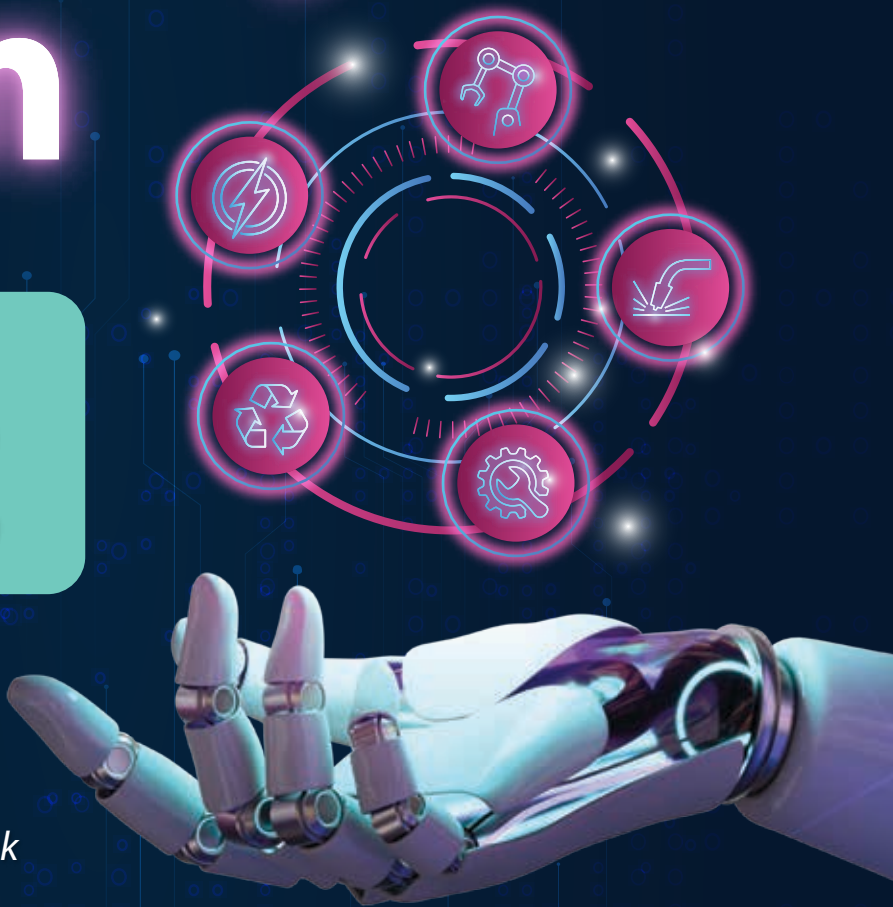
Mednarodni industrijski sejem

**14.-17.
APRIL 2026**

Ključne teme:

- *Industrija prihodnosti: AI, digitalizacija, robotika in človek*
- *Prihodnost varjenja in rezanja*
- *Pametno industrijsko vzdrževanje in industrijsko čiščenje*
- *Energetika v industriji*
- *Logistika in oskrbovalne verige*
- *Grafika, pakiranje in označevanje*
- *Reciklaža, trajnostni materiali in industrijski odpadki*
- *Industrijska elektronika, senzorika in avtomatizacija*

**POSTANITE
RAZSTAVLJAVEC!**



OBRATOVALNA ZMOGLJIVOST AVTOMATIZIRANEGA OBDELOVANJA KMETIJSKIH POVRŠIN PRI SPREMEN- LJIVI RAZPOLOŽLJIVOSTI SOLARNE ENERGIJE V RAZLIČNIH ČASOVNIH OBDOBJIH

Domen Šeruga, Primož Poredoš, Dominik Kozjek, Aleš Gosar, Marko Nagode, Jernej Klemenc

Izvleček:

Trajnostno obdelavo urbanih kmetijskih površin bomo lahko v prihodnosti dosegli z uporabo avtomatiziranih flot obdelovalnih robotov, ki bodo zmožne svojo dejavnost prilagajati razpoložljivosti solarne energije. Ker se ta vir energije spreminja glede na letni čas, je pri snovanju napajalnih sistemov in algoritmov za delovanje robotov ključno upoštevati več dejavnikov. V okviru študije smo analizirali vpliv razpoložljive sončne energije v Ljubljani na napajanje izbranega Li-ionskega baterijskega paketa. Ta je vseboval 7 celic s kapaciteto 20 Ah in nominalno napetostjo 24 V, kar bi zadoščalo za približno 4 ure obratovanja pri moči 100 W. Rezultati kažejo, da se v oblačnem januarskem dnevu pri izbrani velikosti fotovoltaičnih panelov lahko napolni le en baterijski paket, v jasnem januarskem dnevu pa število možnih polnjenj naraste na 20. Jasen junijski dan pri isti velikosti fotovoltaičnih panelov omogoči polnjenje kar 55 baterijskih paketov. Za uspešno avtomatizacijo je torej ključno poznavanje vseh vplivnih dejavnikov, saj nihanja razpoložljive solarne energije neposredno vplivajo na zmogljivost flote obdelovalnih robotov.

Ključne besede:

obratovanje, avtomatizacija, Li-ionske baterije, sončna energija, fotovoltaični paneli

1 Uvod

Zelene skupnosti prihodnosti predstavljajo vizijo urbanega sobivanja, ki temelji na trajnostnem delovanju, tehnološki naprednosti in povezanosti z naravo [1–5]. Njihov razvoj izhaja iz potrebe po oblikovanju prostorov, ki poleg zmanjševanja okoljskega odtisa tudi izboljšujejo kakovost življenja prebivalcev. Ključ do takšnega sobivanja je v sodelovalnem

načrtovanju, kjer lokalne oblasti, prebivalci, podjetja in nevladne organizacije soustvarjajo strategije za trajnostni razvoj mest. S pomočjo smernic, kot jih ponuja mednarodni standard SIST EN ISO 37101 [6], se krepi odgovorno upravljanje mestnih okolij, ki upoštevajo socialne, okoljske in gospodarske vidike.

Pomemben gradnik zelenih skupnosti je vključevanje naravnih elementov v urbano strukturo, saj drevesa, vrtovi in ostale zelene površine ne vplivajo le na estetsko vrednost, temveč tudi izboljšujejo kakovost zraka, uravnavajo temperaturo in prispevajo k ohranjanju biotske pestrosti. Vključevanje pametnih tehnologij v skupnosti omogoča optimiranje upravljanja virov predvsem z uporabo obnovljivih virov energije ter rešitev za nadzor porabe. Zanimiv izziv zelenih skupnosti prihodnosti predstavlja uporaba flot avtomatiziranih obdelovalnih robotov, ki bi s pomočjo recikliranih baterijskih paketov obdelovale javne površine in skrbele za njihovo vzdrževanje.

Izr. prof. dr. Domen Šeruga, univ. dipl. inž., doc. dr. Primož Poredoš, univ. dipl. inž., doc. dr. Dominik Kozjek, univ. dipl. inž., dr. Aleš Gosar, prof. dr. Marko Nagode, univ. dipl. inž., prof. dr. Jernej Klemenc, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-5.11>

vanje. Takšna tehnološka nadgradnja bi spodbudila iskanje inovativnih rešitev za proizvodnjo, pretvorbo in shranjevanje energije v pogojih, ki so odvisni od naravnih virov. Obstajajo že primeri dobre prakse, kjer je življenjska doba baterijskih paketov, prvotno namenjenih uporabi v transportnih sredstvih, podaljšana z uporabo v stacionarnih aplikacijah za pokrivanje energijskih potreb zelenih skupnosti [7].

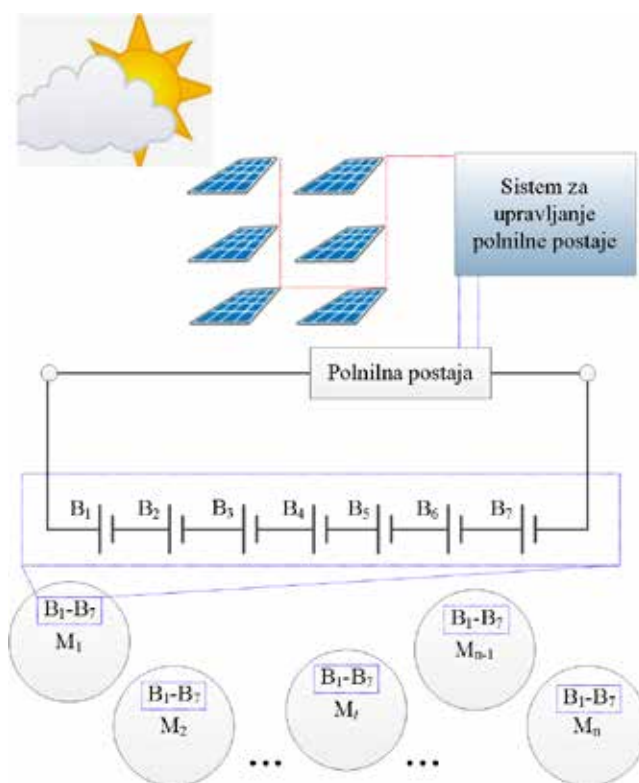
Zelene skupnosti prihodnosti je možno predstaviti tudi kot eksperimentalna okolja, kjer se prepletajo znanost, izobraževanje, civilna družba in lokalna politika [1–3]. S podporo programov partnerstev v okviru organizacije UNESCO [4] ter strategije Evropske komisije [5] se krepi pomen lokalnih rešitev za globalne izzive. Zelene skupnosti torej niso samo možen odgovor na podnebne spremembe, temveč postajajo simbol prostorov, kjer bi tehnologija lahko služila naravi ter ljudem in kjer bi prebivalci lahko soustvarjali pogoje za zdravo, vključujoče in odporno življenje.

Študija v prispevku predstavlja nadaljevanje začetne analize razmer polnjenja in praznjenja baterij obdelovalnih robotov v urbanem prostoru Ljubljane, pri čemer smo zajeli tri ločena časovna obdobja in štiri značilne oblike njihovega delovanja [8]. Dodatno smo analizirali vpliv zamika polnjenja baterijskih paketov, kar se izkaže za najbolj vpliven parameter pri uporabi solarne energije.

2 Metoda

Uporabili smo Li-ionski tip baterijske celice LiNiMn-CoO₂ (NMC) z nazivno kapaciteto 70 Wh ter napekostnim razponom med 3.0 V v izpraznjenem stanju in 4.15 V v povsem napolnjenem stanju [9–11]. Na tej osnovi je bil baterijski paket sestavljen iz sedmih zaporedno vezanih celic B₁–B₇, kar proizvede nazivno napetost 24 V, čeprav se napetostni razpon nekoliko spreminja glede na napolnjenost, in kapaciteto okrog 500 Wh (Slika 1).

V analizi smo predpostavili, da ima vsak robot v obdelovalni floti nameščen tak baterijski paket, ki omogoča njegovo premikanje in izvajanje operativnih nalog. Definirali smo tri tipične polnilne karakteristike fotovoltaičnih panelov glede na tri različne vremenske pogoje. Obravnavali smo oblačen januarski dan (min januar), jasen januarski dan (max januar) in jasen junijski dan (max junij). Da bi lahko zagotovili ravno dovolj energije za polnjenje 1 paketa v najslabših polnilnih pogojih (min januar), smo dimenzionirali solarno napajanje z vzporedno vezavo 6 fotovoltaičnih panelov. V ostalih vremenskih pogojih (max januar in max junij) se je nato glede na razpoložljivo solarno energijo čas polnjenja ustrezno skrajšal. Najkrajši razpoložljiv čas za delovanje fotovoltaičnih panelov na izbrani lokaciji v okolici mesta Ljubljana je namreč 10 ur v januarju, junija pa je časa za polnjenje baterijskih paketov z



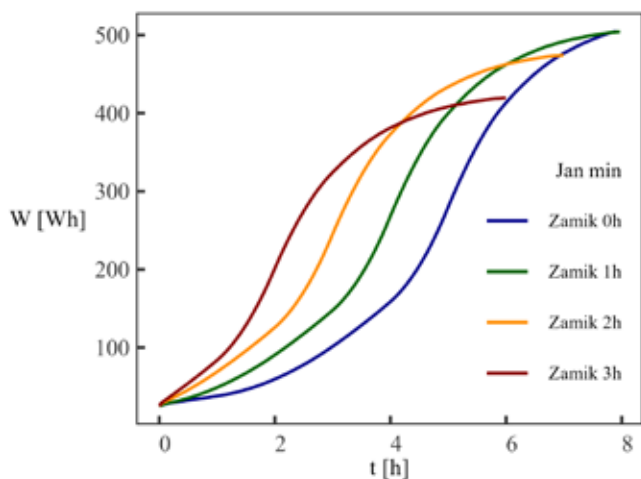
Slika 1 : Solarno napajanje baterijski paket B₁–B₇ za zagotavljanje energije flote obdelovalnih robotov M_i; $i = 1, \dots, n$ [8]

uporabo fotovoltaičnih panelov okrog 16 ur. V vseh preostalih delih leta je časa za polnjenje med 10 in 16 urami. Če bi torej izbrali oblačen junijski dan, bi bila polnilna karakteristika fotovoltaičnih panelov med krivuljami za oblačen januarski in jasen junijski dan.

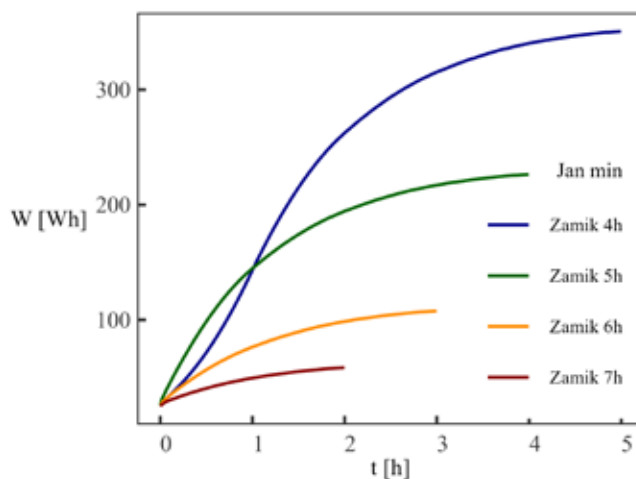
Najbolj vpliven faktor sistema, ki vpliva na čas polnjenja enako velikih baterijskih paketov, je zamik začetka polnjenja od sončnega vzhoda. Glede na zamik polnjenja z izbranim korakom $\Delta t = 1$ h smo torej najprej analizirali polnilne karakteristike baterijskega paketa. Povprečni porabi posameznega obdelovalnega robota velikosti 100 W (Slika 1), ki vključuje premikanje po obdelovalnih tleh in koristno delo, smo dodali še tipične praznilne karakteristike za 200, 400 in 700 W. 200 W moči vključuje premikanje in obdelovanje bolj zahtevnih tal. 400 W porabe zahteva obdelovalni robot pri obdelovanju najzahtevnejšega terena brez premikanja, najvišjo porabo pa predstavlja samo premikanje po zelo zahtevnem terenu.

3 Rezultati in diskusija

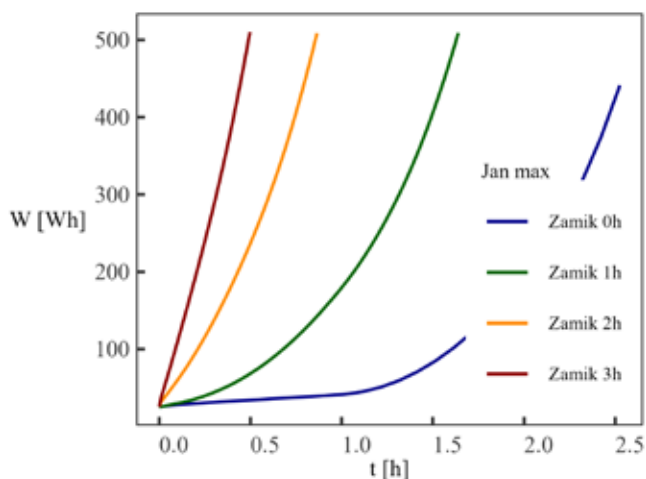
Rezultati simuliranih polnilnih časov glede na različne vremenske pogoje in zamike začetka polnjenja baterijskih paketov so zbrani na Slikah 2–8. Predpostavka simulacij je, da lahko baterijske pakete polni-



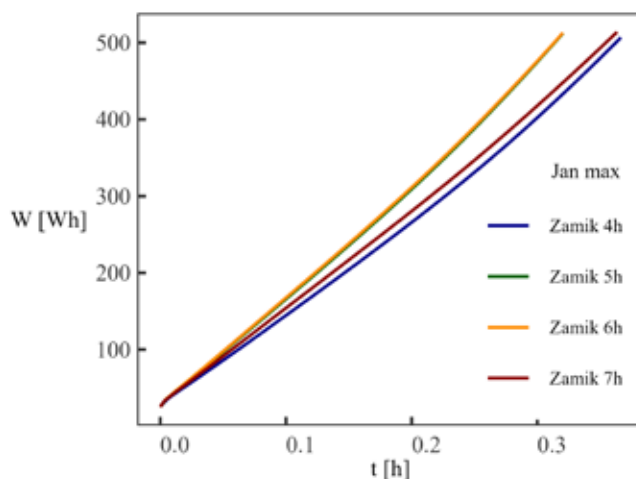
Slika 2 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v oblačnem januarskem dnevu z zamiki med 0 in 3 urami od sončnega vzhoda



Slika 3 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v oblačnem januarskem dnevu z zamiki med 4 in 7 urami od sončnega vzhoda



Slika 4 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v jasnem januarskem dnevu z zamiki med 0 in 3 urami od sončnega vzhoda



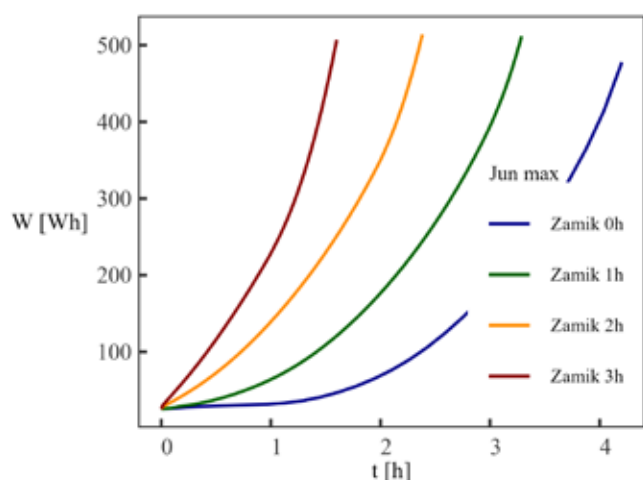
Slika 5 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v jasnem januarskem dnevu z zamiki med 4 in 7 urami od sončnega vzhoda

mo z maksimalnim tokom, ki ga dobimo iz fotovoltaičnega panela. Dejanska vrednost je sicer odvisna od maksimalnega polnilnega toka, ki ga dovoljuje posamezen tip baterijske celice. Na *sliki 2* vidimo, da lahko v najslabših pogojih (min januar) s 6 fotovoltaičnimi paneli napolnimo vsaj 1 porabnika iz flote obdelovalnih robotov, ki ima paket s 7 baterijskimi celicami, če začnemo polniti takoj ob sončnem vzhodu ali z enournim zamikom. Ob štiriurnem zamiku lahko napolnimo le nekoliko več kot polovico baterijskega paketa, pri sedemurnem zamiku pa polnjenje skoraj nima več učinka (*Slika 3*).

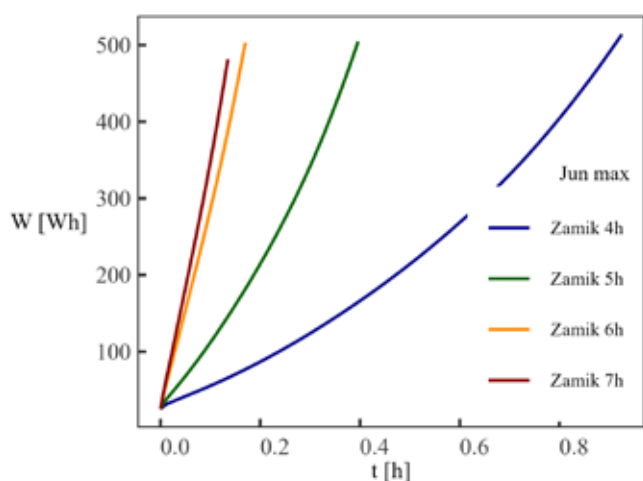
V jasnem vremenu januarja bi lahko napolnili 1 baterijski paket po okrog treh urah, če bi začeli polniti takoj ob sončnem vzhodu oz. po okrog pol ure, če bi polnili z zamikom treh ur (*Slika 4*). Polnilni čas bi se še nekoliko skrajšal pri zamiku 5 oz. 6 ur od

sončnega vzhoda, z zamikom polnjenja 7 ur in več pa bi se spet začel podaljševati (*Slika 5*). Razlog za takšno obnašanje tiči v gostoti solarne energije, ki višek doseže sredi dneva.

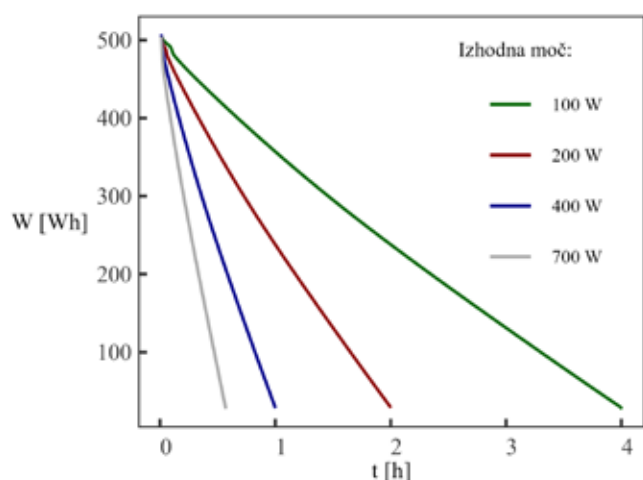
Podobno obnašanje kot v jasnem januarskem dnevu opazimo tudi v jasnem junijskem dnevu (*Slika 6*). Zanimivo je, da je na začetku jasnega januarskega dneva (*Slika 4*) mogoče baterijski paket napolniti hitreje kot na začetku sončnega junijskega dneva (*Slika 6*). Z začetkom polnjenja ob sončnem vzhodu v jasnem junijskem dnevu bi potrebovali namreč okrog 4 ure za napolnitev 1 baterijskega paketa, s triurnim zamikom polnjenja pa okrog uro in pol. Kasneje se solarna moč v junijskem sončnem dnevu močno poveča glede na sončen januarski dan, hkrati pa je dan junija daljši, kar omogoča večkratno polnjenje baterijskih paketov (*Slika 7*). Z upošteva-



Slika 6 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v jasnem junijskem dnevu z zamiki med 0 in 3 urami od sončnega vzhoda



Slika 7 : Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju polnjenja v jasnem junijskem dnevu z zamiki med 4 in 7 urami od sončnega vzhoda



Slika 8 : Praznilni pogoji obravnavanega baterijskega paketa pri upoštevanju različnih obratovalnih pogojev obdelovalnih robotov [8]

njem začetka polnjenja takoj ob sončnem vzhodu bi lahko v jasnem januarskem dnevu napolnili 20 baterijskih paketov. V jasnem vremenu junija bi se ta številka lahko povzpela do 55, če bi polnili z maksimalnim tokom, ki ga fotovoltaični paneli lahko proizvedejo.

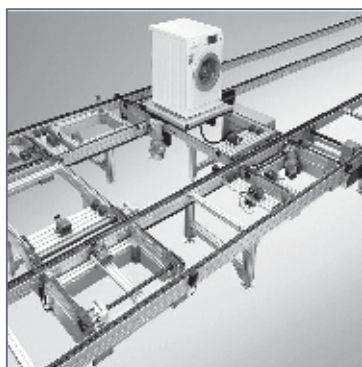
Analiza praznilnih časov glede na obratovalne lastnosti flote obdelovalnih robotov pokaže, da bi se analiziran baterijski paket pri maksimalni porabi izpraznil po približno 0,6 urah uporabe, medtem ko bi povprečna poraba obdelovalnega robota zagotavljala približno 4 ure obdelovalne avtonomije (Slika 8). Karakteristika baterijskega paketa ni linearna, zato tudi razpoložljiva kapaciteta s časom pada nelinearno. Izvedena analiza polnjenja in praznjenja je osnova za določitev optimalnega števila obdelovalnih robotov v floti in izbiranja posameznih robotov za polnjenje. Optimizacijski algoritem mora upoštevati njihovo gibanje oz. trenutne pozicije glede na preostalo energijo v baterijskih paketih, vremenske pogoje polnjenja in obdelovalne razmere, ki pogojujejo praznjenje baterijskih paketov.

4 Zaključek

V prihodnosti bo avtomatizirano obdelovanje tal kot ključen element zelenih skupnosti mogoče prilagajati in optimirati glede na razpoložljivost fotovoltaičnih panelov, število baterijskih paketov, velikost flote obdelovalnih robotov ter površino in namen obdelovalnih zemljišč. Sistemska integracija teh elementov bo omogočila razvoj modularnih in prilagodljivih platform, ki bodo tvorile osnovo za energetsko samooskrbo in lokalno krožno gospodarstvo.

Viri

- [1] HM Government: A Green Future: Our 25 Year Plan to Improve the Environment, OGL (2018), 1-151.
- [2] Costigan, S., Salmon, B.: Green Communities Canada, Strategic plan (2022), 1-12.
- [3] Ljubljanski urbanistični zavod: Strategija varstva in razvoja zelene infrastrukture v Ljubljanski urbani regiji, Regionalna razvojna agencija Ljubljanske urbane regije (2019), 1-79.
- [4] Greening Education Partnership Pillar 4: Greening Communities Guidance, UNESCO, 2024.
- [5] Evropska komisija: Industrijski načrt v okviru zelenega dogovora za neto ničelno dobo, EUR-Lex (2023), 62.
- [6] SIST EN ISO 37101:2023, Trajnostni razvoj v skupnostih, Slovenski inštitut za standardizacijo, (2023).
- [7] Somerville, M.: How 208 Hybrid Car Batteries

Rexroth**ORGATEX®****LEANPRODUCTS®****BOSCH****OPL**
automation

OPL avtomatizacija, d.o.o.
Dobrave 2
SI-1236 Trzin, Slovenija

Tel. +386 (0) 1 560 22 40
Tel. +386 (0) 1 560 22 41
Mobil. +386 (0) 41 667 999
E-mail: info@opl.si
www.opl.si

ries Changed Yellowstone National Park Forever, earth911.com (2015).

- [8] Šeruga, D., Poredoš, P., Kozjek, D., Gosar, A., Nagode, M., Klemenc, J.: Upoštevanje razpoložljivosti solarne energije pri napovedovanju obratovalne zmogljivosti avtomatiziranega obdelovanja kmetijskih površin, 16. industrijski forum IRT: zbornik foruma (2025).
- [9] Nagode, M., Gosar, A., Sweney, C.-A., Jaguemont, J., Van Mierlo, J., Šeruga, D.: Mechanistic modelling of cyclic voltage-capacity response for lithium-ion bat-

teries, Energy (2019), 186, 115791.

- [10] Goutam, S., Timmermans, J.-M., Omar, N., Bossche, P.Vd., Van Mierlo, J.: Comparative Study of Surface Temperature Behavior of Commercial Li-Ion Pouch Cells of Different Chemistries and Capacities by Infrared Thermography, Energies (2015), 8(8), str. 8175-8192.
- [11] Šeruga, D., Gosar, A., Nagode, M., Klemenc, J.: Odziv baterijskih paketov na spremenljive obratovalne pogoje mehanskih sistemov, Akademija strojništva 2024 (2024), str. 116-117.

Operational capacity of automated agricultural land processing under variable solar energy availability across different time periods

Abstract:

Sustainable cultivation of urban agricultural areas in the future can be achieved by using automated fleets of processing robots that will be able to adapt their activities to the availability of solar energy. Since this energy source varies depending on the season, it is crucial to consider several factors when designing power systems and algorithms for robot operation. As a part of the study, the impact of available solar energy in Ljubljana on the power supply of a selected Li-ion battery pack has been analysed. The pack contained 7 cells with a total capacity of 20 Ah and a nominal voltage of 24 V, which would be sufficient for approximately 4 hours of operation with 100 W of power. The results show that using the selected size of photovoltaic panels, only one battery pack can be charged on a cloudy January day, whilst the number of possible charges increases up to 20 on a clear January day. The same size of photovoltaic panels allows for the charging of as many as 55 battery packs on a clear June day. Understanding of all influencing factors is therefore key to successful automation, as fluctuations in available solar energy directly affect the performance of a fleet of processing robots.

Keywords:

operation, automation, Li-ion batteries, solar energy, photovoltaic panels

Zahvala

Zahvala gre Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo raziskovalnega programa št. P2-0182 Razvojna vrednotenja in interdisciplinarnega projekta Univerze v Ljubljani Zelene urbane skupnosti prihodnosti (I. pripravljalna faza).

NOVI NAREBRIČENI VIJAKI IZ SUPER TEH- NIČNEGA POLIMERA: DT.464 IN DT.653-AV

Podjetje Eles+Ganter je razširilo svojo ponudbo standardnih in standardiziranih delov z dvema novima narebričenima vijakoma – DT.464 in DT.653-AV. Oba sta bila razvita za zagotavljanje najvišjih standardov glede mehanske trdnosti, ergonomije in zmanjšanja teže.

Narebričeni vijaki so izdelani iz SUPER termoplasta, visokozmogljive inženirske plastike, ki se že uporablja v številnih izdelkih Eles+Ganter. Razširjajo obstoječo ponudbo, ki vključuje klasične izvedbe po standardih DIN 464 in DIN 653 iz jekla in plemenitega jekla. Z enakimi dimenzijami kot kovinske različice ponujajo novi narebričeni vijaki dodatne prednosti SUPER termoplasta. Zaradi tega so primerni za širok spekter različnih uporab.

Na voljo so v črni in sivi barvi, ki se odlično zlijeta z videzom kovinske opreme. Novi narebričeni vijaki ponujajo številne tehnične prednosti, ki ustrezajo zahtevam sodobne industrije:

- ▶ odpornost proti koroziji, idealno za vlažna in agresivna okolja,
- ▶ odpornost na kemikalije in topila,
- ▶ varnost in dolga življenjska doba, primerna tudi za zunanjo uporabo,
- ▶ visoka mehanska trdnost zaradi ojačane strukture in lastnosti SUPER termoplasta,
- ▶ majhna teža za izboljšanje učinkovitosti,
- ▶ električna izolacija.

Ponudba vključuje 5 različic, ki ustrezajo najpogostejšim zahtevam:

- ▶ standardna,
- ▶ za privijanje s šestrobim ključem,
- ▶ s krogelnim čepom,
- ▶ s pritisknim elementom iz termoplasta,
- ▶ za privijanje z izvijačem.

Prednosti SUPER termoplasta

Podjetje Eles+Ganter izkorišča lastno strokovno znanje in najsodobnejši laboratorij za razvoj umetnih mas naslednje generacije, ki izvirajo iz panog, kot so avtomobilska in letalska industrija ter elektronika. Ti materiali zagotavljajo izjemne mehanske lastnosti in odpornost na temperaturo, kemikalije in korozijo, odlikuje pa jih edinstvena kombinacija trdnosti, lahкости in vzdržljivosti.

So idealni za aplikacije, ki zahtevajo maksimalno zmogljivost in dolgo življenjsko dobo – kot na primer strojna orodja, industrijska avtomatizacija, pakiranje in predelava hrane. Za vsa ta področja



DT.464 narebričeni vijaki

predstavlja SUPER termoplast velik napredek pri oblikovanju standardnih industrijskih delov.

SUPER termoplast, ojačan s steklenimi ali aramidnimi vlakni, ponuja odlično odpornost na natezne, tlačne in upogibne obremenitve, tudi pri visokih temperaturah. Zaradi zelo dobre odpornosti na kemikalije so primerni tudi za agresivna ali zahtevna okolja.

Nizka masa materiala omogoča zmanjšanje celotne teže strojev. To izboljša energetske učinkovitost ter poenostavi namestitve in vzdrževanje. Gladka površina brez por in nizek koeficient trenja zmanjšuje obrabo, zato mazanje ni potrebno. Zagotavljajo tudi električno izolacijo in omogočajo učinkovito proizvodnjo zaradi skrajšanega časa obdelave in stroškov.

Vir:

ELESA+GANTER Austria GmbH, Franz Schubert-Straße 7, AT-2345 Brunn am Gebirge, Tel.: +43 2236 379 900 23, Fax: +43 2236 379 900 20, e-mail: j.plesnik@elesa-ganter.at, GSM: 386 41 362 859, internet: www.elesa-ganter.at

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0

ZANESLJIVE REŠITVE ZA PAPIRNO IN CELULOZNO INDUSTRIJO

Primož Živkovič

Papirna in celulozna industrija sodita med najzahtevnejše proizvodne panoge. Procesi potekajo pod visokimi tlaki, ob velikih temperaturnih nihanjih in v stiku z agresivnimi mediji, kot so lužine in kisline. Za varno, učinkovito in neprekinjeno delovanje obratov so nujne visokokakovostne armature.

Goetze ventili dokazano prispevajo k varnosti in učinkovitosti v papirni in celulozni proizvodnji. S širokim portfeljem varnostnih in regulacijskih ventilov ponujajo rešitve, ki so prilagojene specifičnim zahtevam te industrije.

Ključne rešitve:

- ▶ **Prirobnični varnostni ventili**
Ščitijo tlačne posode, cevovode in stroje pred prekomernim tlakom. Zaradi robustne konstrukcije in odpornosti proti agresivnim medijem, kot so baze in kisline, zagotavljajo varno in neprekinjeno obratovanje.
- ▶ **Kotni varnostni ventili**
Kompaktna zasnova omogoča uporabo v omejenih prostorih, enostavno vzdrževanje pa je dodatna prednost. Posebej primerni so za zaščito črpalk in toplotnih izmenjevalnikov, saj jih je možno neposredno povezati s cevovodi.
- ▶ **Reducirni ventili**
Ključni za stabilizacijo tlaka v procesnih obratih. Zagotavljajo konstanten tlak pri strojih in napravah, kar je posebej pomembno v sušilnih procesih, kjer je natančen nadzor tlaka pare velikega pomena. Namenjeni so uporabi pri plinih in tekočinah, s čimer omogočajo zelo natančno regulacijo.
- ▶ **Odzračevalni ventili**
Poskrbijo za odzračevanje posod in cevovodov ter preprečujejo nastanek podtlaka. S tem povečujejo procesno učinkovitost, zmanjšujejo nevarnost korozije in podaljšujejo življenjsko dobo komponent.

Široko področje uporabe

Goetze ventili se v papirni in celulozni industriji uporabljajo v različnih procesnih fazah. Njihova uporaba vključuje:

- ▶ zaščito kotlov, tlačnih posod in cevovodov,
- ▶ zaščito črpalk in toplotnih izmenjevalnikov,
- ▶ razbremenjevanje parnih in vodnih sistemov,
- ▶ regulacijo tlaka pri oskrbi s paro in vodo,

- ▶ odzračevanje parnih in kondenzacijskih sistemov.

Tehnične značilnosti in serije ventilov

Goetze ponuja različne serije ventilov, ki so prilagojene specifičnim zahtevam industrije:

Serija 355

Visokozmogljiv varnostni ventil z razponom velikosti od DN 15 do DN 100, narejen iz nodularne litine. Primeren za aplikacije z ogrevalno vodo in paro ter tam, kjer so zahteve po odpornosti na korozijo nižje. Ponuja možnost odprtega ali zaprtega pokrova, dodatne opcije pa vključujejo meh iz elastomera ali nerjavnega jekla ter kovinska ali mehka tesnila. *Območje tlakov:* 0,2–40 bar; *temperature:* -10 °C do +350 °C.

Področja uporabe:

Varnostni ventili serije 355 se uporabljajo v ogrevalnih in parnih sistemih, toplotnih izmenjevalnikih, rezervoarjih ter industrijskih cevovodnih sistemih, kjer sta potrebna zanesljiva zaščita pred previsokim tlakom in varno odvajanje medija.

Serija 455

Visokozmogljiv varnostni ventil z razponom velikosti od DN 15 do DN 100, narejen iz nerjavnega jekla. Primeren za skoraj vse aplikacije. Odlikujejo ga visoka odpornost proti medijem, možnost uporabe pri ekstremno visokih temperaturah in dodatna var-



Serija 355

Serija 455

Serija 255

Prirobnični varnostni ventili

Primož Živkovič, GIA-S, d. o. o., Grosuplje

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0

nost z mehomo, ki kompenzira protitlak.

Območje tlakov: 0,2–40 bar; *temperature:* –60 °C do +400 °C.

Področja uporabe:

Varnostni ventili serije 455 se uporabljajo v parnih in toplotnih sistemih, kemični in procesni industriji, energetiki in drugih industrijskih napravah, kjer sta potrebna zaščita pred previsokim tlakom in zanesljivo razbremenjevanje sistema.

Serija 255

Robusten ventil iz jeklene litine z razponom velikosti od DN 15 do DN 100, posebej primeren za hitro odzivne procese v kemični industriji. Omogoča montažo v navpični ali vodoravni poziciji, na voljo je tudi izvedba ANSI (ASME B16.5 / API 526).

Območje tlakov: 0,2–40 bar; *temperature:* –85 °C do +400 °C.

Področja uporabe:

Varnostni ventili serije 255 se uporabljajo v kemični in procesni industriji, energetiki, ogrevalnih sistemih ter pri drugih industrijskih procesih, kjer so zahtevani zanesljivost, hitra odzivnost in enostavno vzdrževanje.

Serije 4420/4450, 6420 in 451

Ventili iz nerjavnega jekla ali bron, posebej zasnovani za občutljive aplikacije (npr. prehrana, farmacija, biotehnologija). Zagotavljajo visoko odpornost proti koroziji, široko fleksibilnost priključkov in visoke varnostne standarde (odobritev ASME).

Območja tlakov: od 0,5 bar do 70 bar; *temperature:* do +400 °C.

Področja uporabe ventilov:

Seriji 4420/4450:

za uporabo v živilski, farmacevtski in biotehnoški industriji ter procesnih sistemih s plini, paro in tekočinami. Odlikujeta ju korozijska odpornost in aseptična izvedba;

Serija 6420:

za farmacevtsko, biotehnoško, kemično in živilsko industrijo, tlačne posode in parne sisteme. Poudarek na odpornosti proti koroziji in zanesljivem tešenju;



Serija 451

Serija 4420

Serija 6420

Kotni varnostni ventili

Serija 451:

za parne in ogrevalne sisteme, procesno industrijo in energetiko.

Reducirni ventili serije 481, 482, 484

Reducirni ventili so robustne, preizkušene rešitve, namenjene tako pitni vodi kot zahtevnim industrijskim aplikacijam. Odlikuje jih visoka odpornost na različne, tudi agresivne medije ter zanesljivo delovanje pri spremenljivih okoljskih pogojih. Uporabljeni materiali so optimizirani za različne kakovosti vode, kar povečuje njihovo univerzalnost.

Področje uporabe ventilov 481, 482 in 484:

Uporabljajo se v vodovodnih, ogrevalnih, pnevmatskih, hidravličnih in industrijskih sistemih za natančno regulacijo tlaka pri različnih, tudi agresivnih medijih.



Serija 481

Serija 482

Serija 484

Reducirni ventili

Odzračevalni ventili serija 1945

Nerjavno jeklo, kompaktna zasnova in visoka prepustnost zraka. Omogočajo zaščito cevodovodov in rezervoarjev pred podtlakom od 0,6 bar do –0,8 bar.

Temperaturno območje: –60 °C do +225 °C.

Področja uporabe:

Ventil se uporablja za praznjenje posod in zaščito pred nastankom vakuma v rezervoarjih, cevovodih, toplotnih izmenjevalnikih ter posodah v parnih sistemih.

Kakovost in zanesljivost

Goetze ventili so certificirani v skladu z evropsko Direktivo o tlačni opremi (PED) ter drugimi standardi, kot so TÜV, DVGW, WRAS, ACS, EAC in ISO 9001. To zagotavlja najvišjo stopnjo varnosti, kakovosti in skladnosti.

Zaključek

Za obratovanje papirnih in celuloznih obratov brez prekinitev in z visoko stopnjo varnosti so Goetze ventili nepogrešljiva rešitev. Njihova robustnost, odpornost na agresivne medije, široko področje uporabe in potrjena kakovost predstavljajo temelj za zanesljivo in učinkovito proizvodnjo.



80 % MANJŠI OGLJIČNI ODTIS: IGUS PRI SERIJI ENERGIJSKIH VERIG E2.1 PREHAJA NA RECIKLIRAN MATERIAL

Matic Butja

Trajnostni material igumid CG LW ponuja primerljive mehanske lastnosti kot dosedanja serija E2.1 – po enaki ceni.

Po uspešnem razvoju prve energijske verige iz reciklirane plastike na svetu so se v podjetju igus, specialistu za gibljivo plastiko, odločili za naslednji korak: celotna serija energijskih verig E2.1 bo odslej izdelana iz recikliranega materiala igumid CG LW.



Slika 1 : Za izdelavo celotne serije energijskih verig E2.1 podjetje igus prehaja na reciklirani material igumid CG LW, s čimer še naprej spodbuja krožno gospodarjenje s plastiko. (Vir: igus GmbH)

Evropska unija si je zadala cilj, da do leta 2050 vzpostavi krožno in podnebno nevtrarno gospodarstvo. Namesto ustvarjanja odpadkov krožno gospodarstvo temelji na načelu od zibelke do zibelke, pri katerem se materiali vračajo v naravne in tehnične cikle ter s tem ohranjajo dragocene vire. S serijo e-verig E2.1, ki je od letošnje pomladi v celoti izdelana iz recikliranih materialov, v igusu dokazujejo, da to ni več le vizija prihodnosti. Podjetje je prvo verigo iz reciklata predstavilo že leta 2022. Nova izvedba temelji na materialu igumid CG LW, ki nastane iz

odsluženih izdelkov, denimo ribiških mrež, zavrženih energijskih verig in drugih industrijskih odpadkov. Ti materiali se predelajo in ponovno uporabijo v okviru internega programa Chainge, ki skrbi za celoten cikel recikliranja, od zbiranja do predelave v nove komponente.

Trajnost brez kompromisov pri kakovosti in ceni

Verige iz trajnostnega materiala ohranjajo enake mehanske lastnosti kot standardne, hkrati pa so na voljo po isti ceni kot prejšnja serija E2.1. Tudi pri odpornosti na obrabo, stabilnosti in dolgotrajni upogibni obremenitvi ostaja kakovost nespremenjena. Serijo odlikujejo dolga življenjska doba, tiho delovanje, nizka teža ter enostavna vgradnja in polnjenje. Širok nabor dimenzij omogoča uporabo v različnih industrijskih panogah – od avtomatiziranih proizvodnih linij do robotike in transportnih sistemov. »S to reciklirano serijo našim kupcem omogočamo, da skupaj z nami prispevajo k razvoju krožnega gospodarstva,« pojasnjuje Jörg Ottersbach, vodja oddelka energijskih verig v podjetju igus. »S prehodom na igumid CG LW dokazujemo, da krožno gospodarstvo in stroškovna učinkovitost lahko hodita z roko v roki.«

80 % manjši ogljični odtis

Z izbiro serije E2.1 kupci prispevajo k trajnostni proizvodnji prihodnosti. V primerjavi s standardnim materialom ima reciklirani material 80 % manjši ogljični odtis, kar pomeni pomembno zmanjšanje emisij CO₂ v celotnem življenjskem ciklu izdelka. Tudi igus s svojimi novimi izdelki spodbuja trajnostne ukrepe. Podjetje se osredotoča na vse ravni (Scopes 1 do 3): od uporabe procesne toplote in zelene energije

Matic Butja, Hennlich, d. o. o., Kranj

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0

do širjenja mreže e-polnilnic, energetske prenove objektov in optimizacije proizvodnih procesov.

Do danes zbranih že 170 ton materiala

V okviru internega programa Chainge podjetje igus že od leta 2019 prevzema izrabljene energijske verige vseh proizvajalcev. Leta 2022 je bil program nadgrajen z uvedbo spletne platforme, preko katere lahko kupci reciklirajo tudi druge tehnične

plastične komponente in hkrati pridobivajo predelane materiale v obliki regranolata. Poleg vračanja starih verig igus prevzema tudi odpadni material iz montažnih naročil. Preko platforme Chainge je bilo do danes recikliranih že približno 170 ton plastike. Za program recikliranja je igus prejel gospodarsko nagrado Porenja v kategoriji trajnostnost leta 2022 in osvojil prvo mesto na natečaju Going Circular, ki ga je leta 2023 organizirala Gospodarska zbornica Kölna.



BATERIJSKA ČRPALKA SCORPIO

- » Pripravljena na uporabo v vsaki situaciji.
- » Hitro in učinkovito praznjenje zabojnikov.
- » Robustna konstrukcija za dolgo življenjsko dobo.
- » Enostavno rokovanje.



www.hennlich.si

HENNLICH d.o.o., Ul. Mirka Vadnova 13, 4000 Kranj / Pokličite nas: 041 386 003

POSVET

AVTOMATIZACIJA STREGE IN MONTAŽE 2025 - ASM '25

04. decembra 2025

na Gospodarski zbornici Slovenije v Ljubljani

aktualne novice o posvetu so na voljo na www.posvet-asm.si

OGLAŠEVALCI

- | | |
|--|---|
| ▶ CELJSKI SEJEM, d. d., Celje 267, 293 | ▶ MIEL Elektronika, Velenje249 |
| ▶ DAX, d. o. o., Trbovlje 294 | ▶ OLMA, d. o. o., Ljubljana 264 |
| ▶ ELESAGANTER GmbH, Brunn am Gebirge, Austria285 | ▶ OMEGA AIR, d. o. o., Ljubljana 249, 305 |
| ▶ FESTO, d. o. o., Trzin249 | ▶ OPL AVTOMATIZACIJA, d. o. o, Trzin ..249, 298 |
| ▶ GIA-S, d. o. o., Grosuplje249, 301 | ▶ POCLAIN HYDRAULICS, d. o. o, Žiri249, 250 |
| ▶ HENNLICH, d. o. o., Kranj 303 | ▶ PPT COMMERCE, d. o. o., Ljubljana249, 252 |
| ▶ HPE, d. o. o., Ljubljana249 | ▶ PROFIDTP, d. o. o., Škofljica292 |
| ▶ ICM, d. o. o., Griže 267, 279, 308 | ▶ SEAL & TRADE, d. o. o., Maribor249 |
| ▶ INOTEH, d. o. o., Bistrica ob Dravi271 | ▶ STROJNISTVO.COM, Ljubljana265 |
| ▶ JAKŠA, d. o. o., Ljubljana259 | ▶ UL, Fakulteta za strojništvo256 |
| ▶ La & Co., d. o. o., Limbuš249 | ▶ YASKAWA, d. o. o., Ribnica261 |

IZKORIŠČANJE ODPADNE TOPLOTE PRI VIJAČNIH KOMPRESORJIH

Izkoriščanje odpadne toplote pri vijačnih kompresorjih je ena od ključnih strategij za izboljšanje energetske učinkovitosti v industriji. Med 80 % in 90 % električne energije, ki jo porabi kompresor, se pretvori v toploto, kar pomeni velik potencial za njeno koristno rabo.

Izkoriščanje odpadne toplote pri vijačnih kompresorjih je odličen način za zmanjšanje emisij CO₂ in povečanje energetske učinkovitosti. Vijačni kompresorji proizvajajo znatne količine toplote, ki jo lahko izkoristimo za ogrevanje prostorov, sanitarne ali tehnološke vode ali za druge industrijske procese.

Prednosti izkoriščanja odpadne toplote:

1. zmanjšanje emisij CO₂ – manjša potreba po dodatnih virih energije pomeni manjšo porabo fosilnih goriv in nižje emisije;
2. znižanje stroškov energije – z uporabljenoto toploto iz kompresorjev se prihrani pri porabi energenta za ogrevanje;
3. trajnostni vidik – podjetja, ki uporabljajo odpadno toploto, lahko izboljšajo svoj okoljski odtis.

Kako nastane odpadna toplota pri vijačnih kompresorjih?

Vijačni kompresorji delujejo tako, da stisnejo zrak s pomočjo rotirajočih vijakov. Pri tem procesu se sprošča velika količina toplote zaradi:

- ▶ stiskanja zraka – ko se zrak stiska, se segreva;
- ▶ trenja in mehanskega delovanja – delovanje notranjih komponent ustvarja toploto;
- ▶ hlajenja olja – olje se v kompresorju hladi s pomočjo ventilatorja in prenosnika toplote olje/zrak. Ogreti zrak pa se lahko koristi za dogrevanje prostorov s toplim zrakom.

Lahko pa ima kompresor tudi toplotni prenosnik olje/voda (rekuperator), ki se koristi za hlajenje olja z vodo – ta se nato lahko izkorišča za dogrevanje povratka v ogrevalnih sistemih ali za ogrevanje sanitarne vode ali dogrevanje tehnološke vode.

Načini izrabe odpadne toplote

1. Ogrevanje vode

Eden najbolj učinkovitih načinov izkoriščanja toplote je ogrevanje vode s pomočjo toplotnih izmenjevalnikov. Ta se lahko uporablja za:

- ▶ sanitarno vodo (umivalniki, prhanje, kuhinja),
- ▶ industrijske procese (čiščenje, predgrevanje

materialov, pasterizacija),

- ▶ ogrevanje stavb (sistemi talnega ali radiatorskega ogrevanja).

Primer: 75 kW kompresor lahko zagotovi dovolj toplote za segrevanje več tisoč litrov vode na dan.

2. Ogrevanje prostorov

Kompresorji proizvajajo vroč zrak, ki ga lahko usmerimo v ventilacijski sistem za:

- ▶ neposredno ogrevanje – topel zrak iz kompresorja se preusmeri v delovne prostore;
- ▶ posredno ogrevanje – preko toplotnih izmenjevalnikov segrevamo vodo, ki napaja radiatorski sistem.

3. Sušenje in industrijski procesi

Industrije, ki potrebujejo sušenje (lesna, tekstilna, živilska), lahko uporabijo odpadno toploto za:

- ▶ predgrevanje sušilnega zraka,
- ▶ sušenje materialov in izdelkov,
- ▶ toplotno obdelavo izdelkov.

4. Sodelovanje s toplovodnimi sistemi

V večjih podjetjih lahko presežek toplote oddamo v daljinsko ogrevanje, kar še dodatno zmanjša emisije CO₂.

Koliko lahko prihranimo?

- ▶ Do 70 % odpadne toplote lahko ponovno uporabimo.
- ▶ Zmanjšanje emisij CO₂ za več deset ton letno.

Primer:

Za izračun prihrankov pri izrabi odpadne toplote vijačnega kompresorja moči 75 kW upoštevamo naslednje predpostavke:

- ▶ odpadna toplota kompresorja: od 80 % do 90 % električne energije, ki jo kompresor porabi, se pretvori v toploto;
- ▶ možna izraba toplote: od te toplote lahko do 70 % uporabimo za ogrevanje vode, prostorov

ali industrijskih procesov;

- ▶ obratovalni čas: predpostavimo, da kompresor deluje 8 ur na dan, 250 dni na leto.

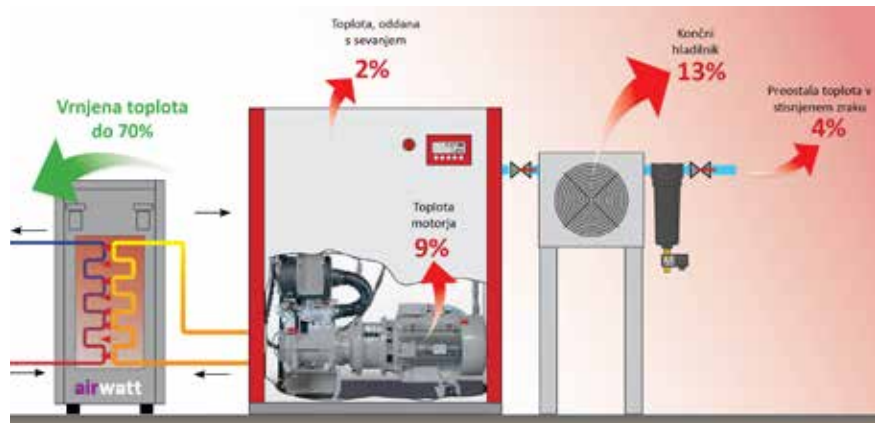
Izračun razpoložljive toplote:

- ▶ poraba električne energije: $75 \text{ kW} \times 8 \text{ h/dan} = 600 \text{ kWh/dan}$, $600 \text{ kWh/dan} \times 250 \text{ dni} = 150.000 \text{ kWh/leto}$;
- ▶ razpoložljiva odpadna toplota (90 % izgubljene energije): $150.000 \text{ kWh} \times 0,9 = 135.000 \text{ kWh/leto}$;
- ▶ uporabna toplota pri 70 % izkoristku sistema: $135.000 \text{ kWh} \times 0,7 = 94.500 \text{ kWh/leto}$.

Koliko lahko prihranimo?

Če to toploto uporabimo namesto plina ali električne energije za ogrevanje, izračunamo prihranek glede na energente:

- ▶ če uporabljamo zemeljski plin (izkoristek kotla ~90 %): cena plina: 0,07 €/kWh, $94.500 \times$



Izkoriščanje odpadne toplote pri vijačnih kompresorjih

$0,07 = 6.615 \times 0,9 = 5.953 \text{ €}$ prihranka letno;

- ▶ če uporabljamo elektriko za ogrevanje: cena elektrike: 0,15 €/kWh, $94.500 \times 0,15 = 14.175 \text{ €}$ prihranka letno;
- ▶ zmanjšanje emisij CO₂ (če nadomestimo plin, to pomeni 0,2 kg CO₂/kWh): $94.500 \times 0,2 = 18,9 \text{ ton CO}_2$ manj letno.

Zaključek

Z izkoriščanjem odpadne toplote iz 75 kW kompresorja lahko prihranimo med 5.953 € (plin) in 14.175 € (elektrika) na leto ter zmanjšamo emisije CO₂ za več kot 18 ton letno.

www.omega-air.si

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0



OMEGA AIR
more than air

OMEGA AIR d.o.o. Ljubljana
Cesta Dolomitskega odreda 10
SI-1000 Ljubljana, Slovenija
www.omega-air.si
T +386 (0)1 200 68 00
info@omega-air.si

RAZPON TLAKOV

1000 mbar
16 bar, 50 bar
100 bar, 250 bar
420 bar

MEDIJI

stisnjen zrak
vakuum
N₂, O₂, CNG,
dihalni zrak
CO₂, H₂, He



© Avtor(ji) 2025. CC-BY 4.0 / © The Authors 2025. CC-BY 4.0

Internet: <http://www.revija-ventil.si>
 E-mail: ventil@fs.uni-lj.si

ISSN 2630-4090 (on line) / ISSN 1318-7279
 UDK 62-82 + 62-85 + 62-31 / -33 + 681.523 (497.12)

VENTIL Revija za fluidno tehniko, avtomatizacijo in mehatroniko
 Journal for Fluid Power, Automation and Mechatronics

Volume Letnik 31
 Year Letnica 2025
 Number Številka 5

Revija je skupno glasilo Slovenskega društva za fluidno tehniko in Fluidne tehnike pri Združenju kovinske industrije Gospodarske zbornice Slovenije. Izhaja šestkrat letno.

Ustanovitelj: SDFT in GZS – ZKI-FT
 Izdajatelj: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
 Glavni in odgovorni urednik: izr. prof. dr. Miroslav Halilović
 Pomočnik urednika: izr. prof. dr. Franc Majdič
 Tehnični urednik: Roman Putrih

Znanstveno-strokovni svet:

- ▶ Erih ARKO, YASKAWA, d. o. o., Ribnica
- ▶ prof. dr. Ivan BAJSIČ, Univerza v Novem mestu, Fakulteta za strojništvo
- ▶ mag. Aleš BIZJAK, Gospodarska zbornica Slovenije, Ljubljana
- ▶ doc. dr. Andrej BOMBAČ, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ prof. dr. Alexander CZINKI, Fachhochschule Aschaffenburg, ZR Nemčija
- ▶ prof. dr. Janez DIACI, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ prof. dr. Jože DUHOVNIK, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (upokojen)
- ▶ izr. prof. dr. Miroslav HALILOVIČ, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ prof. dr. Niko HERAKOVIČ, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ dr. Robert IVANČIČ, INTECH-LES, d. o. o., Rakek
- ▶ dr. Milan KAMBIČ, OLMA, d. o. o., Ljubljana
- ▶ doc. dr. Gorazd KARER, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
- ▶ prof. dr. Mitjan KALIN, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ prof. dr. Roman KAMNIK, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
- ▶ izr. prof. dr. Damjan KLOBČAR, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ prof. dr. Darko LOVREC, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
- ▶ izr. prof. dr. Franc MAJDIČ, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ prof. dr. Hubertus MURRENHOF, RWTH Aachen, ZR Nemčija
- ▶ izr. prof. dr. Dragica NOE, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (upokojena)
- ▶ Bogdan OPAŠKAR, FESTO, d. o. o., Ljubljana (upokojen)
- ▶ dr. Jože PEZDIRNIK, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (upokojen)
- ▶ prof. dr. Jože RITONJA, Univerza v Mariboru, FERi
- ▶ prof. dr. Katarina SCHMITZ, RWTH Aachen, ZR Nemčija
- ▶ prof. dr. Riko ŠAFARIČ, Univerza v Mariboru, FERi
- ▶ Janez ŠKRLEC, inž., uredništvo revije Ventil, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ doc. dr. Marko ŠIMIC, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
- ▶ prof. dr. Željko ŠITUM, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Hrvaška
- ▶ prof. dr. Janez TUŠEK, TKC, d. o. o., Ljubljana
- ▶ prof. dr. Hironao YAMADA, Gifu University, Japonska

Oblikovanje naslovnice in oglasov: Narobe Studio, d. o. o., Ljubljana
 Lektoriranje: Marjeta Humar, prof., Andrea Potočnik
 Prelom in priprava za tisk: Grafex agencija | tiskarna
 Tisk: Schwarz Print d. o. o., Ljubljana
 Marketing in distribucija: Roman Putrih

Naslov izdajatelja in uredništva: UL, Fakulteta za strojništvo – Uredništvo revije Ventil
 Aškerčeva 6, POB 394, 1000 Ljubljana
 Telefon: +(0)1 4771-704
 Faks: +(0)1 4771-772 in +(0)1 2518-567

Naklada: 800 izvodov
 Cena: 5,00 EUR – letna naročnina 30,00 EUR

Revijo sofinancira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

REVIJA JE V ODPRTEM DOSTOPU. 

Znanstveni članki v reviji Ventil so recenzirani. Revija Ventil je indeksirana v podatkovni bazi DOAJ.

Na podlagi 25. člena Zakona o davku na dodano vrednost spada revija med izdelke, za katere se plačuje 5-odstotni davek na dodano vrednost.
 Tiskano v Sloveniji. / Printed in Slovenia.

NEPOGREŠLJIV VIR INFORMACIJ ZA STROKO

Predstavitev strokovnih prispevkov
Strokovna razstava | Aktualna okrogla miza
Podelitev priznanja TARAS



FORUM ZNANJA IN IZKUŠENJ

Dogodek je namenjen vsem, ki delujejo v industrijskem okolju ali za industrijo. Na forumu predstavljamo dosežke in novosti, inovativne rešitve, primere prenosa znanja in izkušenj ter njihove uporabe v industrijskem okolju, pri čemer je pozornost usmerjena tako na nove zamisli, zasnove in metode, kot tudi na tehnologije in orodja. Forum je tudi prostor, kjer osvetlimo resnično stanje v industriji, njene zahteve in potrebe. Posebna pozornost je namenjena uspešnim aplikativnim projektom raziskovalnih organizacij, inštitutov in univerz, izvedenih v industrijskem okolju, ter prenosu uporabnega znanja iz znanstveno-raziskovalnega okolja v industrijo.

Priznanje TARAS za

najuspešnejše sodelovanje
znanstvenoraziskovalnega okolja
in gospodarstva na področju
inoviranja, razvoja in tehnologij.



Portorož, 8. in 9. junij 2026

www.forum-irt.si



IFAM-INTRONIKA-ROBOTICS

17.-19. 2. 2026

Ljubljana

