

VENTIL

ISSN 1318 - 7279

Letnik 32 / 2026 / 1 / Februar

Nova raziskovalna
oprema UL FS

Digitalni dvojčki v
sistemih montaže

Razvoj digitalnega
dvojčka

Uporaba umetne
inteligence

Industrijska olja in maziva



OLMA
www.olma.si



 **FS**
UNIVERZA
V LJUBLJANI | Fakulteta
za strojništvo

FESTO

POCLAIN
Hydraulics

U-VAL

MIEL



ppt commerce

la&co
Sinergija premikanja. Hidravlika. Pnevmatika. Linearna tehnika.



hpe
www.hpe.si info@hpe.si

ZAVORNE REŠITVE

Vrhunske zavorne rešitve za traktorje, off-road vozila in prikolice z dvolinijskim sistemom, zasnovane in proizvedene v Sloveniji

VSESTRANSKOST / VARNOST / ENOSTAVNOST UPORABE / ERGONOMIJA



Ventil za delavno zavoro



Ventil za parkirno zavoro



Ventil za polnjenje akumulatorja



Zavorni ventil za dvolinijski zavorni sistem – traktor



NOVO



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

www.poclain-hydraulics.com



OBRAMBA NI SAMO OROŽJE



Mosul, milijonsko mesto ob Tigri-su na ravninah zgodovinske Mezopotamije, je bil desetletja trgovsko in kulturno središče regije, preden je leta 2014 postal simbol enega najbolj dramatičnih zlo-mov sodobne države. Po umiku ameriških sil se je v Iraku in Siriji okrepil ISIS, ki je do začetka tistega leta zavzel velik del obeh držav. Mosul je branilo okoli trideset tisoč iraških vojakov, oboroženih s sodobnim zahodnim orožjem – od tankov in oklepnikov do helikopterjev. Šestega junija ga je napadlo približno tisoč borcev ISIS in mesto v petih dneh zavzelo. Drugo največje iraško mesto je padlo skoraj brez boja, saj je vojska razpadla; poveljniki in vojaki so pobegnili, ker v koruptivni državi niso čutili, da branijo kaj svojega, in so za seboj pustili bogato vojaško opremo. Mosul ni padel zaradi pomanjkanja orožja, temveč zaradi pomanjkanja legitimnosti države.

Zgodba Mosula ni le bližnje-vzhodna epizoda, temveč opozorilo, da varnost ni preprosto seštevek tankov in proračunskih odstotkov. Tudi v Evropi danes razpravljamo predvsem o številkah in novih nakupih orožja. Za Slovenijo bi takšno povečevanje izdatkov pomenilo velik napor, še posebej, če bi večino sred-

stev namenili opreми, ki bi nato mirovala v skladiščih in za katero bomo upali, da nam je ne bo treba nikoli uporabiti. Če želimo iz tega narediti nekaj več kot le račun za tuje proizvajalce, moramo obrambno politiko povezati z industrijsko, torej namesto uvoza krepiti domače znanje, raziskave in podjetja.

Eden od poskusov, da bi del sredstev namesto v golo uvažanje orožja usmerili v domače zmogljivosti, je ustanovitev družbe Dovos kot naložbenega mehanizma za krepitev varnosti in odpornosti. Smisel takšnih vlaganj ni le v opreми za morebitni konflikt, temveč v razvoju domačega znanja, industrije in logistike. Obramba namreč niso samo tanki in droni, temveč tudi transport, infrastruktura in sistemi, ki koristijo že v miru, denimo ob naravnih nesrečah, ko vojska pomaga civilni zaščiti.

Del teh sredstev naj bi bil namenjen tudi zaščiti kritične infrastrukture, torej stvarjem, ki jih pogosto jemljemo za samoumevne, kot so prometne povezave, zanesljiva oskrba s hrano in zdravlili ter stabilno elektro omrežje. Takšne naložbe skladno s konceptom dvojne uporabe niso pomembne le v primeru vojne, temveč predvsem v miru, saj koristijo vsem državljanom. Hkrati pa družbo naredijo odpornejšo tudi takrat, ko jo preizkusijo poplave, pandemije, krize ali druge izredne razmere.

Evropa se zaveda, da mora varnostno stopiti na svoje noge, vendar je pri tem na razpotju. Kopičenje zalog ameriškega orožja prinaša dobiček proizvajalcem, a dolgoročno lahko postane nevarno, če se ob ponovnem zapiranju

držav v nacionalne okvire znova prebudijo stare ideologije. Slovenija takšni oboroževalni tekmi ne more slediti, zato potrebujemo načelno zunanjo politiko in jasen odgovor na dve vprašanji: ali imamo dovolj domačega znanja in podjetij, da se lahko v krizi prilagodimo, in ali bodo ljudje državo sploh čutili kot svojo ter jo bodo pripravljeni braniti.

Če bodo povečana sredstva za obrambo namenjena zgolj nakupom tujega orožja, bomo dobili polna skladišča in prazno priložnost. Če pa jih bomo usmerili v domače znanje, raziskave in tehnološki razvoj, lahko obrambna politika postane tudi razvojna politika, kar je priložnost za podjetja, ki ustvarjajo rešitve, uporabne tako v krizi kot v miru.

A še pomembnejše od industrijske strategije je stanje duha v državi. Motivacija za obrambo ne raste iz vojaških proračunov, temveč iz zaupanja. Če bodo ljudje živeli z občutkom, da se v državi korupcija samo še povečuje, če jim javno zdravstvo ne bo več dostopno, če bo svobode govora vedno manj, če bodo zaposlitve dostopne samo še po zvezah in če za mlade ne bo bivališč, se bo marsikdo vprašal, čemu bi namesto reševanja teh težav kupovali orožje ter čemu bi takšno stanje sploh branili.

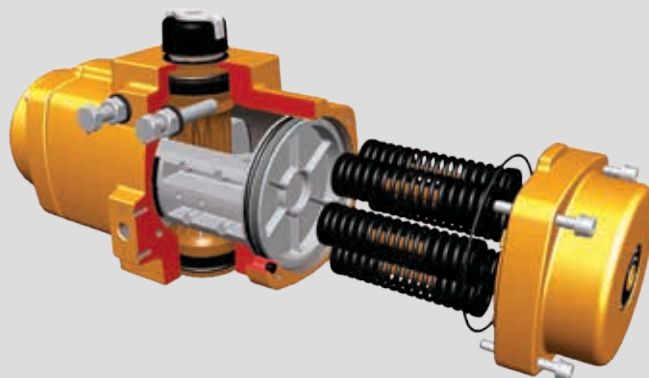
Odgovornost vodilnih je, da nas ne vodijo po poti Mosula. Države ne branijo tanki, temveč ljudje. Ljudje pa brez oklevanja stopijo skupaj za državo in jo branijo le, če ji zaupajo in jo čutijo kot svojo.

Miroslav Halilović

© Avtorji 2025. CC-BY 4.0



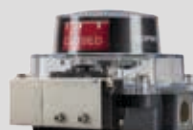
EL Matic™



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	6
Inženirka leta 2025	6
 PREDSTAVITEV	
Helena Grahek	
Nova raziskovalna oprema za prebojne raziskave in še bolj poglobljeno sodelovanje z gospodarstvom – 2. del	10
 NOVICE • ZANIMIVOSTI	14, 35, 57
Astronavtka Sunita Williams navdušena nad raziskovalnimi dosežki Fakultete za strojništvo UL	14
 BIONIKA	
Janez Škrlec	
Kako tehnološke konvergence in sinergije na novo opredeljujejo prihodnost industrij in gospodarstva	26
 TRAJNOSTNA PROIZVODNJA	
Mihael Debevec, Matevž Resman, Miha Pipan, Denis Jankovič, Marko Šimic, Niko Herakovič	
Podpora digitalnih dvojčkov za povečanje trajnosti v sistemih montaže	28
 DIGITALNI DVOJČKI	
Tomaž Pepelnjak, Uroš Štuklek, Albin Sirc, Dejan Rožič, Jure Peternel, Ema Stefanovska	
Razvoj digitalnega dvojčka progresivnega mehatronskega štančnega orodja	36
 UMETNA INTELIGENCA	
Jernej Mlinarič	
Uporaba umetne inteligence pri končni kontroli kvalitete elektromotorjev	44
 AKTUALNO IZ INDUSTRIJE	
Zapah z obračanjem (ELESA+GANTER)	49
JSB – SMC-jev 2/2 zračno krmiljen procesni ventil (SMC Industrijska avtomatika)	50
 NOVOSTI NA TRGU	
Bansbach aktuatorji serija UW100 za uporabo pod vodo (INOTEH)	52
 PODJETJA PREDSTAVLJAJO	
Celovite rešitve za paro, kondenzat in varnostne sisteme SAMSON S-Q2 (GIA-S)	54
Sinusoidna tehnologija za zahtevne industrijske procese (HENNLICH)	58
Fronius predstavlja Velocity Assistant za ročno varjenje MIG/MAG (INGVAR)	60
Ultrazvočni merilniki pretoka in toplote (OMEGA AIR)	62
 LITERATURA	65

EVA PIRC, INŽENIRKA LETA 2025:

RAZUMEVANJE ODPIRA VRATA

DOMIŠLJIJI IN INOVACIJAM

Prejemnica naziva inženirka leta 2025 je dr. Eva Pirc, razvojna inženirka v podjetju Dewesoft. Na slavnostni razglasitvi so zbrane v Cankarjevem domu nagovorili: predsednica RS dr. Nataša Pirc Musar, minister za visoko šolstvo, znanost in inovacije dr. Igor Papič ter ministrica za digitalno preobrazbo mag. Ksenija Klampfer.



Eva Pirc, inženirka leta 2025

V središče izbora organizatorji postavljajo odliko ali potencial izbrane inženirke leta, da je zgled in navdih mlajšim generacijam deklet. To so letos prepoznali v dr. Evi Pirc: »Eva je vzor, da ustvarjalni duh v inženirstvu ne le obstaja, temveč tam resnično zaživi. Njeno delo je fuzija dveh navidezno ločenih svetov: tehnike in domišljije. A Eva poudarja: 'Kam pa pridemo brez domišljije?' Ta misel je jedro njene poslanstva. Mladim želi približati inženirstvo kot ustvarjalen poklic. Kot delo, v katerem znanje, ki ga poganja domišljija, premika meje. In spreminja svet na bolje.« Doktorica elektrotehnike kot razvojna inženirka v podjetju Dewesoft načrtuje in testira elektronska vezja ter razvija nove tehnološke rešitve.

Eva Pirc, inženirka leta 2025, je ob razglasitvi poudarila: »Otroci bi se morali z inženirstvom spoznavati že prej in ne samo po naključju. Več bi morali narediti za ohranjanje njihove domišljije in igrivosti tudi kasneje med šolanjem. Pri meni je bilo razumevanje ključno. Le če stvari razumeš, lahko na tem delaš še naprej. Tam se odpre polje domišljije in inovacij.«

Vidnost ustvarja možnost, možnost pa prihodnost

Častna pokroviteljica izbora in osrednja govornica na dogodku predsednica Republike Slovenije dr.



Inženirka leta 2025 s predsednico RS dr. Natašo Pirc Musar

Nataša Pirc Musar je vsem zbranim, predvsem pa 10 nominirankam, položila na srce: *»Vidnost ustvarja možnost, možnost pa prihodnost. Prav zato je tako zelo dragoceno, da se inženirke povezujejo z mladimi, ki še zlasti potrebujejo našo podporo in oporo. Kajti prihodnost se začne tam, kjer otrok začuti varnost, sprejetost in spodbudo. Vse to tudi sama opažam, ko se pogovarjam s sodelujočimi v projektu od Alje do Žana, ki ga izvaja moja Fundacija Alma.«* Izpostavila je tudi izjemno odgovorno poslanstvo inženirk: mlade navdihniti, jim zagotoviti pomembne informacije in jih opogumiti, da bodo samozavestno raziskovali, spoznavali sami sebe ter ob podpori staršev, učiteljev, mentorjev in skupnosti razvili svoje talente v odličnost.

Domišljija kot iskra znanju

Medeja Lončar, direktorica Siemens Slovenija, predsednica uprave Siemens Hrvaška in direktorica Siemens Srbija ter pobudnica izbora Inženirka leta, je v uvodnem nagovoru izpostavila: *»Za rdečo nit današnjega dogodka smo izbrali domišljijo – tudi zato, ker jo v Sloveniji pogosto podcenjujemo. A prav domišljija je most med tem, kar je, in tem, kar lahko postane. Domišljija ni nasprotje znanju – je njegova iskra. Ko se sreča z znanjem, izkušnjami in pogumom za odločanje, nastanejo rešitve. Takšne, ki premikajo in spreminjajo podjetja, panoge in družbe.«*

Potrebujemo ljudi, ki pokažejo »kako«, ne samo »zakaj«

»Nominiranke in prejemnice naziva inženirka leta dokazujejo, da za dekleta in ženske v tako imenovanih STEM-poklicih ni omejitev, kar je še vedno pogost stereotip. Zato vsi, od staršev, sorodnikov do učiteljic, učiteljev, profesorov, profesorjev, spodbujamo deklice in dekleta, da razvijajo svojo naravoslovno in tehnično nadarjenost, ki bo skozi izobraževanje prerasla v talent,« je poudaril dr. Igor Papič, minister za visoko šolstvo, znanost in inovacije. Ministrica za digitalno preobrazbo mag. Ksenija Klampfer pa je dodala: *»Inženirke rušijo stereotipe tam, kjer je to najtežje – v realnem svetu, z lastnim zgledom. Naslednji korak ni le navduševanje mladih, ampak konkretno prenašanje znanja in samozavesti tudi na odrasle. Inženirke lahko pri tem naredijo ključno razliko, saj govorijo iz prakse in pokažejo, da tehnologija ni abstraktna, ampak uporabna. Ko govorimo o digitalni preobrazbi, potrebujemo ljudi, ki pokažejo 'kako', ne samo 'zakaj'.«*

Metodologija izbora: inženirka leta po izboru štirih komisij

Na odločitve, katera od letošnjih desetih nominirank predstavlja največji zgled in je navdih mladim dekletom, so s svojimi glasovi enakovredno vplivale



Generacija nominirank za inženirko leta 2025

štiri komisije: osem generacij vseh dosedanjih nominirank za priznanje inženirka leta, predstavniki medijev, dijakinje in učitelji iz konzorcija gimnazij ter šolskih centrov *Inženirke in inženirji bomo!* ter predstavniki organizatorja in partnerjev izbora Inženirka leta. V središče izbora organizatorji postavljajo odliko ali potencial izbrane inženirke leta, da je kot inženirka zgled in navdih mlajšim generacijam deklet.

Deset nominirank za inženirko leta 2025

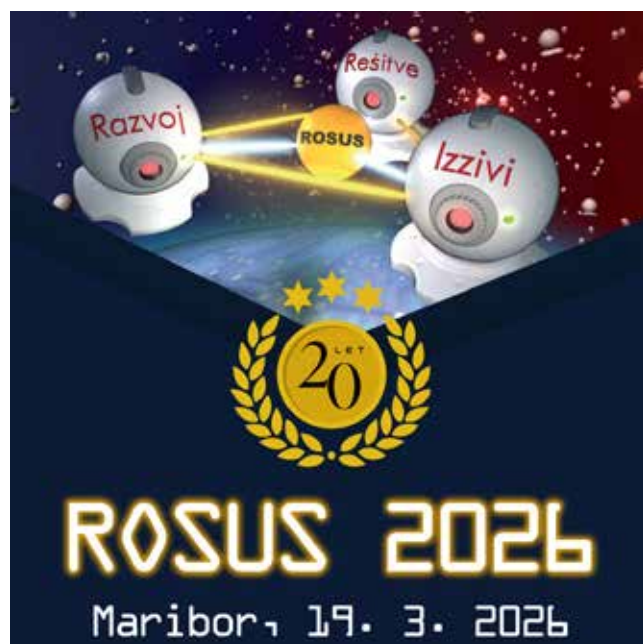
V letošnji izbor nominirank za inženirko leta 2025 so se uvrstile (po abecednem vrstnem redu imen): *Ajda Zavrtanik Drglin*, programerka in vodja delovne skupine za umetno inteligenco v Narodni in univerzitetni knjižnici (NUK); *Barbara Kalšek*, vodja gradbišča v podjetju Pomgrad; *Eva Pirc*, razvojna inženirka za področje elektronike v podjetju Dewesoft; *Iza Resnik Strozak*, managerka za kakovost in okolje v podjetju MM Količevo; *Kaja Jaklin*, podatkovna inženirka specialistka in vodja ekipe v podjetju GEN-I; *Manca Krumpačnik*, raziskovalka strokovnjakinja jr. v podjetju Plastika Skaza; *Marta Pregl*, višja ekspertinja procesnih tehnologij v podjetju Lek, članu skupine Sandoz; *Nuša Bremec*, tehnologinja orodjarne v podjetju MAHLE Electric Drives Bovec; *Rebeka Danica Pacek*, konstrukterka naprav v podjetju Iskra PIO; *Tadeja Volaušek*, vodja kemijskih in tehnoloških projektov v podjetju Nanoten. Izbor je osmič potekal v soorganizaciji revije IRT3000 in družbe Mediade ter sodelujočih partnerjev. Je del projekta *Inženirke in inženirji bomo!*,

ki mlade z dogodki na gimnazijah in šolskih centrih od leta 2012 navdušuje za inženirstvo, tehniko, naravoslovje in inovativnost.

www.irt3000.si

Foto: Andrej Križ, arhiv Inženirka leta

Avtorji 2026. CC-BY 4.0



EDICIJA
2026:

Industrijski sistemi

AI • digitalizacija • varjenje • vzdrževanje • energetika • logistika
industrijski odpadki • elektronika • avtomatizacija

14.-17. APRIL 2026 • Celjski sejem



Industrija
prihodnosti: AI,
digitalizacija,
robotika &
človek



Prihodnost
varjenja &
rezanja



Pametno
industrijsko
vzdrževanje &
industrijsko
čiščenje



Energetika v
industriji



Logistika &
oskrbovalne
verige



Grafika,
pakiranje in
označevanje



Reciklaža,
trajnostni
materiali &
industrijski
odpadki



Industrijska
elektronika,
senzorika &
avtomatizacija



Registriraj se zdaj
in prevzemi **ekskluzivno**
poslovno vstopnico za MIS 2026!

*Za registrirane obiskovalce nakup
vstopnice ni potreben.*



MIS Mednarodni
industrijski
sejem

NOVA RAZISKOVALNA OPREMA ZA PREBOJNE RAZISKAVE IN ŠE BOLJ POGLOBLJENO SODELOVANJE Z GOSPODARSTVOM – 2. DEL

Helena Grahek

Nova oprema odpira dodatne kapacitete na področjih robotike, naprednih materialov, energetskih sistemov, tribologije, aditivnih tehnologij, mikroprocesov ter interakcije človek-stroj. S tem omogočamo zahtevnejše meritve, večjo ponovljivost in zanesljivost rezultatov ter uvajanje podatkovno podprtih metod (npr. digitalni dvojčki, napovedno vzdrževanje, optimizacija procesov). Posodobljena infrastruktura neposredno podpira interdisciplinarne raziskave, preplet eksperimentalnih in numeričnih pristopov ter vključevanje študentov vseh stopenj v projekte, kjer pod mentorstvom raziskovalcev in v sodelovanju s podjetji razvijajo rešitve z visokim tehnološkim potencialom.

Merilni sistem za sprotni nadzor topografije med laserskim procesiranjem – nova perspektiva nadzora

Laboratorij za lasersko tehniko (LASTEH) na Fakulteti za strojništvo UL je pridobil napreden merilni sistem za sprotni nadzor topografije površine med laserskim procesiranjem, ki omogoča neposredno, realno-časovno merjenje globine odstranjevanja materiala in 3D-topografije površin med obdelavo. Sistem dosega natančnost do 10 μm in omogoča vpogled v mikrostrukturo pod površino delno transparentnih materialov do nekaj milimetrov globine. To odpira nove možnosti za razvoj naprednih postopkov laserskega mikrostrukturiranja in mikrovarjenja, ki so ključni za e-mobilnost, biomedicino, mikrofluidiko in druge visokotehnološke aplikacije.

Oprema omogoča raziskave dinamike laserskega odstranjevanja materiala pri zahtevnih materialih, kot so baker, volfram, kompoziti in hibridni kovinsko-polimerni sestavi, ter razvoj realnočasovnega krmiljenja laserskih parametrov na podlagi povratne zanke. S tem bo mogoče razviti nove postopke za visoko trdne in tesne spoje hibridnih komponent. Sistem bo pomembno vključen tudi v pedagoški proces na vseh stopnjah študija, saj študentom



Slika 1 : Merilni sistem za sprotni nadzor topografije med laserskim procesiranjem – nova perspektiva nadzora (Foto: Laboratorij LASTEH)

omogoča praktično delo z najnaprednejšimi tehnologijami, kar je že del diplomskih, magistrskih in doktorskih nalog.

Tehnične zmožljivosti sistema temeljijo na spektralnodomenski optični koherentni tomografiji (SD-OCT), najnaprednejši tehnologiji za merjenje oblike površin in podpovršinskih struktur. Sistem uporablja širokospektralni laserski izvor (880 nm $\pm$ 100 nm) in omogoča globino meritev do 3,4 mm v zraku z aksialno ločljivostjo do 6 μm ter hitrostjo zajema do 80 kHz. Občutljivost detekcije dosega 110 dB, medtem ko skenirna optika omogoča hitrosti premika do 400 mm/s in prečno ločljivost okoli

Helena Grahek, univ. dipl. ekon. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0

10 μm . Posebnost sistema je koksialna integracija z obstoječimi laserskimi sistemi, kar omogoča in-line meritve med obdelavo ter relativno premikanje merilnega žarka glede na obdelovalni laser v območju $\pm 5 \text{ mm}$.

Oprema se uporablja v okviru programa Optodinamika in drugih raziskovalnih projektov laboratorija, ki vključujejo lasersko strukturiranje površin, spajanje naprednih materialov ter razvoj medicinskih laserskih sistemov. Ključna je za tekoče in načrtovane projekte, zlasti za razvoj realnočasnega nadzora laserske obdelave naprednih materialov za zeleni prehod, e-mobilnost in digitalizacijo proizvodnje. Brez OCT-sistema bi bile te raziskave omejene na indirektne metode in postopke naknadne obdelave.

Z novim sistemom Fakulteta za strojništvo UL širi možnosti raziskav in pridobivanja spoznanj, ki jih doslej ni bilo mogoče doseči. Oprema omogoča vpogled v notranjo mikrostrukturo delno prozornih materialov brez porušitve ter izboljšuje kakovost pedagoškega procesa. S tem fakulteta utrjuje vodilno vlogo na področju laserskih tehnologij in odpira vrata inovacijam ter sodelovanju z industrijo.

Mikroelektroerozijski obdelovalni sistem MAKINO U3

Laboratorij za numerično modeliranje in simulacijo v mehaniki (LNMS) je raziskovalno verigo za Material Testing 2.0 nadgradil z mikroelektroerozijskim obdelovalnim sistemom Makino U3. Naprava je namenjena visoko precizni žični elektroeroziji kovin in omogoča izdelavo komponent ter preizkušancev z zelo ozkimi tolerancami in kompleksnimi geometrijami. Osrednja prednost je priprava heterogenih preizkušancev, pri katerih ena sama geometrija omogoča določitev celotnega nabora materialnih odzivov. Ti preizkušanci se nato preizkusijo s korelacijo digitalnih slik, ki meri celotna polja deformacij in napetosti, naprava pa omogoča tudi

natančno pripravo vzorcev iz aditivne proizvodnje brez spreminjanja njihove mikrostrukture. Sekundarno Makino U3 podpira izdelavo specializiranih vpenjal in orodij za univerzalni natezni stroj.

Makino U3 je osrednji člen verige MT2.0, saj omogoča izdelavo majhnih in geometrijsko kompleksnih preizkušancev, pripravo testnih geometrij za validacijo numeričnih simulacij in inverzno kalibracijo materialnih modelov ter izdelavo vzorcev za raziska-

ve aditivne proizvodnje, kjer se proučujejo mikrostruktura, poroznost, toplotna zgodovina in zaostale napetosti. Zaradi izjemne natančnosti in stabilnosti naprava povezuje eksperiment, numeriko in inženirsko aplikacijo ter podpira razvoj raziskav tehnoloških procesov in obdelave materialov.

Tehnično naprava izstopa z natančnostjo pozicioniranja $\pm 1 \mu\text{m}$, ponovljivostjo $0,3 \mu\text{m}$, minimalnim radijem obdelave pod $0,05$



Slika 2 : Zgoraj: Mikro elektroerozijski obdelovalni sistem MAKINO U3; spodaj: a) Makino U3 je kompaktna visoko precizna mikroelektroerozijska naprava, namenjena izdelavi kovinskih preizkušancev z izjemno majhnimi tolerancami in kompleksnimi geometrijami; b) koncept preizkušanja MT2.0. (Foto: Laboratorij LNMS)

mm, podporo žic 0,05–0,25 mm (na voljo 0,10 in 0,25 mm) ter površinsko hrapavostjo do $Ra < 0,1 \mu m$ pri fini obdelavi. Sprejme obdelovance približno do $600 \times 400 \times 200$ mm in mase do približno 300–400 kilogramov. Stabilnost zagotavljajo toplotno uravnotežena konstrukcija, napredni generator pulzov in strategije obdelave EDAF/HyperCut, vključeni pa so tudi upravljalni sistem Hyper-i, linearni pogoni, digitalni servosistem, natančen nadzor napetosti žice, optimizirano izpiranje, adaptivni procesni nadzor, termično stabilizirana zasnova in avtomatska menjava žice.

Oprema je na voljo raziskovalnim skupinam s področij mehanske karakterizacije materialov, naprednih materialnih modelov, aditivnih tehnologij, preizkušanja spajkanih, zvarjenih in večkomponentnih materialov, eksperimentalne mehanike ter raziskav tehnoloških procesov. Ključna je za izvedbo celotne verige MT2: od priprave heterogenih preizkušancev in DIC-meritev do razvoja in validacije modelov ter uporabe v numeričnih simulacijah. Pomembno prispeva tudi k projektom aditivne proizvodnje. Z združevanjem raziskav materialov, aditiva, spajanja, oblikovanja, eksperimentalne mehanike in numeričnega modeliranja naprava krepi interdisciplinarnost, kakovost znanstvenih objav in konkurenčnost fakultete pri evropskih ter industrijskih razpisih.

Kopel za ultranizke temperature

V Laboratoriju za meritve v procesnem inženirstvu (LMPS) na Fakulteti za strojništvo UL smo meroslovno infrastrukturo nadgradili z novo kopeljo za ultranizke temperature (Ultra-low temperature bath), ki prinaša pomemben korak naprej na področju meroslovja temperature. Oprema omogoča stabilno in homogeno ustvarjanje zelo nizkih temperatur – ključni pogoj, kadar želimo temperaturna stanja ne le izmeriti, temveč tudi zanesljivo obvladovati in primerjati.

Največja prednost nove kopeli je njena sposobnost ustvarjanja stabilnega in homogeno porazdeljenega temperaturnega polja pri ultranizkih temperaturah. To pomeni, da lahko v njej izvajamo kakovostna preskušanja temperaturnih merilnih sistemov in drugih preskušancev v pogojih nizkih temperatur. Oprema zagotavlja visoko stabilnost in homogenost (okoli 5 mK), omogoča pa tudi potopno globino temperaturnih sond do približno 500 mm, kar razširi nabor meritev in kalibracij, ki jih lahko izvedemo v laboratoriju.

Poleg izboljšanih zmogljivosti za zagotavljanje meroslovne sledljivosti temperaturnih merilnih sistemov pri nizkih temperaturah ima pridobljena oprema pomembno uporabno vrednost tudi v aktualnih raziskavah. Med drugim se uporablja v okviru mednarodnega raziskovalnega projekta CryoMet ter pri raziskovalnem delu na področju dinamičnega odzi-

va temperaturnih merilnih sistemov. Predvidena je tudi širša uporaba znotraj UL FS ter v sodelovanju z drugimi javnimi institucijami.

Nova kopel hkrati nadomešča starejšo zaradi okvar nefunkcionalno opremo in razširja dosegljivo temperaturno območje meritev. S tem fakulteta pridobiva zanesljivejše pogoje za vrhunsko raziskovalno delo, večjo primerljivost rezultatov ter boljšo konkurenčnost pri sodelovanju v zahtevnih domačih in mednarodnih raziskovalnih projektih.

Ko material »spregovori«: akustična emisija z Vallen AMSY-6

V Laboratoriju za toplotno obdelavo in preiskavo materialov (LATOP) na Fakulteti za strojništvo UL uporabljamo večkanalni merilni sistem za akustično emisijo Vallen AMSY-6 s širokim naborom širokopasovnih in resonančnih senzorjev ter predojačevalci. Gre za napredno neporušno metodo, ki omogoča, da procese v materialu spremljamo »od znotraj« – v realnem času in brez posega v preizkušanece, pogosto še preden se poškodbe pokažejo na površini.

Sistem skupaj s programsko opremo VisualAE Suite zajema valovne oblike akustične emisije in jih zapiše kot vektor značilk v časovni in frekvenčni domeni. Akustična emisija nastaja ob mikrostrukturnih dogodkih, kot so nastanek in rast razpok, mikrozlomi, trenje, korozija, udarci delcev ob površino ali kavitacija. Prav zato je metoda posebej uporabna tam, kjer nas zanima potek in dinamična poškodba – ne le končni lom.

Izbrana konfiguracija ima štiri paralelne merilne kanale, kar omogoča tudi lokacijo izvora AE v 3D-prostoru. Z ustrezno razporeditvijo senzorjev lahko



Slika 3 : Oprema omogoča homogena in stabilna temperaturna polja pri ultranizkih temperaturah, kar odpira različne možnosti uporabe pri znanstveno-raziskovalnem in razvojnem delu laboratorija. (Foto: Laboratorij LMPS)

tako določimo, kje v preizkušancu ali konstrukciji se sprožajo kritični dogodki, in to povežemo z obremenitvami, geometrijo ter stanjem materiala.

Oprema omogoča širok nabor raziskovalnih in razvojnih nalog: spremljanje utrujenosti materialov, analizo iniciacije in napredovanja poškodb med cikli obremenjevanja, preučevanje in optimizacijo novih materialov (kovin, polimerov, kompozitov) ter struktur – zdravstveno diagnostiko kompozitnih struktur, varilnih šivov in industrijskih konstrukcij. Uporabna je tudi za industrijski monitoring (npr. korozija, puščanje, obraba, trenje, delci v toku) ter za spremljanje in ocenjevanje kavitacije, ki je v številnih sistemih ključni mehanizem degradacije.

AMSY-6 ima pomembno vlogo tudi v pedagoškem procesu. Študentom omogoča praktično delo z napredno merilno opremo, učenje obdelave signalov, lokalizacije virov ter interpretacije podatkov, hkrati pa predstavlja odlično platformo za magistrske in doktorske naloge, kjer se razvijajo nove metode in kombinacije akustične emisije z drugimi pristopi preiskav materialov.



Slika 4 : Večkanalni sistem Vallen AMSY-6 v LATOP omogoča zajem signalov akustične emisije, lokalizacijo izvora v 3D-prostoru ter spremljanje nastanka in rasti poškodb v realnem času.

Za vsa dodatna vprašanja v zvezi z opremo in možnostmi sodelovanja se lahko obrnete na rr@fs.uni-lj.si.

POLETNI RAZISKOVALNI TABOR ZA DIJAKE



RAZISKUJ IN POGANJAJ PRIHODNOST

29. JUNIJ - 3. JULIJ 2026



ASTRONAVTKA SUNITA WILLIAMS NAVDUŠENA NAD RAZISKOVALNIMI DOSEŽKI FAKULTETE ZA STROJNIŠTVO UL

Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani je gostila izjemno osebnost vesoljske raziskovalne skupnosti nekdanjo astronautko slovenskega rodu *Sunito Lyn Williams*, eno najuspešnejših ameriških astronautk, ki je v vesolju na treh poletih preživela 608 dni, nazadnje pa je marca 2025 po več kot devetih mesecih zaključila misijo na Mednarodni vesoljski postaji (ISS).



Iz leve proti desni: prof. dr. Matjaž Mikoš (IAS); prof. dr. Franci Pušavec, prodekan za znanstveno-raziskovalno dejavnost in mednarodno sodelovanje Fakultete za strojništvo UL; astronautka Sunita Williams; dr. Igor Papič, minister za visoko šolstvo in inovacije RS; prof. dr. Mitjan Kalin, Fakulteta za strojništvo UL.

Obisk je ponudil enkratno priložnost za izmenjavo izkušenj o razvoju vesoljskih tehnologij ter za predstavitev dosežkov slovenskih raziskovalcev in študentov, ki že danes soustvarjajo prihodnost teh področij.

Fakulteta je predstavila najnovejše raziskave na področjih robotike in avtonomnih sistemov, trajnostnih

materialov, naprednih energetskega rešitev, zdravja v ekstremnih okoljih ter optimizacije fluidnih in toplotnih procesov. Med izpostavljenimi dosežki so bili sistemi za robustno avtonomijo in roj mini robotov za raziskovanje zahtevnih terenov, napredni kompoziti in pametni materiali za vesoljske strukture, tehnologije 3D-tiskanja kovin in elektrolize v ekstremnih razmerah, modeli napovedovanja fizi-



Sunita Williams in izr. prof. dr. Rok Vrabič (Laboratorij LAMPA) med predstavitvijo raziskovalnega robota in projekta Terra Scout, ki razvija avtonomni večrobotski sistem za raziskovanje lunine površine.

oloških sprememb v mikrogravitaciji, naprave za neinvazivno spremljanje zdravja astronautov ter študentski projekt, namenjen

zobozdravstveni oskrbi v vesolju. Pozornost so pritegnile tudi raziskave energetskih in termičnih sistemov – od regeneracije go-

rivnih celic do elastokaloričnega hlajenja – ter ambiciozni projekti s področja mehanike tekočin in fizike, med katerimi izstopajo študentski projekt CAVE Og in referenčne večmerne raziskave vrenja.

Prodekan za znanstvenoraziskovalno dejavnost UL FS prof. dr. Franci Pušavec je poudaril pomen sodelovanja: »V čast nam je bilo gostiti astronautko Sunito Williams, ki s svojo izkušnjo in predanostjo navdihuje raziskovalce in študente. Predstavili smo rešitve, ki nastajajo v tesnem sodelovanju z industrijo in mednarodnimi partnerji, ter odprli nove priložnosti za krepitev povezav v prihodnje.«

Obisk Sunite Williams je še dodatno potrdil, da Fakulteta za strojništvo UL s svojo vizijo, interdisciplinarnostjo in ustvarjalno energijo stopa ob bok vodilnim mednarodnim raziskovalnim



Sunita Williams ob predstavitvi projekta CAVEOg, skupaj s članoma ekipe Jakobom Malijem in Žanom Bočkom ter prof. dr. Matevžem Dularjem. Študentski projekt CAVEOg raziskuje kavitacijsko emulzifikacijo v pogojih breztežnosti, ki jo ekipa preučuje v okviru parabolnih letov ESA Academy.

Ob obisku je Williamsova izrazila iskreno navdušenje: »Neverjetni ste, toliko aplikacij, ki so preprosto osupljive! Navdušena sem nad razvojem, ki sem ga videla na Fakulteti za strojništvo UL. Vaše raziskave na področju robotike, materialov, energetike, zobotehnike in mehurčkov so na izjemni ravni. Resnično sem navdušena – to, kar ustvarjate tukaj, je impresivno in navdihujoče.«

Na vprašanje, katera znanja in kompetence so ključna za inženirje in inženirke pri razvoju vesoljskih sistemov, je poudarila, da prav radovednost poganja prihodnji razvoj tehnologije ter da se tudi najmanjši, na videz osnovni raziskovalni koraki sčasoma izkažejo kot temelj velikih prebojev, zato je za prihodnje generacije ključno razmišljanje o tem, kako lahko današnje delo postane del večjih mednarodnih vesoljskih programov in s tem oblikuje prihodnost vesoljskih misij.



Doc. dr. Janez Urevc (Laboratorij LNMS), Sunita Williams in Andrej Bergauer, dr. med., specialist žilne in splošne kirurgije, ob predstavitvi projekta Modelno napovedovanje kardiovaskularnih protiukrepov v mikrogravitaciji, v okviru katerega razvijajo prediktivni model za personalizirano uporabo negativnega tlaka na spodnji del telesa (LBNP) kot podporo kardiovaskularnim protiukrepom v mikrogravitaciji.

okoljem. Projekti, ki danes nastajajo v laboratorijih fakultete, nakazujejo pogumne korake v prihodnost – v svet, kjer znanje, radovednost in sodelovanje presegajo meje Zemlje ter odpirajo

prostor novim generacijam vesoljskih raziskovalcev.

www.fs.uni-lj.si
Foto: Željko Stevanič/IFP

Avtorji 2026. CC-BY 4.0



FS
UNIVERZA
V LJUBLJANI | Fakulteta
za strojništvo



POLETNA ŠOLA STROJNIŠTVA

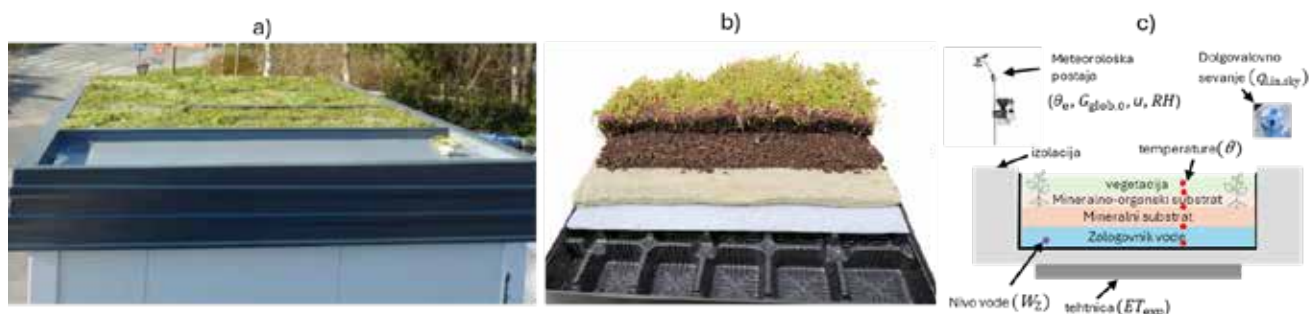
25. - 28. AVGUST 2026



MODRO-ZELENE STREHE:

HLAJENJE MEST TUDI V SUŠNIH OBDOBJIH

Modro-zelene strehe so ena ključnih rešitev za boj proti poletnemu pregrevanju mest. Raziskovalci Laboratorija za okoljske tehnologije v zgradbah Fakultete za strojništvo UL so razvili model, ki zna napovedati njihovo delovanje tudi v ekstremnih sušnih obdobjih. Celovit numerični model je bil objavljen v reviji *Building and Environment* (IF = 7,6).



a) Slika zelene strehe na zunanjem preizkuševališču LOTZ. b) Prikaz sestave modro-zelene strehe po slojih, od spodaj navzgor: zadrževalnik in zalogovnik vode, geotekstil, mineralni substrat, organski substrat, vegetacija. c) Shema modro-zelene strehe z merjenimi veličinami.

Zelene strehe so eden ključnih ukrepov za izzive urbanih središč. Omogočajo blaženje vročinskih valov, zadrževanje ekstremnih padavin in izboljšanje bivalnega okolja. Njihova učinkovitost pa je močno odvisna od razpoložljive vode.

Zato so se v zadnjih letih pojavile zelene strehe, ki pod substrati vključujejo tudi zalogovnik vode (t. i. modro-zelene strehe). S tem podaljšamo obdobje, ko rastline aktivno hladijo okolico z izhlapevanjem vode. Med sušnimi obdobji pa se v zalogovniku vode oblikuje tudi zračni sloj, ki v dosedanjih modelih prenosa toplote ni bil upoštevan.

Raziskovalci laboratorija LOTZ so razvili celovit numerični model, ki podrobno obravnava toplotne in vodne tokove v naprednih modro-zelenih strehah, vključno z zahtevnimi sušnimi razmerami. S podrobnim modeliranjem prenosa toplote v zračni regi so raziskovalci ključno izboljšali natančnost napovedi modela. Posebna novost je vpeljava koeficienta črpanja vode iz zalogovnika. Dodatna pred-

nost raziskave je neposredno merjenje latentnega toplotnega toka (izhlapevanje vode), ki je omogočilo potrjevanje rezultatov modela z meritvami.

Raziskava temelji na večmesečnih terenskih meritvah na zunanjem laboratoriju LOTZ.

»Z našim modelom lahko natančno napovemo obnašanje modro-zelenih streh v vseh vremenskih scenarijih, tudi v ekstremni vročini. To je pomemben korak k načrtovanju stavb, ki bodo odporne tudi na prihodnje ekstremne podnebne razmere,« poudarja glavni avtor raziskave Tej Žižak.

Raziskovalci ocenjujejo, da bodo boljše napovedi toplotnega in hidrološkega odziva modro-zelenih streh omogočile optimizacijo sestave, učinkovito rabo shranjene deževnice in trajnostno hlajenje mest med vročinskimi valovi.

www.fs.uni-lj.si

Avtorji 2026. CC-BY 4.0



REVILJA ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO
VENTIL

VIRTUALNI VPOGLED V GORIVNE CELICE S PROTONSKO IZMENJEVALNO MEMBRANO

Raziskovalci Laboratorija za motorje z notranjim zgorevanjem in elektromobilnost na Fakulteti za strojništvo so razvili inovativno diagnostično metodologijo za gorivne celice s protonsko izmenjevalno membrano (PEMFC), ki jo omogoča večskalni modelski pristop.

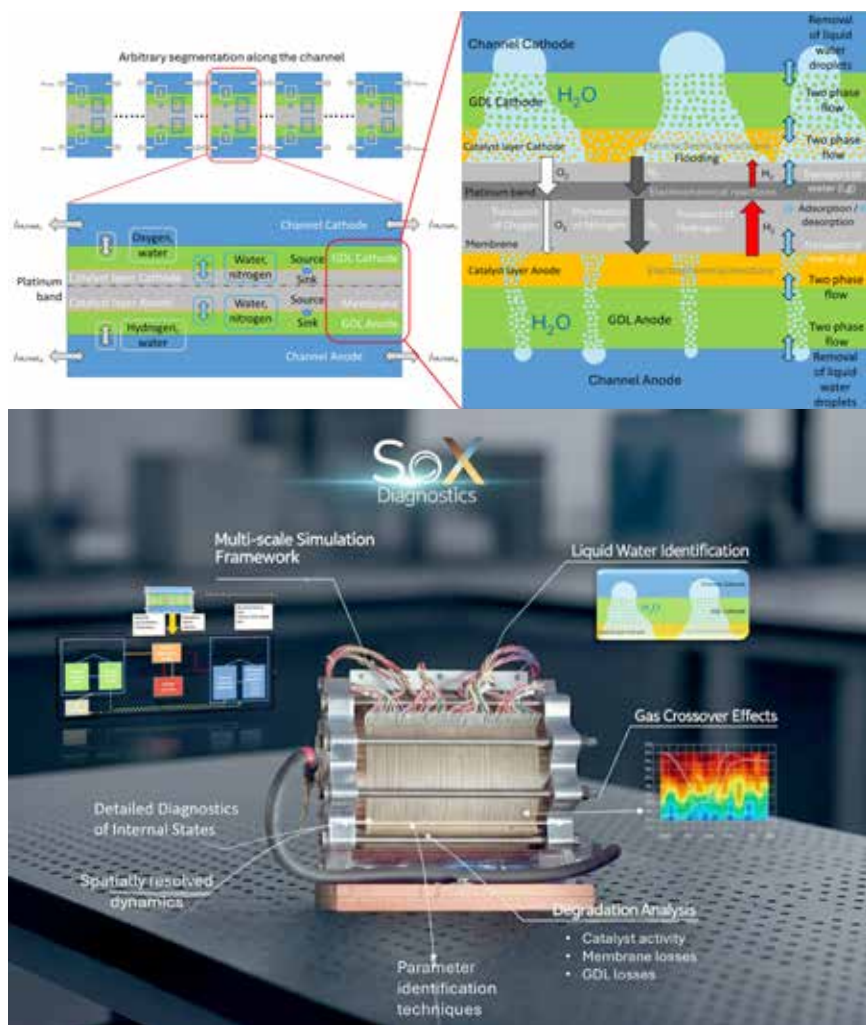
Sočasna optimizacija delovnih pogojev in trajnosti PEMFC zahteva uporabo napredne diagnostike State-of-X (SoX), kjer SoX pomeni stanje delovnih pogojev (*State-of-Operation-Conditions* - SoOC), stanje zdravja (*State-of-Health* - SoH) in stanje delo-

vanja (*State-of-Function* - SoF). Za razliko od trenutno uporabljenih metod SoX, ki temeljijo na izmerjenih električnih parametrih in zato omogočajo omejen vpogled v notranja stanja in parametre gorivne celice, kar posledično omejuje njihove dia-

gnostične sposobnosti, omogoča razviti diagnostični pristop celovit virtualni vpogled v PEMFC. Tako razvita diagnostična metodologija, ki kot vhodni informaciji uporablja zgolj izmerjeni električni tok in napetost, omogoča nove funkcionalnosti SoX z inovativno uporabo modelsko osnovanega vpogleda v notranja stanja PEMFC in parametre, ki predstavljajo hitrost in učinkovitost reakcij ter transportnih mehanizmov.

Razvita diagnostična metodologija SoX omogoča izračun notranjih stanj gorivne celice v realnem času, kar pomeni, da omogoča funkcionalnost virtualnih zaznaval v realnem času in torej inovativno diagnostiko SoOC ter funkcionalnost digitalnega dvojčka. Podobno modelsko podprta analiza parametrov, povezanih s hitrostjo in učinkovitostjo reakcij ter transportnih mehanizmov, odpira nove diagnostične funkcionalnosti SoH, medtem ko obe funkcionalnosti podpirata inovativne funkcionalnosti SoF.

Ta zahtevni izziv so raziskovalci rešili z razvojem inovativne metode za diagnostiko SoX, ki temelji na računsko učinkovitem večskalnem modelskem pristopu za PEMFC, metodah identifikacije parametrov in metodah za ocenjevanje enolične določljivosti identifikacije parametrov, ki je bila objavljena v *International Journal of Hydrogen Energy*. Predlagani izvirni modelski pristop vključuje napreden podmodel za prostorsko razločeno dinamiko vode v kapljevitem stanju in novo razviti podmodel, ki upošteva vpliv učinkov prehoda plina čez membrano na mešane potenciale gorivne celice.



Shematska predstavitev diagnostične metodologije SoX, ki temelji na metodah identifikacije parametrov, metodah za ocenjevanje enolične določljivosti identifikacije parametrov in računsko učinkovitem večskalnem modelskem pristopu za PEMFC, ki je predstavljen z 1D diskretizacijo vzdolž kanala in podrobnejšim popisom, povezanim z 1D diskretizacijo pravokotno na membrano, z označenimi učinki dinamike vode in prehoda plina skozi membrano.

Rezultati potrjujejo sposobnost inovativne metodologije diagnostike SoX za napredno določanje notranjih stanj PEMFC in natančno določanje sprememb parametrov, ki so posledica degradacije in so povezane z aktivnostjo katalizatorja, izgubami v membrani in izgubami v plinski difuzijski plasti. Razvita metodologija diagnostike SoX je torej sposobna razbrati specifične prispevke posameznih komponent k napetostnim izgubam. Razvita

metodologija torej odpira nova obzorja modelsko osnovane diagnostike gorivnih celic in predstavlja ključno orodje za napredne metode zaznavanja in določitve napak ter nove perspektive na področju strategij preprečevanja napak.

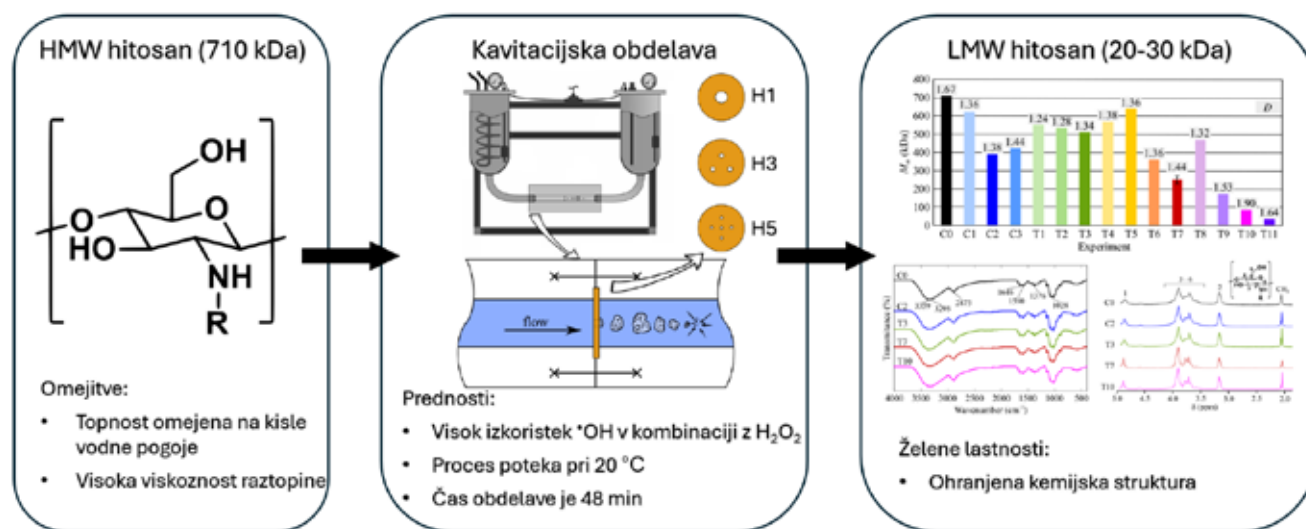
www.fs.uni-lj.si

Avtorji slike: Andraž Kravos, Tomaž Katrašnik in Jon Hauptman

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0

UPORABA KAVITACIJSKIH MEHURČKOV ZA PRIPRAVO HITOSANA Z NIZKO MOLSKO MASO

Raziskovalci Laboratorija za vodne in turbinske stroje (LVTs) so skupaj z raziskovalci Odseka za polimerno kemijo in tehnologijo, Odseka za anorgansko kemijo in tehnologijo ter Odseka za katalizo in reakcijsko inženirstvo Kemijskega inštituta (KI) in Fakultete za farmacijo (FFA) s pomočjo kavitacijskih mehurčkov pripravili hitosan z nizko molsko maso. Rezultate študije so objavili v reviji *Ultrasonics Sonochemistry* (IF = 9.7).



Grafični povzetek raziskave

Ob kolapsu kavitacijskega mehurčka se v zelo omejeno časovno in prostorsko območje sprosti energija, ki povzroči mehanske in kemijske pojave, povezane s kavitacijo. Ti pojavi lahko med drugim povzročijo cepitev glikozidnih vezi in posledično razgradnjo polisaharidov. Raziskovalci so v študiji preiskovali vpliv intenzivnosti kavitacije, koncentracije H_2O_2 , priprave vzorca in pH-medija na učinkovitost razgradnje hitosana.

Konvencionalne metode priprave hitosana z nizko molsko maso zahtevajo visoke temperature ali pa so dolgotrajne ter pogosto poškodujejo strukturne enote. Raziskovalci so v študiji z uporabo kavitacije in dodatka oksidanta v 48 minutah zmanjšali pov-

prečno molsko maso hitosana za 97,2 %, ne da bi ob tem spremenili njegovo kemijsko strukturo, kar zagotavlja ohranitev funkcionalnih lastnosti.

Rezultati študije ponovno potrjujejo, da bi lahko za cepitev glikozidnih vezi v polisaharidih uporabili kavitacijsko obdelavo. Metoda v primerjavi s kemijskimi in encimskimi metodami ponuja hitrejšo, milejšo in bolj trajnostno alternativo, kar poudarja njen potencial za skalabilno in okolju prijazno proizvodnjo bioaktivnega hitosana z nizko molsko maso.

www.fs.uni-lj.si

Avtorji 2026. CC-BY 4.0

ODPADNA TOPLOTA – PROBLEM ALI REŠITEV?

PREBOJNA RAZISKAVA POZIVA K POPOLNI PRENOVI ENERGETIKE

Raziskovalci iz *Laboratorija za hlajenje in daljinsko energetiko (LAHDE)* so skupaj z mednarodno ekipo objavili raziskavo v reviji *Nature Energy* (Springer Nature), ki velja za vodilno znanstveno publikacijo na področju energetike. V članku so prvič celovito ovrednotili doslej spregledan potencial alternativnih tehnologij visokotemperaturnih toplotnih črpalk, ki bi lahko v industriji in energetiki nadomestile neučinkovito kurjenje fosilnih goriv ter neposredno električno ogrevanje. S tem bi bistveno zmanjšali rabo energije, emisije in toplotno obremenjevanje okolja.

Toplota je srce energetskega problema: za ogrevanje in hlajenje uporabimo približno 50 % končne rabe energije, hkrati pa se približno 50 % končne rabe energije pretvori v odpadno toploto – toploto, ki jo danes pogosto preprosto zavržemo v okolje preko hladilnih stolpov, segrevanja rek ali morja in drugih izpustov. Raziskava pokaže, da lahko visokotemperaturne toplotne črpalke to odpadno toploto učinkovito zajamejo in jo nadgradijo na bistveno višje temperature, primerne za najzahtevnejše industrijske procese.

Današnje tržne rešitve visokotemperaturnih toplotnih črpalk so praviloma omejene na temperature približno do 250 °C, medtem ko številni industrijski procesi zahtevajo več – tudi do ali celo preko 1000 °C. Objavljena raziskava zato sistematično predstavi in primerja alternativne pristope, ki bi lahko omogočili preboj: kalorične, termoelektrične, termoakustične tehnologije ter mehanske procese na osnovi Stirlingovega in Braytonovega krožnega procesa.

»Rešitve nam podajajo možnosti novih produktov in storitev ob istočasnem pomembnem znižanju rabe energije, emisij, manjšem toplotnem obremenjevanju okolja ter omogočajo povečanje odpornosti. Sedaj je čas, da te produkte spravimo v življenje, spodbudimo razvoj v gospodarstvu, hkrati pa naredimo popolno revizijo naših energetskih sistemov in industrije,« poudarja prof. dr. Andrej Kitanovski, prvi avtor članka.

Soavtorica doc. dr. Katja Klinar z UL FS dodaja: »Naša raziskava odpira povsem nova področja uporabe toplotnih črpalk. Medtem ko je danes samoumevno, da jih uporabljamo za ogrevanje in hlajenje stavb, se postavlja vprašanje, zakaj jih ne bi izkoristili tudi v industrijskih procesih – na primer za področja ogrevanja od 250 °C in vse do 1200 °C.«

Ključna prednost visokotemperaturnih toplotnih črpalk je njihova energijska učinkovitost: namesto da bi industrija toploto ustvarjala z neposrednim kur-



Prof. dr. Andrej Kitanovski in dr. Katja Klinar

jenjem ali uporovnim električnim ogrevanjem, lahko obstoječo odpadno toploto ponovno uporabi in jo dvigne na višjo temperaturno raven. Avtorji izpostavljajo, da bi se s tem lahko raba energije in posledične emisije pri visokotemperaturnih procesih vsaj razpolovile v primerjavi z danes razširjenimi pristopi. Največji potencial uporabe vidijo v predelovalni industriji (metalurgija, proizvodnja nekovinskih mineralnih proizvodov, kemijska industrija in rafinerije, deloma prehrabna in tekstilna industrija) in tudi v energetiki, kjer so priložnosti velike pri izrabi odpadne toplote, povezovanju sektorjev in bolj učinkovitih poteh pretvorbe viškov električne energije v toploto – namesto energetskega skromnih rešitev, ki danes pogosto prevladujejo.

Pri raziskavi so sodelovali strokovnjaki iz Kitajske, Španije, Hrvaške in Velike Britanije, kar potrjuje globalni pomen teme in krepi vlogo Slovenije v mednarodni znanstveni skupnosti. Raziskava poudari tudi širši izziv: odpadna toplota je danes pogosto obravnavana kot breme, ne kot priložnost – in prav tu se odpira prostor za nove tehnologije, nove industrijske rešitve in nova delovna mesta z višjo do-

dano vrednostjo. Avtorji ob tem napovedujejo, da raziskava odpira vrata novim projektom in razvoju prototipov, razmišljajo pa tudi o komercializaciji nekaterih idej, ki so jih v zadnjih letih že pripeljali do konceptualnih rešitev.

Objava v reviji Nature Energy je izjemno pomembna tako na mednarodni ravni kot tudi za slovensko znanost in industrijo. Z objavo so avtorji postavili nove mejnike na področju visokotemperaturnih grelnih procesov in toplotnih črpalk, ki jih doslej še ni nihče obravnaval. Hkrati pa so ponovno opozorili na dejstvo, da v svetu in tudi v Sloveniji odpadno toploto obravnavamo kot neizkoriščen odpadke, ki ga enostavno zavržemo v okolje. Rešitve, ki so jih podali, ponujajo za slovensko gospodarstvo razvoj novih globalno konkurenčnih produktov in storitev. Za slovensko politiko pa je to alarm, da je potrebno narediti popolno revizijo naših energetskega sistemov in industrije ter zagotoviti sodelovanje strokovnjakov z različnih področij.

Članek je dostopen na povezavi: <https://www.nature.com/articles/s41560-025-01908-4>.

»Rešitve nam podajajo možnosti novih produktov in storitev ob istočasnem pomembnem znižanju rabe energije, emisij, manjšem toplotnem obremenjevanju okolja ter omogočajo povečanje odpornosti. Sedaj je čas, da te produkte spravimo v življenje, spodbudimo razvoj v gospodarstvu, hkrati pa naredimo popolno revizijo naših energetskega sistemov in industrije,« poudarja prof. dr. Andrej Kitanovski, prvi avtor članka.

Soavtorica doc. dr. Katja Klinar z UL FS dodaja: *»Naša raziskava odpira povsem nova področja uporabe toplotnih črpalk. Medtem ko je danes samoumevno, da jih uporabljamo za ogrevanje in hlajenje stavb, se postavlja vprašanje, zakaj jih ne bi izkoristili tudi v industrijskih procesih – na primer za področja ogrevanja od 250 °C in vse do 1200 °C.«*

www.fs.uni-lj.si

Avtorji 2026. CC-BY 4.0

SODOBNA ZAŠČITA DIHAL: KO TEHNOLOGIJA PRESEŽE OMEJITVE KLASIČNIH RESPIRATORJEV

V številnih industrijah je zaščita dihal nepogrešljiva – nevarni delci, hlapi, dim ali aerosoli so vsakodnevna realnost v proizvodnji, varilstvu, kemiji, farmaciji in zdravstvu. Kljub temu so klasični PAPR-respiratorji pogosto nepraktični: težki, povezani s cevmi in nahrbtniki, nerodni za uporabo v ozkih ali dinamičnih delovnih okoljih.

CleanSpace ponuja sodoben odgovor na te izzive. Gre za linijo elektronsko podprtih respiratorjev, ki delujejo brez cevk in zunanij enot. Sistem se samodejno prilagaja uporabnikovemu dihanju in omogoča visoko stopnjo zaščite (EN 12942 – TM3), obenem pa ohranja izjemno nizko težo (približno 500 g).

Glavne prednosti:

- ▶ brez cevnih povezav in nahrbtnikov,
- ▶ samodejni nadzor pretoka zraka,
- ▶ dolga avtonomija in tiho delovanje,
- ▶ enostavno vzdrževanje in čiščenje,
- ▶ modeli za industrijo, zdravstvo in ATEX-območja.

Uporabniki CleanSpace respiratorjev poročajo o občutno večjem udobju in pripravljenosti za uporabo – kar pomeni, da zaščita v praksi bolje deluje.



Vir:

TU-VAL, d. o. o., Breznikova ulica 26, 1230 Domžale, Tel: + 386 1 729 37 80, Mobi: +386 31 679 965, www.tu-val.si, g. Marko Levstek

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0

POVEZAVA STRUKTURE IN LASTNOSTI VZPOSTAVLJENEGA OMREŽJA OGLJIKOVIH NANOCEVK ZA IZBOLJŠANJE TERMO-MEHANSKE STABILNOSTI IN ELEKTRIČNE PREVODNOSTI V FLEKSIBILNIH NANOKOMPOZITIH

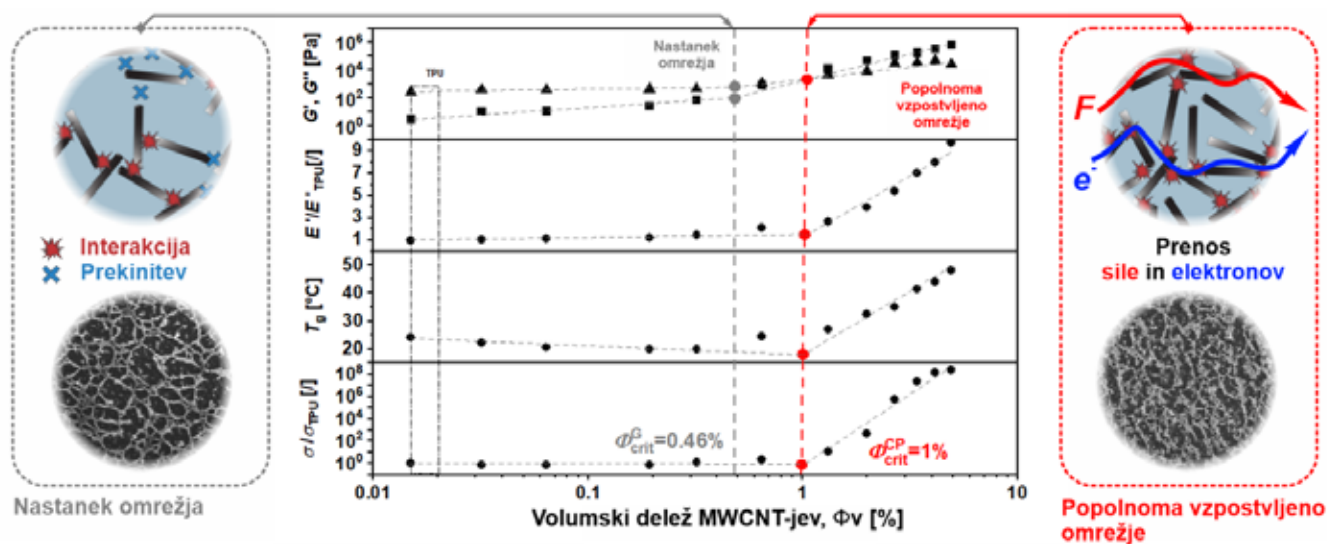
Raziskovalna skupina Laboratorija za eksperimentalno mehaniko (LEM) Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani je v sodelovanju s skupino Odseka za tehnologijo površin Inštituta Jožef Stefan (IJS) izvedla eksperimentalno študijo na področju ogljikovih nanokompozitov, ki obravnava vpliv nastanka omrežja iz ogljikovih nanocev (CNT) na termo-mehansko stabilnost in električno prevodnost fleksibilnih nanokompozitov. Rezultati raziskave so objavljeni v priznani znanstveni reviji s področja materialnih znanosti Materials & Design (IF = 7,9).

Raziskavo je izvedla petčlanska interdisciplinarna skupina, ki združuje znanja s področij nanomaterialov, eksperimentalne mehanike, karakterizacije polimernih nanokompozitov in elektronske mikroskopije. V raziskavi so sodelovali Stefan Serafimoski, Matic Šobak, Lidija Slemenik Perše in Alen Oseli s Fakultete za strojništvo UL ter Alenka Vesel z Inštituta Jožef Stefan. S komplementarnimi raziskovalnimi pristopi so prispevali k celostnemu razumevanju nastanka CNT-omrežja ter njegovega vpliva na funkcionalne lastnosti fleksibilnih nanokompozitov. Predstavljena študija je tesno povezana s sodobnimi tehnologijami fleksibilnih senzorjev, ki predstavljajo ključne elemente številnih področij – od avtomobilske in letalske industrije do medicine. Zaradi širokega spektra aplikacij so tovrstni senzori izpostavljeni različnim okoljskim in obremenitvenim pogojem, hkrati pa morajo izkazovati izjemne funkcionalne lastnosti, ki poleg električne prevodnosti

vključujejo tudi visoko termo-mehansko stabilnost. Funkcionalnost takšnih materialov primarno zavisi od vzpostavljenega CNT-omrežja oziroma od povezav med mikrostrukturno in makroskopskimi lastnostmi materiala, kar je bil tudi glavni predmet obravnavane raziskave.

Glede na navedeno je bil glavni cilj študije vzpostaviti jasno povezavo med osnovnimi gradniki CNT-omrežja, njegovim nastankom oziroma konfiguracijo ter posledičnim vplivom na električne lastnosti in termo-mehansko vedenje fleksibilnih nanokompozitov, sestavljenih iz večstenskih ogljikovih nanocev (MWCNT) in termoplastičnega poliuretana (TPU).

Z uporabo naprednih eksperimentalnih orodij (plazemsko jedkanje in elektronska mikroskopija, reološka in termo-mehanska analiza, elektroanaliza itd.) je bilo pokazano, da je omrežje sestavljeno iz sno-



Grafični prikaz, kako se lastnosti materiala spreminjajo z naraščajočo vsebnostjo ogljikovih nanocev (MWCNT).

Katere izzive ste pri eksperimentalnem delu zaznali kot ključne pri vzpostavljanju popolnega CNT-omrežja in kako bi jih lahko reševali v industrijskih procesih?

Kot pojasnjuje Alen Oseli, je eden ključnih izzivov vzpostavitve popolnoma funkcionalnega CNT-omrežja priprava ustrezne mešanice, ki mora zagotoviti čim učinkovitejši razdor primarnih aglomeratov na osnovne enote ter njihovo enakomerno porazdelitev v polimerni talini. »Pri tem je ključno, da ne pride do degradacije niti osnovnega materiala niti nanopolnila,« poudarja. V primeru prenosa postopkov v industrijsko okolje se takšni izzivi praviloma rešujejo s predpripravo materiala, na primer z izdelavo koncentratov nanopolnila in matričnega materiala, v katerih so CNT-ji že homogeno porazdeljeni.

pov MWCNT, ki predstavljajo osnovne gradnike sistema. Ti se obnašajo kot toge paličaste (Brownove) enote, ki zaradi amorfne narave elastomerne matriče tvorijo naključne geometrijske preplete. Izkazalo se je, da vzpostavitev funkcionalnosti (električna prevodnost, termo-mehanska stabilnost itd.) ne

Kako vidite potencial aplikacij teh materialov?

»Piezo- in termoobčutljivi materiali imajo izjemen aplikativni potencial,« poudarja Oseli. »Mogoče jih je integrirati v pametne avtomatizirane sisteme v industriji in medicini, uporabljati v fleksibilnih elektronskih komponentah ter v nosljivih napravah, kjer so ključne lastnosti zanesljivost, prilagodljivost in visoka funkcionalnost.«

zavisi zgolj od vzpostavitve CNT-omrežja pri 0,46 vol.% MWCNT, temveč mora biti omrežje popolnoma razvito, kar se doseže pri 1 vol.% MWCNT. V tem primeru se električna prevodnost izboljša za osem velikostnih razredov (z 10^{-11} na 10^{-3} S/m), termo-mehanska stabilnost, opredeljena s temperaturo steklastega prehoda, pa se poveča za približno 30 °C (z 20 °C na 50 °C).

Ta ključna odkritja omogočajo razvoj in proizvodnjo ogljikovih nanokompozitov z relativno visoko fleksibilnostjo in izjemno električno prevodnostjo, kar je ključnega pomena za nadaljnji razvoj tehnologij fleksibilnih senzorjev.

www.fs.uni-lj.si

Avtorji 2026. 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

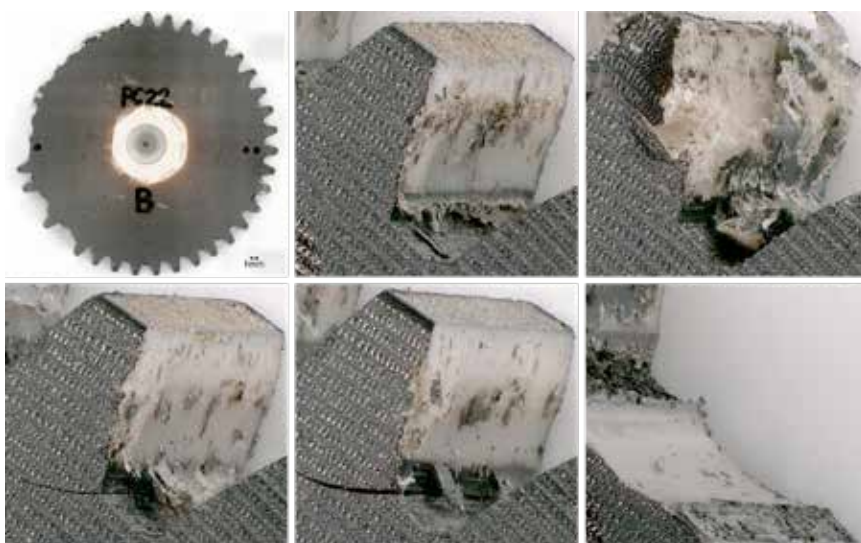







VISOKOTRDNOSTNE ZAŠČITNE PREVLEKE ZA IZBOLJŠANJE ŽIVLJENJSKE DOBE POLIMERNIH ZOBNIKOV

Raziskovalci Fakultete za strojništvo (UL) so dokazali, da lahko visokotrdnostne DLC-prevleke (ang. Diamond-Like Carbon) znatno izboljšajo življenjsko dobo polimernih zobnikov pri obratovanju v zahtevnih pogojih. Rezultati so pomemben korak razvoja bolj učinkovitih in trajnostnih pogonskih sistemov.



Tipične poškodbe PEEK polimernega zobnika s 5 mikrometrov debelo a-C:H DLC prevleko po odpovedi: obraba, deformacija zob, utrujenostne razpoke in lom zob

Polimerni zobniki se zaradi nizke mase in tihega delovanja pogosto uporabljajo v prenosnikih moči, vendar njihova omejena odpornost proti utrujanju in obrabi predstavlja izziv. Številne raziskave so pokazale, da lahko površinske prevleke znatno izboljšajo tribološke lastnosti kovinskih komponent, manj pa je znanega o vplivu visokotrdnostnih DLC-prevlek na polimerne zobnike.

V članku *High cycle fatigue and wear behavior of ta-C and a-C:H coated PEEK polymer spur gears under dry contact conditions*, ki je bil objavljen v prestižni reviji *Polymer Testing* (IF = 6.0), so naši raziskovalci kot prvi eksperi-

mentalno preučili zmogljivost polimernih zobnikov PEEK, prevlečenih s prevlekami ta-C in a-C:H različnih debelin. Zobniki so bili preizkušeni v referenčnem paru z jeklenim zobnikom v skladu s priporočili VDI 2736. Preizkusi so potekali brez mazanja zobnikov, pri navoru 1,8 Nm.

Rezultati kažejo, da se tanke prevleke (2 μm) hitro obrabijo in ne

izkazujejo znatnega vpliva na življenjsko dobo polimernih zobnikov. Debelejše prevleke (5 μm) pa kljub relativno hitri obrabi bistveno izboljšajo odpornost zobov proti utrujanju. Zobniki s prevleko ta-C (5 μm) in a-C:H (5 μm) so okvirno dosegli dvakrat daljšo življenjsko dobo v primerjavi z zobniki brez prevlek. Prevleke a-C:H so izšle kot zmagovalec, saj so povzročile občutno manjšo obrabo protiubirnih jeklenih zobnikov v primerjavi s prevlekami ta-C.

»Naša raziskava dokazuje, da je mogoče z ustrezno izbrano debelino in tipom DLC-prevleke bistveno povečati zmogljivost polimernih zobnikov v realnih obratovalnih pogojih,« poudarja prvi avtor raziskave asist. dr. Bor Mojškerc. Vodilni avtor izr. prof. dr. Nikola Vukašinović dodaja, da so ugotovitve dragocene za prihodnji razvoj naprednih in lahkih pogonskih sistemov.

Povezava do članka v reviji *Polymer testing*: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.109009>

www.fs.uni-lj.si

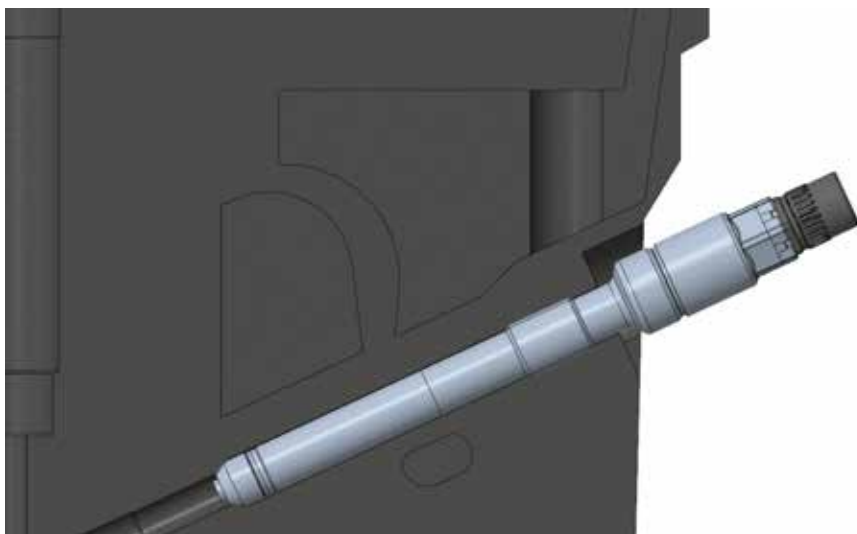
Avtorji 2026. CC-BY 4.0

REVija ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO

VENTIL

ZAKAJ JE TOČNO MERJENJE VISOKOFREKVENČNEGA TLAKA KLJUČNO ZA PRIHODNOST MOTORJEV Z NOTRANJIM ZGOREVANJEM?

Kljub globalnemu prehodu na elektromobilnost, ki ga spodbujata okoljska politika in tehnološki napredek, bodo motorji z notranjim zgorevanjem v prihodnjih letih še vedno ključni za avtomobilsko industrijo. To je posledica trenutnih omejitev baterijske tehnologije, nepopolne infrastrukture za polnjenje ter specifičnih omejitev tehnologije gorivnih celic.



Prečni prerez vgradnje piezoelektričnega merilnika tlaka (Hidria, CPS) v motor z notranjim zgorevanjem

Izboljšanje učinkovitosti in zmanjšanje emisij motorjev z notranjim zgorevanjem sta zato ključnega pomena za izpolnjevanje strogih standardov emisij toplogrednih plinov, hkrati pa podpirata postopni prehod k popolni elektrifikaciji vozil.

Točnost določanja dinamičnih parametrov motorjev z notranjim zgorevanjem je v veliki meri odvisna od točnosti merjenja tlaka v valju motorja, na podlagi katerega se ti parametri določajo. Točnost merjenja visokofrekvenčnega tlaka v motorjih z notranjim zgorevanjem pa je bila do sedaj omejena, saj se merilniki tlaka, uporabljeni v teh aplikacijah, tradicionalno kalibrirajo kvazistatič-

no s konvencionalnimi etaloni za tlak.

V članku *A method for determining the high-frequency in-cylinder pressure of an internal combustion engine using a pressure sensor dynamically calibrated with a shock tube*, objavljenem v prestižni reviji *Mechanical Systems and Signal Processing* (IF = 8,9), so raziskovalci Laboratorija za meritve v procesnem strojništvu (LMPS) in Laboratorija za motorje z notranjim zgorevanjem in elektromobilnost (LICEM) v sodelovanju z raziskovalci Laboratorija ETC na Inštitutu za avtomobilsko industrijo Hidria Advancetec razvili in ovrednotili novo metodo za določanje viso-

kofrekvenčnega tlaka v valju motorjev z notranjim zgorevanjem z uporabo merilnika tlaka, ki je dinamično kalibriran z udarno cevjo.

Rezultati kažejo, da predlagana metoda izboljša točnost merjenja tlaka v valju do 13 %, kar posledično izboljša določanje hitrosti naraščanja tlaka do 38 %, povprečne temperature plina v valju do 5 % ter hitrosti sproščanja toplote celo do 48 %. »Razvoj nove metode omogoča uporabo dinamično kalibriranih merilnikov tlaka, kar bistveno izboljšuje točnost določanja dinamičnih parametrov motorjev z notranjim zgorevanjem ter s tem pomembno prispeva k nadaljnjemu razvoju motorjev z večjo učinkovitostjo in nižjimi emisijami,« izpostavlja prvi avtor raziskave, doc. dr. Andrej Svete.

Povezava do članka: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088832702501235X>

www.fs.uni-lj.si

Avtorji 2026. CC-BY 4.0



KAKO TEHNOLOŠKE KONVERGENCE IN SINERGIJE NA NOVO OPREDELJUJEJO PRIHODNOST INDUSTRIJ IN GOSPODARSTVA

Janez Škrlec

Danes je na primer skrivnost konvergence v širšem obsegu v tem, da tehnologije ne dojemamo kot cilj sam po sebi, temveč kot niz orodij, ki jih je mogoče vedno znova kombinirati na prilagodljive načine za reševanje različnih problemov. Tehnološki napredek je odvisen od kombiniranja konvergence in sestavljanja.



Bionični dvojčki bodo naslednja meja v integraciji človeka in tehnologije

Različne tehnologije se združujejo v hibride, združujejo sisteme in pospešujejo napredek v neprekinjenem ciklu. Danes konvergence spodbujajo preboje na številnih področjih. Obvladovanje konstelacije tehnologij in ne izoliranih napredkov

je ključ do reševanja globalnih izzivov in uspeha v dobi, ko se meje med industrijami brišejo. Zanimiv je model trajnostne tehnološke konvergence (STCM – Sustainable Technological Convergence) kot multidisciplinarni okvir, zasnovan za reševanje izzivov trajnosti. Model združuje robno in kognitivno računalništvo, bionično tehnologijo in generativno umetno inteligenco za spodbujanje čiste proizvodnje in trajnostnega razvoja, pri čemer tehnološke inovacije usklajuje z družbeno odgovornostjo podjetij. STCM je zgrajen s strateško integracijo novih tehnologij. Robno računalništvo optimizira obdelavo podatkov blizu vira, s čimer zmanjšuje zakasnitev in porabo energije. Kognitivno računalništvo uporablja napredne algoritme za inteligentno odločanje. Bionska tehnologija uporablja vpogled iz kognitivnega računalništva za oblikovanje trajnostnih rešitev, ki jih navdihujejo naravni sistemi. Generativna umetna inteligenca sintetizira ugotovitve, da predlaga inovativne z viri učinkovite zasnove, ki izboljšujejo operativno trajnost in spodbujajo krožno gospodarstvo.

V industriji že poznamo digitalne dvojčke in njihovo vlogo. Kaj pa prinašajo bionični dvojčki?

Bionični dvojčki (BT Bionic Twins) bodo naslednja meja v integraciji človeka in tehnologije. Koncept dvojčkov je doživel pomembno preobrazbo, saj se je razvil iz povsem bioloških pojavov v napredne tehnološke sisteme, ki združujejo fizični in digitalni svet. Ta evolucija se je premaknila od bioloških dvojčkov, naravno prisotnih genetskih replik, do digitalnih dvojčkov, virtualnih modelov, ki simulirajo in optimizirajo entitete resničnega sveta, in zdaj do bioničnih dvojčkov, ki predstavljajo globoko integracijo biologije in tehnologije. Biološki dvojčki so naravno prisotni pari posameznikov s skoraj iden-

Janez Škrlec, inž. Uredništvo revije Ventil

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0

tično genetsko sestavo. Študija bioloških dvojčkov že dolgo zagotavlja vpogled v genetiko, epigenetiko in vplive okolja na človekov razvoj.

Digitalni dvojčki: Z napredkom v računalništvu in analizi podatkov se je koncept dvojčka razširil v digitalno področje. Digitalni dvojček je dinamična digitalna replika živega ali neživega bitja v realnem času, kot je človek, rastlina, fizični objekt, proces ali sistem. Z uporabo senzorjev interneta stvari, algoritmov strojnega učenja in velikih podatkov digitalni dvojčki omogočajo nenehno spremljanje, simulacijo in optimizacijo svojih fizičnih dvojnikov. Široko se uporabljajo v panogah, kot so proizvodnja, vesoljska industrija in zdravstvo. Na primer: v vesoljski industriji lahko digitalni dvojček letalskega motorja napove potrebe po vzdrževanju z analizo podatkov senzorjev v realnem času, s čimer prepreči okvare in optimizira delovanje. Najnovejši razvoj je bionični dvojček, ki združuje biološko in tehnološko področje. Bionični dvojčki vključujejo integracijo živih bioloških sistemov z naprednimi kibernetskimi komponentami. Za razliko od digitalnih dvojčkov, ki so povsem virtualni, so bionični dvojčki fizične entitete, ki združujejo organske in sintetične materiale. To lahko vključuje vse od nevronskega tkiva in protez do bioinženirskih tkiv, integriranih z elektronskimi sistemi. Tehnični vidiki bioničnih dvojčkov: kibernetični vsadki in nevronski vmesniki, napredna protetika in biohibridne naprave, umetni organi in tkivno inženirstvo ter razširjena kognicija in simbioza človek-stroj.

Umetna inteligenca, bionična inteligenca in druge oblike inteligence

Za razumevanje prihodnosti (tudi spreminjanja industrij) je poleg umetne inteligence nujno potrebno poznati tudi druge oblike, na primer bionsko inteligenco. Inteligenca je sposobnost entitete, da se prilagodi spremembam v okolju in premaga izzive. Inteligenca je bila od nekdaj lastnost, ki je bila značilna le za žive organizme, vse do pojava umetne inteligence. Zato izraz »inteligence« v sebi nosi latentno »bionično« konotacijo. V nasprotju z umetno inteligenco, ki se osredotoča na podvajanje in razširjanje človeških kognitivnih sposobnosti, bionična inteligenca črpa navdih iz inteligentnega vedenja in funkcij v različnih živih organizmih, da bi omogočila bionske sisteme z nizko porabo energije, napredno delovno učinkovitostjo in močno prilagodljivostjo nalogam. V svetu nastajajo centri za bionično inteligenco, eden od bolj znanih je v Nemčiji – BITS.

Ker smo vse bližje neki novi realnosti, je prav, da dam v zaključku tega članka še poudarek, da se konvergenca tehnologij lahko danes odzove na opredeljene tržne ali družbene potrebe in omogoči nastanek novih industrij ali raziskovalnih področij. Ta proces lahko pomaga pri proizvodnji novih in hibridnih izdelkov, odpiranju novih raziskovalnih področij in ustvarjanju novih industrijskih priložnosti. Danes ni preprosto najti načina krmarjenja skozi obdobje kombinatoričnih inovacij. Obstaja sicer okvir, ki poudarja tri ključne faze: kombinacijo (integracijo različnih tehnologij), konvergenco (prestrukturiranje vrednostnih verig) in združevanje (učinki omrežja in preobrazba ekosistemov).



Fronius VELO
Nova dimenzija
MIG MAG varjenja

INGVAR

PODPORA DIGITALNIH DVOJČKOV ZA POVEČANJE TRAJNOSTI V SISTEMIH MONTAŽE

Mihael Debevec, Matevž Resman, Miha Pipan, Denis Jankovič, Marko Šimic, Niko Herakovič

Izvleček:

Ta študija predstavlja razširjen pristop digitalnega dvojčka za izboljšanje trajnosti in učinkovitosti v sistemih montaže. V sklopu razvojnega dela sta bila razvita dva digitalna dvojčka za primer paletne krožne proizvodne linije s tremi delovnimi postajami. Prvi digitalni dvojček odraža obstoječi proces z enim končnim preverjanjem kakovosti, drugi pa vključuje kontrolo kakovosti po vsaki izvedeni delovni operaciji. Analize na podlagi izvajanih scenarijev so pokazale, da dodatna mesta za kontrolo kakovosti zmanjšajo porabo surovin do 10 %, nastajanje odpadkov za okrog 20 % in porabo energije v rang 10 %. Prikazan pristop digitalnih dvojčkov je omogočil hitro testiranje ob različnih nastavljenih parametrih in fleksibilno odločanje o uporabnih nastavitvah, kar potrjuje njegovo uporabnost v različnih okoljih montaže in potencialno širitev na druga proizvodna področja.

Ključne besede:

trajnostna proizvodnja, digitalni dvojček, zmanjševanje odpadkov, pametna proizvodnja, digitalno okolje, simulacija, metodologija

1 Uvod

Hiter razvoj industrije 4.0 je temeljito spremenil proizvodno okolje, kar je vodilo do pametnih tovarn, ki uporabljajo napredne digitalne tehnologije za optimizacijo procesov [1–4]. Posledično morajo sodobni proizvodni sistemi postati vse bolj agilni, prilagodljivi in trajnostni, da se lahko prilagajajo dinamičnim tržnim zahtevam in okoljskim pogojem, hkrati pa zagotavljajo visoko kakovost izdelkov [5–7]. Med transformativnimi tehnologijami, ki pogajajo te spremembe, digitalni dvojčki igrajo še posebej pomembno vlogo, saj omogočajo ustvarjanje dinamičnih virtualnih predstavitev fizičnih sistemov.

Učinkovit digitalni dvojček temelji na poenostavljeni, a ustrezno natančni predstavitvi resničnega proizvodnega sistema in procesa, ki zajema vse ključne značilnosti in lastnosti. Ti dvojčki so razviti za specifične namene, kot so analiza ali napovedovanje obnašanja proizvodnih sistemov v virtualnem okolju [8].

Slika 1 prikazuje osnovni koncept digitalnega dvojčka, kjer je realni proizvodni sistem povezan s svojim virtualnim dvojnikom preko vmesnika za neprekinjeno izmenjavo podatkov. V tem prispevku uporabljamo naslednjo terminologijo: digitalni model se nanaša na statično virtualno predstavitev sistema, ki vključuje njegovo geometrijo, logiko in parametre. Digitalni dvojček pa je dinamična, podatkovno pogojena replika, ki se preko vmesnikov v realnem času sinhronizira s fizičnim sistemom, omogoča dvosmerni pretok podatkov in podpira simulacije, spremljanje in optimizacijo.

Trajnost je postala ključna prioriteta v proizvodnji z vse večjim poudarkom na zmanjševanju odpadkov materialov in optimizaciji uporabe virov. Čeprav je vloga digitalnih dvojčkov pri povečevanju učinkovitosti in podpiranju odločanja dobro prepoznana, njihov potencial za spodbujanje trajnosti – zlasti z zmanjševanjem odpadkov – še ni dovolj raziskana. Še posebej integracija dodatnih ukrepov nadzora kakovosti v modele digitalnih dvojčkov kot sredstva za zmanjševanje materialnih izgub še ni bila dovolj raziskana.

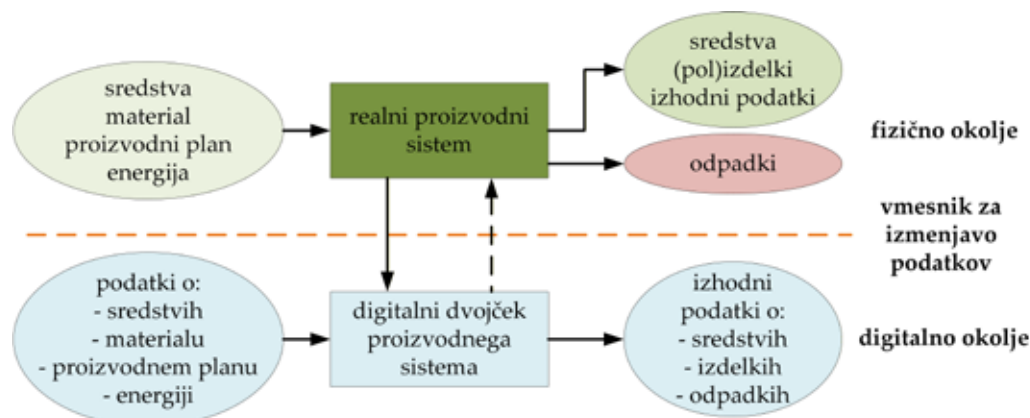
Obstoječe raziskave o digitalnih dvojčkih in trajnosti so se večinoma osredotočale na izboljšave učinkovitosti in produktivnosti, medtem ko le redke študije preučujejo, kako izboljšane strategije nadzora kakovosti znotraj digitalnih dvojčkov lahko nepo-

Doc. dr. Mihael Debevec, univ. dip. inž., dr. Matevž Resman, mag. inž., doc. dr. Miha Pipan, univ. dipl. inž., dr. Denis Jankovič, mag. inž., izr. prof. dr. Marko Šimic, univ. dipl. inž., prof. dr. Niko Herakovič, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-1.17>



Slika 1: Povezava med fizičnim in digitalnim svetom (ilustracija je bila prilagojena na podlagi koncepta iz referenc [8–9]).

sredno prispevajo k zmanjšanju odpadkov v resničnem proizvodnem okolju. Poleg tega primanjkuje analiz, temelječih na scenarijih, ki ocenjujejo vpliv različnih pristopov nadzora kakovosti na zmanjšanje odpadkov in s tem na ohranjanje vhodnih materialov. Kljub široki uporabi digitalnih dvojčkov je v realnem svetu le malo celovitih implementacij, ki bi pokazale njihovo vrednost pri optimizaciji pretoka materiala in notranje logistike za trajnostne rezultate. Naslavljanje teh raziskovalnih vrzeli bi lahko ponudilo dragocene vpogled v to, kako je mogoče digitalne dvojčke uporabljati učinkoviteje za trajnostno proizvodnjo.

Ta študija predstavlja strukturirano korak-po-korak metodologijo za oblikovanje in implementacijo digitalnega dvojčka, ki vključuje napredne ukrepe nadzora kakovosti za zmanjšanje materialnih izgub in izboljšanje učinkovitosti virov. Z uporabo modeliranja na podlagi scenarijev je sistematično ocenjen vpliv različnih strategij nadzora kakovosti na zmanjšanje odpadkov, s čimer se zapolni pomembna vrzel v literaturi. Predlagani okvir je potrjen s primerom iz realne industrije, da se prikaže praktična učinkovitost digitalnih dvojčkov pri optimizaciji pretoka materiala in izboljšanju trajnosti. Z vgradnjo mehanizmov nadzora kakovosti v modele digitalnih dvojčkov ta raziskava prispeva nove vpogled v upravljanje življenjskega cikla in ponuja proizvajalcem izvedljive strategije za bolj trajnostno in učinkovito delovanje z nizko stopnjo generacije odpadkov.

Prispevek je strukturiran na naslednji način. Poglavje Izkušnje in znanje povzema raziskave o digitalnih modelih, digitalnih dvojčkih in trajnosti v sistemih montaže. Materiali in metode opisujejo petstopenjsko metodologijo po korakih: 1. korak zajema analizo sistema montaže in grupiranje gradnikov, 2. korak obravnava procesne tokove v proizvodnem sistemu, 3. korak opredeljuje identifikacijo podatkov in parametrov za razvoj digitalnega modela in digitalnega dvojčka, 4. korak popisuje povezavo

med digitalnim modelom in realnim sistemom in 5. korak razlaga vizualizacijo pridobljenih rezultatov. Sledi testiranje s primeri iz prakse in razvoj digitalnih dvojčkov, kjer je pristop prikazan v realnih sistemih montaže in analiziranih rezultatih. Rezultati o zmanjšanju odpadkov in učinkovitosti virov so predstavljeni v poglavju Rezultati in razprava. Na koncu Zaključki povzemajo prispevke in opredeljujejo smeri prihodnjih raziskav.

2 Izkušnje in uporabljeno znanje

Raziskava, predstavljena v tem prispevku, se močno opira na pretekle izkušnje in akumulirano znanje avtorjev, ki je bilo razvito in izpopolnjeno skozi več znanstvenih študij v zadnjih letih. Velik del tega preteklega dela je bil posvečen razvoju in uporabi konceptov, povezanih z virtualno tovarno in optimizacijo proizvodnih procesov [8, 10–13]. Te študije so zagotovile pomembne metodološke temelje za modeliranje in simulacijo kompleksnih proizvodnih okolij, kar omogoča učinkovitejšo analizo in podporo odločanju. Poleg tega so prejšnje raziskave obravnavale integracijo vitkih pristopov v proizvodne sisteme [14] s poudarkom na učinkovitosti, zmanjševanju odpadkov in nenehnem izboljševanju. Gledano kot celota to delo predstavlja trdno osnovo, na kateri temelji obravnavana študija.

Kljub mnogim dostopnim raziskavam po našem vedenju še niso bile opravljene raziskave, ki bi izrecno obravnavale vidik trajnosti pri zmanjševanju odpadkov z vključitvijo dodatnih ukrepov nadzora kakovosti v modele digitalnih dvojčkov ter sistematično ocenile njihov vpliv z uporabo scenarijev »kaj-če« v resničnih proizvodnih sistemih. Čeprav so digitalni dvojčki široko raziskani v kontekstu trajnosti, je bil poudarek pretežno na izboljšanju operativne učinkovitosti, izkoriščanja virov in splošne zmogljivosti sistema. Vendar pa specifični potencial vključevanja korakov nadzora kakovosti po vsaki sestavni operaciji – in s tem zgodnje prepoznavanje

ter ločevanje neustreznih izdelkov – še ni bil temeljito raziskan. Tak pristop bi lahko bistveno zmanjšal nepotrebno porabo materiala, omejil predelave in minimiziral nastajanje napak v nadaljnji proizvodnji, s čimer bi prispeval k izboljšani trajnosti.

3 Materiali in metode

Sodobni proizvodni sistemi postajajo vse bolj kompleksni zaradi naraščajočega števila različic izdelkov, kar digitalizacijo hkrati postavlja kot izziv in kot predpogoj za ohranjanje konkurenčnosti. Ena od obetavnih rešitev je uporaba digitalnih dvojčkov, ki omogočajo izvajanje »kaj-če« scenarijev za analizo in optimizacijo procesov. Z uporabo simulacij je mogoče virtualno oceniti alternativne konfiguracije procesov, pri čemer se izhodne matrike generirajo iz velikega števila vhodnih parametrov.

Predlagana metodologija uvaja strukturiran petstopenjski okvir za sistematičen razvoj digitalnih dvojčkov. V prvem koraku so proizvodni gradniki [13] razdeljeni v štiri kategorije: Proizvodnja, Logistika, Skladiščenje in Kontrola. Ta klasifikacija zagotavlja, da je vsak gradnik povezan z ustreznimi parametri in zahtevami modeliranja ter natančno odraža svojo funkcijo znotraj proizvodnega sistema.

V drugem koraku se celoten proizvodni sistem in njegov procesni tok definirata s funkcionalnim diagramom. Ta diagram prikazuje vse gradnike, njihove vhode in izhode ter povezave med njimi, s čimer zagotavlja celovit pogled na proizvodni tok. Hkrati služi kot osnova za zanesljivo modeliranje in kasnejšo sinhronizacijo s fizičnim sistemom.

Korak tri se osredotoča na določanje parametrov in vzpostavitev digitalnega modela. Za vsak gradnik so izbrani le najbolj relevantni parametri – kot so čas procesov, prostorske koordinate, hitrosti, pospeški in sistemske omejitve – da se zagotovi tako natančnost kot računska učinkovitost. Ti parametri se nato implementirajo v simulacijsko okolje, sledita pa temeljita verifikacija in validacija, da se potrdi skladnost z resničnim proizvodnim sistemom.

Četrty korak predstavlja povezavo med digitalnim modelom in realnim sistemom ter vzpostavitev digi-

talnega dvojčka. Ta korak presega ustvarjanje statičnega digitalnega modela. Da bi model postal operativni digitalni dvojček, je bil vzpostavljen vmesnik za neprekinjeno sinhronizacijo podatkov med fizičnim montažnim sistemom in njegovo virtualno reprezentacijo. Uporabljen je bil standardni industrijski protokol OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture). Sinhronizacija vključuje podatke v realnem času, kot so stanje strojev (vklopljeno/izklopljeno, napaka), položaj in identifikacija palet, časi izvajanja operacij ter rezultati kontrol kakovosti. Frekvenca posodabljanja je znašala 1 Hz. Ta dvosmerna povezava omogoča, da digitalni dvojček ne le odraža trenutno stanje sistema, temveč tudi prejema ukaze za optimizacijo (npr. dinamično preražeporejanje nalog), kar je temelj za izvajanje »kaj-če« scenarijev in prediktivno vzdrževanje.

Peti korak se osredotoča na vizualizacijo in interakcijo z uporabnikom. Digitalni dvojčki ponujajo prilagojene nadzorne plošče za deležnike, kot so operaterji, planerji in managerji, ter zagotavljajo vpoglede v kakovost, ozka grla, stroške in delovanje strojev. Sinhronizacija v realnem času med digitalnim in fizičnim svetom omogoča tudi prediktivno upravljanje, sledljivost izdelkov in prilagodljivo odločanje, kar povečuje fleksibilnost ter podpira trajnostno in učinkovito proizvodnjo.

4 Testiranje s primeri iz prakse in razvoj digitalnih dvojčkov

Primeri iz prakse temeljijo na realnem montažnem paletnem sistemu, ki obsega tri montažna mesta in končno kontrolo kakovosti. Montažne operacije potekajo na treh paletah, na katerih se izdelujeta dve vrsti izdelkov (Tip_N in Tip_B). Glavna razlika med obema vrstama izdelkov je v vhodnih sestavnih delih, ko je različna širina uporabljenih tkanin in kovinskih plošč.

Proces montaže je za obe vrsti izdelkov enak in se razlikuje le v specifičnih prilagoditvah proizvodne linije. Te prilagoditve vključujejo zamenjavo palet, spremembo parametrov nanosa lepila ter spremembo parametrov stiskanja in sušenja, prilagojeno specifikacijam izdelka.



Slika 2 : Logična shema procesa montaže za Primer iz prakse 1



Slika 3 : Logična shema procesa montaže za Primer iz prakse 2

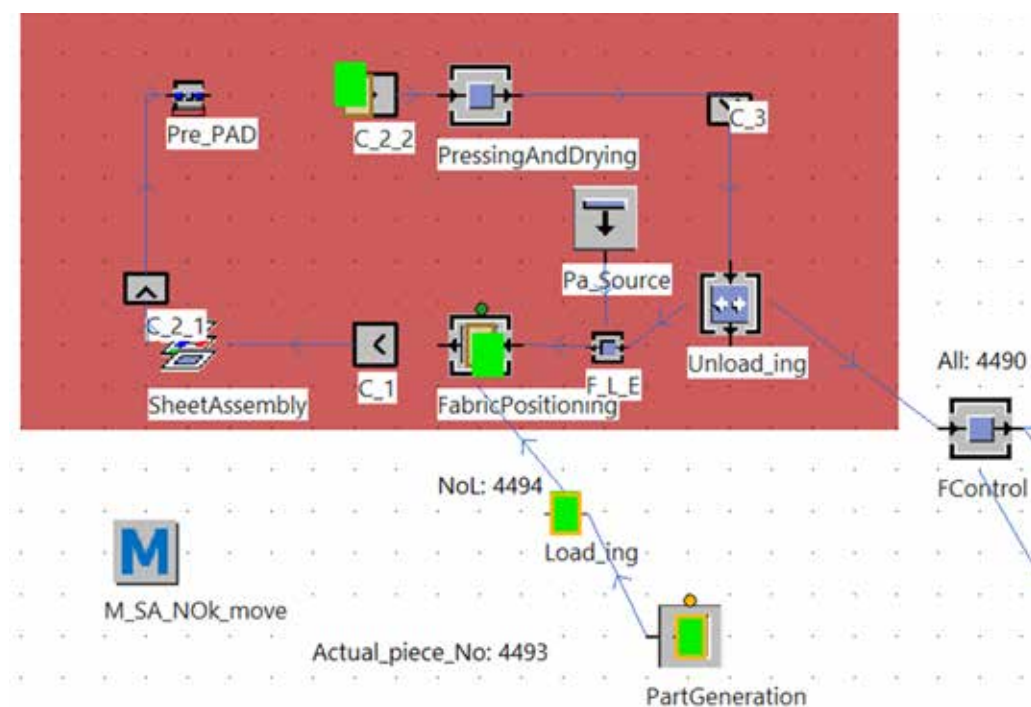
Najprej je bil obravnavan Primer iz prakse 1, ki opisuje obstoječi proizvodni sistem, ki temelji na enem končnem preverjanju kakovosti (Slika 2). Za izboljšanje proizvodnega procesa ob hkratnem spodbujanju bolj trajnostnega pristopa k proizvodnji je bil razvit Primer iz prakse 2, ki je bil testiran in ocenjen z raziskovalnim pristopom. Glavna značilnost Primera iz prakse 2 je uvedba dodatnega nadzora kakovosti na vseh sestavnih postajah (Slika 3), kjer vsak posamezen oranžen kvadrat predstavlja delovno mesto in je kontrola kakovosti kot ena od operacij vključena v tok izdelave.

S primerjavo situacij v obeh primerih iz prakse bo raziskano, kako različne strategije nadzora kakovosti

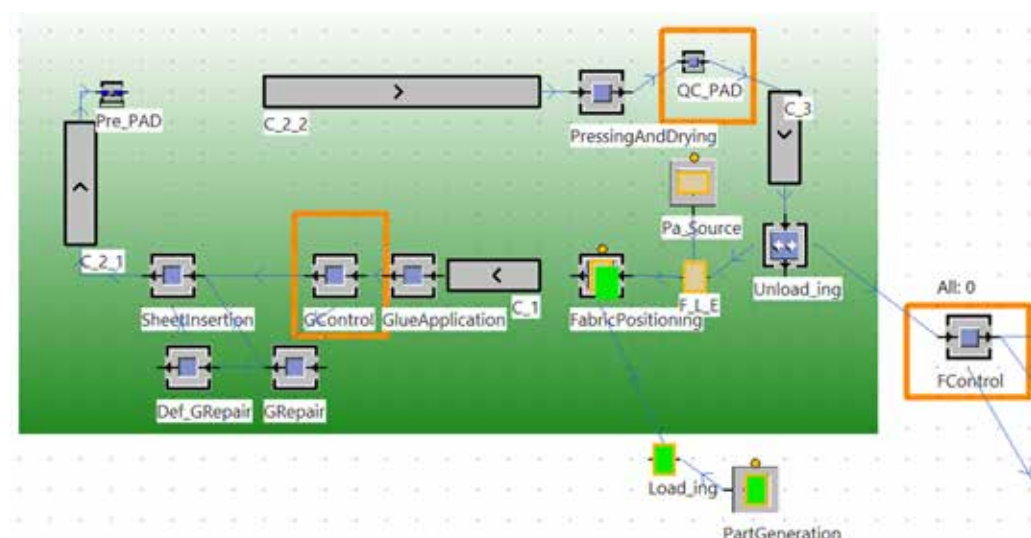
vtplivajo na zmanjšanje odpadkov in optimizacijo proizvodnega procesa. Cilj je najti najučinkovitejšo rešitev, ki ne izboljša le kakovosti izdelkov, temveč tudi minimizira odpadke in podpira trajnostno uporabo surovin.

Za doseg tega cilja bodo za oba primera razviti digitalni dvojčki z uporabo zgoraj opisanega pristopa. Osredotočili smo se na razvoj digitalnih dvojčkov, vendar je bil proces korak-po-korak za ustvarjanje teh dvojčkov izveden v celoti.

Razvojni proces se je začel z definicijo postavitve proizvodnega sistema, ki je vključevala vse potrebne gradnike. Vsaka vrsta gradnika je popisana



Slika 4 : Digitalni dvojček za Primer iz prakse 1 [13]



Slika 5 : Digitalni dvojček za Primer iz prakse 2 (dodatni procesi nadzora kakovosti v oranžnih kvadratih) [13]

z vsemi potrebnimi specifičnimi parametri. Digitalni dvojčki so bili razviti na podlagi postavljenih logičnih modelov, kot okolje za modeliranje pa je bila uporabljena dobro znana programska oprema Plant Simulation [15]. Med razvojem digitalnih dvojčkov je bil osnovni logični model transformiran v digitalne dvojčke (*Slika 4* za Primer iz prakse 1 in *Slika 5* za Primer iz prakse 2). Ti dvojčki so bili nadgrajeni z interaktivnimi grafičnimi, numeričnimi in besedilnimi izhodi za izboljšanje uporabnosti.

V digitalne dvojčke so vgrajene vse logične lastnosti dejanskega montažnega sistema. Ko različni izdelki potujejo skozi sistem, ta samodejno prepozna vsak izdelek in ustrezno prilagodi čase procesov na posameznih operacijah. Sistem prav tako prepozna spremembo tipa izdelkov in samodejno določi potrebne čase menjave za delovne procese, potrebne za rekonfiguracijo proizvodnega sistema.

Na prikazu razvitega modela (*Slika 5*) vsak posamezen prikazan oranžen kvadrat predstavlja operacijo kontrole kakovosti na posameznem delovnem mestu.

5 Rezultati in razprava

V tem poglavju so predstavljeni rezultati, pridobljeni z izvajanjem digitalnih dvojčkov montažnega sistema za Primer iz prakse 1 in Primer iz prakse 2. Za

raziskovalne namene je bilo izvedenih pet testov, pri čemer so bili zbrani podatki o času proizvodnje, številu dobrih kosov Tip_N, številu dobrih kosov Tip_B, številu neustreznih kosov Tip_N in številu neustreznih kosov Tip_B.

Rezultati petih testnih izvedb za vsak primer so prikazani v Tabeli 1. Testi so zajemali različne časovne horizonte in razmerja izdelkov, da bi zajeli različne obremenitve sistema:

- ▶ TEST_1: 4 ure delovanja, razmerje izdelkov Tip_N : Tip_B = 50 : 50,
- ▶ TEST_2: 8 ur delovanja, razmerje Tip_N : Tip_B = 50 : 50,
- ▶ TEST_3: 24 ur delovanja, razmerje Tip_N : Tip_B = 50 : 50,
- ▶ TEST_4: 4 ure delovanja, razmerje Tip_N : Tip_B = 60 : 40,
- ▶ TEST_5: 8 ur delovanja, razmerje Tip_N : Tip_B = 50 : 50.

Vsi testi so bili izvedeni pod enakimi začetnimi pogoji (hitrost transportnega traku, temperatura okolja, nastavitve strojev). Spodnji del tabele (Kazalniki trajnostno usmerjenega primera ...) prikazuje absolutno zmanjšanje porabe za vsak test, izračunano kot razlika med Primerom iz prakse 1 in 2. Relativni prihranki za glavne kazalnike so povprečno: število neustreznih kosov ↓ ~78 %, poraba pločevine ↓ ~8-10 %, poraba izolacije ↓ ~74 %, poraba lepila ↓ ~74 %.

Tabela 1 : Podatki o učinkovitosti za vseh pet testov za Primer iz prakse 1 in Primer iz prakse 2 [13]

		TEST_1:	TEST_2:	TEST_3:	TEST_4:	TEST_5:
Primer iz prakse 1	N_dobrih [kos]	1425	8265	14253	1898	8748
	N_defektnih [kos]	575	3335	5747	769	3531
	N_pločevine N [kos]	288	1668	2872	480	1809
	N_pločevine B [kos]	287	1667	2875	289	1722
	L_izolacije [m]	132,24	767,04	1321,84	174,96	811,26
	V_lepila [mL]	2588	15008	25860	3556	15933
Primer iz prakse 2	N_dobrih [kos]	1852	10742	18525	2027	9358
	N_defektnih [kos]	148	858	1475	162	746
	N_pločevine N [kos]	75	430	738	88	376
	N_pločevine B [kos]	73	428	737	74	370
	L_izolacije [m]	34,02	197,32	339,24	37,12	171,52
	V_lepila [mL]	667	3862	6638	736	3360
Kazalniki trajnostno usmerjenega Primera iz prakse 2 v primerjavi s Primerom iz prakse 1	N_defektnih [kos]	427	2477	4272	607	2785
	N_pločevine N [kos]	213	1238	2134	392	1433
	N_pločevine B [kos]	214	1239	2138	215	1352
	L_izolacije [m]	98,22	569,72	982,6	137,84	639,74
	V_lepila [mL]	1921	11146	19222	2820	12573

Ocenjeni 10-odstotni prihranek energije izhaja iz zmanjšane porabe električne energije glavnih porabnikov sistema (poganjala transportnega traku, servopogonov, grelnikov za sušenje lepila, osvetlitve). Poraba energije (v kWh) je bila izračunana na podlagi izmerjene nazivne moči posameznih enot in njihovega dejanskega časa delovanja med testi. Z uvedbo vmesnega nadzora kakovosti se je skrajšal skupni čas delovanja sistema, potreben za izdelavo enake količine dobrih izdelkov, saj se neustrezni izdelki prej odvzamejo iz proizvodnega toka. To vodi do sorazmernega zmanjšanja energije, porabljene za pogon in podporne procese.

Na koncu je treba poudariti, da modeli digitalnih dvojčkov omogočajo spremljanje, analizo in dinamično optimizacijo delovnih procesov. In obenem omogočajo oceno vpliva različnih proizvodnih dejavnikov – kot so razporeditev dela, izkoriščenost strojev in ozka grla v sistemu – na učinkovitost posameznih delovnih korakov in celotnega proizvodnega sistema. Dodatno grafična predstavitev izsledkov služi kot učinkovito orodje za odločanje, ker proizvodnim managerjem in inženirjem omogoča prepoznavanje potencialnih izboljšav, izvajanje optimizacij procesov ter testiranje možnih trajnostnih proizvodnih strategij v virtualnem okolju, preden se te uvedejo v dejanski proizvodnji.

6 Zaključki

V prispevku je obravnavano, kako digitalizacija in digitalni dvojček načrtovanega in nadgrajenega montažnega procesa ter uvedba dodatnih kontrolnih procesov izboljšata trajnost z zmanjšanjem porabe surovin in odpadkov. Z uporabo dveh primerov iz prakse, pri katerih je bilo izvedenih po pet testov, nam analiza pokaže, da ti ukrepi bistveno povečajo proizvodno učinkovitost ob hkratnem minimiziranju vplivov na okolje in zdravje.

Predstavljeni raziskovalni rezultati, pridobljeni iz študij resničnih primerov, kažejo 8–10 % zmanjšanje porabe surovin, 18–23 % zmanjšanje nastajanja odpadkov in posledično do 10 % prihranka energije v primerjavi z osnovnimi operacijami. V obeh primerih je pristop z uporabo digitalnega dvojčka omogočil hitro analizo scenarijev in nastavitve parametrov ter podpiral prilagodljivo odločanje ter izpolnjevanje določenih ključnih kazalnikov uspešnosti (KPI) za trajnost.

Poleg tega je predlagani pristop visoko prilagodljiv različnim proizvodnim sistemom, še posebej tistim z visoko stopnjo odpadkov. Digitalni dvojčki so se izkazali kot učinkovito orodje za napovedovanje časov izvedbe, primerjavo proizvodne uspešnosti ob različnih količinah izdelkov istega tipa ter prepoznavanje ključnih neučinkovitosti. Njihova fleksibilnost omogoča prilagojeno testiranje pod različnimi delovnimi pogoji ter pomaga pri načrtovanju virov in optimizaciji procesov.

Teste je mogoče izvesti vnaprej, da se pridobi najugodnejši scenarij na podlagi izhodnih podatkov določenih scenarijev – še preden se delovni proces izvede v dejanskem sistemu.

Dodatne raziskave na tem področju lahko vključujejo dinamiko delovne sile, vključno z ravniyo znanja in razpoložljivostjo, kar pripomore k izboljšanju proizvodnih modelov in k boljšemu načrtovanju potreb po delovni sili. Razširljivost sistema omogoča prilagoditve proizvodne zmogljivosti bodisi z avtomatizacijo, investicijami v nove stroje ali izboljšanim planiranjem.

Poleg tega razširljivost sistema omogoča prilagoditve proizvodne zmogljivosti bodisi z avtomatizacijo, investicijami v nove stroje ali izboljšanim planiranjem. Prihodnje raziskave bodo vključevale tudi dinamiko delovne sile (raven znanja, razpoložljivost) v model digitalnega dvojčka, kar bo prispevalo k boljšemu načrtovanju kadrovskih potreb in celovitejši oceni trajnostnih učinkov.

Raziskavo so financirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARIS), raziskovalni projekt J2-4470 in raziskovalni program P2-0248, ki ju financira Republika Slovenija – Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport, Evropska unija v okviru programa Horizon Europe, številka projekta 101087348, projekt INNO2MARE – Krepitev zmogljivosti za odličnost slovenskih in hrvaških inovacijskih ekosistemov za podporo digitalnim in zelenim prehodom pomorskih regij, in tudi projekt NextGenerationEU GREENTECH.

Viri

- [1] Pandhare, V.; Negri, E.; Ragazzini, L.; Cattaneo, L.; Macchi, M.; Lee, J. Digital twin-enabled robust production scheduling for equipment in degraded state. *J. Manuf. Syst.* 2024, 74, 841–857. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.027>.
- [2] Malega, P.; Daneshjoo, N. Increasing the production capacity of business processes using Plant simulation. *Int. J. Simul. Model.* 2024, 23, 41–52.
- [3] Weng, L. L. Dynamic scheduling for manufacturing workshops using Digital Twins, Competitive Particle Swarm Optimization, and Siamese Neural Networks. *Adv. Prod. Eng. Manag.* 2024, 19, 301–314. <https://doi.org/10.14743/apem2024.3.508>.
- [4] Marc, I.; Berlec, T. Inventory risk decision-making techniques using customer behaviour analysis. *Stroj. vestnik/Journal Mech. Eng.* 2023, 69, 317–325, 2023. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2023.577>.
- [5] Komoto, H.; Masui, K. Model-based design and simulation of smart factory from usage and functional aspects. *CIRP Ann.* 2018, 67, 133–136. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.025>.

- [6] Hussain, H.; Jahanzaib, M. Sustainable manufacturing-An overview and a conceptual framework for continuous transformation and competitiveness. *Adv. Prod. Eng. Manag.* 2018, 13, 237–253. DOI: 10.14743/apem2018.3.287.
- [7] Cioffi, R.; Travaglioni, M.; Piscitelli, G.; Petrillo, A.; Parmentola, A. Smart manufacturing systems and applied industrial technologies for a sustainable industry: A systematic literature review. *Appl. Sci.* 2020, 10, 2897. <https://doi.org/10.3390/app10082897>.
- [8] Debevec, M.; Simic, M.; Jovanovic, V.; Herakovic, N. Virtual factory as a useful tool for improving production processes. *J. Manuf. Syst.* 2020, 57, 379–389. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.10.018>.
- [9] Resman, M.; Protner, J.; Simic, M.; Herakovic, N. A Five-Step Approach to Planning Data-Driven Digital Twins for Discrete Manufacturing Systems. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3639. <https://doi.org/10.3390/app11083639>.
- [10] Resman, M.; Debevec, M.; Herakovič, N. Using Digital Twin Technology to Improve the Organization of the Supply Chain in Piece Type of Production. *Systems* 2025, 13, 505. <https://doi.org/10.3390/systems13070505>.
- [11] Debevec, M.; Pipan, M.; Zupan, H.; Herakovič, N. An innovative training of production planners through virtual production performing. *Teh. vjesn.* 2016, 23, 363. <https://doi.org/10.17559/TV-20150130124330>.
- [12] Debevec, M.; Herakovič, N. Management of resources in small and medium-sized production enterprises. *IRAN J SCI TECHNOL B.* 2010, 34, 509. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2002229.2002233>.
- [13] Resman, M.; Herakovič, N.; Debevec, M. Integrating Digital Twin Technology to Achieve Higher Operational Efficiency and Sustainability in Manufacturing Systems. *Systems* 2025, 13, 180. <https://doi.org/10.3390/systems13030180>.
- [14] Herakovič, N.; Metlikovič, P.; Debevec, M. Motivational Lean Game to Support Decision between Push and Pull Production Strategy. *Int. J. Simul. Model.* 2014, 13, 443–446. DOI: 10.2507/IJSIMM13(4)4.275.
- [15] Bangsow, S. *Tecnomatix Plant Simulation – Modeling and programming by means of examples*, 2nd ed.; Springer: Berlin, Germany, 2020.

Support with digital twins to enhance sustainability in assembly systems

Abstract:

This study presents an extended approach to digital twins for improving sustainability and efficiency in assembly systems. As part of the development, two digital twins were developed for a pallet circular production line with three workstations. The first digital twin represents the existing process with a single final quality check, while the second incorporates quality control after each work operation. Analyses of the implemented scenarios showed that additional quality control stations reduce raw material consumption by up to 10%, waste generation by around 20%, and energy consumption by around 10%. The digital twin approach enabled rapid testing with different parameter settings and flexible decision-making on optimal configurations, confirming its value in various assembly environments and its potential for expansion to other production areas.

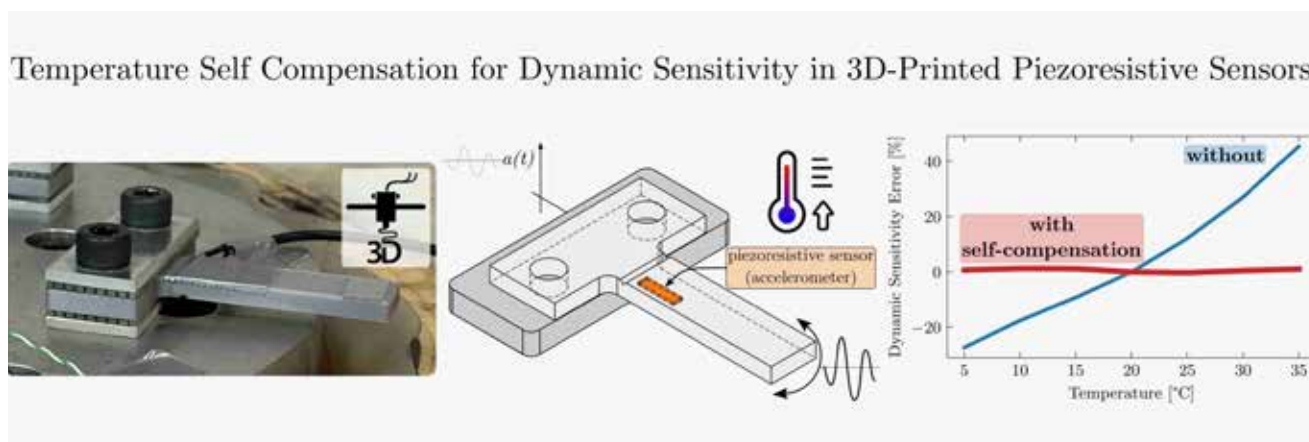
Keywords:

sustainable production, digital twin, waste reduction, smart manufacturing, digital environment, simulation, methodology



3D-NATISNJENI SENZORJI S SAMODEJNIM PRILAGAJANJEM NA TEMPERATURNE SPREMEMBE BREZ DODATNIH ZAZNAVAL

Raziskovalci Fakultete za strojništvo so razvili revolucionarno metodo, ki 3D-natisnjnim senzorjem omogoča samodejno prilagajanje temperaturnim spremembam brez potrebe po dodatnih temperaturnih senzorjih. Odkritje odpira vrata za široko uporabo pametnih struktur v spremenljivih okoljih, od letala do infrastrukturnih objektov, kjer dosedanje rešitve niso bile dovolj zanesljive ali so bile preveč kompleksne.



Temperaturna samo-kompensacija 3d natisnjenih zaznaval omogoča merjenje dinamičnih obremenitev v širokem temperaturnem območju

3D-natisnjeni piezouporovni senzorji omogočajo zaznavanje deformacije, pospeška in sil neposredno v pametnih strukturah. Vendar spremembe temperature povzročijo do 90 % spremembo občutljivosti senzorja, kar onemogoča zanesljive meritve. Ta ovira je do sedaj preprečevala širšo uporabo tehnologije 3D-natisnjenih senzorjev.

Konvencionalni pristopi zahtevajo dodatne temperaturne senzorje, kompleksne kalibracije ali posebne materiale. Takšne rešitve povečujejo kompleksnost sistema, zmanjšujejo zanesljivost in integracijo večjega števila senzornih elementov.

Raziskava objavljena v *International Journal of Mechanical Sciences* ($IF=9.4$) odkriva, da je sprememba električne upornosti piezouporovnega senzorja direktno sorazmerna spremembam njegove občutljivosti. To omogoča natančno napoved občutljivosti senzorja le na podlagi meritev upornosti med normalnim delovanjem.

verza v Ljubljani in Department of Engineering, University of Perugia, Italija je testirala 24 3D-natisnjenih pospeškomerov v temperaturnem območju 5-35 °C in treh nivojih vlažnosti. Napovedi občutljivosti v testiranem temperaturnem območju dosegajo natančnost pod 5 % pri normalnih in 12 % pri ekstremno vlažnih pogojih. Metoda ne potrebuje dodatne opreme in senzorjev, saj temelji na fizikalni lastnosti senzorja, ki se že sedaj spremljajo med obratovanjem. "Ta pristop je pomemben korak naprej," poudarja Gašper Krivic iz Laboratorija za dinamiko strojev in konstrukcij (LADISK). "Namesto dodajanja kompleksnosti izkoriščamo to, kar senzor že ima."

Metoda omogoča enostavno integracijo več piezouporovnih senzorjev v pametne strukture, ki obratujejo v spremenljivem okolju. Aplikacije vključujejo metamateriale, aerospace sisteme in spremljanje stanja konstrukcij.

www.fs.uni-lj.si

Avtorji 2026. CC-BY 4.0

Ekpa raziskovalcev iz Fakultete za strojništvo, Uni-

RAZVOJ DIGITALNEGA DVOJČKA PROGRESIVNEGA MEHATRONSKEGA ŠTANČNEGA ORODJA

Tomaž Pepelnjak, Uroš Štuklek, Albin Sirc, Dejan Rožič, Jure Peternel,
Ema Stefanovska

Izvleček:

V sodobni industrijski proizvodnji se teži k optimizaciji izdelovalnih procesov s posebnim poudarkom na zmanjševanju porabljene energije in odpada pri izdelavi kot tudi čim večji fleksibilnosti izdelave. V primerih preoblikovalnih postopkov predstavljajo dodatno povečanje kompleksnosti proizvodnje zahtevana oženja izdelovalnih toleranc naročnikov, ki silijo vsa proizvodna podjetja v iskanje novih, inovativnih izvedb preoblikovanja.

Kot primer inovativnega prilagodljivega koncepta procesa štančanja je bilo v okviru projekta »Pametno mehatronsko progresivno orodje za štančanje tipskih izdelkov« za optimizacijo delovanja mehatronskega progresivnega štančnega orodja vzpostavljeno prilagajanje delovanja mehatronskega preoblikovalnega orodja, ki sledi vnaprej programirani obliki izdelka. Z enim preoblikovalnim orodjem lahko ob njegovi fleksibilnosti izdelujemo več različnih geometrijsko sorodnih izdelkov in hkrati minimiziramo odpad ob menjavi tipa komponente na izbranem orodju.

V prispevku je predstavljen koncept razvoja delovanja enega rezalnega pestiča z mehatronskim nastavljanjem, za katerega je bil razvit nov inovativen direktno gnan elektromagnetni aktuator za dvig in spust tega aktivnega dela preoblikovalnega orodja. Vzporedno smo kakovost delovanja orodja in vgrajenega aktuatorja spremljali z digitalnim dvojčkom orodja in vzpostavili ustrezno povratno zanko njegovega nadzora in obratovanja. Predstavljeni koncept progresivnega mehatronskega štančnega orodja se bo v nadaljevanju ob večjem številu krmiljenih pestičev nadgradil v progresivno mehatronsko štančno orodje, ki omogoča izdelavo do osem različnih izdelkov z istim orodjem.

Ključne besede:

digitalni dvojček, štančanje pločevine, mehatronsko orodje, prilagodljivost procesa

1 Uvod

V razvitem industrijskem svetu postajajo digitalni dvojčki ključni elementi industrije 4.0, s katero se drastično povečujeta prilagodljivost in zmogljivost proizvodnih sistemov [1]. Sodobne pametne tovarne, ki so zasnovane na digitalizaciji in večnivojski

informacijski povezanosti, podjetjem omogočajo boljšo sledljivost proizvodnje in optimizacijo procesov. Sistematičen pristop uvajanja digitalnih dvojčkov na nivo fleksibilne proizvodnje je pri tem ključnega pomena [2].

Digitalni dvojček je virtualna podoba fizičnega objekta, sistema ali procesa, ki omogoča analizo v realnem času, napovedovanje in preprečevanje napak ter optimizacijo samega procesa [3]. Proces razvoja ideje digitalnih dvojčkov sega v leto 2002, ko je Grieve [4] predstavil koncept »virtualnega digitalnega izražanja, enakovrednega fizičnim izdelkom« na področju upravljanja življenjskega cikla izdelka. Na vseh področjih tehnoloških procesov so se sprva pojavila le digitalna vrednotenja in simulacijski modeli, ki so v digitalnem okolju primerjali digitalni model z realnim stanjem – dandanes take modele imenujemo »digitalne sence«. Prvič pojem digitalnega dvojčka uporabi NASA v osnutku tehnološkega načrta leta 2010 [5]. Danes digitalni dvojčki (DD) povezujejo digitalni in fizični svet

Izr. prof. dr. **Tomaž Pepelnjak**, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; **Uroš Štuklek**, univ. dip. ekon., Dafa kontakt tehnologija, d. o. o., Žalec; **Albin Sirc**, univ. dipl. inž., Egasi d. o. o.; Radovljica; **Dejan Rožič**, mag. inž., Dafa kontakt tehnologija d. o. o., Žalec; **Jure Peternel**, univ. dipl. inž., Egasi d. o. o., Radovljica, Ema Stefanovska, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-118>

ter omogočajo natančno spremljanje in upravljanje različnih procesov. Bistvena razlika proti predhodnim različicam primerjav digitalnega in realnega okolja je v aktivnem povezovanju obeh delov digitalnih dvojčkov (digitalnega in fizikalnega). Čeprav sta pojem DD in njegova uporabnost izšla iz proizvodnega industrijskega okolja (pametne tovarne), se je njegova uporaba hitro razširila tudi na druge panoge, kot so pametna mesta, pametni energetski sistemi, krožno gospodarstvo, trajnostna uporaba virov ... [6]. Definicija DD se je razširila celo s fizikalnih modelov na popise kompleksnih bioloških sistemov, kot so ljudje, rastline in drevesa, ter v panoge poljedelstva, živinoreje in medicine [3].

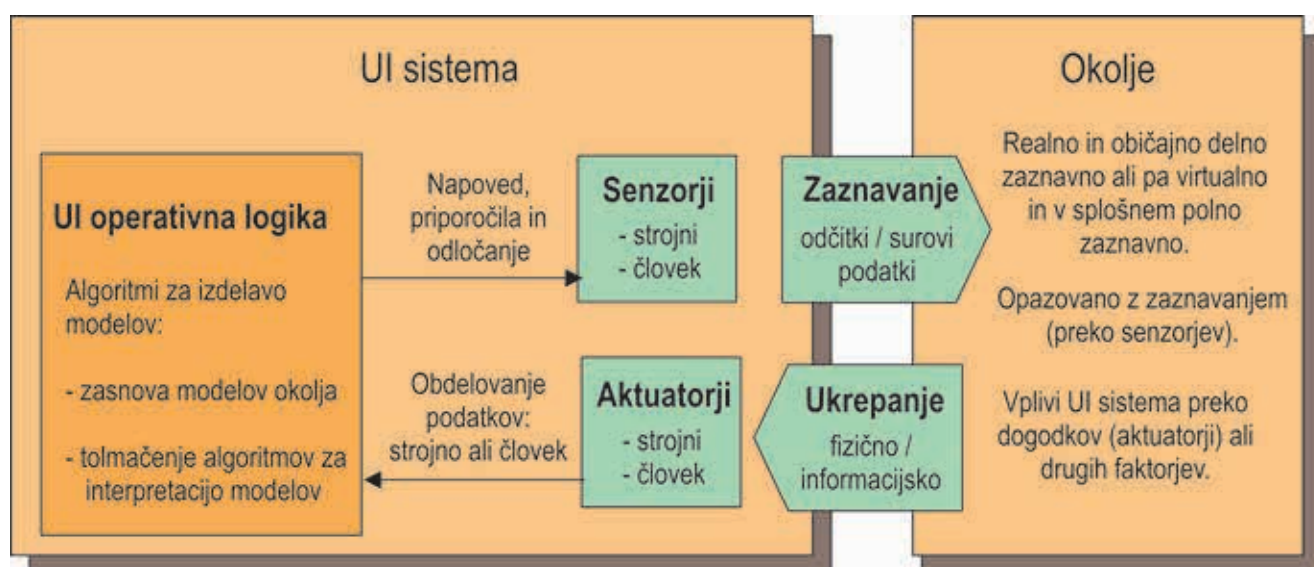
Integracija DD v procesih preoblikovanja kovin strokovnjakom omogoča neprekinjeno spremljanje delovanja strojne opreme in preoblikovalnega orodja v realnem času in s tem zagotavlja minimalne motnje proizvodnje. S sprotnim zbiranjem, analizo in interpretacijo podatkov je mogoče pravočasno in proaktivno zaznati morebitne napake ter odstopanja v delovanju sistema stroj-orodje-preoblikovalni proces. To poleg sprotne optimizacije in krmiljenja procesa preoblikovanja s pomočjo umetne inteligence (UI) ustvarja trdno osnovo za učinkovito izvajanje strategij prediktivnega vzdrževanja. Koncept delovanja digitalnega dvojčka prikazuje *slika 1*.

Za kakovostno delovanje digitalnega dvojčka mora ta omogočati interakcijo z uporabnikom ter implementacijo ustreznih logičnih modelov za delovanje sistema [7]. Takšen pristop sprotnega usklajevanja digitalnega in fizikalnega okolja omogoča preprečevanje nepredvidenih zastojev in izpadov, zmanjšuje tveganja za okvare tako strojev kot preoblikovalnih orodij ter optimizacijo pogojev preoblikovanja, vse to pa se neposredno odraža v večji zanesljivosti in stabilnosti proizvodnega procesa. Zaradi značilnosti proizvodnje s postopki preoblikovanja, težje

vgradnje senzorjev in aktuatorjev ter nizke geometrijske prilagodljivosti orodij so do nedavnega bile rešitve DD na tem področju industrijske proizvodnje redke in omejene [8]. Še posebej so tovrstne omejitve ključnega pomena pri procesih štančanja, ki potekajo pri taktih orodij med 100 in 1500 gibi na minuto, kar pogojuje tudi čase zajema informacij senzorjev, procesiranje informacij in odzivne čase aktuatorjev.

V okviru projekta »Pametno mehatronsko progresivno orodje za štančanje tipskih izdelkov« (projekt št. P-RRI-NOO/00283) smo zasnovali in razvili pametno mehatronsko progresivno štančno orodje, ki omogoča izdelavo več različnih geometrij s spremembami lege aktivnih elementov orodja. Bistvena novost delovanja mehatronskega progresivnega štančnega orodja (v nadaljevanju mehatronskega orodja) je njegovo unikatno prilagajanje delovanja skladno z zahtevami oblik izdelka, ki smo jih analizirali na primeru različnih vklopov rezalnih pestičev. Za ustrezno digitalizacijo in krmiljenje delovanja orodja je bil vzpostavljen digitalni dvojček mehatronskega orodja, ki spremlja za kakovostno štančanje ključne procesne parametre. V našem primeru kot digitalni dvojček opisujemo CAD-model orodja, v katerem so poleg dimenzij in opredeljenih materialov zajeti tudi potrebni podatki o uporabljenih senzorjih in aktuatorjih, ki v fizičnem okolju spremljajo delovanje mehatronskega orodja in skrbijo, da deluje v opredeljenih delovnih pogojih.

Digitalni dvojček mehatronskega progresivnega štančnega orodja, razvit na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani v Laboratoriju za preoblikovanje, predstavlja tudi izhodišče za simulacijski model ključnih detajlov orodja, s katerim se v digitalnem okolju nato predvidi, kako bi ob različnih pogojih sistem deloval v prihodnosti. Stopnja natančnosti v digitalnem okolju izvedenih simulacij je zelo odvi-



Slika 1 : Delovanje digitalnega dvojčka in interakcije z okoljem [7]

сна od kakovosti vhodnih parametrov in vrste uporabljenih modelov – bolj so ti kakovostni, več časa potrebujemo za njihovo izvedbo.

2 Digitalni dvojček mehatronskega progresivnega štančnega orodja

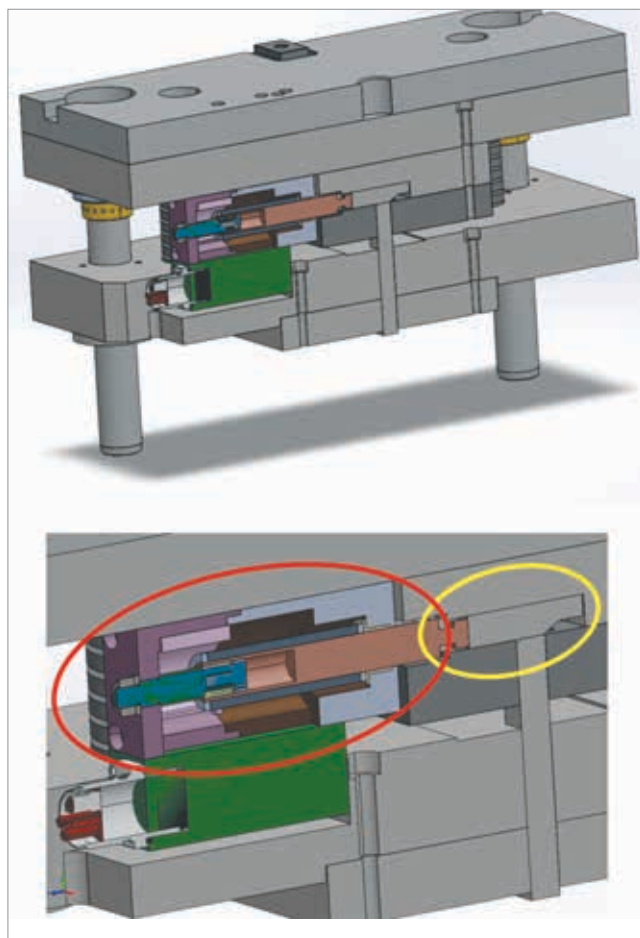
V dosegljivi strokovni in znanstveni literaturi doslej digitalni dvojčki štančnih procesov niso bili poznani, zato smo na Fakulteti za strojništvo UL v preliminarnih raziskavah [8, 9] koncept DD prilagodljivega progresivnega štančnega orodja za prilagajanje kota krivljenja razvili popolnoma na novo. Pri razvoju digitalnega dela DD smo uporabili inovativen koncept, v katerem smo združili napredne tehnike strojnega učenja za izboljšanje natančnosti procesov štančanja pločevine. Razviti model s kombiniranjem odprtokodnega razpršenega okvirja za povečevanje gradienta za strojno učenje (light gradient boosting machine – LightGBM) in globokih nevronskih mrež (DNN) dosega visoko natančnost pri napovedovanju končne geometrije štančanih pločevinastih delov in proaktivno identificira potencialna odstopanja, da se zagotovi strogo upoštevanje geometrijskih toleranc.

Pridobljena znanja smo prenesli v koncept mehatronskega orodja, razvitega v podjetju Dafra kontakt tehnologija d. o. o., ki omogoča izdelavo več različnih štančanih delov v istem orodju [10]. V specifičnem kontekstu preoblikovanja pločevine tehnologija digitalnega dvojčka predstavlja virtualno podobo samostojnega procesa, ki se osredotoča na preoblikovanje kovinskih surovcev (v našem primeru traku pločevine). Zaradi fleksibilnosti mehatronskega preoblikovalnega orodja se osredotočamo na delovanje aktivnih delov orodja in njihove preklope za zagotavljanje različnih oblik izdelkov, izdelanih z istim orodjem [11]. Poleg tega ob delovanju orodje shranjuje vse ključne podatke delovanja in nastavitve aktivnih delov orodja, ki se ob zagonu orodja za izdelavo nove serije takoj priključijo iz podatkovne baze in ustrezno z aktuatorji nastavijo pravilne geometrijske nastavitve orodja.

V delovanju izbranega tipa mehatronskega štančnega orodja imajo ključno vlogo preklopni aktuatorji [12] – *slika 2*, ki zagotavljajo, da lahko z istim orodjem izdelujemo družino oblikovno sorodnih izdelkov, kot so na primer štančane komponente za baterijske sklope. Koncept delovanja takega preklopnega mehatronskega orodja in primernost izbire aktuatorja sta bila preverjena na testnem orodju z le enim aktuatorjem. Slednji je omogočal vklapljanje in izklapljanje pestiča za prebijanje izbrane rezane oblike.

Za zagotavljanje premikanja preklopnega mehanizma lahko uporabljamo pnevmatske ali hidravlične pogone in elektromotorje. Vsi navedeni sistemi morajo v primeru štančnega orodja delovati v okolju, ki

zaradi delovanja stroja močno vibrira. V preteklosti pogosto uporabljeni pnevmatski pogoni so se izkazali za zelo kompleksne in manj zanesljive pri hitro tekočih preoblikovalnih orodjih, kjer lahko prihaja do zamud pri preklonih pnevmatskih sistemov. V ta namen je bil v okviru razvojnega projekta razvit cevasti linearni elektromotor (partner Egasi d. o. o.), ki je bistveno manj občutljiv na vibracije, povzročene ob delovanju mehatronskega preoblikovalnega orodja. Pri razvoju je bil poseben razvojni poudarek posvečen ustreznemu uležanju gibajočega se dela magnetne cevke aktuatorja. Upoštevati je treba, da se celoten aktuator zaradi premikanja nastavitvenih preklopov pestiča mora vgraditi v gornji gibajoči se del preoblikovalnega orodja. Slednji se v začetni razvojni fazi giblje s takti od 100 do 300 gibov na minuto – *slika 2* (spodaj), v nadaljnjih razvojnih projektih pa bi se mehatronska preoblikovalna orodja vgradila v stroje, ki zmorejo do 1000 gibov na minuto. Zaradi navedenih dinamičnih obremenitev gibajočih se delov orodja je optimalno uležanje aktuatorja ključnega pomena. Karakteristike razvitega direktno gnanega cevnege aktuatorja v primerjavi z običajno uporabljanimi pnevmatskimi aktuatorji prikazuje *tabela 1*.



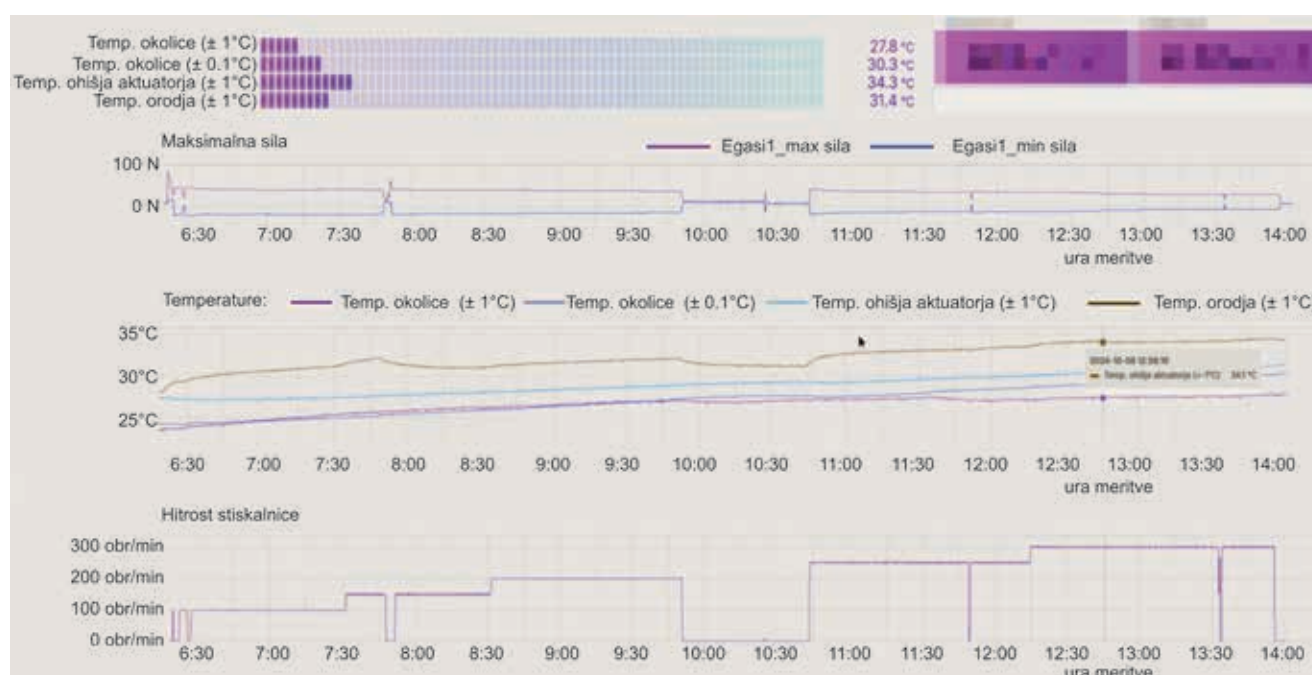
Slika 2 : CAD-model prereza testnega orodja (zgoraj) in detajl preklopnega mehanizma z aktuatorjem (spodaj). Preklopni mehanizem je označen z rumeno in aktuator z rdečo elipso.

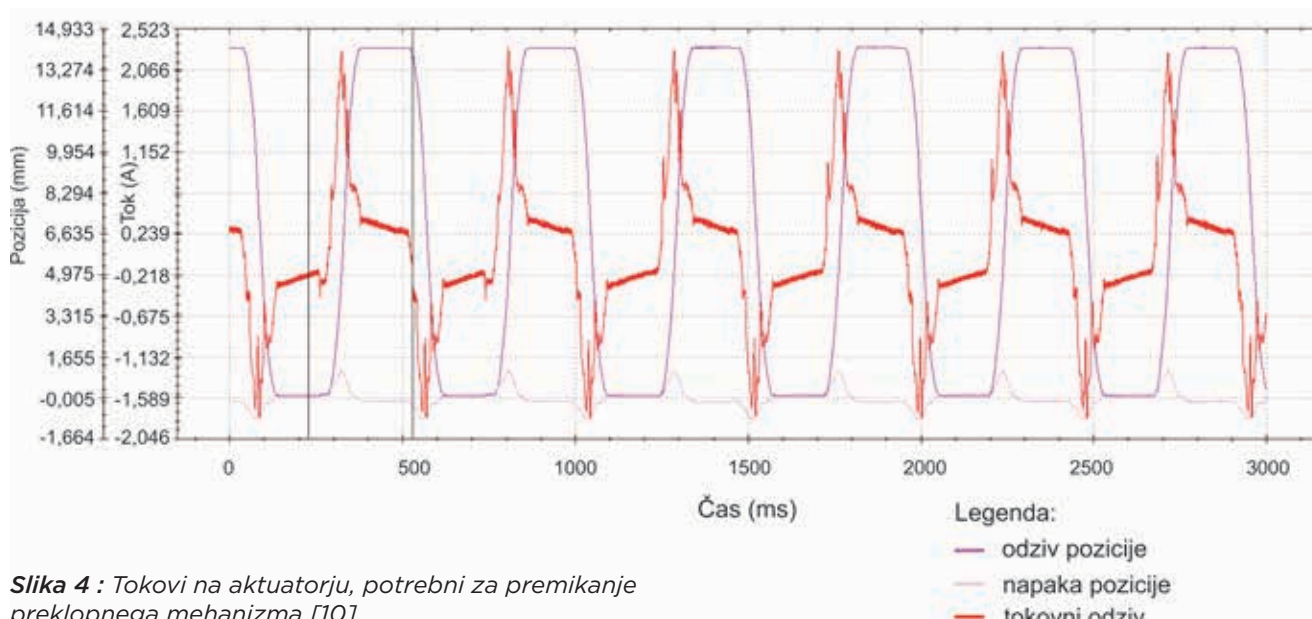
Tabela 1 : Primerjava lastnosti pnevmatskega cilindra in pametnega električnega cilindra z linearnim motorjem

Lastnost	Pnevmatski cilindar	Pametni električni cilindar z linearnim motorjem
 Način pogona	Stisnjen zrak	Elektromagnetno (linearni motor)
 Krmiljenje	ON/OFF (ventil)	Popolna lega, hitrost, profil poti
 Odzivni čas	30 ÷ 80 ms	<10 ms
 Ponovljivost natančnosti	±0,1 ÷ 0,5 mm	±0,001 ÷ 0,01 mm (odvisno od senzorja)
 Sila	Visoka (zrak 6 bar)	Odvisno od modela
 Nastavljiv hod	Ne (fiksno) & se lahko zaleti	Da (poljubna točka) & mehek stop
 Vzdrževanje	Visoko (zrak, tesnila, mazanje)	Minimalno (ni stika, ni trenja)
 Poraba energije	Kompresor deluje neprestano	Samo ob gibanju
 Diagnostika	Težko	Preko enkoderja in računalniškega programa
 Komunikacija	Analogni/digitalni IO	IO-link

Tabela 2 : Primer zamenjave pnevmatskega cilindra s pametnim električnim cilindrom z linearnim motorjem

 Primer zamenjave		
Element	Prej	Po zamenjavi
Vpenjalni cilindar traku	Pnevmatski cilindar Ø32, hod 20 mm	LSM032 VR_Egasi
Krmiljenje	Elektromagnetni ventil + PLC	PLC
Hod	Fiksni (20 mm)	Nastavljivi: Možno prilagajanje glede na debelino materialov itd.
Diagnostika	Brez	Možen sproten monitoring pozicije in sile
Usklajevanje z udarcem	Ni sinhronizirano	Natančna sinhronizacija z udarcem

**Slika 3 :** Merjene temperature na ohišju aktuatorja pri delovanju orodja pri 300 obratih/min



Slika 4 : Tokovi na aktuatorju, potrebni za premikanje preklopnega mehanizma [10]

Če že obstoječi pnevmatski sistem na preoblikovalnem štančnem orodju želimo zamenjati z novim, direktno gnanim aktuatorjem, so iz primerjave v *tabeli 2* razvidne prednosti pametnega električnega cilindra z linearnim motorjem proti konvencionalnemu pnevmatskemu pogonu.

Kot je razvidno iz priložene *tabele 2*, se da pametni električni cilinder z linearnim motorjem bistveno bolje nadzorovati, sama narava vanj vgrajenega senzorja pozicije pa tudi omogoča natančno spremljanje lege in s tem bistveno drugačen nivo nadzora delovanja preklopnih ali aktuatorskih elementov preoblikovalnega orodja.

Sistem razvitega digitalnega dvojčka je opremljen s senzorji v fizičnem orodju za spremljanje fizičnega procesa – v našem primeru aktuatorja za zagotavljanje vklapljanja in izklapljanja delovanja pestiča. Senzorji pošiljajo podatke v digitalni svet preko komunikacijskih vmesnikov. Digitalni dvojček nato analizira prejete podatke s pomočjo algoritmičnih simulacij in vizualizacij, kar omogoča generiranje bistvenih vpogledov v delovanje mehatronskega orodja. Za boljši vpogled v delovanje mehatronskega orodja so bili v ohišje aktuatorja, v neposredno bližino aktivnega gibljivega gornjega dela orodja (pestiča), v ohišje orodja ter v neposredno okolico orodja vgrajeni tudi temperaturni senzorji [13]. Vsi navedeni temperaturni senzorji skrbijo, da ne pride do pregrevanja posameznih segmentov orodja.

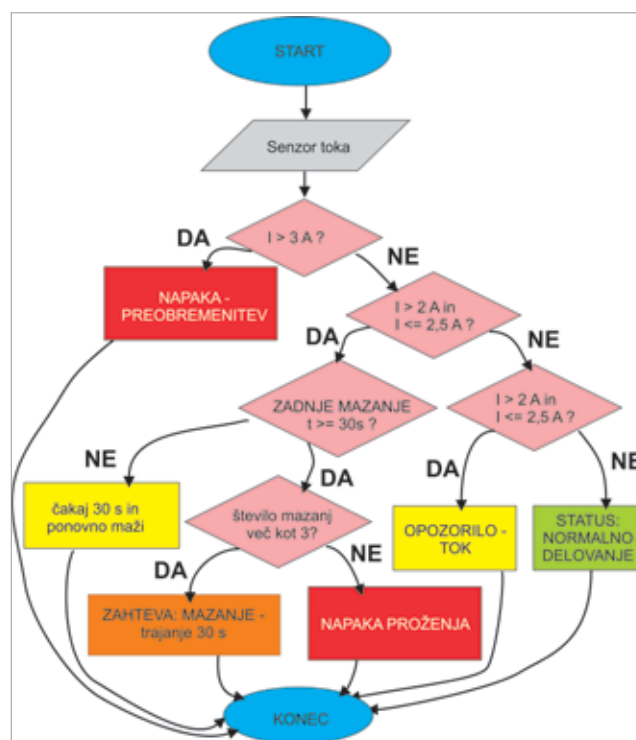
Poleg tega se je ob delovanju v pametnem električnem cilindru z linearnim motorjem meril tok, potreben za premikanje magnetne cevke, s katero se nastavlja lega preklopnega mehanizma za uravnavanje višine pestiča v orodju.

Glede na izhodne signale pozicije aktuatorja, njegovega toka in vseh merjenih temperatur se je s pomočjo digitalnega dvojčka v orodju spremlja-

lo stanje delovanja mehatronskega progresivnega štančnega orodja [14]. Primer beleženja temperatur prikazuje *slika 3*, medtem ko so na *sliki 4* prikazani merjeni tokovi, potrebni za premikanje aktuatorjeve magnetne cevke.

3 Logične sheme digitalnega dvojčka

Za delovanje digitalnega dvojčka mehatronskega progresivnega štančnega orodja smo opredeli-



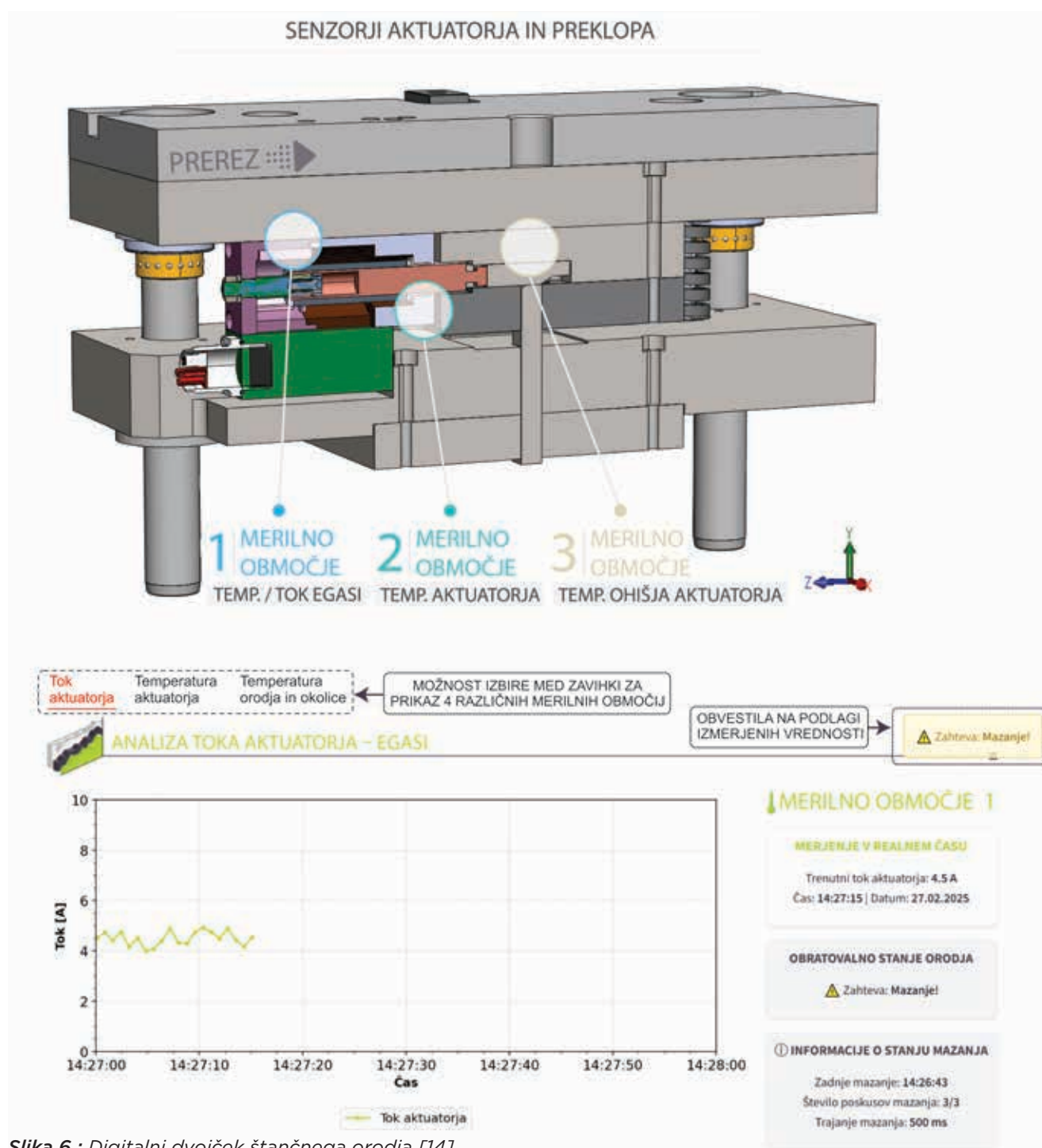
Slika 5 : Shema delovanja digitalnega dvojčka za vrednotenje toka na aktuatorju

li logične povezave, iz katerih izhajajo posamezne akcije delovanja fizičnega dela sistema glede na opredeljene digitalne modele. V ta namen smo vsi trije partnerji projekta opredelili mejne pogoje, pri katerih se sproži bodisi akcija za varnostno mazanje orodja ali varnostna funkcija, ki varuje aktuator orodja pred njegovo preobremenitvijo (slika 5).

Na osnovi shem delovanja vseh senzorjev in njihovih vplivov na delovanje mehatronskega preoblikovalnega orodja je bilo zgrajeno programsko okolje za delovanje digitalnega dvojčka. Okolje je sestavljeno iz dveh sklopov. V prvem se lahko nastavlja,

spremlja, zapisuje in analizira posamezne vplive temperatur na delovanje aktuatorja in preklonnega sistema za nastavljanje lege pestiča.

V drugem delu programskega okolja se spremljajo in vrednotijo vplivni parametri preklonnega sistema na velikost sile, ki jo ta povzroča na aktuatorju. Na ta način se lahko že pred konstrukcijo preklonnega mehanizma ugotovi, kateri parametri najbolj vplivajo na obremenitve aktuatorja v mehatronskem progresivnem štančnem orodju. Okolje digitalnega dvojčka za spremljanje delovanja aktuatorja prikazuje slika 6.



Slika 6 : Digitalni dvojček štančnega orodja [14]

4 Sklep

Digitalni dvojček mehatronskega progresivnega štančnega orodja predstavlja prvo razvojno fazo v osvajanju koncepta digitalnih dvojčkov pri proizvodnji s prilagodljivimi progresivnimi štančnimi orodji. Slednja predstavljajo revolucionaren pristop k minimizaciji odpada pri menjavi proizvodnje skupine različnih izdelkov, poleg tega pa se drastično skrajša tudi čas, potreben za menjavo izdelave serij geometrijsko podobnih izdelkov. V predstavljeni razvojni fazi smo zasnovali digitalni dvojček, ki skrbi za kakovostno delovanje orodja, po potrebi sproži mazanje in javlja kritične napake delovanja orodja v primeru, če se te pojavijo.

V nadaljevanju razvoja se pridobljeno znanje prenaša na realno industrijsko orodje, ki bo v realnih pogojih obratovanja štančanja velikoserijskih izdelkov izdelovalo do osem različnih izdelkov iz istega traku pločevine.

Viri

- [1] Rozhok, A.; Abate, R.; Manoli, E. & Nele, L. A Review of Recent Advanced Applications in Smart Manufacturing Systems. *J. Manuf. And Mat. Proc.* 2026, 10(1), 1. <https://doi.org/10.3390/jmmp10010001>.
- [2] Resman, M.; Debevc, M.; Šimic, M.; Heraković, N. Metodologija načrtovanja digitalnih dvojčkov v pametnih tovarnah. *Ventil* 2024, 30, 6, 360–365.
- [3] Singh, M.; Fuenmayor, E.; Hinchy, E. P.; Qiao, Y.; Murray, N. & Devine, D. Digital Twin: Origin to Future. *Appl. Syst. Innov.* 2021, 4, 2, 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.
- [4] Grieves, M.W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises. *Int. J. Prod. Dev.* 2005, 2, 71–84.
- [5] Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R.; Glaessgen, E.; Kemp, C.; LeMoigne, J.; Wang, L. Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap. *Technol. Area* 2010, 11.
- [6] Zhang, R.; Wang, F.; Cai, J.; Wang, Y.; Guo H. & Zheng J. Digital twin and its applications: A survey. *Int J Adv Manuf Technol* 2022, 123, 4123–4136.
- [7] Pepelnjak, T.; Stefanovska, E.; Sevšek, L. Razvoj digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja – izhodiščno stanje. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024.
- [8] Stefanovska, E.; Pepelnjak, T. Development of a flexible tooling system for sheet metal bending. *Adv. Prod. Eng. Manag.* 2022, 17, 3, 311–325. DOI: <https://doi.org/10.14743/apem2022.3.438>.
- [9] Stefanovska, E.; Pepelnjak, T. Optimising predictive accuracy in sheet metal stamping with advanced machine learning: A LightGBM and neural network ensemble approach. *Adv. Eng. Inform.* 2025, 65, 103103, 1–17, DOI: 10.1016/j.aei.2024.103103.
- [10] Štuklek, U. Poročilo projekta Pametno mehatronsko štančno orodje za štančanje tipskih izdelkov, Dafra d. o. o., Žalec 2024.
- [11] Pepelnjak, T. Analize aktuatorskega pestičnega sklopa za mehatronsko preoblikovalno orodje. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024.
- [12] Pepelnjak, T.; Stefanovska, E.; Sevšek, L.; Rupnik Poklukar D. Razvoj digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja – optimizacija sistema. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024.
- [13] Pepelnjak, T.; Stefanovska, E.; Sevšek, L. Razvoj digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja – izhodiščno stanje. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024. 1 zv. (loč. pag.), ilustr.
- [14] Stefanovska, E.; Pepelnjak, T. Digitalni dvojček mono-aktuatorskega mehatronskega štančnega orodja. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2025. 16 datotek. <https://github.com/emastefanovska-fs/dafra-app.git>.

Development of a digital twin of a progressive mechatronic stamping tool

Summary:

In modern industrial production, there is a tendency to optimize manufacturing processes, with a special emphasis on reducing waste and energy consumption as well as maximizing manufacturing flexibility. In forming processes, customers' need to narrow manufacturing tolerances increases production complexity, forcing all manufacturing companies to seek new, innovative forming solutions.

As an example of an innovative, flexible stamping process concept, the "Smart mechatronic progressive tool for stamping standard products" project established the adaptation of mechatronic tool operation to a pre-programmed product shape to optimize the operation of mechatronic progressive stamping tools. With a single forming tool, its flexibility allows us to manufacture several different geometrically similar products while minimizing waste when changing the component produced by the selected tool. The article presents the concept of developing a single-cutting punch operation with mechatronic adjustment, for which a new, innovative direct-drive electromagnetic actuator was developed to raise and lower the active part of the forming tool. At the same time, we monitored the tool's and the built-in actuator's performance using their digital twins and established appropriate feedback loops for their control and operation. The presented concept of a stamping tool will be upgraded to a mechatronic stamping tool with a greater number of controlled punches, enabling the production of up to eight different products with the same progressive tool.

Keywords:

digital twin, sheet metal stamping, mechatronic tool, process adaptability

Zahvala

Delo je finančno podprlo Ministrstvo za gospodarstvo, turizem in šport Republike Slovenije v okviru RRI projekta z naslovom »Pametno mehatronsko progresivno orodje za štančanje tipskih izdelkov«, pridobljenega v okviru javnega razpisa »Spodbude za raziskovalno-razvojne projekte NOO«, pogodba: P-RRI-NOO/00283 in Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in inovacije v okviru raziskovalnega programa Inovativni izdelovalni sistemi in procesi (P2-0248) Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije.



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA GOSPODARSTVO,
TURIZEM IN ŠPORT



Financira
Evropska unija
NextGenerationEU



Javna agencija za znanstvenoraziskovalno
in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije



"Direct drive" Električni cilinder LSM032

Ključne prednosti:

- ✓ Enostavna integracija – vse v enem paketu – PLC kompatibilen
- ✓ Patentirana tehnologija
- ✓ Visoka hitrost in natančnost
- ✓ Bistveno nižji obratovalni stroški kot pri pnevmatiki - energetska optimizacija
- ✓ Varo servo delovanje - natančen nadzor sile in gibanja
- ✓ Integrirana elektronika - povezljivost - Industrija 4.0
- ✓ Trajnost in tišina – direktno gnan prenos - brez obrabljivih delov
- ✓ Neposredna zamenjava pnevmatskih cilindrov v aplikacijah z nizko do srednjo silo



Brez ventilov. Brez cevi. Brez kompresorja. Brez kompromisov.



Egasi d.o.o. / Razvoj in proizvodnja mehatronskih aktuatorjev / Ljubljanska c. 11, 4240 Radovljica / info@egasi.eu



item

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.

www.inoteh.si

INOTEH

A BIBUS GROUP COMPANY
Inoteh d.o.o. K železnici 7 2345 Bistrica ob Dravi

UPORABA UMETNE INTELIGENCE PRI KONČNI KONTROLI KVALITETE ELEKTROMOTORJEV

Jernej Mlinarič

Izvleček:

Članek obravnava sodobne pristope h končni kontroli kakovosti (angl. End of Line – EoL) elektromotorjev z uporabo umetne inteligence. EoL predstavlja zadnjo stopnjo preverjanja izdelka v proizvodnem procesu. Predstavljene so metode strojnega učenja (angl. Machine Learning), ansambelski modeli (angl. Ensembles), prenos znanja (angl. Transfer Learning) in nevronske mreže za analizo vibracijskih in zvočnih signalov, ki poenostavijo diagnostične postopke, zmanjšajo odvisnost od ekspertnega znanja ter izboljšajo prilagodljivost industrijskih EoL-sistemov. Rezultati uporabe opisanih metod kažejo na večjo robustnost diagnostike in krajši čas uvajanja novih tipov elektromotorjev v proizvodnjo.

Ključne besede:

končna kontrola kakovosti, elektromotorji, strojno učenje, umetna inteligenca, prenos znanja, nevronske mreže, vibracije, zvok

1 Uvod

Elektromotorji sodijo med najbolj množične industrijske izdelke. Vgrajeni so v gospodinske aparate, orodja, vozila in številne druge sisteme, kjer se od njih pričakuje zanesljivo in dolgotrajno delovanje. Zaradi velikih proizvodnih količin je že majhen delež napak lahko vir visokih stroškov, zato je 100 odstotna končna kontrola kakovosti (t. i. End of Line, EoL) nepogrešljiv del sodobnih proizvodnih linij.

Tradicionalni EoL-sistemi temeljijo na natančno definiranih testnih postopkih, obsežni obdelavi signalov ter na strokovno določenih pravilih in pragovih. Takšen pristop je zanesljiv, a hkrati kompleksen, slabo prilagodljiv novim variantam izdelkov in močno odvisen od izkušenih strokovnjakov. V zadnjem desetletju se zato v industriji vse bolj uveljavlja uporaba metod umetne inteligence in strojnega učenja, ki obetajo večjo avtomatizacijo, prilagodljivost in učinkovitost.

V članku sta predstavljena razvoj in uvedba metod strojnega učenja ter globokega učenja za končno kontrolo kakovosti brezkrtačnih enosmernih elektromotorjev (BLDC), ki temelji na realnih industrij-



Slika 1 : Primer modularnega EoL diagnostičnega sistema

skih podatkih in izkušnjah iz proizvodnega okolja. Slika 1 prikazuje modularni EoL diagnostični sistem iz realnega industrijskega okolja.

2 Klasičen EoL-sistem: zanesljiv, a neprilagodljiv

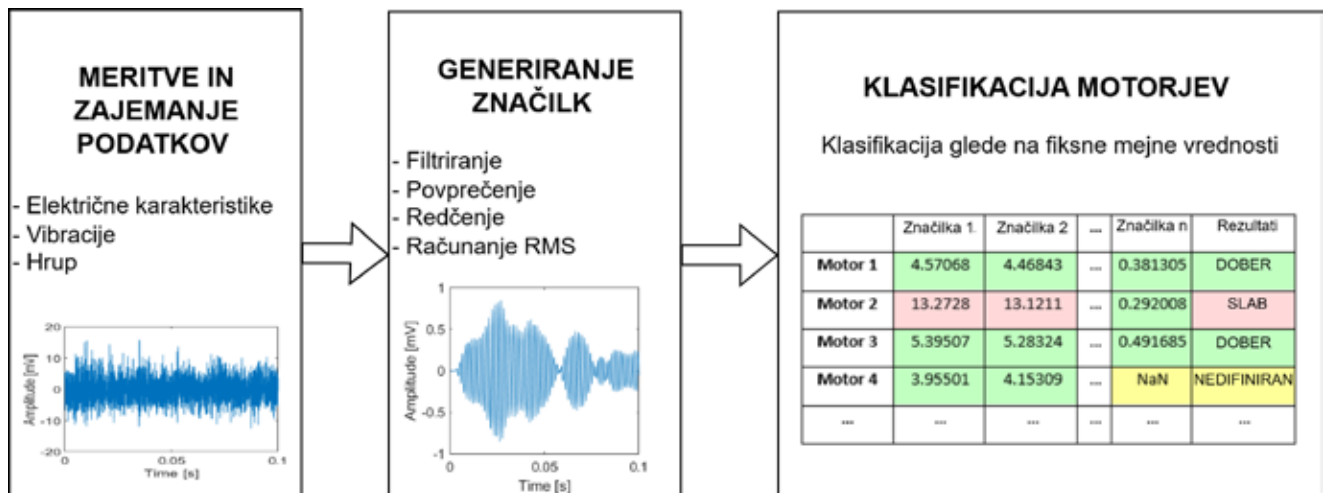
Sodobni EoL-sistemi za elektromotorje so praviloma sestavljeni iz več diagnostičnih celic. Vsakemu motorju se med kratkim testnim tekom izmerijo električne veličine, hitrosti vrtenja, vibracij in zvoka. Iz zajetih signalov se z uporabo signalno procesnih metod (filtriranje, FFT, izračun RMS-vrednosti ipd.) izračuna več numeričnih značilk.

Jernej Mlinarič, mag. inž., Inštitut Jožef Stefan, Ljubljana



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-1.19>



Slika 2 : Shematski prikaz delovanja klasičnega EoL diagnostičnega sistema

Na njihovi podlagi sistem preveri, ali posamezne vrednosti ležijo znotraj vnaprej določenih mej. Če so vsi pogoji izpolnjeni, je motor ocenjen kot dober, sicer kot slab. V primeru manjkajočih meritev je motor označen kot nedefiniran. Ključna slabost takšnega pristopa je, da:

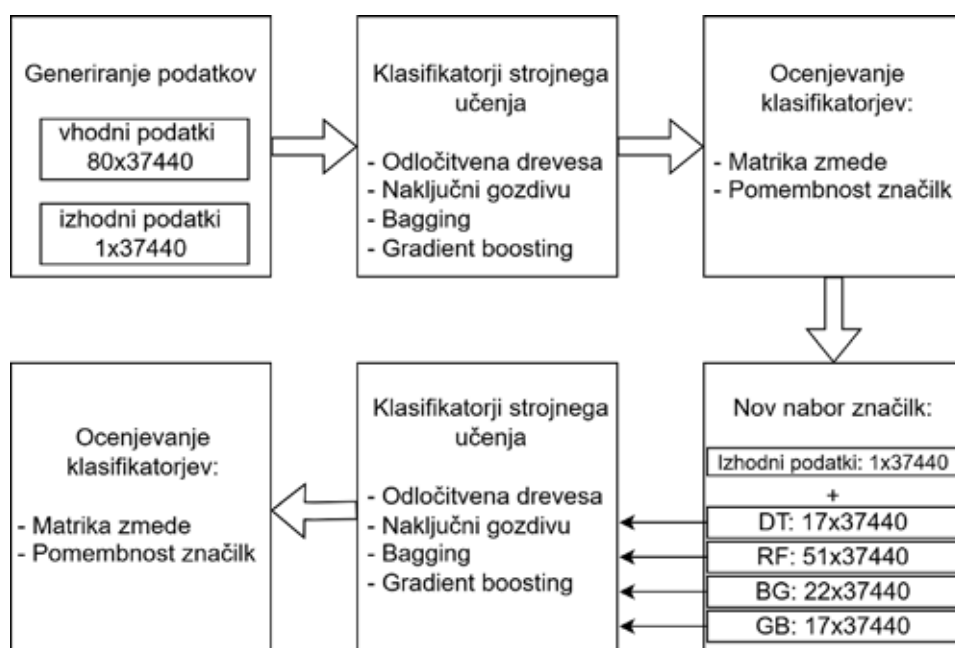
- ▶ zahteva veliko število značilk in s tem veliko pragov,
- ▶ vsebuje redundantne ali malo informativne značilke,
- ▶ je nastavitev pragov dolgotrajna in močno odvisna od ekspertnega znanja,
- ▶ se slabo prilagaja novim tipom ali variantam motorjev.

To se posebej pokaže v fazah zagona proizvodnje ali pri uvajanju novih izdelkov, ko zgodovinskih po-

datkov še ni dovolj. Slika 2 prikazuje osnovne tri korake delovanja klasičnega EoL diagnostičnega sistema. V prvem koraku se zajamejo merilni signali elektromotorja, kot so vibracije, zvok in električne veličine, ki se v drugem koraku obdelajo in pretvorijo v numerične značilke. V tretjem koraku se te značilke primerjajo z vnaprej določenimi pragovi, na podlagi česar sistem sprejme končno odločitev o kakovosti izdelka.

3 Strojno učenje kot nadgradnja ekspertnega znanja

Prvi korak k večji avtomatizaciji EoL-kontrole je bila uporaba klasičnih metod nadzorovanega strojnega učenja, kot so odločitvena drevesa, na-



Slika 3 : Shema strojnega učenja, uporabljena v [1]

ključni gozdovi, bagging in gradient boosting. Gre za tako imenovane ansambelske modele, ki združujejo več osnovnih klasifikatorjev v enoten klasifikacijski model. Te metode omogočajo dve ključni izboljšavi:

1. Samodejno izbiro relevantnih značilk – modeli iz velikega nabora določijo tiste značilke, ki največ prispevajo k pravilni klasifikaciji.
2. Samodejno določanje pragov – pragovi niso več ročno nastavljeni, temveč so implicitno vključeni v strukturo modela.

Analize na več deset tisoč realnih primerov so pokazale, da je mogoče število značilk bistveno zmanjšati (tudi za več kot polovico), ne da bi se pri tem poslabšala natančnost klasifikacije [1]. Nasprotno – poenostavljeni modeli so pogosto bolj robustni, hitrejši in lažje razložljivi.

Pomembna prednost takšnih metod je tudi njihova razložljivost (angl. Explainable AI). Odločitvena drevesa in ansambelski modeli omogočajo vpogled v to, katere značilke so ključne za odločanje, kar je v industrijskem okolju bistveno za zaupanje v sistem. *Slika 3* prikazuje postopek strojnega učenja, izveden v šestih zaporednih korakih, ki se začne z generiranjem izvirnega nabora značilk na podlagi zajema in obdelave merilnih signalov elektromo-

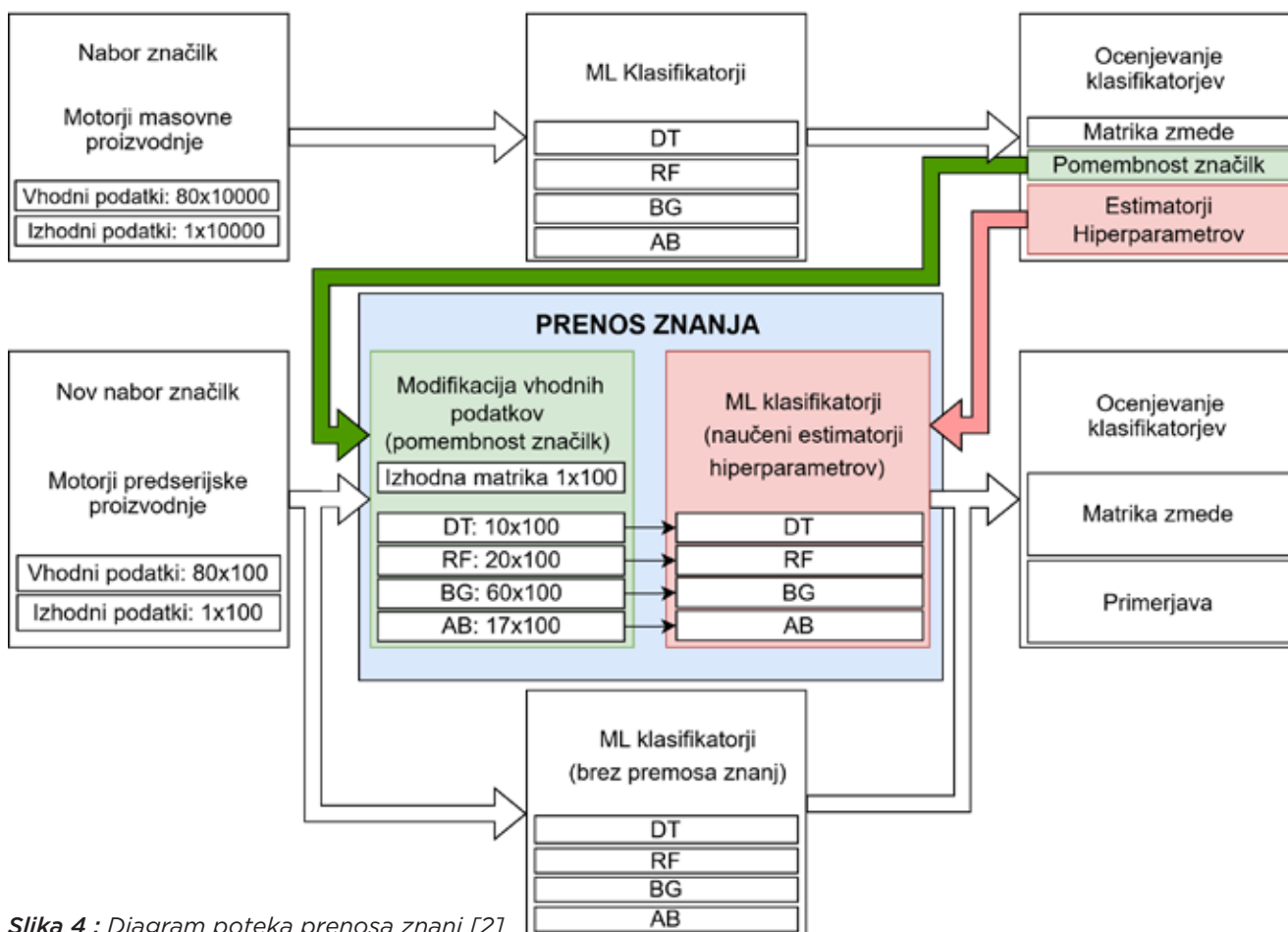
torjev. V nadaljevanju sledijo učenje klasifikatorjev, samodejna izbira in vrednotenje pomembnosti značilk ter postopno zmanjševanje nabora značilk na tiste, ki vsebujejo približno 95 % uporabnih informacij. V zadnjih korakih se klasifikatorji ponovno učijo na zmanjšanem naboru podatkov in se njihova učinkovitost primerja z izhodiščnimi modeli, kar omogoča oceno vpliva zmanjšanja značilk na natančnost končne kontrole kakovosti [1].

4 Prenos znanja med različnimi tipi elektromotorjev

Poseben izziv v industriji je faza predserijske proizvodnje, kjer je na voljo zelo malo podatkov. Klasični pristopi strojnega učenja v takšnih razmerah odpovejo, saj potrebujejo veliko učno množico.

Rešitev ponuja prenos znanja (angl. Transfer Learning). Ideja je, da znanje, pridobljeno na velikoserijski proizvodnji enega tipa motorja, prenesemo na sorodne tipe, ki so šele v fazi uvajanja [2]. V praksi se to lahko izvede na dva načina:

- ▶ s prenosom najpomembnejših značilk,
- ▶ s prenosom hiperparametrov in strukture modelov.



Slika 4 : Diagram poteka prenosa znanj [2]

Rezultati so pokazali, da je mogoče z zelo majhnim številom učnih primerov doseči primerljivo ali celo bistveno boljšo natančnost, kot če bi model učili iz nič. To neposredno skrajša čas zagona kontrole kakovosti in zmanjša potrebo po ročnih prilagoditvah. *Slika 4* prikazuje celoten postopek implementacije prenosa znanja, ki se začne z zajemom podatkov in učenjem klasifikatorjev na velikoserijsko proizvedenem tipu elektromotorja ter z oceno njihove uspešnosti, pomembnosti značilk in optimalnih hiperparametrov. Pridobljeno znanje se nato prenese na predserijske tipe elektromotorjev v obliki zmanjšanega nabora vhodnih značilk (prenos značilk) oz. v obliki prenosa hiperparametrov in ocenjevalcev, pri čemer se vzporedno izvede tudi učenje brez prenosa znanja za primerjavo. V zadnjem koraku se uspešnost obeh pristopov ovrednoti in primerja na podlagi točnosti klasifikacije in stroškov napačne razvrstitve, kar omogoča objektivno oceno vpliva prenosa učenja na zanesljivost končne kontrole kakovosti. Celoten potek je predstavljen v [2].

5 Globoko učenje in surovi signali

Čeprav klasično strojno učenje učinkovito zmanjša kompleksnost sistema, še vedno temelji na ročno

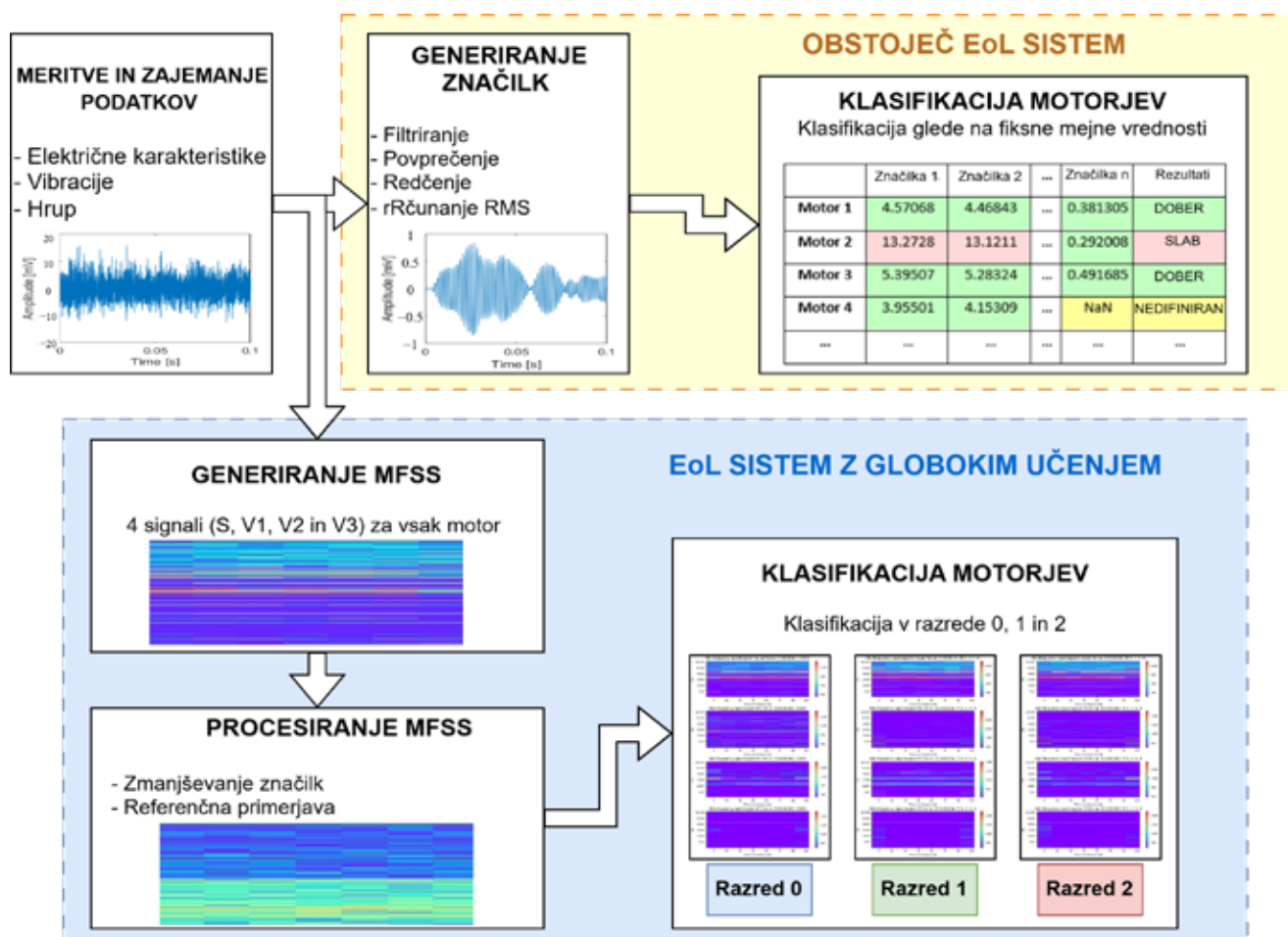
definiranih značilkah. Naslednji korak je popolna odprava tega koraka z uporabo globokih nevronskih mrež.

V predstavljenem pristopu [3] se sistem ne uči več na vnaprej izračunanih značilkah, temveč neposredno na surovih vibracijskih in zvočnih signalih. Ti signali se pretvorijo v Mel frekvenčne spektrograme, ki časovno frekvenčno strukturo signala predstavijo v obliki slike.

Za klasifikacijo je uporabljena hibridna arhitektura:

- ▶ konvolucijske nevronske mreže (CNN) za prepoznavanje lokalnih vzorcev v spektrogramih,
- ▶ dvosmerne rekurentne enote (BiGRU) za zajem časovne dinamike signalov.

Takšen model se uči neposredno iz podatkov, brez ročnega modeliranja značilk in pragov. Kljub izrazito neuravnoteženim podatkom (velika večina motorjev je brez napak) so bile dosežene zelo visoke klasifikacijske natančnosti, primerljive ali boljše od klasičnih pristopov. *Slika 5* primerja klasični klasifikacijski model z modelom, ustvarjenim z globokim učenjem [3]. V obeh primerih se postopek začne z zajemom merilnih vibracijskih in zvočnih signa-



Slika 5 : Primerjava klasičnega modela in modela, ki temelji na globokem učenju.

lov, vendar je klasični pristop močno odvisen od ekspertnega znanja. Predlagani pristop uporablja časovno-frekvenčne predstavitve surovih signalov (Mel-frekvenčne spektrograme), na podlagi katerih se nevronska mreža neposredno uči razpoznavnih vzorcev, kar poenostavi razvoj sistema in poveča njegovo prilagodljivost različnim tipom elektromotorjev.

6 Prednosti in odprta vprašanja

Uvedba umetne inteligence v končno kontrolo kakovosti prinaša več pomembnih prednosti:

- ▶ poenostavitev razvoja in vzdrževanja EoL-sistemov,
- ▶ zmanjšanje odvisnosti od strokovnjakov,
- ▶ večja prilagodljivost novim izdelkom,
- ▶ možnost zgodnjega odkrivanja subtilnih napak.

Hkrati pa ostajajo odprta vprašanja, kot so: potreba po označenih podatkih, razločljivost modelov, ki temeljijo na nevronskih mrežah, in njihova integracija v obstoječe industrijske informacijske sisteme.

7 Zaključek

Razvoj EoL-sistemov za elektromotorje jasno kaže, da umetna inteligenca ne nadomešča strokovnjakov,

temveč jim daje nova, močnejša orodja. Prehod od ekspertnih pravil k podatkovno vodenim modelom omogoča bolj robustne, prilagodljive in učinkovite sisteme kontrole kakovosti. Uporabljeni algoritmi strojnega učenja, ansambelski modeli in globoke nevronske mreže pomembno prispevajo k zanesljivejšemu zaznavanju napak in hitrejši prilagoditvi sistemov novim proizvodnim razmeram. V prihodnosti lahko pričakujemo še večji poudarek na nenadzorovanem učenju, prenosu znanja in prognostiki, kjer EoL-sistemi ne bodo več zgolj zadnja kontrolna točka, temveč aktiven vir informacij za optimizacijo celotne proizvodnje.

Viri

- [1] J. Mlinarič, B. Pregelj, P. Boškoski, G. Dolanc and J. Petrovčič, "Optimization of reliability and speed of the end-of-line quality inspection of electric motors using machine learning," *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 19, no. 2, pp. 183-196, 2024.
- [2] J. Mlinarič, B. Pregelj, P. Boškoski, G. Dolanc and J. Petrovčič, "A transfer learning approach to machine learning-based end-of-line quality inspection," *Advances in Production Engineering and Management*, vol. 20, no. 2, pp. 277-290, 2025.
- [3] J. Mlinarič, B. Pregelj and G. Dolanc, "End-of-Line Quality Control Based on Mel-Frequency Spectrogram Analysis and Deep Learning," *Machines*, vol. 13, no. 7, 2025.

The Use of Artificial Intelligence for End-of-Line Quality Control of Electric Motors

Abstract:

The paper presents modern approaches to end-of-line (EoL) quality inspection, i.e. the final inspection stage in the manufacturing process of electric motors, based on artificial intelligence. Traditional EoL systems rely on extensive signal processing and expert-defined features and thresholds, which limits their adaptability and increases dependence on specialist knowledge. To address these limitations, several machine learning approaches are discussed, including ensemble-based classification models, transfer learning, and deep neural networks. The application of ensemble models enables automatic feature selection and implicit threshold determination, resulting in a significant reduction of model complexity while maintaining or improving classification accuracy. Transfer learning is shown to be particularly effective in pre-production scenarios, where only limited training data are available, allowing faster commissioning of quality inspection systems and improved fault detection reliability. Furthermore, deep learning methods based on convolutional and recurrent neural networks, trained directly on vibration and acoustic signals represented as Mel-frequency spectrograms, eliminate the need for manual feature engineering and achieve high classification accuracy even in highly imbalanced industrial datasets. The presented results demonstrate that artificial intelligence-based EoL systems can simplify diagnostic procedures, reduce reliance on expert knowledge, improve robustness to product variations, and enhance the overall adaptability and efficiency of industrial quality inspection processes.

Keywords:

end-of-line quality inspection, electric motors, machine learning, artificial intelligence, transfer learning, neural networks, vibration, sound

ZAPAH Z OBRAČANJEM

Klasika med standardiziranimi elementi: zapahi. Hitro, intuitivno in varno zaprejo lopute, vrata ali pokrove. Podjetje Eles+Ganter širi svojo ponudbo z različicami iz nerjavnega jekla in novimi funkcionalnimi koncepti.



Zapahi podjetja Eles+Ganter

Konstrukterjem je situacija dobro znana: prostor za zaklepne mehanizme je omejen, manjkajo nasprotnne površine za zaklepne jezičke oz. polzapornice, vendar mora biti postopek zaklepanja zanesljiv in intuitiven. Podjetje Eles+Ganter ponuja že pripravljene rešitve za takšne izzive, ki jih je mogoče fleksibilno prilagoditi individualnim zahtevam.

To so na primer kavljasti zapahi, ki delujejo po drugačnem funkcionalnem principu kot klasične polzapornice. Namesto zaklepnega jezička, ki se zaskoči za okvir, se pri tej izvedbi kavelj zaskoči radialno glede na os vrtenja v ustrezen nasprotni držalni element. Paleta kavljastih zapahov GN 115.8 je zdaj razširjena z različicami iz nerjavnega jekla ter izvedbami, ki zanesljivo izpolnjujejo zahteve zaščitnega razreda IP69K. Zapahi za upravljanje z nasadnim ključem so primerni tudi za uporabo v izjemno vlažnih okoljih. Način delovanja je vedno enak: ko se nasadni ključ, ključ z brado, narebričeni ročaj, prečniki ali vzvodi obrnejo za 90 stopinj, se kavelj premika sinhrono z njimi. Ker ga je mogoče namestiti na zunanji del, se kavelj zaskoči pri obračanju levo ali desno, kar omogoča enostavno prilagajanje. Zaradi integriranega vhodnega posnetega roba zapah dopušča bočno neporavnost do štirih milimetrov. Praktičen primer uporabe: bočno nameščeni kavljasti

zapahi blokirajo vodoravni pokrov škatle na vremensko odporen način in brez motečih okvirjev.

Klasični zapahi s polzapornico še naprej dokazujejo svojo vrednost v aplikacijah z geometrijo zapah-okvir. Naletne poševnosti na jezičku zapaha ustvarjajo kontaktni tlak, če se zapah zavrti za 90 stopinj, kar zagotavlja tesno in varno zapiranje.

Upravljanje je mogoče prilagoditi projektu: zaklepanje s cilindrično ključavnico, preprosto ročno upravljanje s pomočjo ročaja, gumba ali vtičnega ključa.

Če je debelina vrat večja od osmih milimetrov, kar je pogosto pri loputih v klimatski tehniki, je primeren zapah GN 515. Zahvaljujoč ohišju z dolžino do 60 milimetrov omogoča uporabo pri skoraj vseh tipih odpiranja. Novost so različice iz nerjavnega jekla, odpornega proti koroziji.

Vrtljivi vpenjalni zapah GN 516 je primeren za uporabo tam, kjer so zahtevani tesni in na vibracije odporni zaklepni mehanizmi. Pri zapahu GN 516 se rotacijsko gibanje ne konča na 90 stopinjah, temveč se nato pretvori v linearni hod zapaha, s čimer se doseže velika kontaktna razdalja, na primer v kombinaciji z elastičnim tesnilom.

Druga možnost zapiranja, odpornega proti vibracijam, temelji na principu »pritisni in obrni«: upravljalni element v obliki ročice, gumba ali narebričenega ročaja se v končnem položaju zaskoči in se samodejno zaklene. S pritiskom v radialni smeri se ta blokada sprosti, nato pa je mogoče izvesti 90-stopinjsko vrtenje.

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 2026. CC-BY 4.0

REVILJA ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO
VENTIL

JSB – SMC-JEV 2/2 ZRAČNO KRMILJEN PROCESNI VENTIL

Nova serija sedežnih ventilov *JSB* podjetja *SMC* prinaša številne ključne prednosti tako za proizvajalce strojev kot tudi za uporabnike v procesnih obratih. Ventili združujejo dolgo življenjsko dobo, izjemno nizek padec tlaka in kompaktne dimenzije z zelo visokim pretokom. Zaradi optimizirane notranje konstrukcije ventil omogoča bistveno manjše tlačne izgube v primerjavi s klasičnimi 2/2 procesnimi ventili, kar neposredno prispeva k večji energetski učinkovitosti celotnega sistema.

Ventili *JSB* so primerni za uporabo z različnimi mediji, kot so para, voda in zrak, pri čemer konstrukcija ventila zagotavlja stabilno delovanje tudi pri zahtevnejših obratovalnih pogojih. Na voljo so različni tlačni razredi, ki omogočajo uporabo tako pri nizkih kot tudi pri višjih delovnih tlakih, odvisno od izbrane izvedbe in medija.

Različne izvedbe za maksimalno prilagodljivost

Serija *JSB* je zasnovana z mislijo na širok spekter industrijskih aplikacij, zato je na voljo v več mehaničnih izvedbah:

- ▶ navojni priključek,
- ▶ varilni nastavek,
- ▶ higienska objemka DIN 32676-B / ASME BPE.

Funkcijske izvedbe delovanja:

- ▶ Normalno zaprt (N.C.)
Ventil je brez krmilnega signala zaprt in se odpre ob dovodu krmilnega zraka.
- ▶ Normalno odprt (N.O.)
Ventil je brez krmilnega signala odprt in se zapre ob dovodu krmilnega zraka.

Širok, a jasno opredeljen spekter uporabe

Sedežni ventili *JSB* so zasnovani za širok nabor industrijskih aplikacij, kjer so ključni visok pretok, nizke tlačne izgube, zanesljivo delovanje in dolga življenjska doba. Ohišje ventila je izdelano iz nerjavnega jekla SUS316L, ki zagotavlja odlično odpornost proti koroziji, visokim temperaturam in agresivnim medijem, kar omogoča uporabo v različnih industrijskih okoljih.

Ventili *JSB* so primerni za uporabo v številnih industrijskih panogah, predvsem v tehničnih in procesnih sistemih. Tipične industrije vključujejo:

- ▶ živilsko industrijo,
- ▶ industrijo pijač,



SMC-jev 2/2 zračno krmiljen procesni ventil

- ▶ farmacevtsko industrijo,
- ▶ kemično industrijo,
- ▶ procesno industrijo,
- ▶ ogrevalne in energetske sisteme,
- ▶ industrijo obdelave vode,
- ▶ papirno in celulozno industrijo.

Tako širok spekter uporabe omogoča varno, skladno in optimalno izbiro ventila glede na zahteve posamezne industrijske panoge in sistema. Hkrati uporabnikom zagotavlja ključne prednosti serije *JSB*: visok pretok, izjemno nizek padec tlaka, dolga življenjska doba ter zanesljivo delovanje tudi v energetsko optimiziranih in nizkotlačnih sistemih, kot je koncept 4-bar factory.

Dolga življenjska doba in kompaktna zasnova

Poleg visokega pretoka in nizkega padca tlaka serijo *JSB* odlikuje tudi izjemna vzdržljivost. Ventili

dosegajo do 10 milijonov ciklov pri uporabi zraka ali vode ter do 3 milijone ciklov pri uporabi pare, kar zagotavlja dolgo in zanesljivo obratovanje ter zmanjšuje stroške vzdrževanja in izpadov proizvodnje.

Kompaktna konstrukcija predstavlja dodatno prednost, saj je prostor v proizvodnih obratih pogosto omejen. Višina ventilov SMC JSB se začne pri 121,3 mm, kar omogoča enostavno vgradnjo tudi v zelo prostorsko omejene aplikacije – brez kompromisov pri zmogljivosti.

Enostavno čiščenje in vzdrževanje

V panogah, kot so živilska, medicinska in farmacevtska industrija, je enostavno čiščenje nujen pogoj. Konstrukcija ventila JSB je zato optimizirana z zmanjšanim številom mest, kjer bi se lahko zadrževali ostanki, umazanija ali kemikalije, s čimer se bistveno zmanjša tveganje za kontaminacijo procesa.

Vsi sestavni deli ventila so zamenljivi, kar omogoča hitro in stroškovno učinkovito vzdrževanje. Aktuator ventila je dodatno toplotno izoliran, kar prispeva k stabilni notranji temperaturi in zagotavlja dosledno, natančno in zanesljivo delovanje tudi pri delu s paro.

Ko so v ospredju visok pretok, zanesljivo delovanje in energetska učinkovitost, je izbira jasna. Prepričajte se sami, kako lahko 2/2-sedežni ventili serije JSB prispevajo k optimizaciji in zanesljivosti vaših procesov.

Vir:

SMC Industrijska Avtomatika d. o. o., Mirnska cesta 7, 8210 Trebnje, tel.: +386 7 388 5425, spletna stran: www.smc.si, www.smc.eu, e-pošta: tehnika@smc.si, g. Jan Matko

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0



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

DIGITALNA NAROČNINA



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



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

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

BANSBACH AKTUATORJI SERIJA UW100 ZA UPORABO POD VODO

Aktuatorji iz nerjavnega jekla AISI 316 z zaščito pred visokim tlakom, namenjeni pomorskim, potapljaškim in drugim aplikacijam, ki so v stiku z vodo ali trajno potopljene.



Slika 1: Aktuator UW100

Aktuatorji serij easyE-35/35i in easyE-50/50i proizvajalca BANSBACH so posebej zasnovani za podvodno uporabo do globine 100 metrov ter opremljeni z dodatnim tesnjenjem in ohišjem iz visokokakovostnega nerjavečega jekla AISI 316.

Podjetje BANSBACH easylift predstavlja aktuatorje serije UW100, posebej razvite za zahtevna podvodna okolja. Modela easyE-35/35i in easyE-50/50i zagotavljata zanesljivo delovanje sistemov tudi na globinah do 100 metrov (10 barov). Dodatno tesnjenje za zaščito pred visokim vodnim tlakom in odpornost proti koroziji odražata nemško kakovost, ki te aktuatorje jasno loči od konkurence.

- ▶ Globinska zmogljivost: preizkušeni in odobreni za podvodno uporabo do 100 metrov (10 barov).
- ▶ Kakovost materiala: celotno zunanje ohišje in batnica sta izdelana iz nerjavečega jekla AISI 316, kar zagotavlja izjemno odpornost proti koroziji.
- ▶ Tesnjenje: opremljeni s posebnimi in dodatnimi tesnilnimi elementi, zasnovanimi za vzdrževanje visokega vodnega tlaka.
- ▶ Dinamična obremenitev: v primeru tveganja, da bi bila kablenska uvodnica in kabel izpostavljeni dinamičnim obremenitvam, je zelo priporočljiva izvedba aktuatorja Bansbach UW100 s priključkom SubConn.

Te serije so na voljo z različnimi prestavnimi razmerji, da ustrezajo različnim zahtevam glede hitrosti in sile.

Področja uporabe:

- ▶ pomorstvo in dejavnosti na odprtem morju: delovanje daljinsko vodenih podvodnih vozil (ROV) ter mehanizmov podmorniških loput in ventilov;
- ▶ akvakultura: sistemi za samodejno prilagajanje mrež in gojitvenih kletk;
- ▶ industrijske potapljaške aplikacije: sistemi za pozicioniranje podvodnih kamer in senzorjev;
- ▶ obnovljivi viri energije: krmilni mehanizmi za plimske in valovne energetske naprave.

Bansbach

Podjetje Bansbach® easylift že več kot 50 let razvija in proizvaja plinske vzmeti različnih izvedb. Njihov portfelj izdelkov se nenehno širi (plinske vzmeti, električni aktuatorji, easymotion, posebni pnevmatski sistemi, mikrohidravlika ...).

Certificirana kakovost, ki izpolnjuje najvišje zahteve, na primer v letalski industriji, pohištvni industriji ali medicinski tehnologiji, predstavlja temelj mednarodnega uspeha z oznako Made in Germany (proizvedeno v Nemčiji).

Vir:

INOTEH, d. o. o., K železnici 7, 2345 Bistrica ob Dravi, tel.: +386(0)2 673 01 34, e-mail: gp@inoteh.si, internet: www.inoteh.si

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0



**ČISTI PROSTORI
DANES IN JUTRI:**

INOVACIJE, TRAJNOST, ODLIČNOST
TER SKLADNOST Z REGULATIVO





Gospodarska
zbornica
Slovenije

Mednarodna konferenca, 30. – 31. marec 2026, Brdo pri Kranju

© Avtor(ji) 2026. CC-BY 4.0 / © The Authors 2026. 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** 32
Year **Letnica** 2026
Number **Številka** 1

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, POCLAIN HYDRAULICS, d. o. o., Žiri
- ▶ 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 MURRENHOFF, 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.  ACCESS

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.

CELOVITE REŠITVE ZA PARO, KONDENZAT IN VARNOSTNE SISTEME **SAMSON S-Q2**

Primož Živkovič

Podjetje GIA-S d. o. o. je dolgoletni partner nemškega podjetja SAMSON, katerega produktna linija S-Q2 že več kot stoletje vključuje visokotehnološke sisteme za upravljanje pare, kondenzata in industrijske energije.

Naše rešitve združujejo učinkovitost, varnost in trajnostno rabo energije, kar industrijskim obratom omogoča popoln nadzor nad procesi ogrevanja, hlajenja in pretoka medijev.

S produktno linijo **SAMSON S-Q2** ponujamo modularne in integrirane sisteme za procesno avtomatizacijo, varnost (SIL2 / SIL3) in energetske optimizacije.

1. SAMSON 7110 – generator nasičene pare

Generator nasičene pare *Tip 7110* pretvarja pregreto paro v nasičeno, torej v medij z natančno določeno temperaturo in tlakom na meji kondenzacije.

Rezultat je stabilna in homogena para, idealna za ogrevanje, sterilizacijo in sušenje v procesih, kjer je potrebna zelo natančna temperaturna regulacija.

Zakaj je to pomembno?

Pregreata para je lahko prevroča in poškoduje opremo, hkrati pa je regulacija takšnih procesov težja.

Tip 7110 ohladi pregreto paro do nasičenja in jo pripravi za varno uporabo v procesih, kjer je regulacija natančne temperature ključna.

Tehnične prednosti:

- ▶ natančna regulacije temperature do $\pm 0,1$ K,
- ▶ popolna regulacija v celotnem območju pretoka (0–100 %),
- ▶ **SIL** – skladna zasnova za uporabo v varnostnih sistemih,
- ▶ brez tveganja za pregrevanje tudi ob spremembah obremenitve.

Uporaba: elektrarne, farmacevtska industrija, prehrambni obrati, kemični procesi.



Generator nasičene pare

2. SAMSON 7115 in 7116 – hlajenje pregrete pare

Tip 7115 je parna hladilna šoba, ki z vbrizgom natančno odmerjene količine vode ohlaja pregret parni tok.

Ko voda izhlapi, odvzame toplotno energijo pari, tlak ostane nespremenjen, temperatura pa se zniža na približno +7 K nad temperaturo nasičenja.

Tip 7116 gre korak dlje: združuje hlajenje in regulacijo tlaka v eni napravi ter deluje kot kompaktna enota za pripravo pare.

To pomeni, da sistem paro ne le ohladi, temveč tudi nadzoruje njen tlak oziroma skupno entalpijo – kar je ključno v industrijskih procesih, kjer morata biti tlak in temperatura ves čas znotraj natančno določenih mej.

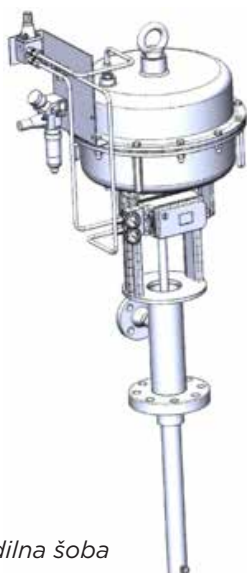
Primož Živkovič, GIA-S, d. o. o., Grosuplje

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0

Ključne značilnosti:

- ▶ hlajenje in regulacija v enem sistemu,
- ▶ visoka stabilnost tlaka in temperature,
- ▶ minimalni tlačni padci.

Uporaba: elektrarne, kemična in farmacevtska industrija, sušilnice, valjarne, toplotni procesi.



Parna hladilna šoba

3. SAMSON 7150 / 7151 / 7152 – procesni in krmilni sistemi

Serijska omogoča natančno pripravo in regulacijo tlaka, temperature ali pretoka pare:

- ▶ *Type 7150* – regulacija tlaka,
- ▶ *Type 7151* – regulacija temperature,
- ▶ *Type 7152* – regulacija pretoka.

Sistemi so sestavljeni iz senzorjev, krmilnikov in ventilov, ki skupaj tvorijo avtomatsko krmilno zanko.

Ko sistem zazna spremembo tlaka, temperature ali pretoka, avtomatsko prilagodi položaj ventilov, da ohrani želene vrednosti procesa.

Deluje po principu *PID-regulacije* in omogoča natančno, hitro in zanesljivo avtomatizacijo industrijskih procesov.

Uporaba: živilska in farmacevtska industrija, energtika, gumarska industrija, kemični obrati.



SAMSON procesni in krmilni sistemi

4. SAMSON 7140 / 7141 / 7142 – enote za vračanje kondenzata

Ko para opravi svoje delo, odda energijo in se spremeni nazaj v vodo, ki jo imenujemo kondenzat.

Namesto da bi ga zavrgli, SAMSON-ovi sistemi kondenzat zberejo, ločijo in vrnejo v sistem, kar prihrani ogromno energije in stroškov pri pripravi vode.

Tip	Funkcija	Opis
7140	Vračanje kondenzata	S črpalko sistem vrača zbrani kondenzat v sistem za pripravo vode in napajanje parnega kotla.
7141	Rezervoar za kondenzat	Zbira kondenzat in omogoča njegovo vračanje v sistem.
7142	Flash posoda	Varno ločuje paro in pregreti kondenzat ter omogoča njuno ponovno uporabo.

Skupaj tvorijo pametni krožni tok pare in kondenzata:

para → ogrevanje → kondenzat → vračanje → ponovna uporaba.

Uporaba: industrije s parnim ogrevanjem ali sušenjem, prehranski obrati, farmacija, kemični procesi.

5. SAMSON SIS – Safety Instrumented Systems

Varnost je ključna pri delu s paro, plini in vodikom.

Rešitve *SAMSON SIS* zagotavljajo zanesljivo zaščito pred prenapetostjo, povratnim tokom, pregrevanjem in kontaminacijo medijev.

Tip	Funkcija	SIL stopnja
7301 / 7305	Zaščita pred povratnim tokom medija (Backflow Protection)	SIL2 / SIL3
7315 / 7316	Nujni izklop (Emergency Shutdown System)	SIL2 / SIL3

SIL (Safety Integrity Level) označuje stopnjo varnostne zanesljivosti. SIL3 predstavlja najvišjo raven zaščite in se uporablja v zahtevnih aplikacijah, kot so vodikovi in visokotlačni procesi.

Dvokanalne izvedbe (Dual-channel) (7305, 7316) vključujejo dve neodvisni varnostni verigi, kar zagotavlja, da sistem ostane operativen tudi v primeru odpovedi enega od kanalov.



Dvokanalni sistem za preprečevanje povratnega toka

Uporaba: vodikove postaje, kemična industrija, farmacija, energetika, procesna varnost.

6. SAMSON H₂ – vodikove rešitve prihodnosti

SAMSON S-Q2 je med vodilnimi ponudniki na področju vodikovih tehnologij.

Sistemi omogočajo nadzor tlaka in pretoka vodika do 500 bar ter integracijo varnostnih in regulacijskih funkcij v enoten sistem.

Kombinacija tipa 7150 (*procesni nadzor*) in tipa 7316 (*SIS varnostni sistem*) omogoča:

- ▶ varno praznjenje vodikovih rezervoarjev (npr. s 500 bar na 50 bar),
- ▶ stabilen masni pretok (30–300 kg/h),
- ▶ zaščito pred povratnim tokom in prenapetostjo,
- ▶ SIL3 skladno zaščito z dvojno varnostno verigo.

Uporaba: vodikove polnilnice, laboratoriji, testne postaje, industrijski in energetski sistemi prihodnosti.

7. Krmilne in merilne enote S-Q2

Za popolno integracijo in digitalni nadzor ponuja linija S-Q2 naslednje podporne sisteme:



SAMSON modularni sistemi in rešitve

- ▶ Tip 7311 – *pnevmatski krmilni sistem* za regulacijo tlaka in temperature (naslednik serije 420/430),
- ▶ Tip 7400 – *merilno-krmilna postaja* z industrijskim krmilnikom TROVIS 6495/6493,
- ▶ Tip 7510 – *rezervoar za zasilni zrak*, ki zagotavlja varno delovanje ventilov tudi ob izpadu električne energije.

Ti moduli povezujejo vse komponente v popolnoma avtomatiziran, nadzorovan in SIL skladen sistem.

8. Električni parni generatorji SAMSON – čista energija prihodnosti

Električni parni generatorji SAMSON S-Q2 zagotavljajo natančno, zanesljivo in popolnoma brezemisjsko proizvodnjo pare, saj delujejo brez uporabe fosilnih goriv.

Na voljo so v treh standardnih močeh:

Tip	Moč	Napajanje
7121	90 kW	400 V / 50 Hz
7120	300 kW	400 V / 50 Hz
7129	1 MW	690 V / 50 Hz

Vsaka enota deluje kot kompaktni modularni sistem, ki vključuje:

- ▶ napajalni sistem za vodo (Tip 7126 / 7127),
- ▶ odtočno posodo za odvod odpadne pare/kondenzata (Tip 7124 / 7125),
- ▶ prenosno krmilno enoto ali parno kotlovnico (Tip 7123 / 7128).

Ti generatorji zagotavljajo stabilno, čisto in varno paro za sterilizacijo, ogrevanje, laboratorijske aplikacije in proizvodne procese, kjer je zahtevana natančna regulacija temperature in tlaka.

Zakaj izbrati GIA-S d. o. o.?

Kot uradni partner podjetja SAMSON zagotavljamo:

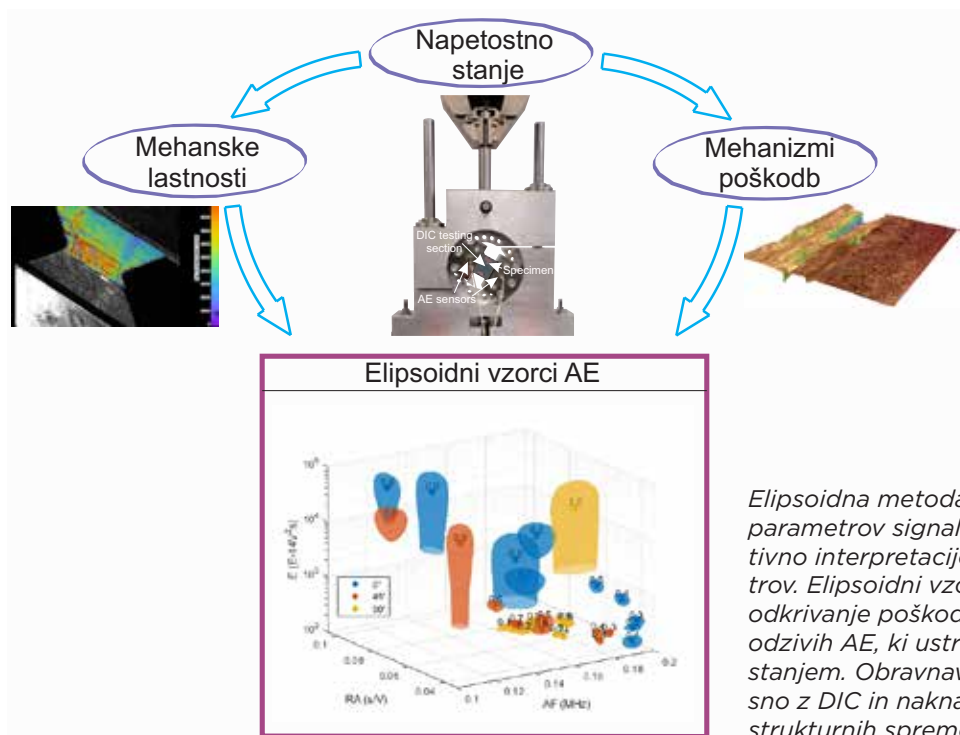
- ▶ svetovanje in podporo projektantom pri načrtovanju sistemov,
- ▶ dobavo opreme SAMSON,
- ▶ tehnično podporo, servis in zagon naprav
- ▶ ter energetske optimizirane rešitve za industrijske procese.

Naša naloga je povezati tehnološko dovršene naprave SAMSON v učinkovit, varen in trajnosten sistem, ki zmanjšuje stroške in povečuje zanesljivost delovanja.



ZVOČNI PODPIS POŠKODB: NOVA METODA ZA SPREMLJANJE OBRABE BAZALTNIH KOMPOZITOV

Raziskovalci UL FS so razvili novo metodo vizualizacije akustične emisije, ki omogoča boljše razumevanje razvoja poškodb v bio osnovanih kompozitnih materialih. Rezultati odpirajo pot zanesljivejšemu spremljanju stanja konstrukcij in napovedovanju njihovega obnašanja v realnih pogojih.



Elipsoidna metoda vizualizacije za predstavitev parametrov signalov AE, ki omogoča bolj intuitivno interpretacijo velikosti in trendov parametrov. Elipsoidni vzorci AE omogočajo zgodnje odkrivanje poškodb in razkrijejo spremembe v odzivih AE, ki ustrezajo različnim napetostnim stanjem. Obravnavano je spremljanje AE sočasno z DIC in naknadno mikroskopsko analizo strukturnih sprememb v laminatih.

Bazalni bio epoksidni laminati postajajo vse pomembnejši v trajnostni gradnji in industriji, saj združujejo mehansko trdnost z nižjim vplivom na okolje. Njihova odpornost pa je še vedno odvisna od kompleksnih notranjih poškodb, ki se razvijajo med obremenjevanjem.

Obstoječe metode spremljanja teh poškodb so pogosto premalo občutljive ali pa zahtevajo invazivne posege. Zato so raziskovalci z uporabo posebej zasnovanega Arcanovega vpenjala preizkušali laminatne vzorce z različno usmerjenimi vlakni in hkrati zajemali signale akustične emisije (AE).

Novost predstavlja elipsoidna vizualizacija AE-signalov, ki omogoča intuitivnejše razumevanje njihove velikosti in razpršenosti. Ta pristop ne le poenostavi interpretacijo, ampak tudi izboljša zanesljivost zgodnjega zaznavanja poškodb.

S pomočjo nevronske mreže so raziskovalci razvili klasifikatorje, ki uspešno razvrščajo AE-sigle

de na stopnjo obremenitve. To pomeni boljše napovedi, kdaj in kako bo prišlo do porušitve materiala.

»Naš pristop združuje natančno mehansko testiranje, napredno obdelavo signalov in strojno učenje. Tako dobimo orodje, ki lahko pomaga inženirjem pri spremljanju zdravja konstrukcij v realnem času,« pojasnjuje doc. dr. Tomaž Kek, eden od avtorjev raziskave.

Nova metodologija podpira razvoj napovednih modelov za obnašanje kompozitov pod obremenitvijo in predstavlja pomemben korak k bolj trajnostni in varni uporabi teh materialov v praksi.

Celoten članek: *Elipsoidni vzorci akustične emisije v bazaltnih bio epoksidnih laminatih pri različnih kotih obremenitve / Ellipsoidal acoustic emission patterns in basalt bio-epoxy laminates under different loading angles.*

www.fs.uni-lj.si

Avtorji 2026. CC-BY 4.0

SINUSOIDNA TEHNOLOGIJA ZA ZAHTEVNE INDUSTRIJSKE PROCESSE

Mojca Gros

Procesne črpalke MasoSine temeljijo na sinusoidni tehnologiji (rotor v obliki sinusoidne krivulje). Gre za črpalko z rotorjem posebne sinusoidne geometrije, ki ustvarja gladek, skoraj neprekinjen pretok z izjemno nizkimi strižnimi silami.

Takšna zasnova omogoča zanesljivo in nežno črpanje širokega spektra tekočin – od nizko viskoznih do zelo viskoznih, vključno z mediji, ki vsebujejo mehke trdne delce.

Ključne prednosti črpalk MasoSine

1. Nizko strižno delovanje
Sinusoidni rotor zagotavlja minimalno mehansko obremenitev medija, kar zmanjšuje tveganje za razgradnjo črpanega medija, mehanske poškodbe delcev ter nezaželene spremembe strukture ali teksture. Idealno za zelo občutljive medije.
2. Enakomeren pretok z zelo nizko pulzacijo
Stabilen in ponovljiv proces z zmanjšanimi vibracijami in hrupom, brez potrebe po dodatnih dušilnikih pulzacij.
3. Močna sesalna zmogljivost
Samosesanje do približno 0,85 bar vakuumu, zanesljivo črpanje tudi pri slabih sesalnih pogojih, primerno za praznjenje rezervoarjev in transport gostih medijev.
4. Visoka zmogljivost in tlak
Pretoki do ~99.000 l/h, delovni tlaki do 15 barov, konstantna zmogljivost tudi pri spremembah viskoznosti.
5. Ravnanje z delci
Prenos mehkih trdnih delcev do ~60 mm, brez rezanja, drobljenja ali poškodovanja delcev.

SP-serija – industrijska in higienska izvedba

Procesne črpalke MasoSine SPS so zasnovane za zahtevna industrijska okolja in higienske aplikacije.

Tehnične značilnosti:

- ▶ samosesalna sinusoidna črpalka,
- ▶ robustno ohišje z dolgo življenjsko dobo,
- ▶ možnost CIP/SIP-čiščenja,
- ▶ enostavno vzdrževanje in dostop do notranjih komponent,
- ▶ do 20 let garancije na ohišje (odvisno od konfiguracije).

Primerjava z drugimi tehnologijami

MasoSine v primerjavi s centrifugalnimi črpalkami:

- ▶ bistveno bolj stabilno in učinkovito delovanje pri viskoznih medijih,
- ▶ samosesalne lastnosti,
- ▶ stabilen pretok ne glede na tlak,
- ▶ primernejše za občutljive in dragocene produkte.



Slika 1 : Inovativni rotor ustvarja skoraj neprekinjen pretok.

Mojca Gros, Hennlich, d. o. o., Kranj,
gros@hennlich.si

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0

MasoSine v primerjavi s peristaltičnimi črpalkami:

- ▶ večji pretoki in višji tlaki,
- ▶ ni potrošnega materiala (cevi),
- ▶ primernejše za kontinuirane industrijske procese,
- ▶ daljši servisni intervali.

Tipične aplikacije:

- ▶ živilska industrija in industrija pijač, omake, juhe, nadevi, izdelki z delci (sadje, zelenjava, meso), viskozni in lepljivi mediji,
- ▶ farmacija in kozmetika: kreme, geli, emulzije, občutljive formulacije, higienski procesi s CIP/SIP-zahtevami,
- ▶ industrija in kemija: lepila, smole, polimeri, viskozna in abrazivna sredstva, procesi z visokimi zahtevami po zanesljivosti.



Slika 2 : Črpalke MasoSine so primerne tudi za farmacijo, kozmetično in živilsko industrijo.

Črpalke tudi v ATEX-izvedbi

Procesne črpalke MasoSine predstavljajo zanesljivo rešitev za aplikacije, kjer so ključni nežno črpanje, stabilen in ponovljiv pretok, visoka sesalna zmogljivost, dolga življenjska doba ter nizki stroški vzdrževanja.

SPS-serija združuje inovativno sinusoidno tehnologijo z robustno industrijsko zasnovo, kar jo uvršča med najbolj vsestranske procesne črpalke na trgu.

V podjetju HENNLICH vam svetujejo pri iskanju prave rešitve za vas – www.hennlich.si.



BREZPRAŠEN VSIP

- » Vsipniki za natovarjanje sipkih, suhih ali zrnatih materialov.
- » Učinkovit nadzor prahu za varno in čisto delovno okolje.
- » Enostavna namestitve in hitrost vsipa preko 400 m³/uro.
- » Boljša kakovost zraka in manjša izguba materiala.



www.hennlich.si

HENNLICH d.o.o., Ul. Mirka Vadnova 13, 4000 Kranj / Pokličite nas: 031 386 056

OGLAŠEVALCI

- | | |
|---|--|
| ▶ CELJSKI SEJEM, d. d., Celje 9 | ▶ Miel elektronika, d. o. o., Velenje 1 |
| ▶ DAX, d. o. o., Trbovlje 67 | ▶ POCLAIN HYDRAULICS, d. o. o, Žiri 1, 2 |
| ▶ EGASI, d. o. o., Radovljica 43 | ▶ PPT COMMERCE, d. o. o., Ljubljana 1, 4 |
| ▶ GIA-S, d. o. o., Grosuplje 1, 309 | ▶ PROFIDTP, d. o. o., Škofljica 51, 68 |
| ▶ HENNLICH, d. o. o., Kranj 59 | ▶ SEAL & TRADE, d. o. o., Maribor 1 |
| ▶ HPE, d. o. o., Ljubljana 1 | ▶ Slovensko združenje za tehnologijo čistih prostorov 52 |
| ▶ INGVAR, d. o. o., Ljubljana 27 | ▶ STROJNISTVO.COM, Ljubljana 17 |
| ▶ INOTEH, d. o. o., Bistrica ob Dravi 43 | ▶ TU-VAL, d. o. o., Domžale 1 |
| ▶ JAKŠA, d. o. o., Ljubljana 23 | ▶ UL, Fakulteta za strojništvo 13, 16 |
| ▶ La & Co., d. o. o., Limbuš 1 | ▶ UM, FERL 8 |
| ▶ MIEL Elektronika, Velenje 1 | ▶ YASKAWA, d. o. o., Ribnica 66 |
| ▶ OLMA, d. o. o., Ljubljana 1 | |
| ▶ OMEGA AIR, d. o. o., Ljubljana 1, 64 | |

FRONIUS PREDSTAVLJA VELOCITY ASSISTANT ZA ROČNO VARJENJE MIG/MAG

Z novim sistemom Velocity Assistant, krajše Velo, podjetje Fronius dviguje ročno varjenje MIG/MAG na povsem novo raven. Inovativni sistem je bil javnosti prvič predstavljen na sejmi SCHWEISSEN & SCHNEIDEN v Essnu in FABTECH v Chicagu, kjer je požel veliko zanimanja med vsemi, ki pogosto varijo dolge in natančne zvarne spoje. Velo navdušuje strokovnjake za varjenje z asistirano vodenim gorilnikom in konstantno hitrostjo varjenja – za popolne, ponovljive zware ob zmanjšani telesni obremenitvi.

Dolgi zvari predstavljajo izziv tudi za izkušene varilce: enakomerna hitrost in natančno vodenje gorilnika sta ključna za kakovost zvara, vendar ju je na daljših razdaljah težko in predvsem naporeno vzdrževati. Tukaj Velo pokaže svojo pravo vrednost, saj Velocity Assistant prvič omogoča nadzor hitrosti med ročnim varjenjem. Posledično podpira širok nabor aplikacij, predvsem tam, kjer so potrebni dolgi in enakomerni zvari – na primer v transportni industriji, težki mehanizaciji, jeklenih konstrukcijah ali strojogradnji. Velo je primeren tako za aplikacije na tanki pločevini kot za varjenje debelejših pločevin iz jekla, CrNi ali visokotrdnostnega jekla.

Kvantni skok v ročnem varjenju

Srce sistema Velo je druga žica – tako imenovana Velo žica, ki deluje brez obloka in brez dodatne-



Velo žica »potiska« gorilnik vzdolž zvara in zagotavlja konstantno hitrost varjenja ter razdaljo do obdelovanca. To zagotavlja kakovost in razbremenjuje varilca.



Popolni, dolgi in enakomerni MIG/MAG-zvari v enem kosu – z asistentom Velo to ni nobena znanost.

ga dovoda plina. Ta žica se v trdnem stanju dotika obdelovanca in s pomočjo trenja ustvarja gibanje naprej. Hitrost pomika Velo žice določa hitrost varjenja.

Velo žica ohranja konstantno razdaljo med obdelovancem in kontaktno šobo ter »potiska« gorilnik vzdolž roba zvara, utora ali posnetega roba brez posebne priprave zvara. Pri vsem tem Velo žica zvaru doda le minimalno količino dodatnega materiala: poraba žice natančno ustreza dolžini zvara.

»Če si dovolite prepustiti del nadzora, lahko zdaj pri ročnem varjenju izdelujete popolne zware z neprekosljivo hitrostjo, tako da preprosto držite gorilnik,« pojasnjuje Franziska Eichhorn, strateška produktna vodja pri Fronius International. »Testni uporabniki potrjujejo opazno manjšo obremenitev ter znatno povečanje natančnosti in kakovosti varjenja.«



Uporaba je izjemno preprosta: Velo žica prevzame vodenje in nudi podporo varilcu.

Ne glede na to, ali ste začetnik ali profesionalac – Velo podpira vse.

Velo prinaša korenite spremembe: medtem ko začetniki zahvaljujoč podpornemu vodenju hitro dosežejo visokokakovostne zware, profesionalci izkoristijo razbremenitev pri dolgih ali zahtevnih varilnih nalogah. Krči in utrujenost so stvar preteklosti, kakovost zvara pa ostaja konsistentno visoka. Poseben poudarek: pod določenimi pogoji lahko Velo doseže hitrosti varjenja, ki so primerljive z robot-skim varjenjem, kar znatno poveča produktivnost.

Preprosta nadgradnja – takojšen začetek

Velo je združljiv z obstoječimi napravami TPS/i od 320 A dalje ter sistemi iWave Multiprocess PRO in ga je mogoče preprosto naknadno dopolniti. Vse, kar potrebujete, je:

- ▶ podajalnik žice za Velo žico,
- ▶ ustrezen adapter za gorilnik s sistemom za podajanje Velo žice,
- ▶ ustrezno aktivacijo programske opreme.

Integracija v obstoječe sisteme je hitra in enostavna – brez potrebe po zapletenih predelavah.

Poudarek na ergonomiji in prilagodljivosti

Držalo Velo je mogoče zasukati za 360° brez uporabe orodja in se varno zaskoči na mestu. Če je dostopnost omejena, lahko komponente sistema Velo preprosto snamete z držala in jih odmaknete. Zahvaljujoč svoji prilagodljivosti je sistem primeren za vse položaje – tudi za varjenje cevi s 360° zvari ali večplastne aplikacije.



Enostavna nadgradnja: Za naprave TPS/i (od 320 A) in iWave Multiprocess PRO potrebujete le podajalnik žice, adapter za gorilnik in programsko opremo.

Veliko delovno območje zagotavlja pet metrov dolg sistem za podajanje Velo žice. Sistem se aktivira neposredno na varilnem gorilniku, kar pomeni, da ga je mogoče po potrebi kadar koli izklopiti in fleksibilno preklapljati med ročnim in asistirano vodenim varjenjem.

Razpoložljivost in distribucija

Sistem je po vsem svetu na voljo od jeseni 2025, patentni postopek pa je v teku. Za več informacij obiščite: www.fronius.com/velo-en.

Vir:

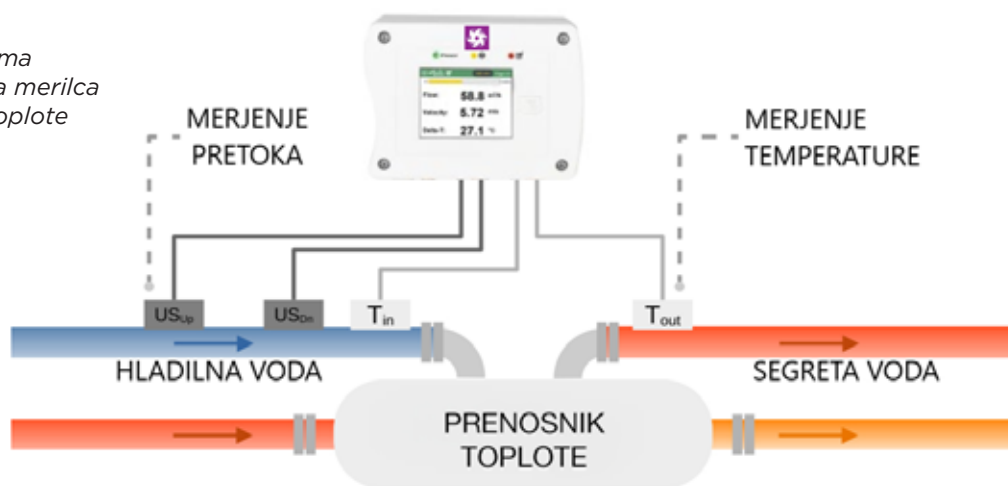
Ingvar d. o. o., Brnčičeva ul. 5d,
1231 Ljubljana, Slovenija, Tel.: 01 236 14 20
e-poštni naslov: info@ingvar.si, g. Marko Pečlin

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0

ULTRAZVOČNI MERILNIKI PRETOKA IN TOPLOTE

Ultrazvočni merilnik pretoka in toplote podjetja OMEGA AIR d. o. o. Ljubljana, za namestitev na zunanost cevi zagotovi hitro in točno merjenje in beleženje parametrov brez posegov v obstoječe inštalacije.

Slika 1 : Shema inštaliranega merilca pretoka in toplote



V središču današnjih industrijskih podjetij je prizadevanje za uspešnost in trajnost postalo strateško nujno. Cilji so jasni:

- ▶ zmanjšanje količine odpadnih surovin in energije,
- ▶ optimalizacija porabe energije,
- ▶ krepitev konkurenčnosti (zmanjšanje izpadov proizvodnje in stroškov vzdrževanja),
- ▶ zagotavljanje okoljske skladnosti.

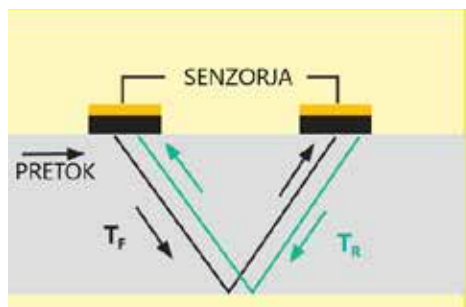
Natančno merjenje pretoka tekočin in porabe toplote je torej ključno za prepoznavanje priložnosti izboljšav na področju izgub energije.

Z uporabo ultrazvočnih merilnikov pretoka industrijski operaterji pridobijo vpogled v svoje energetske tokove v realnem času. Na ta način lahko

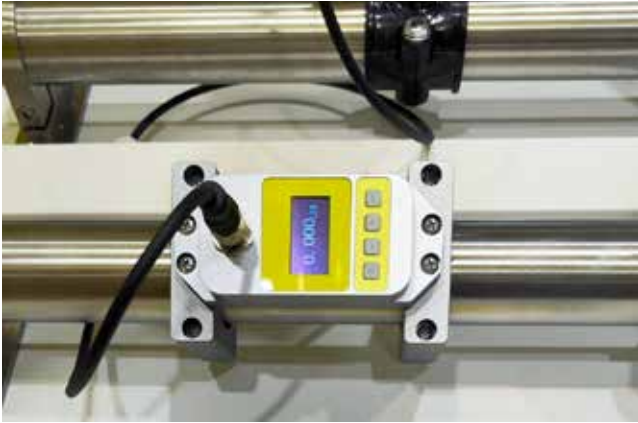
hitro prilagodijo proizvodne parametre. Brez neposrednega stika s tekočino se odpravijo tveganja onesnaženja in zmanjša ogljični odtis (manj materialov, manj posegov). Njihova visoka natančnost pa omogoča takojšnje odkrivanje odstopanj v porabi, boljšo razporeditev virov in optimizacijo proizvodnje, s čimer se povečata donosnost procesov in okoljska učinkovitost.

Razvoj tehnologije merilnikov pretoka

V primerjavi s preteklostjo danes ultrazvočni merilniki pretoka zagotavljajo neprekosljivo raven natančnosti za merjenje pretoka tekočine. Najnovejša tehnologija pošilja ultrazvočne impulze diagonalno med dvema senzorjema, nameščenima na zunanji strani cevi. Časovna razlika, izmerjena med zgor-



Slika 2 : Prikaz delovanja in namestitve senzorja pretoka



Slika 3 : Merilec pretoka za cevi manjših premerov

njimi in spodnjimi senzorji, je posledica hitrosti tekočine. Ta pristop omogoča zelo natančne meritve, ne da bi bile omejene na tekočine, ki vsebujejo mehurčke ali delce.

Ob hkratnem merjenju temperature medija na vhodni in izhodni strani pa dobimo kompleten vpogled v porabo energije.

Z več senzorji, povezanimi v eno točko, enostavneje sproti analiziramo podatke. Podatki se lahko izvozijo tudi na računalnik za kasnejšo analizo.

Tehnologija tranzitnega časa

Ultrazvočni merilniki pretoka podjetja OMEGA AIR, d. o. o., Ljubljana, delujejo s tehnologijo tranzitnega časa. Prednosti tega načina pa so:

- ▶ *visoka natančnost:* merjenje ni odvisno od prisotnosti delcev, kar zagotavlja zanesljive rezultate tudi v zelo čistih tekočinah;
- ▶ *brez kontaminacije:* brez stika s tekočino, kar preprečuje kontaminacijo ali obrabo komponent;
- ▶ *prilagodljivost v več panogah:* primerno za ultračiste tekočine, rahlo napolnjene tekočine in zahtevnejše aplikacije.

Novi algoritmi za obdelavo signalov izboljšujejo občutljivost senzorjev in diagnostiko (zaznavanje zračnih mehurčkov, ocena kakovosti signala itd.). Posledično merilniki pretoka izstopajo kot vodilna rešitev, ki zagotavlja zanesljivo merjenje, prihranke pri stroških in enostavno namestitve, kar popolnoma ustreza izzivom v različnih proizvodnih okoljih.

Namestitev in uporaba po principu »vklopi in meri« Ena od ključnih prednosti takih ultrazvočnih merilnikov pretoka je njihova enostavnost namestitve z objemkami. Za razliko od vgradnih merilnikov pretoka (vstavnih ali linijskih) se namestitev izvede na zunanji strani cevovoda:

- ▶ *brez zaustavitev proizvodnje:* brez rezanja, varjenja in praznjenja cevovoda;
- ▶ *hiter zagon:* namestitev senzorjev in konfiguracija naprave trajata le nekaj minut;
- ▶ *združljivost z več materiali:* jeklo, PVC, HDPE ... Objemke iz nerjavnega jekla na merilnikih pretoka ostanejo učinkovite z različnimi materiali cevi.

Ta preprostost znatno zmanjša izpade in težke postopke, neposredno zniža industrijske stroške in zagotovi boljšo kontinuiteto storitev.

Zmanjšano vzdrževanje in hitra diagnostika

Čas delovanja je ključnega pomena za optimizacijo industrijskih procesov. Z našimi ultrazvočnimi merilniki pretoka je vzdrževanje poenostavljeno:

- ▶ *brez delov, ki so v stiku s tekočino:* brez korozije, usedlin ali prezgodnje obrabe;
- ▶ *hitra diagnostika:* omogočajo preverjanje segmentov cevovodov in hitro odkrivanje puščanja ali zamašitev;
- ▶ *enostavna zamenjava:* okvarjen merilnik pretoka je mogoče zamenjati, ne da bi ustavili proizvodnjo.

Ta odzivnost pomeni večjo razpoložljivost proizvodne linije in natančnejše zaznavanje anomalij.



Slika 4 : Na cev nameščeni sondi merilca pretoka

Vsestranskost in prilagodljivost za širok spekter sektorjev

Ultrazvočno merjenje pretoka med merilniki pretoka izstopa zaradi svoje izjemne vsestranskosti. Ker merijo brez neposrednega stika s tekočino, so primerni za številne industrije, kot so:

- ▶ *kemična industrija*: Natančno doziranje reagentov pomaga omejiti odpadke surovin in zagotavlja kakovost izdelkov. Merilniki pretoka zagotavljajo stabilno in zanesljivo merjenje, hkrati pa preprečujejo kontaminacijo – ohranjajo čistost komponent in izpolnjujejo standarde sledljivosti;
- ▶ *obdelava vode*: Z neprekinjenim merjenjem pretoka surove ali obdelane vode lahko operaterji hitro prilagodijo parametre filtracije in usedanja, preprečijo prelivanje in optimizirajo porabo energije. Merjenje v realnem času olajša tudi skladnost z okoljskimi normami;
- ▶ *industrijski hladilni sistemi*: Pri hlajenju in klimatizaciji zgodnje zaznavanje sprememb pretoka ali temperature zagotavlja optimalno delovanje. Merjenje pomaga preprečiti drage izpade in prekomerno porabo energije.

Zahvaljujoč tej prilagodljivosti se ultrazvočni merilniki pretoka učinkovito spopadajo z izzivi v mnogih industrijskih aplikacijah.



Slika 5 : Sonda pretoka nameščena na cev večjega premera

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



TOČKE ROSIŠČA

+3°C
-25°C
-40°C
-70°C



OB IZIDU SLOVENSKEGA TEHNIŠKEGA SLOVARJA

Andrej Šmalc

Konec leta 2025 je pri založbi ZRC izšel Slovenski tehniški slovar, ki so ga uredili: Andrej Šmalc, Andrej Paulin in Marjeta Humar s sodelovanjem avtorjev: Andreja Čadeža, Leona Čelika, Petra Glaviča, Ferdinanda Gubine, Marjete Humar, Boža Igliča, Sonje Malej - Kveder, Aleša Mohoriča, Andreja Paulina, Andreja Šmalca, Jožeta Spanringa, Antona Stuška, Matija Tume, Jožeta Unka, Florijana Vodopivca in Branka Zadnika. Slovar je vsaj delno zapolnil skoraj štiridesetletno vrzel po zadnjem izidu splošnega tehniškega slovarja.



Slovenski tehniški slovar

Potreba po slovenskem tehniškem slovarju je že stara in sega v leto 1911, ko se je začelo zbirati gradivo zanj v okviru tedaj ustanovljenega Društva tehnikov in arhitektov. Slovensko tehniško izrazje

je bilo tedaj še zelo pomanjkljivo, zato so se ob ustanovitvi univerze leta 1919 v učnem jeziku še veliko uporabljali strokovni izrazi, ki so bili bolj ali manj posrečeni prevodi nemških izrazov. V letih od 1943 do 1947 je bila pri novo ustanovljeni Akademiji znanosti in umetnosti osnovana Terminološka komisija, ki je prevzela nalogo izdelati splošni tehniški slovar, pri delu pa je z njo sodelovala tudi Zveza inženirjev in tehnikov. Leta 1962 in 1964 sta izšla prvi in drugi del splošnega tehniškega slovarja, druga, dopolnjena izdaja pa je izšla, prav tako v dveh delih kot prva, v letih 1978 oziroma 1981. Obe izdaji splošnega tehniškega slovarja sta ob svojem izidu kljub nekaterim nedoslednostim in pomanjkljivostim predstavljali zbir bogate slovenske tehniške terminologije.

Od tedaj, zlasti pa v zadnjem času, je tehnika doživela nesluten razvoj, ki je s seboj prinesel številne nove pojme, po drugi strani pa so nekateri drugi, zlasti starejši, izginili iz rabe. Zato se je čedalje bolj kazala potreba po novem, razlagalnem slovarju, ki bi bil ne samo prejšnji splošni tehniški slovar, dopolnjen z novimi gesli, temveč bi bil tudi slovaropisno sistematsko urejen z bolj preglednim prikazom gesel in geselskih zvez ter odnosov med njimi ter opremljen s kratkimi razlagami.

Leta 1981 je bilo ob ustanovitvi Znanstvenoraziskovalnega centra SAZU delo v zvezi z novim slovenskim tehniškim slovarjem preneseno v terminološko komisijo, ki jo je leta 1988 nasledila sekcija za terminološke slovarje Inštituta za slovenski jezik Frana Ramovša pri ZRC SAZU. V letu 2007 je bil izdan poskusni snopič Slovenskega tehniškega slovarja A-B, ki naj bi pokazal morebitne pomanjkljivosti, da bi so se te lahko pravočasno odpravile oziroma upoštevale.

Novi slovar v skoraj 20.000 slovarskih sestavkih, ki so razvrščeni po abecednem redu iztočnic, vsebu-

Dr. Andrej Šmalc, upokojeni sodelavec Inštituta
»Jožef Stefan«

© Avtorji 2026. CC-BY 4.0

je strokovne izraze 23 strokovnih področij. Namenjen je zlasti strokovnjakom z omenjenih strokovnih področij pa tudi za splošno rabo, čeprav je pri nekaterih zahtevnejših definicijah potrebno strokovno predznanje. Je informativen, v veliki meri pa tudi normativen, kolikor je bilo mogoče glede na veliko količino gradiva določiti ustaljeno rabo posameznih izrazov. Slednje je še zlasti pomembno glede na naraščajoče število novih univerz v Sloveniji, na katerih naj bi se uporabljalo kolikor mogoče poenoteno tehniško izrazje.

Slovar je zasnovan tako, da slovarski sestavki prednostnih strokovnih izrazov vsebujejo strokovni izraz kot iztočnico, jezikoslovne podatke, po potrebi enega ali največ dva označevalnika strokovnega področja, kratko razlago oziroma definicijo, lahko tudi enega ali več enakovrednih ali podrejenih, tj. manj uporabljenih ali manj ustreznih sinonimov, in

morebitne primerjave. Enakovredni sinonimi so v slovarju označeni z oznako **S**, podrejeni z oznako **Sp**, primerjave pa z oznako **PRIM**. Definiciji včasih sledi kratica z oznako **K**.

Sestava komisije za izdelavo slovarja se je tekom časa spreminjala, nekaterih članov žal tudi ni več med nami. Vključevanje novih članov, ki naj bi jih nadomestili, pa v današnjem času spričo splošne obremenjenosti strokovnjakov ni lahko. Tudi zato so nekatera strokovna področja žal ostala nepokrita in zaradi nepopolnosti v slovarju za zdaj niso zastopana. To težavo bo odpravila šele bodoča spletna izdaja Slovenskega tehniškega slovarja na Termanii, ki jo bo mogoče dopolnjevati in po potrebi tudi popravljati. Upoštevala bo tudi spremene navade uporabnikov slovarjev, ki želijo hitro dobiti informacijo.

MOTOMAN NEXT
YASKAWA

AI vodeni roboti: NOVA DOBA

Prilagodljivi roboti s pomočjo umetne inteligence (AI) z uporabo senzorjev in kamer zaznavajo okolico, se prilagodijo in z uporabo lastnih veščin samostojno opravljajo naloge.



YASKAWA Slovenija d.o.o. • T: +386 (0)1 83 72 410 • YSL-info@yaskawa.eu • www.yaskawa.si



www.dax.si

EPSON
EXCEED YOUR VISION

**VSE V DOSEGU.
TUDI CENA.**



T3 SCARA

400 mm 3 kg

KONTROLER V BAZI ROBOTA RAZVOJNO OKOLJE RC+7

INDUSTRIJSKI FORUM **IRT** 2026

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