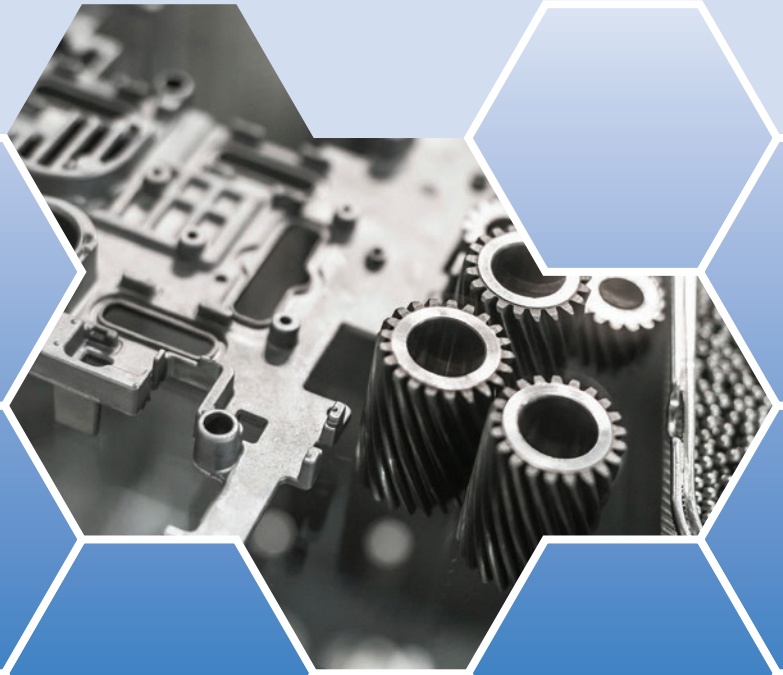


INDUSTRIJSKI  
FORUM **IRT** 2026



**VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ  
ZA STROKO**

Portorož, 8. in 9. junij 2026



# 17. INDUSTRIJSKI FORUM **IRT**

VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ  
ZA STROKO

**Zbornik foruma**

Urednik  
**Darko Švetak**

Portorož, 8. in 9. junij 2026

Naslov: **17. Industrijski forum IRT - VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ ZA STROKO**

Urednik: Darko ŠVETAK, PROFIDTP d. o. o., Škofljica

Organizator: PROFIDTP d. o. o., Škofljica

Glavni pokrovitelji: ABB d. o. o.  
FANUC Adria d. o. o.

Pokrovitelji: BTS d.o.o.  
Carl Zeiss d.o.o.  
EMUS d.o.o.  
KONICA MINOLTA SLOVENJA d.o.o.  
SMART COM d.o.o.  
Spanflug Technologies GmbH  
TOPOMATIKA d.o.o.  
YASKAWA SLOVENIJA d.o.o.

Medijski partnerji: Revija IRT3000  
Revija OBRTNIK-PODJETNIK  
Revija VENTIL  
Revija Računalniške novice  
Finance.si

Oblikovanje, prelom  
in priprava za tisk: Darko Švetak s.p., Škofljica

Založnik in  
izdajatelj: PROFIDTP d.o.o., Škofljica

Tisk: Tiskarna SCHWARZ PRINT d.o.o., Ljubljana

Naklada: 350 izvodov

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

338.45(497.4)(082)  
001.895(082)  
621(082)

INDUSTRIJSKI forum IRT (17 ; 2026 ; Portorož)

Vir znanja in izkušenj za stroko : 17. industrijski forum IRT :  
zbornik foruma : Portorož, 8. in 9. junij 2026 / urednik Darko Švetak ;  
[organizator Profidtp]. - Škofljica : Profidtp, 2026

ISBN 978-961-95800-6-6  
COBISS.SI-ID 277783043

*Programski odbor smatra, da je tematika prispevkov v skladu s cilji foruma, ne odgovarja pa za noben podatek ali drugo informacijo, podano v zborniku.*

# Uvodnik

## Inženirski kompas v dobi inteligentne industrije

Pred vami je zbornik Industrijskega foruma IRT 2026, ki v Portorož ponovno prinaša koncentracijo znanja v času, ko se globalna industrijska krajina neustavljivo spreminja. Vprašanje, ki si ga zastavljamo letos – »Ali lahko slovenska pamet premaga globalno maso?« – ni le tema osrednje okrogle mize, temveč rdeča nit vseh prispevkov, zbranih v tej izdaji.

Vsebine, predstavljene na največjem dogodku domače industrije, jasno odražajo, da ta ni zgolj opazovalec svetovnega dogajanja, temveč aktivni člen industrijskega kolesja. Globalni trgi so neusmiljeni, geopolitična trenja preoblikujejo dobavne verige, umetna inteligenca pa iz faze navdušenja prehaja v fazo neizprosne aplikativne uporabe. V tem kontekstu slovenska industrija ne sme biti le opazovalka. Prispevki v tem zborniku dokazujejo, da naša podjetja niso le podizvajalci, temveč arhitekti rešitev. Od gigantskih livarskih celic s 3.500 tonami zapiralne sile v LTH Castings, ki postavljajo nove standarde v avtomobilski industriji, do naprednih robotskih aplikacij Yaskawe za precizno obdelavo peščenih jeder – slovensko inženirstvo odgovarja z visoko dodano vrednostjo in tehnološko drznostjo. Letošnji zbornik dokumentira prehod iz številnih teoretičnih konceptov v oprijemljive rešitve.

Medtem ko tehnologija postaja vse bolj impresivna, človek vse bolj postaja odločevalec. Posebej ljudje, ki znajo uporabljati ta hip brzkone najbolj obetavno tehnologijo na planetu – umetno inteligenco. O njej ne govorimo več kot o futurističnem konceptu, temveč o orodju, ki v povezavi s strukturiranim inoviranjem (metode TRIZ) omogoča reševanje najtežjih tehničnih ugank. Vendar pa Industrijski forum IRT znova opominja na ključni element: človeka. Razvoj metod za objektivno ocenjevanje sposobnosti delavcev v pametnih tovarnah, ki jih obravnavamo na forumu, dokazuje, da je tehnologija brez opolnomočenega in kompetentnega posameznika le mrtvi kapital. V središču Industrije 5.0 tako ostaja inženir – s svojo intuicijo, etiko in ustvarjalnostjo.

Digitalizacija vsega, kar se digitalizirati da, prinaša izjemne priložnosti, a tudi ranljivosti. Program letošnjega foruma namenja posebno pozornost kibernetiki varnosti. V dobi, ko so proizvodni procesi neločljivo povezani z internetnim omrežjem, odpornost OT-okolij in skladnost z zakonodajo nista več le tehnični opravili, temveč strateška prioriteta uprave vsakega resnega podjetja. Kibernetika varnost pa postaja temelj zaupanja v digitalizirani proizvodnji.

Posebno mesto na Industrijskem forumu IRT in v tem zborniku zavzema priznanje Taras, ki ostaja simbol najtesnejšega sodelovanja med razvojno sfero in industrijsko prakso. Taras je več kot le kipec. Je dokaz, da so najboljši rezultati sad sinergije med akademsko sfero, razvojnimi instituti in realnim industrijskim sektorjem. Povezovanje pa edina prava pot naprej. Ko k temu dodamo še navdihujočo zgodbo letošnje Inženirke leta, postane jasno: naša največja »surovina« je človeški kapital.

V času, ko strateški razvoj industrije zahteva usklajeno delovanje gospodarstva, znanosti in države, naj ta zbornik služi kot orodje za prenos dobrih praks. Naj bodo prispevki, ki so pred vami, spodbuda za nove projekte, partnerstva in preboje, ki bodo Slovenijo obdržali v krogu tehnoloških zmagovalcev.

Hrabro naprej v prihodnost, ki jo soustvarjamo danes!

Portorož, junij 2026

Darko ŠVETAK



PROFIDTP, d. o. o.  
Škofljica

---

**Na povezavi ali preko črtne kode, lahko dostopate do mape, kjer se nahaja zbornik Industrijskega foruma IRT**

<https://www.forum-irt.si/o-forumu/arhiv-zbornikov/>

QR koda:



# VSEBINA

## Strokovni prispevki foruma

### DAN 1 - DVORANA 1

#### KAKO GRADITI IN KREPITI VARNO DIGITALIZIRANO INDUSTRIJSKO OKOLJE

Peter CEFERIN  
Smart Com d.o.o. .... 3

#### KAKO Z VARNOSTNIM PREGLEDOM DO BOLJŠIH ODLOČITEV O KIBERNETSKI VARNOSTI

Klemen KOVAČIČ, Rihard RIFELJ  
Smart Com d.o.o. .... 7

#### SKLADNOST Z ZAKONOM O INFORMACIJSKI VARNOSTI (ZINJV-1) V PRAKSI: OD NOTRANJIH UKREPOV DO DOBAVNE VERIGE

Igor MLAKAR<sup>1</sup>, Simon MEDVEŠEK<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Smart Com d.o.o.  
<sup>2</sup>TKI Hrastnik d.d. .... 11

#### PRIMER DOBRE PRAKSE ALPACEM CEMENT D.D. - ODPORNO INDUSTRIJSKO OMREŽJE

Žiga PERKO<sup>1</sup>, Matej MARKOČIČ<sup>2</sup>, Aleš MUGERLI<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Smart Com d.o.o.  
<sup>2</sup>Alpacem Cement d.d. .... 15

#### PRISTOP OCENJEVANJA SPOSOBNOSTI DELAVCEV Z UPORABO MEHKE AHP

Aljaž JAVERNIK, Borut BUCHMEISTER, Iztok PALČIČ, Robert OJSTERŠEK  
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo .... 19

#### STRUKTURIRANO REŠEVANJE PROBLEMOV Z UMETNO INTELIGENCO

Matej HOHNJEC  
Matej Hohnjec s.p. .... 25

#### STRATEŠKI RAZVOJ INDUSTRIJE ZA NASLEDNJE DESETLETJE

Gorazd RAKOVEC  
KIBERNOVA s.p. .... 29

### DAN 2 - DVORANA 1

#### ROBOTSKA CELICA ZA ČIŠČENJE IN BARVANJE PEŠČENIH JEDER ZA ODLITKE

Hubert KOSLER<sup>1,2</sup>, Matej MERKAČ<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>YASKAWA Slovenija d.o.o.  
<sup>2</sup>YASKAWA Ristro d.o.o. .... 35

#### OD TALINE DO KONČNEGA ODLITKA – AVTOMATIZIRANA LIVARSKA CELICA Z 3,500 T ZAPIRALNE SILE

Maria YAKIMOVSKA, Vinko DREV, Andrej SMOLIČ  
LTH Castings d.o.o. .... 39

#### AVR - AUTONOMOUS VERSATILE ROBOTICS

Tomaž LASIČ  
ABB d.o.o. .... 43

#### DIGITALIZACIJA SODELOVALNIH APLIKACIJ VIJAČENJA V AGILNIH PROIZVODNJAH

Žiga GOSAR  
ELVEZ d.o.o. .... 47

#### KAKO AGV-JI IN AMR-JI OPTIMIZIRAJO NOTRANJO LOGISTIKO PRI ŠKODA AUTO, TOYOTA IN DRUGOD

Zdeněk ŠIBRAVA, Filip POSPÍŠIL  
ServisControl Ltd. .... 51

<b>PRAKTIČNI PRIMJERI ISPRAVNOG ODABIRA 3D MJERNE TEHNOLOGIJE ZA SUVREMENE PROIZVODNE PROCESSE</b> Luka KURTALJ, Josip KOS, Maximilian HERCIGONJA, Tomislav HERCIGONJA TOPOMATIKA d.o.o.	.....	55
<b>NAČRTOVANJE OPTIMALNE TRAJKTORIJE ZA ROBOTSKO SKENIRANJE Z METODAMI UMETNE INTELIGENCE</b> Karel CEROVŠEK <sup>1</sup> , Jakob FABJAN <sup>1</sup> , Kusai ALMAHAMID <sup>1</sup> , Marko MUNIH <sup>2</sup> <sup>1</sup> Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto <sup>2</sup> Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani	.....	63
<b>GEOMETRIJSKO-OPTIMIZACIJSKA KOMPENZACIJA REDUNDANCE ROBOTA NA LINEARNI TRAJČNICI ZA VISOKO NATANČNE OPERACIJE</b> Jožica PIŠKUR Rudolfovo - Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto	.....	69
<b>HIBRIDNO PROGRAMIRANJE ROBOTOV KOT MOST MED DIGITALNIM DVOJČKOM IN REALNO CELICO: ENCY HYPER</b> Nikolaj KONOV KROKK d.o.o.	.....	75
<b>ROBOTSKO ŠOKIRANJE IZDELKOV</b> Matevž POŽAR, Gregor BIZJAK, Aleš TURK Kolektor Mobility d.o.o. - Podružnica Postojna	.....	79
<b>DAN 2 - DVORANA 2</b>		
<b>PRILAGAJANJE KAKOVOSTI VODE RAZLIČNIM INDUSTRIJSKIM NAMENOM</b> Tadeja VOLAUŠEK Nanoten d.o.o.	.....	83
<b>UVAJANJE ALTERNATIVNIH POLIMERNIH MATERIALOV V SERIJSKO PROIZVODNJO: OD LABORATORIJSKE VALIDACIJE DO STABILNEGA PROIZVODNEGA PROCESA</b> David ČREŠNAR, Aleksander SEDOVŠEK BSH Hišni aparati d.o.o., Nazarje	.....	87
<b>IZBOLJŠANJE LASTNOSTI RECIKLIRANEGA PA66 GF15 Z RAZLIČNIMI DODATKI</b> Silvester BOLKA <sup>1</sup> , Tamara ROZMAN <sup>1</sup> , Rajko BOBOVNIK <sup>1</sup> , Aljaž KOLAR <sup>2</sup> , Bojan BREZNIK <sup>2</sup> , Primož HABERMAN <sup>2</sup> , Blaž NARDIN <sup>1</sup> <sup>1</sup> Fakulteta za tehnologijo polimerov <sup>2</sup> O.P.S. Breznik d.o.o.	.....	93
<b>OJAČITEV MEHANSKO RECIKLIRANEGA PETG Z ODPADNIM DUROPLASTOM ZA APLIKACIJE V BRIZGANJU IN 3D TISKU</b> Tamara ROZMAN, Silvester BOLKA, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN Fakulteta za tehnologijo polimerov	.....	101
<b>CAN 3D PRINTING REPLACE THE ORIGINAL? AN EXPERIMENTAL ANSWER FROM INDUSTRIAL PRACTICE</b> Nenad DRVAR <sup>1</sup> , Tomislav HERCIGONJA <sup>1</sup> , Antonio HORVAT <sup>2</sup> <sup>1</sup> TOPOMATIKA d.o.o. <sup>2</sup> SIGNUM MAX d.o.o.	.....	109
<b>DIGITALNA NIT: POVEZOVANJE RAZVOJA IN PROIZVODNJE</b> Andrej ZUPAN, Miha TRČEK CADACM Lab d.o.o.	.....	113
<b>OD DOLGE K PRAVI ŽIVLJENJSKI DOBI: EVROPSKO ORODJARSTVO V DOBI KRATKIH CIKLOV</b> Sebastjan KOTNIK, Peter FAJS TECOS, Razvojni center orodjarstva Slovenije	.....	119
<b>GRENKI MEDVEDKI: LEKCIJE IZ HARIBO PRENOVE ERP SISTEMA</b> Peter KORENČAN <sup>1</sup> , Dejan GMAJNER <sup>2</sup> , Tomaž OREHEK <sup>3</sup> <sup>1</sup> Korenčan in družabniki, Peter Korenčan s.p. <sup>2</sup> Biostile d.o.o. <sup>3</sup> MM KOLIČEVO d.o.o.	.....	125

<b>NAPREDNE TEHNOLOŠKE REŠITVE PRI SERIJSKI OBDELAVI PRECIZNIH IZVRTIN</b> Branko UŠAJ BTS Company d.o.o.	.....	131
<b>DIGITALNI DVOJČEK ZA ENERGETSKO UČINKOVITOST IN OPTIMIZACIJO PROIZVODNJE V PODPORO POMORSKI INDUSTRIJI</b> Filip Jure VUZEM <sup>1,3</sup> , Boštjan DOLŽAN <sup>2</sup> , Hugo ZUPAN <sup>1,3</sup> , Marko ŠIMIC <sup>3</sup> , Niko HERAKOVIČ <sup>3</sup> <sup>1</sup> DIGITEH d.o.o. <sup>2</sup> ISKRA d.o.o. <sup>3</sup> Laboratorij LASIM, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani	.....	137
<b>DAN 2 - DVORANA 3</b>		
<b>MAZIVA ZA PLINSKE MOTORJE IN NJIHOVA DIAGNOSTIKA</b> Jošt MOHORKO, Aleš HROBAT, Milan KAMBIČ Olma d.o.o.	.....	141
<b>NOVI POSTOPKI PRI ANALIZI TEHNIČNE ČISTOSTI</b> Matjaž MENCEJ Carl Zeiss d.o.o.	.....	147
<b>PRIMER MOBILNE APLIKACIJE NA OSNOVI IOT ZA INTELIGENTNO VZDRŽEVANJE</b> Miroslav GOJIC, Vojislav HOC, Darko RADEKA Evoks d.o.o.	.....	151
<b>ASISTENT ZA PODPORO PROIZVODNIM PROCESOM</b> Rok STRUNA, Vinko LONGAR Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto	.....	161
<b>OD AVTOMATIZACIJE DO ANALITIKE: TRENDI RAZVOJA IN DIGITALIZACIJA PROIZVODNJE</b> Gašper MUHIČ FANUC ADRIA d.o.o.	.....	165
<b>VLOGA UMETNE INTELIGENCE PRI OPTIMIZACIJI PROCESA CNC OBDELAVE</b> Sandi KEGU Acam Pro d.o.o.	.....	169
<b>NADGRADNJA 3-OSNEGA VERTIKALNEGA CNC STROJA S 4./5. OSJO pL LEHMANN: MANJ NASTAVITEV, NIŽJI STROŠKI, HITREJŠI ROI</b> Nikolaj KONOV KROKK d.o.o.	.....	173
<b>AVTOMATSKA IZDELAVA PONUDBE: KAKO LAHKO SLOVENSKI PONUDNIKI CNC STORITEV V TRENUTNIH RAZMERAH OSTANEJO KONKURENČNI</b> Andrej POTREBUJES Spanflug Technologies GmbH	.....	177
<b>FUNKCIONALNA IN PROSTORSKA OPTIMIZACIJA POGONOV</b> Peter SKOPEC ControlTech d.o.o.	.....	181
<b>PAMETNA PROIZVODNJA Z INTEGRACIJO SENZORJEV V INDUSTRIJSKI PLAZEMSKI REAKTOR</b> Žiga GOSAR ELVEZ d.o.o.	.....	187
<b>DAN 2 - DVORANA 4</b>		
<b>PREIZKUS ZMOGLJIVOSTI LASERSKEGA SLEDILNIKA Z METODO PRIMERJALNEGA MERJENJA</b> Luka ČAS, Bojan AČKO, Rok KLOBUČAR Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za tehnološke meritve	.....	191

**POMEN ROBNIH POGOJEV PRI ANALIZAH KOMPLEKSNIH KONSTRUKCIJ**Domen ŠERUGA<sup>1,\*</sup>, Peter ZOBEC<sup>1</sup>, Jaka KRIŽ<sup>2</sup>, Gašper MRAK<sup>2</sup>, Jernej KLEMENC<sup>1</sup><sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo<sup>2</sup>Iskra PIO d.o.o.\*Korespondenčni avtor: [domen.seruga@fs.uni-lj.si](mailto:domen.seruga@fs.uni-lj.si)

..... 197

**PLAZEMSKO ELEKTROLITSKO POLIRANJE ZA IZBOLJŠANJE INTEGRITETE POVRŠIN  
KOMPLEKSNO OBLIKOVANIH IZDELKOV**

Joško VALENTINČIČ, Jithinraj EDAKLAVAN KOROTH

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

..... 201

**RAZVOJ DIGITALNEGA DVOJČKA MEHATRONSKEGA INDUSTRIJSKEGA ŠTANČNEGA  
ORODJA**Tomaž PEPELNJAK<sup>1</sup>, Uroš ŠTUKLEK<sup>2</sup>, Albin SIRC<sup>3</sup>, Ema STEFANOVSKA<sup>1</sup>, Dejan ROŽIČ<sup>2</sup>,Iztok SATLER<sup>2</sup>, Jure PETERNEL<sup>3</sup><sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo<sup>2</sup>Dafra kontakt tehnologija d.o.o.<sup>3</sup>Egasi d.o.o.

..... 205

**UPORABA 3D-OPTIČNEGA SKENIRANJA ZA DOLOČANJE K-FAKTORJA PRI UPOGIBANJU  
Z LASERJEM REZANEGA KONSTRUKCIJSKEGA JEKLA**

Tadej PERŠAK, Kristijan ŠKET, David POTOČNIK, Marko SIMONIČ, Goran MUNĐAR,

Mirko FICKO, Simon KLANČNIK, Tomaž BRAJLIH

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

..... 211

**NAPOVEDOVANJE OBRABE ORODJA ZA REZKANJE Z UPORABO STROJNEGA UČENJA**Vid GANTAR<sup>1</sup>, Gašper GANTAR<sup>2,3</sup><sup>1</sup>Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani<sup>2</sup>Visoka šola za proizvodno inženirstvo<sup>3</sup>Fakulteta za varstvo okolja

..... 215

**IZDELAVA STRATEGIJE ZA KROŽNO GOSPODARSTVO V PROIZVODNEM PODJETJU**Gašper GANTAR<sup>1,2</sup>, Andreja HASENBICHEL<sup>3</sup>, Branko BRAČKO<sup>3</sup><sup>1</sup>Visoka šola za proizvodno inženirstvo<sup>2</sup>Fakulteta za varstvo okolja<sup>3</sup>Unior d. d.

..... 219


**Komercialni oglasi podjetji**

..... 223

# 17. INDUSTRIJSKI FORUM **IRT**

## STROKOVNI PRISPEVKI

Portorož, 8. in 9. junij 2026





## KAKO GRADITI IN KREPITI VARNO DIGITALIZIRANO INDUSTRIJSKO OKOLJE

**Peter CEFERIN**  
Smart Com d.o.o.

### IZVLEČEK

Industrijski procesni sistemi (ICS/OT) predstavljajo temelj sodobne avtomatizacije in digitalizacije v industriji, energetiki, prometu, kritični infrastrukturi, pametnih zgradbah, logistiki in drugih okoljih, kjer je potrebno zanesljivo vodenje fizičnih procesov. V nasprotju s klasičnimi IT sistemi, ki so osredotočeni predvsem na obdelavo in zaščito podatkov, OT sistemi neposredno vplivajo na delovanje naprav, proizvodnih linij, energetskih sistemov in drugih procesov, zato so njihove ključne prioritete razpoložljivost, odzivnost, varnost procesa in neprekinjeno delovanje.

Zaradi vse večje povezanosti OT okolij z IT sistemi, oblakom, oddaljenim vzdrževanjem, dobavitelji in poslovnimi aplikacijami se napadalna površina hitro povečuje. Dodatno tveganje predstavljajo dolgi življenjski cikli opreme, zastareli sistemi, omejena možnost posodabljanja, šibka segmentacija omrežij, slaba vidljivost nad sredstvi ter industrijski protokoli, ki pogosto niso bili zasnovani z mislijo na sodobne kibernetske grožnje.

Kibernetska varnost v OT/ICS okoljih je pogosto zapostavljena zaradi zmotnih prepričanj, kot so »pri nas tega ni«, »nismo zanimiva tarča« ali »sistem je zaprt«. Takšno razmišljanje ustvarja lažen občutek varnosti in povečuje tveganje za resne posledice. Napadi na OT okolja niso več zgolj tehnični incidenti, temveč lahko povzročijo prekinitev proizvodnje, finančno škodo, motnje v dobavnih verigah, ogrožanje varnosti ljudi in vpliv na poslovni ugled. Zato mora kibernetska varnost postati sestavni del operativne odpornosti in strateškega upravljanja industrijskih organizacij.



## Osnovne značilnosti procesnih sistemov ICS/OT v industriji

- ICS (ang. Industrial Control System) so specializirani računalniški sistemi, ki se uporabljajo za nadzor in avtomatizacijo industrijskih procesov in vsebujejo gradnike operativne tehnologije OT (ang. Operational Technology).
- OT tehnologijo zasledimo praktično v vseh okoljih, kjer imamo opravka s procesi vodenja in upravljanja (SCADA, ADMS, EMS ...), digitalizacijo in avtomatizacijo:
  - Industrija/tovarne - proizvodne linije, skladišča, elektroenergetski sistemi, železnice, letališča, pametne zgradbe, cestni promet, podatkovni centri, bolnišnice, tovarne, pristanišča, farmacevtske tovarne, trgovina, pametna mesta itd.
- Za razliko od IT tehnologije, OT krmili in bdi nad procesi v različnih okoljih, pogosto so sestavni del sodobnih strojev (roboti, proizvodne linije).
- OT vključuje protokole, ki jih v IT ne zasledimo (npr. Modbus, Profinet, EtherNet, OPC, BACnet, MQTT, S7, IEC 60870-5-104, ICCP, IEC 61850 itd.) in so z vidika kibernetske varnosti zelo ranljivi.
- ICS/OT sistemi so privlačna tarča različnih akterjev z druge strani zakona, ki poskušajo izkoristiti ranljivosti v sistemih in opremi ICS/OT.

www.smart-com.si

## IT in OT



### IT sistemi procesirajo podatke.

- V večini primerov gre pri IT za standardizirano **strojno in programsko opremo (Microsoft, Unix, Linux, Mac)**, ki deluje v predvidljivih konfiguracijah in omrežjih (t. j. pisarna ali strežniški prostor).
- **IT platforme** so zasnovane tako, da so odprte, dinamične in razširljive s pogostimi posodobitvami izdelkov.



[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## IT in OT



- **OT sistemi upravljajo zapletene fizične procese.** Ključni prioriteti sta **odzivnost in visoka razpoložljivost**. OT sistemi pogosto delujejo v **izoliranih ('Air gapped')**, **manj predvidljivih** in v veliko primerih **zahtevnih okoljih** z omejeno povezljivostjo.
- OT tehnološki sklop **vkjučuje zaprte, lastniške protokole** z omejenim sodelovanjem z opremo drugih proizvajalcev.
- **Življenjski cikel** OT naprav v omrežju **se meri v letih in desetletjih**.
- OT omrežja so brez sodobne **varnostne zaščite in dogodki kibernetike varnosti lahko znatno ogrozijo procese v industrijskem okolju**.



[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Najbolj izpostavljene razlike med IT in OT



- **Življenjski cikel:** IT tehnologije se menjajo na **2-3 leta**, OT pa pogosto delujejo **10-20 let** brez večjih sprememb.
- **Posodobitve in popravki:** IT omogoča hitro, avtomatizirano posodabljanje; v OT so popravki zahtevni in lahko povzročijo izpad delovanja.
- **Varnostne prioritete:** IT se osredotoča na **zaščito podatkov**, OT pa na **neprekinjeno delovanje in zanesljivost procesov**.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Industrijska okolja so vedno bolj izpostavljena kibernetским napadom



Vzroki za porast kibernetских napadov na ICS/OT okolja:

- Večja povezanost OT z IT, oblakom in internetom povečuje napadalno površino.
- Oddaljeni dostopi za vzdrževanje in dobavitelje pogosto odpirajo dodatne vstopne točke.
- Zastareli sistemi in dolgi življenjski cikli opreme otežujejo redno posodabljanje in zaščito.
- Nezdostna segmentacija IT/OT omrežij omogoča širjenje napada iz poslovnega v industrijsko okolje.
- Industrijski protokoli pogosto nimajo vgrajene varnosti, ker so bili zasnovani v času, ko kibernetска varnost ni bila izpostavljena in za zaprta okolja.
- Slaba vidljivost nad OT sredstvi in prometom otežuje pravočasno zaznavanje napadov.
- Izsiljevalske (Ransomware) skupine in državno podprti akterji vse pogosteje ciljajo industrijo in kritično infrastrukturo.
- Visok vpliv napada na proizvodnjo in fizične procese povečuje motivacijo napadalcev za izsiljevanje ali sabotažo.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Kibernetska varnost v OT/ICS okoljih je pogosto zapostavljena



V praksi pogosto naletimo na razmišljanja, ki kažejo na premalo pozornosti posvečeni kibernetski varnosti v industrijskih procesnih okoljih:

- „Pri nas tega ni“ - odsotnost zaznanih incidentov še ne pomeni, da tveganja ali napadalci ne obstajajo.
- „Nismo zanimiva tarča“ - napadalci pogosto ciljajo ranljivosti, ne organizacije; žrtev je lahko vsak izpostavljen sistem.
- „Naš sistem je zaprt“ - v praksi pogosto obstajajo povezave za vzdrževanje, dobavitelje, nadzor, poročanje ali integracijo z IT.
- „OT deluje že leta, zato je varen“ - stabilnost sistema ne pomeni odpornosti proti sodobnim kibernetskim grožnjam.
- „Za varnost skrbi IT“ - OT zahteva poseben pristop, ker so prioritete razpoložljivost, varnost procesa in neprekinjeno delovanje.
- „Dokler deluje, ne posegamo vanj“ - odlašanje z varnostnimi ukrepi povečuje tehnični dolg in stroške ob incidentu.
- „Napad se nam ne more zgoditi“ - vprašanje ni več če, ampak kdaj in kako dobro bomo pripravljeni.  
[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Aktualno stanje in trendi v industrijskih OT/ICS okoljih - poslovni in varnostni izzivi



- Poslovni in varnostni izzivi
- Digitalizacija proizvodnje povečuje odvisnost od OT sistemov - izpad ni več samo tehnična težava, temveč neposredno vpliva na proizvodnjo, dobavo, prihodke in ugled.
- Meja med IT in OT se briše - povezovanje z ERP/MES sistemi, oblakom, dobavitelji in oddaljenim vzdrževanjem povečuje učinkovitost, hkrati pa odpira nove vstopne točke za napade.
- „Ransomware“ in izsiljevanje postajata poslovno tveganje - napadalci ciljajo prekinitve proizvodnje, ker ta hitro povzroči finančni pritisk na organizacijo.
- OT okolja ostajajo tehnološko heterogena in pogosto zastarela - dolgi življenjski cikli, težko posodabljanje in zahteva po neprekinjenem delovanju otežujejo hitro uvajanje varnostnih ukrepov.
- Vidljivost nad sredstvi in komunikacijami je še vedno omejena - organizacije pogosto nimajo popolnega pregleda nad napravami, povezavami, ranljivostmi in dejanskim tveganjem.
- Dobavitelji in vzdrževalci postajajo del varnostnega perimetra - tveganje se širi prek oddaljenih dostopov, servisnih povezav in odvisnosti v dobavni verigi.
- Regulatorna in standardna zvišujejo pričakovanja - NIS 2, IEC 62443 in podobni okvirji zahtevajo bolj sistematično upravljanje tveganj, incidentov, segmentacije in odpornosti.
- Kibernetska varnost postaja del operative odpornosti - cilj ni več samo zaščita pred napadom, ampak zagotavljanje varnega, neprekinjenega in predvidljivega delovanja procesov.  
[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## KAKO Z VARNOSTNIM PREGLEDOM DO BOLJŠIH ODLOČITEV O KIBERNETSKI VARNOSTI

**Klemen KOVAČIČ, Rihard RIFELJ**  
Smart Com d.o.o.

### IZVLEČEK

*Prispevek obravnava varnostni pregled poslovnega (IT) in industrijskega oz. procesnega (OT) okolja kot ključno izhodišče za razumevanje dejanskega stanja kibernetске varnosti v organizaciji. Prikazuje, kako strukturiran pregled omogoča prepoznavo varnostnih vrzeli, prioriternih tveganj in kritičnih odvisnosti med IT in OT okolji.*

*Poseben poudarek je namenjen povezavi med varnostnimi pregledi ter regulatornimi zahtevami, kot sta ZInfV-1 in direktiva NIS 2, ter njihovi vlogi pri doseganju skladnosti. Predstavljene so najpogostejše ugotovitve, ki se pojavljajo v industrijskih okoljih, ter njihove poslovne ter operative posledice.*

*Prispevek poudarja, da je varnostni pregled kot orodje za sistematično uvajanje nenehnih izboljšav ter sprejemanje odločitev za zagotavljanje neprekinjenega delovanja kritičnih sistemov, ne zgolj kot enkratno preverjanje stanja.*

## Vas vaši proizvodni sistemi še vedno upoštevajo?



- Medtem ko vi berete to besedilo, kibernetски napadalci iščejo dostope do vašega internega okolja, proizvodnih procesov, krmilnikov, senzorjev, proizvodnih naprav in robotskih rok.
- Ena sama ranljivost v vašem proizvodnjem okolju, ki jo izrabi napadalec, lahko ustavi proizvodne procese hitreje kot katerakoli okvara stroja.
- Posledičen izpad ne pomeni le izgube časa temveč ogromne stroške in ogroženo varnost zaposlenih in uporabnikov vaših storitev in produktov.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Varnost v proizvodnih procesih



- Proizvodna okolja so specifična, vendar se z vse večjo digitalizacijo meja med poslovnim (IT) in procesnim (OT) okoljem briše, tveganja pa posledično povečujejo.
- Napadi v poslovnem okolju se lahko hitro razširijo v ključne sisteme vaše organizacije, ki skrbijo za nemoteno proizvodnjo produktov.
- Sistemi proizvodnje pa so strateške investicije, namenjene za dolgotrajno uporabo, ki pogosto ne prejemajo varnostnih popravkov in so vezani na obstoječe verzije nameščene programske opreme za stabilno delovanje.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## ...strateške investicije, ki pogosto



- uporabljajo neposodobljene in ranljive operacijske sisteme, strojno opremo in ključne gradnike potrebne za delovanje.
- uporabljajo privzeta ali šibka gesla.
- uporabljajo nezavarovane in nešifrirane industrijske protokole.
- ob integraciji z IT okoljem vodi v:
  - pomanjkljivo segmentacijo omrežja ali združevanja posameznih IT in OT sistemov v enotne mrežne segmente za enostavnejšo upravljanje,
  - nekontrolirane oddaljene dostope ali pomanjkljivo zaščitene dostope do OT okolij,
  - posledičen vnos zastarelih in ranljivih konfiguracij v IT okolje zaradi odvisnosti OT sistemov od zastarelih in nepodprtih protokolov in aplikacij.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Kako lahko tveganja identificiramo?



- Ena od metod je identifikacija varnostnih vrzeli z varnostnimi pregledi in vdornimi testiranj.
- Gre za načrtovane procese sistematičnega preverjanja informacijskih (IT) in industrijskih (OT) sistemov, ki omogoča identifikacijo ranljivosti, pomanjkljivih konfiguracij, tveganj in odstopanj od varnostnih standardov.
- Ob tem pripomorejo k identifikaciji groženj in tveganj, preverjanju skladnosti z zakonskimi in drugimi zahtevami, prioritizaciji investicij in organizacije pripravijo na učinkovitejši odziv na incidente z identifikacijo pomanjkljivosti varnostnih kontrol in pripomorejo k izboljšanju odpornosti organizacije.



[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Varnostni pregledi in skladnost



- Novosti regulative (npr. ZInfV-1/NIS 2), standardov in dobrih praks (npr. ISO27001, IEC62443) vzpostavljajo zahteve za zagotavljanje informacijske varnosti s pomočjo procesov.
- Z varnostnimi pregledi se na podlagi groženj in tveganj oceni realno stanje skladnosti procesov upravljanja ranljivosti, upravljanja sprememb, zagotavljanja varnosti na nivoju arhitekture, upravljanja dostopov in identitet ter odziva na incidente z regulativnimi in drugimi zahtevami, ter omogočijo, da na podlagi identifikacije pomanjkljivosti procesov, le te razvijejo v varnejše in odpornejše na grožnje.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Varnostni pregledi kot orodje izboljšav?

- Varnostni pregled ima dvojno vlogo:
  - Preverja, kakšno je trenutno tehnično stanje in pomaga identificirati in izkoreniniti varnostni dolg.
  - Služi varnostni kontroli v ciklu izboljšav sistema upravljanja informacijske varnosti in omogoči prehod organizacije iz odzivnega pristopa v proaktivno in strateško obvladovanje tveganj.
- Varnostni pregledi omogočijo vpogled v dejansko stanje organizacije in ponudijo ključne podatke za odločevalce, da se seznanijo s stanjem in optimizirajo pristope za namene zagotavljanja informacijske varnosti in odpornosti.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Varnostni pregledi kot orodje izboljšav?

- Testiranja omogočijo krepitev zavedanja zaposlenih o informacijski varnosti, tipih groženj, ki se pojavljajo v okolju in varnih praksah, da pripomorejo k izboljšanju varnostne drže in izgradnji odpornosti informacijske varnosti.
- Izboljšanje zaupanja na trgu in doseganje skladnosti v procesih upravljanja ranljivosti, saj pripomorejo k konstatnemu izboljšanju sistema informacijske varnosti.
- Zmanjševanje tehničnega dolga in identifikacija alternativnih pristopov za zagotavljanje upravljanja in odprave prepoznanih varnostnih pomanjkljivosti.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## SKLADNOST Z ZAKONOM O INFORMACIJSKI VARNOSTI (ZInfV-1) V PRAKSI: OD NOTRANJNH UKREPOV DO DOBAVNE VERIGE

Igor MLAKAR<sup>1</sup>, Simon MEDVEŠEK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Smart Com d.o.o.

<sup>2</sup>TKI Hrastnik d.d.

### IZVLEČEK

*Prispevek obravnava praktične vidike uvajanja skladnosti z Zakonom o informacijski varnosti (ZInfV-1) v industrijskih in procesnih okoljih. Predstavlja realističen pristop k izpolnjevanju zakonodajnih in standardnih zahtev, ki upošteva obstoječe procese, organizacijsko zrelost in operativne omejitve podjetij.*

*Analiza vrzeli (GAP analiza) je predstavljena kot ključno orodje za razumevanje trenutnega stanja ter načrtovanje ciljne ravni varnosti in skladnosti. Poseben poudarek je namenjen varnosti dobavne verige ter učinkovitemu obvladovanju kibernetских tveganj, povezanih z dobavitelji in poslovnimi partnerji. S tem prispevek poudarja, da kibernetična varnost presega okvire IT-oddelka in predstavlja pomemben organizacijski ter poslovni izziv.*

## Skladnost z Zakonom o informacijski varnosti (ZInfV-1) v praksi: od notranjih ukrepov do dobavne verige



- Kako se lotiti skladnosti s standardi in zakonodajo?
- Analiza vrzeli - kje smo danes in kam želimo priti?
- Primeri, kako podjetja postopno uvajajo procese brez motenj v poslovanju.
- Varnost dobave verige - učinkovito obvladovaje varnostnih tveganj dobaviteljev in partnerjev.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Skladnost kot temelj poslovne odpornosti



- Zahteve ZInfV-1 presegajo zgolj pravno ali tehnično področje - zahteva se celovito obvladovanje tveganj in vključitev celotne organizacije.
- V praksi največ težav povzročajo:
  - nejasne odgovornosti,
  - razdrobljeni procesi,
  - pomanjkanje pregleda nad dobavitelji,
  - podcenjevanje operativnih tveganj.
- Ključno vprašanje ni “ali bomo skladni?”, ampak: “Kako bomo skladnost uvedli na način, ki podpira poslovanje?”

Skladnost z zakonodajo naj bo povezana s potrebami poslovanja.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Skladnost kot proces, ne le projekt



- Organizacije pogosto pristopijo k skladnosti kot:
  - enkratni aktivnosti,
  - pripravi dokumentacije,
  - projektu pred presojo.
- Dolgoročni pristop pa vsebuje:
  - jasno upravljanje odgovornosti,
  - redno preverjanje učinkovitosti ukrepov,
  - vključevanje vodstva,
  - periodične vaje in preverjanja,
  - stalno izboljševanje.

Dobra skladnost ni rezultat dokumentacije, ampak predvidljivega in ponovljivega delovanja organizacije.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Kje smo in kaj moramo še postoriti?



- Analiza vrzeli ni le pregled dokumentacije – osnova je prepoznavanje poslovnih potreb organizacije.
- Preverja se:
  - dejansko stanje (analiza izpostavljenosti),
  - zrelosti procesov,
  - odgovornosti,
  - operativne prakse,
  - sposobnosti odzivanja.

Največja vrednost analize vrzeli ni seznam neskladij, ampak jasen načrt ukrepov.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Uvedba ukrepov brez motenj v poslovanju



Uspešna skladnost nastaja postopno, skozi nadzorovane in merljive spremembe.

## Dokazovanje skladnosti v dobavni verigi



### • Metodologija

- Osnova je **ocena tveganj**
- Kategorizacija
- Zbiranje dokazov in ocenjevanje

### • Organizacija

- Kdo izvaja
- Kdo nadzoruje
- Kdo odloča

### • PROCES

Ni dovolj "reči" - treba je dokazati

Kdaj je metoda "dovolj dobra"?

Potrdila, Procesi, Politike,  
Poročila, Podatki



Jasne vloge. Dokazljiva skladnost.



Obseg preverjanja naj bo sorazmeren ugotovljenim tveganjem in vrednosti za organizacijo

## Zahteve do dobaviteljev



**Varstvo podatkov in zaupnost**

**Upravljanje dostopov in tehnična zaščita**

**Neprekinjenost poslovanja in odzivnost**

**Incidenti, ranljivosti in varni razvoj**

**Nadzor dobaviteljev in poddobaviteljev**



Obvezno sodelovanje tehnične in pravne stroke!

Zahteve naj bodo uravnotežene glede na potrebe in zmožnosti organizacije.

Pogodba ni administrativno "breme".  
Pogodba je prvi in končni varnostni kontrolni mehanizem!

## PRIMER DOBRE PRAKSE ALPACEM CEMENT, D.D. - ODPORNO INDUSTRIJSKO OMREŽJE

Žiga PERKO<sup>1</sup>, Matej MARKOČIČ<sup>2</sup>, Aleš MUGERLI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Smart Com d.o.o.

<sup>2</sup>Alpacem Cement d.d.

### IZVLEČEK

*Prispevek predstavlja primer dobre prakse vzpostavitve odpornega industrijskega omrežja v proizvodnem okolju, ki se sooča z naraščajočo digitalizacijo in povezovanjem poslovnih (IT) in procesnih (OT) sistemov.*

*Obravnava, zakaj digitalna preobrazba bistveno povečuje pomen varnega, zanesljivega in razpoložljivega industrijskega omrežja. Izpostavljena je IT/OT konvergenca kot priložnost za večjo učinkovitost in preglednost, hkrati pa kot vir novih kibernetičnih tveganj. Poudarjena je vloga omrežne segmentacije kot temeljnega gradnika kibernetične varnosti v industrijskih okoljih.*

*Prispevek prek konkretne izkušnje slovenskega proizvodnega podjetja pokaže, kako je mogoče varnostne zahteve uspešno združiti z operativnimi potrebami proizvodnje.*

## Digitalizacija prinaša nova varnostna tveganja



- Povprečna življenjska doba procesnih (OT) naprav znaša 15-30 let, ki so pogosto brez varnostnih posodobitev.
- Nekdaj izolirani OT sistemi so danes povezani s poslovno (IT) infrastrukturo, oblakom in zunanjimi vzdrževalci.
- OT protokoli (Modbus, Profinet, S7, IEC 60870) so zasnovani za zanesljivost, ne varnost.
- Vsaka nova digitalna povezava pomeni potencialno vstopno točko za nepooblaščen dostop.
- Razumevanje tega konteksta je izhodišče za vsako varnostno odločitev.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## IT/OT konvergenca - priložnosti in izzivi



- **KORIST:** Prediktivno vzdrževanje in nadzor v realnem času.
- **KORIST:** Integracija z ERP, oblakom in poslovnimi sistemi, kar prinaša višjo produktivnost.
- **KORIST:** Nižji operativni stroški in hitrejši odziv na motnje.
- **IZZIV:** Napad prek IT omrežja se lahko razširi do PLC-jev in ustavi proizvodnjo.
- **IZZIV:** Zastarele OT naprave brez avtentikacije ali šifriranja.
- Primer Colonial Pipelina leta 2021: IT incident, ki je ustavil dobavo goriva za polovico vzhodne obale ZDA.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Najpogostejše vrste napadov na OT sisteme



- **Ransomware:** šifrira podatke ali blokira dostop - v OT ustavi produkcijo (Norsk Hydro 2019: 71 M\$).
- **Spear phishing:** ciljni napadi na operaterje in vzdrževalce - najpogostejša vstopna točka.
- **Zloraba oddaljenega dostopa:** nezavarovan VPN, skupna gesla, odsotnost MFA.
- **Napadi na dobavno verigo:** kompromitirana oprema ali SW pri dobavitelju (Stuxnet, SolarWinds).
- **Manipulacija OT ukazov:** neposredni napadi na protokole (Modbus, IEC-104, GOOSE injection).
- **MITRE ATT&CK za ICS:** brezplačen javni okvir z 82 tehnikami napadov na industrijske sisteme.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

---

## Segmentacija omrežja po Purdue modelu (IEC 62443)



- Nivo 4-5 (Enterprise IT): ERP, e-pošta, splet, pisarniška oprema
- iDMZ (Demilitarizirana cona): posreduje promet - brez neposrednih poti med IT in OT
- Nivo 3 (Produksijsko upravljanje): Historian, MES, Active Directory
- Nivo 0-2 (Procesna oprema): SCADA, HMI, PLC, RTU, senzorji, aktuatorji
- Segmentacija ne pomeni izolacije - podatki tečejo nadzorovano in filtrirano
- Vzpostavitev je postopna, po conah, brez izpadov produkcije

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

---

## Trije stebri OT kibernetске varnosti



- 1. VIDLJIVOST:** Popis vseh naprav, protokolov in komunikacij - osnova za vse nadaljnje ukrepe.
- 2. ZAZNAVANJE ANOMALIJ (OT ADS):** Razume OT protokole, zazna odstopanja od normalnega vedenja.
- 3. NADZOR DOSTOPOV (PAM):** Vsak privilegiran dostop pusti revizijsko sled z MFA in snemanjem.
  - Ključno načelo: Ne morete varovati tistega, česar ne vidite.
  - Vidljivost je pasivna, saj ne posega v naprave ali produkcijske procese.
  - Vsi trije ukrepi so „agentless“, brez posegov na obstoječe naprave.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Primer iz prakse - slovensko proizvodno podjetje



- **Korak 1** (mesec 1-2): Pasivno skeniranje - odkrito 3-krat več naprav kot v ročnem inventarju.
- **Korak 2** (mesec 3-4): Segmentacija po Purdue modelu, vzpostavitev iDMZ cone.
- **Korak 3** (mesec 5-6): PAM z MFA za vse zunanje vzdrževalce, snemanje sej.
- **Rezultat:** polna NIS 2 / ZInfV-1 skladnost, brez izpada proizvodnje v celotnem projektu.
- **Pristop:** pilot na enem obratu, nato postopna razširitev na celotno podjetje.
- **Zaključek:** strukturiran fazni pristop je izvedljiv v realnem industrijskem okolju.

[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## Tri ključna spoznanja



- **1. NAJPREJ VIDLJIVOST:** Popis omrežja in naprav je izhodišče za vsak varnostni program.
- **2. SEGMENTACIJA DELUJE:** Purdue model (IEC 62443) učinkovito omejuje razširitev napadov.
- **3. REGULATIVA POMAGA:** NIS 2 / ZInfV-1 in IEC 62443 dajeta jasen okvir in ni ne le zakonska obveza.
- Vsaka pot se začne z razumevanjem lastnega okolja in popisa naprav.
- Pristop je postopen in ni nujno, da vse naredite hkrati.
- Kibernetska varnost v OT okolju je dosegljiva za vsako industrijsko podjetje.



[www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

## PRISTOP OCENJEVANJA SPOSOBNOSTI DELAVCEV Z UPORABO MEHKE AHP

**Aljaž JAVERNIK, Borut BUCHMEISTER, Iztok PALČIČ,  
Robert OJSTERŠEK**

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

### IZVLEČEK

*Objektivno ocenjevanje sposobnosti delavcev je ključno v človeku usmerjenih proizvodnih sistemih. Pri ročnih nalogah se uspešnost delavca odraža v njegovi učinkovitosti, konsistentnosti in zanesljivosti, povezani z napakami. Kljub kompleksnosti ocenjevanja sposobnosti posameznika se v industrijski praksi še vedno pogosto uporabljajo zgolj posamezni kazalniki, ki ne zagotavljajo celovite ocene sposobnosti delavca. V prispevku je predstavljen in eksperimentalno validiran strukturiran večkriterijski okvir za ocenjevanje sposobnosti delavcev z uporabo mehke analitične hierarhične metode (Fuzzy AHP). Parne primerjave ekspertov so bile uporabljene za določitev uteži kriterijev ob hkratnem preverjanju konsistentnosti. Normalizirani kazalniki uspešnosti so bili nato agregirani v enoten kazalnik sposobnosti. Tako pridobljen kazalnik omogoča transparentno in ponovljivo vrednotenje sposobnosti delavcev ter predstavlja strukturiran vhodni parameter za nadaljnje modeliranje, simulacije in podpora odločanja v človeku usmerjenih proizvodnih okoljih.*

### 1 UVOD

Transformacija proizvodnje v okviru Industrije 4.0 ter nastajajoče paradigme Industrije 5.0 je bistveno preoblikovala vlogo delavcev v proizvodnih sistemih. Kljub temu da digitalne tehnologije in sodelovalna robotika omogočajo večjo fleksibilnost ter višjo stopnjo avtomatizacije, človeški dejavnik ostaja ključen prispevek k zagotavljanju učinkovitosti sistema [1, 2]. Človeku usmerjena proizvodnja vse izraziteje poudarja potrebo po postavitvi delavca v središče proizvodnih sistemov, saj se njegov vpliv odraža v produktivnosti, fleksibilnosti in trajnosti [3, 4]. V fleksibilnih montažnih okoljih imajo časi sestave, konsistentnost in zanesljivost, ki so pomembni od delavca, pomemben vpliv na dosežene rezultate [5, 6]. Raziskave kažejo, da heterogenost sposobnosti delavcev predstavlja ključen strukturni parameter proizvodnih sistemov, ki ga je treba eksplicitno vključiti v modele in nadaljnjo obravnavo [7]. Kljub temu se v industrijski praksi sposobnost oz. uspešnost delavcev pogosto ocenjuje na podlagi izoliranih kazalnikov, kot sta čas sestave, število končanih kosov v določenem časovnem intervalu ali število napak, ki ne zajamejo večdimenzionalne narave sposobnosti [8]. Sama učinkovitost namreč ne odraža stabilnosti in robustnosti izvedbe, ki sta ključni v raznolikih proizvodnih nalogah [9].

Metode večkriterijskega odločanja omogočajo strukturiran pristop k integraciji heterogenih kazalnikov uspešnosti [10]. Analitična hierarhična metoda (AHP) je široko uveljavljena zaradi svoje sposobnosti hierarhičnega strukturiranja problema in sistematičnega določanja uteži kriterijev na podlagi parnih primerjav [11]. V primerjavi s klasično AHP mehka različica AHP omogoča obravnavo negotovosti in nejasnosti v ekspertnih presojah z uporabo trikotnih mehkih števil [12]. V sodelovalnih okoljih (človek–robot) je natančna karakterizacija delavca še posebej pomembna [13], saj od tega zavisi tako učinkovitost sistema kot dobro počutje delavca.

Cilj študije je razviti in eksperimentalno validirati strukturiran večkriterijski okvir za objektivno ocenjevanje sposobnosti delavcev. Namesto osredotočanja na posamezne kazalnike uspešnosti predlagani pristop združuje učinkovitost in konsistentnost v enoten kazalnik sposobnosti z uporabo mehke AHP. Z vključitvijo ekspertnega znanja, preverjanjem konsistentnosti in modeliranjem negotovosti, okvir zmanjšuje subjektivnost in omogoča transparentno določanje uteži heterogenih kriterijev. Predlagani pristop tako prispeva k premoščanju vrzeli med ekspertno podprtimi metodami ocenjevanja in podatkovno podprtim vrednotenjem uspešnosti v človeku usmerjenih proizvodnih okoljih.

## 2 METODOLOGIJA

Predlagani okvir za ocenjevanje sposobnosti delavcev temelji na strukturiranem pristopu večkriterijskega odločanja. Metoda AHP omogoča sistematično razčlenitev kompleksnih problemov odločanja na hierarhične ravni, ki vključujejo splošni cilj, kriterije ocenjevanja in merljive kazalnike [11]. V študiji je bil kot splošni cilj definirana ocena sposobnosti delavca, medtem ko so bili kriteriji izpeljani iz eksperimentalno merjenih spremenljivk uspešnosti, vključno s povprečnim časom sestave, povprečnim časom odziva, merami variabilnosti in kazalniki, povezanimi z napakami. Takšna hierarhična struktura zagotavlja transparentnost procesa ocenjevanja in jasno opredeljuje prispevek posamezne dimenzije uspešnosti h končni oceni sposobnosti delavca.

Ker ekspertne presoje o relativni pomembnosti kriterijev lahko vključujejo negotovost in jezikovno interpretacijo, je bila klasična AHP razširjena z uporabo mehke AHP. Ekspertne ocene so bile zbrane v obliki matrik parnih primerjav, njihova logična skladnost pa je bila preverjena z uporabo razmerja konsistentnosti v skladu z uveljavljenimi načeli AHP. Nekonsistentne presoje so bile izločene, s čimer je bila zagotovljena zanesljivost dobljenih uteži. Po agregaciji konsistentnih ekspertnih matrik so bile z uporabo metode razširjenega obsega izračunane sintetične mehke vrednosti, kar je omogočilo določitev normaliziranih mehkih uteži za vsak kriterij. Posamezni kazalniki uspešnosti delavcev so bili normalizirani glede na vnaprej določene referenčne meje, končna skupna ocena sposobnosti delavca pa je bila izračunana kot utežena agregacija vseh kriterijev.

Nastali kazalnik predstavlja večkriterijsko optimizirano oceno sposobnosti, ki združuje učinkovitost, konsistentnost in kazalnike, povezane z napakami, v enotno kvantitativno predstavitev. Predlagani metodološki okvir zagotavlja strukturirano določanje uteži, transparentnost logike ocenjevanja in ponovljivost rezultatov. Eksperimentalna validacija je zasnovana z namenom prikaza uporabnosti celotnega okvira, ne posameznih kazalnikov uspešnosti, ter dokazuje, da je mogoče objektivne podatke o uspešnosti pri izvajanju nalog v

kombinaciji z ekspertno določenimi utežmi, pridobljenimi z uporabo mehke AHP sistematično integrirati v enoten in interpretabilen kazalnik sposobnosti delavca, primeren za primerjavo in uporabo v aplikacijah podpore odločanju.

## 3 EKSPERIMENT

V eksperimentu je sodelovalo 65 udeležencev (45 moških in 20 žensk). Vzorec je vključeval 18 delavcev iz industrije s povprečno starostjo 38.3 leta ( $SD = 9.1$ ) in 47 študentov s povprečno starostjo 22 let ( $SD = 1.6$ ). Eksperimentalni vzorec je bil razdeljen na kvalificirano in nekvalificirano eksperimentalno populacijo. Kvalificirano populacijo je predstavljalo 18 delavcev iz industrije in 8 študentov, ki so navedli predhodne izkušnje s podobnimi nalogami sestave, medtem ko je nekvalificirano populacijo sestavljalo preostalih 39 študentov brez tovrstnih izkušenj. Vsi udeleženci so v eksperimentu sodelovali prostovoljno.

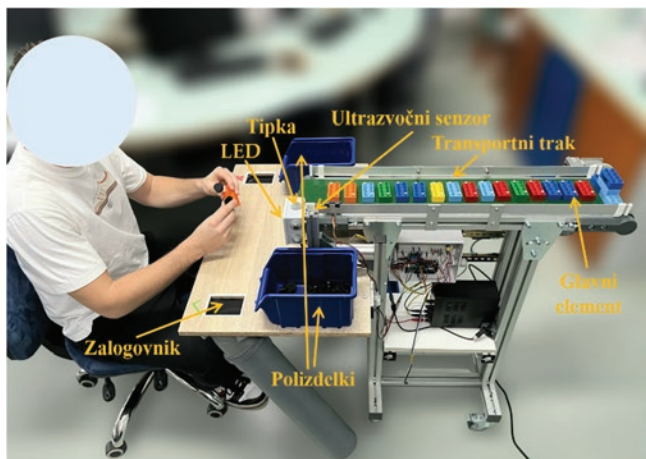
### 3.1 Opis eksperimentalnega delovnega mesta

Eksperimentalno delovno mesto (Slika 1) je bilo razvito v laboratorijskem okolju z namenom zagotavljanja objektivnega ocenjevanja sposobnosti delavcev. Operacija je obsegala enostavno ročno sestavo 22 izdelkov, pri čemer je končni izdelek predstavljal sestavljen sklop glavnega elementa in dveh manjših podsklopov.

Na začetku vsakega delovnega cikla je bil glavni element udeležencu eksperimenta dostavljen s pomočjo transportnega traku. Ultrazvočni senzor, nameščen na koncu traku, je zaznal prihod glavnega elementa, zaustavil njegovo gibanje ter aktiviral zeleno signalno luč, s čimer je operaterju signaliziral začetek sestave. Udeleženec je glavni element odstranil s transportnega traku, ga postavil na delovno površino pred seboj in izvedel postopek sestave (pritrditev dveh podsklopov na glavni element). Po zaključku sestave je udeleženec končni izdelek odložil v ustrezen zalogovnik končanih kosov in pritisnil potrditveno tipko, s čimer je signaliziral konec sestave ter sprožil nov delovni cikel.

Med 22 izdelki jih je bilo 8 namerno zasnovanih kot napačnih. Njihova identifikacija je bila vključena v izvajanje naloge in je od udeleženca

zahtevala prepoznavanje nepravilnosti ter izbiro ustreznega zalogovnika končanih kosov. Takšna zasnova operacije in delovnega poteka je omogočila, da sta bila v oceno vključena tudi vidika pozornosti in odločanja.



Slika 1: Zasnova eksperimentalnega delovnega mesta

### 3.2 Kriteriji

Ocenjevanje sposobnosti delavcev je temeljilo na objektivnih podatkih, kot so čas sestave, odzivni čas in število napak. Čas sestave in odzivni čas sta bila avtomatsko merjena prek neposredne povezave med fizičnim delovnim mestom in sistemom za zajem podatkov, medtem ko so bile napake beležene ročno. Vsi avtomatsko zajeti signali so bili obdelani in zapisani v Excelovo datoteko prek vmesnika PLX-DAQ, kar je zagotovilo sinhroniziran, ponovljiv in nepristranski zajem podatkov.

Čas sestave je bil definiran kot časovni interval od odstranitve glavnega elementa s transportnega traku do pritiska potrditvene tipke, ki označuje zaključek delovnega cikla. Odzivni čas je bil definiran kot interval od aktivacije zelene signalne luči do trenutka, ko je udeleženec odstranil element s transportnega traku. Težja napaka je bila opredeljena kot napačno odložen izdelek v neustreznem zalogovniku končanih kosov.

Navedene spremenljivke predstavljajo osnovo za ocenjevanje, vendar zgolj povprečne vrednosti ne omogočajo celovite obravnave sposobnosti delavca. Konsistentnost izvajanja in časovna stabilnost sta ključni značilnosti dela pri

ponavljajočih se industrijskih nalogah. Za zajem teh vidikov so bili iz merjenih podatkov izpeljani dodatni kriteriji, kar je vodilo do skupno sedmih kriterijev ocenjevanja.

Končni nabor kriterijev vključuje povprečni čas sestave ( $M_{sestava}$ ), povprečni čas odziva ( $M_{odziv}$ ), standardni odklon časa sestave ( $SD_{sestava}$ ), standardni odklon časa odziva ( $SD_{odziv}$ ), število težjih napak ( $TN$ ), število lažjih napak v sestavi ( $LN_{sestava}$ ) in število lažjih napak v odzivu ( $LN_{odziv}$ ). Lažje napake v sestavi in odzivu so bile definirane individualno za vsakega udeleženca, tako da je bila lažja napaka zabeležena vsakič, ko je posamezen čas sestave ali odzivni čas presegel lastno povprečno vrednost, povečano za en standardni odklon. Na ta način so bila zajeta odstopanja glede na tipično uspešnost posameznika.

Lažje napake predstavljajo nekritična odstopanja v uspešnosti, ki sicer ne vodijo do napačnega rezultata, vendar nakazujejo začasno motnje ali zmanjšano učinkovitost med izvajanjem naloge. S kombinacijo kazalnikov učinkovitosti, konsistentnosti in težjih ter lažjih napak, izbrani kriteriji zagotavljajo celovito in uravnoteženo oceno sposobnosti delavca.

### 3.3 Postavitev uteži

Za kvantifikacijo relativne pomembnosti sedmih kriterijev ocenjevanja so bile uteži kriterijev določene z uporabo skupinske mehke AHP. Z namenom zmanjšanja subjektivnosti in zagotavljanja, da uteži odražajo strokovno znanje, je bilo v raziskavo vključenih pet ekspertov, ki so podali ocene parnih primerjav kriterijev.

Vsak ekspert je izpolnil recipročno matriko parnih primerjav dimenzije  $7 \times 7$ ,  $A = [a_{ij}]$ , kjer  $a_{ij}$  predstavlja pomembnost kriterija  $i$  glede na kriterij  $j$ . Jezikovne presoje so bile preslikane v trikotna mehka števila  $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$  z uporabo ustrezne mehke Saatyjeve lestvice. Konsistentnost presoj vsakega eksperta je bila preverjena s uporabo razmerja konsistentnosti ( $CR$ ), ki se pogosto uporablja v okviru AHP. Kot kriterij sprejemljive konsistentnosti je bila uporabljena meja  $CR < 0.1$ .

Izmed petih pridobljenih matrik je ena presegla dovoljeno mejo konsistentnosti ( $CR \approx 0.63$ ) in je

bila zato izločena iz nadaljnje analize. Preostale štiri konsistentne ekspertne matrike so bile agregirane z izračunom aritmetičnega povprečja pripadajočih trikotnih mehkih števil.

Na podlagi končne agregirane matrike so bile nato izračunane in normalizirane uteži kriterijev (Tabela 1).

Tabela 1: Končne uteži posameznih kriterijev

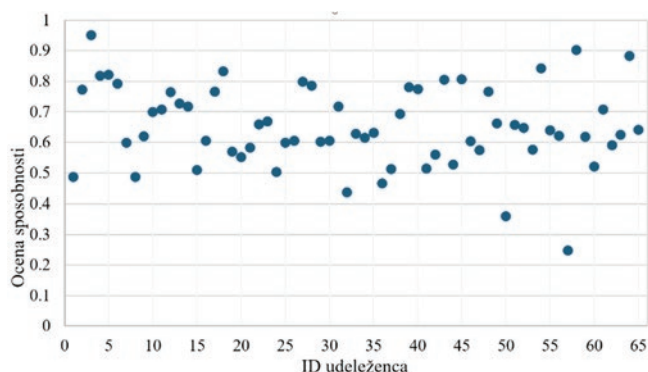
Kriterij	Utež
$M_{sestava}$	0.335
$M_{odziv}$	0.114
$SD_{sestava}$	0.126
$SD_{odziv}$	0.051
$TN$	0.304
$LN_{sestava}$	0.044
$LN_{odziv}$	0.027

#### 4 REZULTATI

Obravnavani kriteriji se razlikujejo po merilu, enotah in interpretaciji, zato je bila pred njihovo agregacijo v enoten kazalnik oz. oceno sposobnosti potrebna normalizacija. Za izvedbo postopka normalizacije je bilo treba določiti referenčne vrednosti kriterijev, zato je bila definirana referenčna skupina, sestavljena iz kvalificiranih udeležencev (26 udeležencev).

Za vsak kriterij ocenjevanja sta bila na podlagi podatkov referenčne skupine izračunana 10. in 90. percentil, ki sta bila uporabljena kot spodnja in zgornja meja normalizacije. Takšen pristop, temelječ na percentilih, zmanjšuje vpliv ekstremnih vrednosti, hkrati pa ohranja občutljivost na razlike v uspešnosti znotraj tipičnega območja posameznega kriterija.

Vsaka vrednost kriterija za posameznega udeleženca je bila nato normalizirana v brezdimenzijsko vrednost v intervalu [0,1] z uporabo linearne normalizacije, pri čemer je bila smer normalizacije prilagojena glede na to, ali nižje ali višje vrednosti pomenijo višjo uspešnost. Skupna ocena sposobnosti je bila nato izračunana kot utežena vsota normaliziranih kriterijev.



Slika 2: Končne ocene sposobnosti udeležencev

Izračunane ocene sposobnosti so se znotraj eksperimentalne populacije gibale v razponu od 0.24 do 0.91, kar kaže na izrazito razpršenost med udeleženci (Slika 2). Porazdelitev nakazuje, da uporabljena strategija normalizacije, ki temelji na referenčnih mejah, določenih s percentili, omogoča učinkovito skaliranje obravnavanih kriterijev. Ocene so zvezno porazdeljene po celotnem območju brez izrazitega združevanja pri ekstremnih vrednostih, kar kaže, da izbrani 10. in 90. percentil ustrezno zajameta tipično variabilnost uspešnosti naloge, hkrati pa omejujeta vpliv odstopajočih vrednosti.

Rezultati študije potrjuje, da predlagani postopek normalizacije in agregacije zagotavlja dobro razpršeno predstavitev individualne sposobnosti delavcev, namesto da bi udeležence združeval v majhno število med seboj težko razločljivih ravni ocen. Takšna porazdelitev ocen je še posebej pomembna, kadar se ocena sposobnosti delavca uporablja kot vhodna spremenljivka v modelih, temelječih na učenju ali napovedovanju, saj ohranja smiselne razlike med posamezniki.

Rezultati potrjujejo, da predlagani večkriterijski okvir omogoča integracijo heterogenih kazalnikov uspešnosti v zvezno in interpretabilno oceno sposobnosti delavca, primerno za primerjavo in nadaljnjo analizo.

## 5 DISKUSIJA IN ZAKLJUČEK

Primarni cilj študije ni bila primerjava sposobnosti udeležencev eksperimenta, temveč prikaz strukturirane in transparentne metodologije za določanje enotne ocene sposobnosti delavca na podlagi več heterogenih kazalnikov uspešnosti.

Rezultati potrjujejo, da predlagani okvir z uporabo mehke AHP zagotavlja zvezno in dobro razločljivo porazdelitev sposobnosti, primerno za nadaljnje analitične pristope ali pristope simulacijskega modeliranja. Ugotovitve so skladne z obstoječimi študijami, ki uporabljajo mehko AHP v evalvacijskih kontekstih, kjer metoda omogoča strukturirano integracijo več kriterijev, medtem ko obravnavano delo razširja njeno uporabo na podatkovno podprto ocenjevanje sposobnosti delavcev v človeku usmerjenih proizvodnih okoljih.

Pomemben metodološki korak predstavlja določitev mej normalizacije. V tej študiji sta bila za skaliranje kriterijev uporabljena 10. in 90. percentil izkušene referenčne skupine. Tak pristop omejuje vpliv ekstremnih vrednosti, hkrati pa ohranja razlike v uspešnosti med udeleženci. Vendar pa izbrani razpon percentilov neposredno vpliva na to, kako razpršene ali zgoščene bodo vrednosti posameznih kriterijev in končne ocene. V izogib je potrebno meje normalizacije izbrati glede na namen ocenjevanja in posamezno delovno operacijo.

Drugi pomemben vidik je pretvorba zveznih ocen v diskretne razrede. Čeprav kategorizacija ocen v praksi poenostavi interpretacijo, je treba meje razredov določiti šele po analizi dejanske porazdelitve rezultatov, saj lahko poljubna delitev intervalov prikrije pomembne razlike. Zvezna ocena, ki jo daje predlagana metoda, ohranja ločljivost sposobnosti in je še posebej uporabna kot vhodna spremenljivka v napovednih ali simulacijskih modelih.

Pri opredeljevanju ocen sposobnosti delavcev, je treba tudi natančno preučiti in poznati vpliv posameznih uteži kriterijev. V tej študiji je kriterij težje napake imel relativno visoko utež ( $\approx 30\%$ ), ampak ker je bila eksperimentalna operacija relativno enostavna in ni omogočala veliko priložnosti za težje napake, je večina udeležencev pri tem kriteriju dosegla maksimalno oceno. V kolikor pa je udeleženec storil napako, pa je bila ta

močno kaznovana, zato je potrebno vhodne podatke kriterijev ustrezno določiti. Ta ugotovitev kaže, da končni rezultati sposobnosti niso odvisni le od uspešnosti udeležencev, temveč tudi od kompleksnosti naloge in strukture uteži. Kadar naloge ponujajo omejene možnosti, v tem primeru za težje napake, lahko dodelitev visoke uteži takim kriterijem zmanjša diskriminativnost celotne ocene, zato morata biti zasnova naloge in določitev uteži med seboj skrbno usklajeni.

Predlagana metodologija združuje heterogene kazalnike uspešnosti, vključno z učinkovitostjo, variabilnostjo in kazalniki, povezanimi z napakami, v enoten konsolidiran kazalnik sposobnosti delavca. S kombinacijo ekspertno določenih uteži, preverjanja konsistentnosti in normalizacije na osnovi percentilov, okvir zagotavlja transparentnost, robustnost in interpretabilnost ocenjevanja. Dobljeni rezultati potrjujejo, da metoda omogoča zvezno in dobro diferencirano porazdelitev ocen, pri čemer ohranja smiselne razlike med ocenami posameznikov.

Z vidika širšega raziskovalnega konteksta predstavljena metodologija predstavlja enega izmed gradnikov razvoja človeku prilagojenih modelov podpore odločanju in optimizacije, kjer je ključno definirati zanesljive in merljive vhodne ter izhodne spremenljivke. Strukturiran kazalnik predstavlja konsistenten in sistematičen vhodni parameter za opis sposobnosti delavca.

V nadaljnjih raziskavah bo poudarek usmerjen v identifikacijo najprimernejšega delavca za specifične operacije, zlasti v povezavi z intenzivnostjo dela, počutjem in učinkovitostjo. Z vključevanjem celovitih kazalnikov v napovedne modele, bo mogoče bolje razumeti medsebojne vplive med značilnostmi delavcev in operativnimi rezultati ter razviti učinkovitejše, prilagodljive in človeku usmerjene proizvodne sisteme.

## ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo za uporabo raziskovalne opreme – sistema za razvoj in preizkušanje kognitivnih proizvodnih pristopov v okviru Industrije 4.0, ki vključuje sodelovalne robote z opremo ter senzoriko, strojno in programsko opremo za ergonomsko analizo sodelovalnega delovnega mesta. Oprema je bila pridobljena v okviru projekta »Nadgradnja nacionalnih

raziskovalnih infrastruktur – RIUM«, ki so ga sofinancirali Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport ter Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Avtorji se zahvaljujejo za podelitev finančnih spodbud za razvoj znanstvenoraziskovalne dejavnosti Univerze v Mariboru – interni razpis v letu 2025 (sporazum št. 075/2025/50-SPO).

Viri:

- [1] Fantini, P., Pinzone, M., Taisch, M.: Placing the operator at the centre of Industry 4.0 design: Modelling and assessing human activities within cyber-physical systems. *Computers and Industrial Engineering*, 139, 105058 (2020).
- [2] Mei, L., Feng, X., Cavallaro, F.: Evaluate and identify the competencies of the future work-force for digital technologies implementation in higher education. *Journal of Innovation and Knowledge*, 8(4), 100445 (2023).
- [3] Ojsteršek, R., Buchmeister, B., Javernik, A.: Personalizing human-robot workplace parameters in human-centered manufacturing. *Machines* 12(8), 546 (2024).
- [4] Tóth, N., Kulcsár, G.: New models and algorithms to solve integrated problems of production planning and control taking into account worker skills in flexible manufacturing systems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 12(4), pp. 381–400 (2021).
- [5] Dolgui, A., Sgarbossa, F., Simonetto, M.: Design and management of assembly systems 4.0: Systematic literature review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 60(1), pp. 184–210 (2022).
- [6] Kaasinen, E., Schmalfuß, F., Öztürk, C., Aromaa, S., Boubekeur, M., Heilala, J., Heikkilä, P., Kuula, T., Liinasuo, M., Mach, S., Mehta, R., Petäjä, E., Walter, T.: Empowering and engaging industrial workers with Operator 4.0 solutions. *Computers and Industrial Engineering*, 139, 105678 (2020).
- [7] Gualtieri, L., Palomba, I., Merati, F. A., Rauch, E., Vidoni, R.: Design of human-centered collaborative assembly workstations for the improvement of operators' physical ergonomics and production efficiency: A case study. *Sustainability* 12(9), 3606 (2020).
- [8] Acemoglu, D., Autor, D.: Skills, tasks and technologies: Implications for employment and earnings. In: *Handbook of Labor Economics*, vol. 4, pp. 1043–1171 (2011).
- [9] Dornelles, J.de A., Ayala, N.F., Frank, A.G.: Collaborative or substitutive robots? Effects on workers' skills in manufacturing activities. *International Journal of Production Research*, 61(22), pp. 7922–7955 (2023).
- [10] Bhalaji, R.K.A., Bathrinath, S., Ponnambalam, S.G., Saravanasankar, S.: Analyze the factors influencing human-robot interaction using MCDM method. *Materials Today: Proceedings* 39, pp. 100–104 (2020).
- [11] Ishizaka, A., Labib, A.: Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 38(11), pp. 14336–14345 (2011).
- [12] Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), pp. 649–655 (1996).
- [13] Javernik, A., Buchmeister, B., Ojsteršek, R.: The NASA-TLX approach to understand work-ers workload in human-robot collaboration. *International Journal of Simulation Modelling* 22(4), pp. 574–585 (2023).
- [14] Md Yusoff, Y., Omar, M. Z., Zaharim, A., Mohamed, A., Muhamad, N.: Employability skills performance score for fresh engineering graduates in Malaysian industry. *Asian Social Science*, 8(16), pp. 140–145 (2012).

## STRUKTURIRANO REŠEVANJE PROBLEMOV Z UMETNO INTELIGENCO

**Matej HOHNJEC**  
Matej Hohnjec s.p.

### IZVLEČEK

*Prispevek obravnava uporabo programske opreme, temelječe na TRIZ-u, kot strukturiranega poziva (SuperPrompt) za AI klepetalne robote z namenom izboljšanja učinkovitosti reševanja kompleksnih problemov. Poseben poudarek je na analitičnih orodjih Situation Assessment Questionnaire (SAQ) in Problem Formulator, ki omogočata strukturirano analizo problemske situacije, prepoznavanje protislovij ter generiranje sistematičnih smeri za inovativne rešitve. Raziskava temelji na primerjalni analizi rezultatov uporabe AI klepetalnega robota v treh scenarijih: (1) izvirni opis problema, (2) strukturiran opis z uporabo SAQ in (3) smeri rešitev, generirane z uporabo Problem Formulatorja. Rezultati kažejo, da uporaba strukturiranih nadrejenih pozivov pomembno izboljša tako količino kot kakovost predlaganih rešitev, zlasti glede njihove uporabnosti in stopnje inovativnosti. Ugotovitve potrjujejo, da integracija TRIZ analitičnih orodij kot vstopnega modula za AI klepetalne robote predstavlja učinkovit pristop za podporo generiranju idej in odločanju v kompleksnih problemskih situacijah.*

### 1 UVOD

Teorija reševanja inventivnih problemov (TRIZ), ki jo je razvil Genrich Altshuller, predstavlja sistematičen pristop k reševanju kompleksnih problemov na osnovi analize vzorcev inovacij, identificiranih predvsem v patentih. Namesto posnemanja človeškega načina razmišljanja TRIZ temelji na rekonstrukciji preverjenih principov inoviranja, kar omogoča bolj strukturiran, ponovljiv in učinkovit proces generiranja rešitev.

Vzporedno je razvoj AI klepetalnih robotov odprl nove možnosti za podporo reševanju problemov. V tem kontekstu se TRIZ orodja lahko uporabljajo kot strukturirani poziv (SuperPrompt), ki izboljša kakovost vhodnih informacij in usmerja generiranje odgovorov.

Sodobni razvoj TRIZ-a se odraža v specializiranih programskih rešitvah, med katerimi imata pomembno vlogo Ideation Brainstorming Software (IBS) in Express Situation Assessment and Management (ESAM).

Ključni analitični modul obeh programov je Ideation Problem Formulator®, ki omogoča strukturirano modeliranje problemske situacije z uporabo vzročno-posledičnih povezav, samodejno prepoznavanje protislovij ter generiranje sistematičnih smeri za inovativne rešitve. Dodatno

pomembno vlogo ima Situation Assessment Questionnaire (SAQ), ki podpira celovito in dosledno zajemanje vhodnih informacij o problemu.

V prispevku je poudarek na uporabi programske opreme IBS kot strukturiranega poziva za AI klepetalne robote pri reševanju konkretnega problema. Obravnavan je primer proizvodnje visoko čistega bakra, kjer kompleksnost procesa in medsebojni vplivi dejavnikov zahtevajo strukturiran pristop k analizi in generiranju rešitev. Cilj prispevka je pokazati, kako lahko uporaba IBS, zlasti modula Problem Formulator, izboljša kakovost in uporabnost rezultatov, pridobljenih z uporabo AI klepetalnih robotov.

### 2 PROGRAMSKA OPREMA IDEATION ZA UPORABO KOT VSTOPNI MODUL ZA AI KLEPETALNE ROBOTE

Dve programski rešitvi podjetja Ideation sta bili nedavno razviti z namenom poenostavljenega in uporabniku prijaznejšega vmesnika ter združljivosti z na novo uvedenimi AI klepetalnimi roboti:

- **Ideation Brainstorming Software (IBS):** splošno namensko analitično orodje, podprto z umetno inteligenco, za pretvorbo kompleksnih

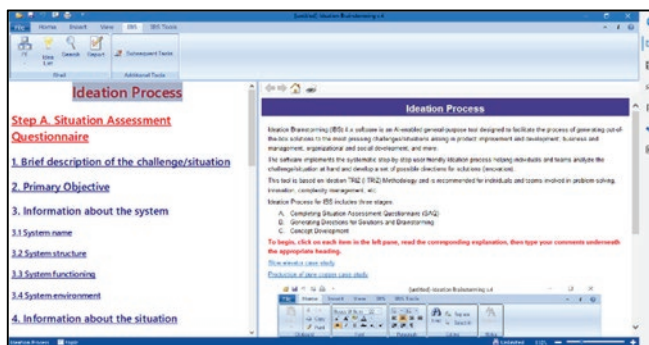
situacij v celovit nabor smeri za rešitve in inoviranje. Namenjen predvsem tehničnim problemom.

- **Express Situation Assessment and Management (ESAM):** analitično orodje, podprto z umetno inteligenco, za obravnavo kompleksnih situacij, za katere je značilen eden ali več naslednjih elementov nestanovitnost, negotovost, kompleksnost in dvomnost (VUCA). Namenjen predvsem za ne-tehnične probleme.

Obe programski rešitvi imata naslednje skupne lastnosti:

- temeljita na metodologiji TRIZ,
- proces obravnave problema vključuje tri faze:
  1. vprašalnik za oceno situacije (Situation Assessment Questionnaire – SAQ),
  2. generiranje smeri za rešitve oz. inovacije (z uporabo Problem Formulator),
  3. razvoj koncepta,
- učinkoviti sta kot strukturirani poziv (SuperPrompt) za AI klepetalne robote.

Programski vmesnik je prikazan spodaj (Slika 1).



Slika 1: Prikaz programskega vmesnika IBS

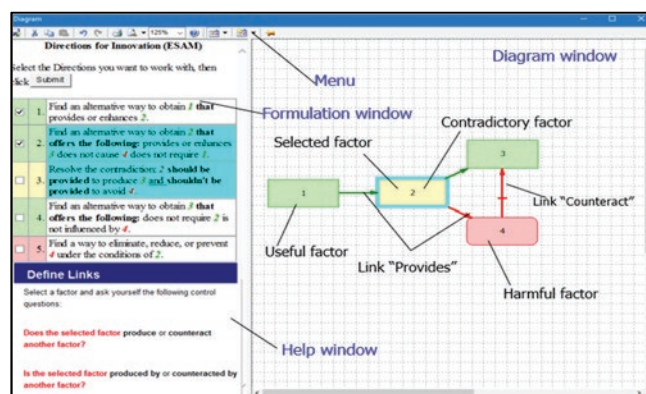
## 2.1. Problem Formulator

Problem Formulator (PF) predstavlja osrednjo in ključno komponento obeh predstavljenih programskih rešitev, IBS in ESAM. V obeh primerih deluje kot temeljno analitično jedro, ki omogoča pretvorbo kompleksnih problemskih situacij v strukturiran nabor smeri za rešitve.

Problem Formulator (Slika 2) je namensko analitično orodje, podprto z umetno inteligenco, za

pretvorbo kompleksnih situacij v celovit nabor smeri za rešitve oz. inovacije, zlasti:

- prikaz problemskih situacij v obliki vzročno-posledičnih odnosov, vizualiziranih na diagramu,
- poleg funkcij lahko deluje z vsemi smiselno opredeljenimi dejavniki (parametri, tokovi, pogoji, objekti itd.),
- omogoča vizualno reorganizacijo in analizo diagrama ter razkrivanje (in sprotno popravljanje) različnih neskladij, napak, manjkajočih dejavnikov in povezav,
- vse navedeno z uporabo preprostega jezika.



Slika 2: Prikaz vmesnika Problem Formulator-ja

Problem Formulator ima naslednje funkcionalnosti, podprte z umetno inteligenco:

- samodejno prepoznava in označuje protislovja,
- samodejno pretvori vizualni diagram v celovit nabor smiselnih stavkov, ki predstavljajo možne smeri za rešitve oz. inovacije,
- samodejno zagotavlja bolj podrobne smeri rešitev oz. inovacij znotraj generiranih smeri (predlaga dodatno razčlenjevanje smeri).

## 3 PRIMER DOBRE PRAKSE

### 3.1. Namen in metoda

1. Namen študije je bil raziskati učinkovitost uporabe nove programske opreme Ideation Brainstorming kot vstopnega modula za AI klepetalne robote.
2. Študija ima dva dela:
  - Delo z IBS programsko opremo, vključno z izpolnjevanjem vprašalnika za oceno situacije (Situation Assessment Questionnaire – SAQ)

in uporabo Problem Formulatorja za izdelavo diagrama in generiranje smeri za rešitve oz. inovacije.

- Tri faze z ChatGPT, vključno z:
  - faza 1: delo z izvirnim opisom problema,
  - faza 2: izpolnjen vprašalnik SAQ,
  - faza 3: delo z izbranimi smerni za rešitve oz. inovacije z dodatno razčlenjenimi smerni (Refined Directions).
- 3. Pridobljeni predlogi za vsako fazo z ChatGPT so bili razdeljeni v naslednje skupine:
  - splošni (očitni),
  - uporabni ali delno uporabni,
  - zanimivi ali kreativni.

### 3.2 Izvirni opis problema

Plošče visoko čistega bakra se proizvajajo z naslednjim elektrolitskim postopkom: kos običajnega bakra se postavi v kad, ki vsebuje elektrolit, in se poveže s pozitivno elektrodo (anodo) enosmernega vira. "Seme" čistega bakra se prav tako postavi v kad in poveže z negativno elektrodo (katodo). Ko se dovede tok, se bakrovi ioni premikajo z anode in se odlagajo na katodi, medtem ko se nečistoče izločajo na dno kadi.



Slika 3: Proces proizvodnje čistega bakra

Med tem procesom elektrolit prodira v majhne pore, ki so se razvile na površini bakrenih plošč. Plošče se nato pred odpremo skladiščijo, med tem časom pa elektrolit izhlapi iz por, kar pusti oksidne madeže na površini bakra. Ti madeži poslabšajo videz izdelka, zmanjšajo njegovo vrednost in povzročajo znatne izgube.

Da bi se temu izognili, se plošče pred skladiščenjem operejo, da se iz por odstrani elektrolit. Zaradi majhne velikosti por je težko odstraniti ves elektrolit. Poleg tega to povečuje stroške in zahteva dodaten čas. Zato je bil problem: kako izboljšati postopek pranja?

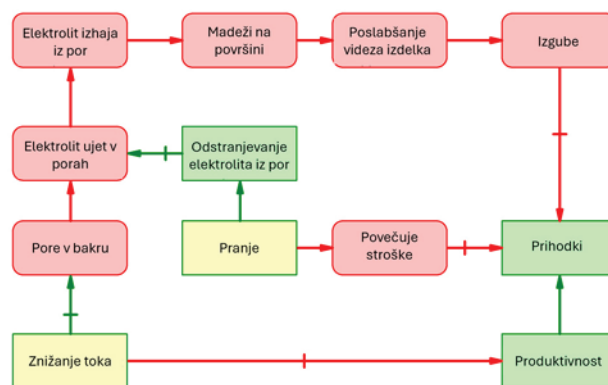
### 3.3 Uporaba Ideation Brainstorming Software za izboljšanje proizvodnje čistega bakra

Prvi korak v procesu je izpolnitev vprašalnika za oceno situacije (Situation Assessment Questionnaire - SAQ). To je niz vprašanj, prikazanih spodaj (Sika 4). Glej izpolnjen SAQ v celotnem poročilu [2].

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kratak opis izziva/situacije</li> <li>• Glavni cilj</li> <li>• Informacije o sistemu                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ime sistema</li> <li>- Struktura sistema</li> <li>- Delovanje sistema</li> <li>- Okolje sistema</li> </ul> </li> <li>• Informacije o situaciji                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Izziv, ki ga je treba razrešiti</li> <li>- Dejavniki, ki povzročajo problem/izziv</li> <li>- Posledice nerazrešene situacije</li> <li>- Zgodovina izziva</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idealna vizija rešitve</li> <li>• Dovoljene spremembe sistema</li> <li>• Merila za izbor konceptov rešitve</li> <li>• Dodatne informacije</li> <li>• Podatki o projektu                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Časovni načrt projekta</li> <li>- Kontaktni podatki projektne skupine</li> </ul> </li> </ul>
--	--

Slika 4: Seznam vprašanj v SAQ

Drugi korak je izdelava diagrama v modulu Problem Formulator (Slika 5) in posledično samodejno generiranje smeri za rešitve in inoviranje.



Slika 5: Diagram, ki prikazuje vzročno-posledični opis problema za proizvodnjo čistega bakra

Za obravnavani problem smo samodejno dobili 14 generiranih smeri, ki si jih lahko ogledate v celotnem poročilu [2]. Za test smo uporabili samo 3 najbolj obetavne, ki smo jih posredovali v ChatGPT:

- Najti način za odpravo, zmanjšanje ali preprečitev uhajanja elektrolita iz por, da bi se izognili madežem na površini v pogojih, ko je elektrolit ujet v porah. *Dodatna razčlenitev smeri:* najti način za preprečevanje uhajanja elektrolita iz por.
- Najti alternativni način za doseganje zmanjšane toka, ki omogoča naslednje: odpravi, zmanjša ali prepreči, da pore v bakru vplivajo na produktivnost.
- Razrešiti protislovje: zmanjšan tok naj bi bil zagotovljen za preprečevanje vpliva por v bakru, hkrati pa ne bi smel biti zagotovljen, da ne bi negativno vplival na produktivnost. *Dodatna razčlenitev smeri:*
  - poskusiti zagotoviti zmanjšan tok na enem območju in ga ne zagotavljati na drugem,
  - poskusiti zagotoviti zmanjšan tok v določenem času in ga ne zagotavljati v drugem času.

Zadnji predlagani smeri rešitve oz. inovacije sta se zelo približali dejanski rešitvi, ki je bila uvedena v proces. Proti koncu elektrolitskega procesa se je znižal tok in posledično je bila površina plošč bolj kakovostna in težave z elektrolitom so bile odpravljene.

### 3.5 Povzetek rezultatov

Povzetek rezultatov je prikazan v spodnji tabeli.

Tabela 1: Povzetek rezultatov podanih priporočil

Faza	Št. idej	Splošna	Delno uporabna	Zanimiva
1	4	1	3	-
2	7	2	5	-
3	7	-	6	1

1. Število in zlasti kakovost priporočil ChatGPT sta se z nadaljnjo uporabo rezultatov programske opreme stalno povečevala.

2. Samo 3 izbrane generirane smeri od 14 smeri so skoraj podvojile skupno število idej (7/4) v primerjavi z izvirnim opisom problema.
3. Zanimivo (kreativno) priporočilo, ki ga je ChatGPT podal v tretji fazi (z uporabo smeri za inoviranje, generiranih s Problem Formulatorjem), je bila zelo blizu rešitvi, ki jo je prej razvila profesionalna TRIZ ekipa in je bila vpeljana v proces.

## 4 SKLEP

Danes so na voljo različni AI klepetalni roboti za pomoč pri iskanju rešitev zahtevnih izzivov. Vendar je uporabnost odgovora klepetalnega robota močno odvisna od kakovosti vprašanj.

Namen študije je bil raziskati učinkovitost uporabe Ideation Brainstorming Software za pripravo strukturiranih pozivov za AI klepetalne robote. Rezultati študije so pokazali, da sta se število in zlasti kakovost priporočil ChatGPT z zaporedno uporabo rezultatov programske opreme stalno povečevala.

Rezultati študije so dokazali, da je uporaba programske opreme IBS kot vstopnega modula za AI klepetalne robote koristna, zlasti ker lahko kompenzira znane pomanjkljivosti razpoložljivih klepetalnih robotov.

Modul Problem Formulator je lahko še posebej koristen za kompleksne situacije, ki so pogosto kombinacije manj zapletenih delnih problemov. Težave so v njihovem številu, številnih, pogosto nejasnih medsebojnih povezavah, neznanih vzorcih itd. Jasnost situacije (kar pomeni razumevanje narave in celovitosti seznama delnih problemov) je lahko pomembnejša od uporabe tradicionalnih orodij za reševanje problemov, saj je dobro opredeljene delne probleme pogosto mogoče rešiti s kombinacijo zdrave pameti ter ustreznega strokovnega znanja in/ali izkušenj.

Viri:

- [1] Zlotin, B. and Zusman, A. "TRIZ and Practical Artificial Intelligence". Proceedings of the International TRIZ Conference ITC 2023, Graz, Austria.
- [2] Zlotin, B., Zusman, A., Hohnjec, M.: "Copper washing case study report" (povezava do celotnega poročila: <https://3zen.si/copper-washing-case-study-report/>)

## STRATEŠKI RAZVOJ INDUSTRIJE ZA NASLEDNJE DESETLETJE

Gorazd RAKOVEC  
KIBERNOVA, s. p.

### IZVLEČEK

*V Sloveniji imamo napisanih precej strategij, a zaostajamo v gospodarskem razvoju. Svetovni razvoj je vsak dan kompleksnejši in hitrejši. Postavlja se vse pomembnejše vprašanje, kako k razvoju pristopiti in kako ukrepati, da bi zaostajanje ne samo zmanjšali, temveč prešli med vodilne v svetu? Tako obsežne in kompleksne naloge se je treba lotiti najprej na strateškem nivoju tako politike države kot tudi lastnikov, ki odločajo o vseh večjih premikih. Naloga vsakega strateškega vodstva je, da predvideva pot družbe za 10 ali 20 let v prihodnost. A kako vedeti, kaj se bo dogajalo v prihodnosti? Dejstvo je, da tehnologija prehiteva družbo za 10-20 let in s tem postaja hrbtenica razvoja vse družbe. Lestvica industrijskih revolucij je hrbtenica razvoja industrije in cele družbe. V Sloveniji mediji močno propagirajo ekonomijo kot edino stroko za razvoj strategije, kar pa je veliko premalo. Strategija gospodarstva vključuje vse stroke v gospodarstvu. Strateško področje je izrazito transdisciplinarno, kjer so industrijske stroke združene v homogeno celoto. Pri nas je dolgo veljalo zmotno prepričanje, da naj se politika ne vmešava v razvoj gospodarstva in da ga bo trg usmerjal. Razvoj danes močno presega nivo enega podjetja in se širi na nivo cele družbe. Za pospešen razvoj je treba v podjetja usmeriti, poleg tega kar zmorejo sama ob podpori lastnikov, še podporo cele vlade, ministrstev in večine storitvene družbe.*

### 1 STRATEŠKA TEHNOLOGIJA

Strategija pomeni dolgoročno smer osredotočenosti virov na področja doseganja najboljših poslovnih in družbenih koristi. Dolgoročnost pomeni, da gre za aktivnosti, ki jih bomo izvajali ne samo danes ali naslednje leto, temveč kontinuirno tudi čez 5, 10 ali več let in zato se moramo na njih usmeriti že danes in ohranjati smer, da bomo lahko do njih prišli po najkrajši poti. Morda še pomembnejša je osredotočenost - koncentracija virov. Osredotočiti moramo ljudi, delovna sredstva, procese, materiale, energijo, finančne, časovne vire. Če vire razdelimo na pet področij namesto na osemdeset, je njihova koncentracija šestnajstkrat večja.

Tehnologija prehiteva družbo za 10–20 let in usmerja njen razvoj. Celotna zgodovina človeške družbe temelji na sledenju tehnologiji, nikoli obratno. Problem nastaja zadnje desetletje, ko se nove tehnologije pojavljajo tako hitro, da jih družba ne uspe več slediti. Zaostanek družbe za nakopičenimi tehnologijami se veča in postaja velik problem, istočasno pa so nakopičene tehnologije tudi področje konkurenčne prednosti.

Smo sredi globalne tekme. Kdor obvlada več novih tehnologij, ima konkurenčno prednost.

Lestvica industrijskih revolucij 3.0 do 7.0 predstavlja dolgoročno vizijo razvoja industrije in hrbtenico razvoja človeške družbe:

**Industrija 3.0** se je začela v 70. letih prejšnjega stoletja in pomeni prehod na računalniško podprto avtomatizacijo proizvodnje. Zanj so značilni sistemi ERP in MES, internet, metode vitke proizvodnje (Lean) ter uvedba PLC-krmilnikov, CNC-strojov in robotov. To je omogočilo natančnejšo, hitrejšo in bolj fleksibilno proizvodnjo. Cilj Industrije 3.0 je bil povečati produktivnost in kakovost ter hkrati zmanjšati stroške.

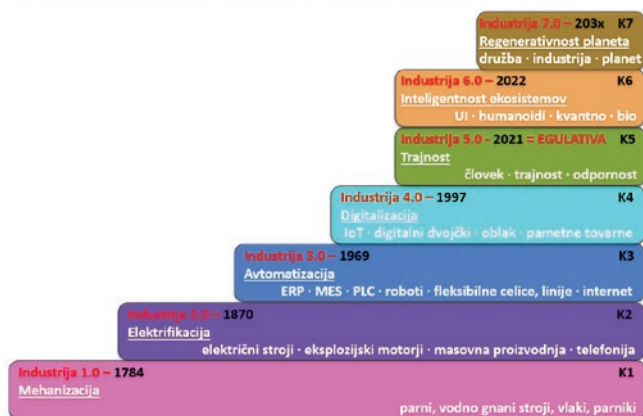
**Industrija 4.0** je prinesla nadgradnjo avtomatiziranih procesov z digitalizirano procesno povratno zvezo in povezavo vseh fizičnih stvari z računalniškimi tehnologijami. Od približno leta 2000 naprej so se v ZDA pojavili koncepti, kot so Internet stvari (IoT), STEM izobrazba, obdelava velikih podatkov (Big Data), računalništvo v oblaku, itd. Ključna inovacija so bili digitalni dvojčki objavljeni leta 2002. Cilj Industrije 4.0 je ustvariti pametne tovarne, kjer se procesi čim bolj samodejno prilagajajo, kar vodi do večje učinkovitosti in fleksibilnosti.

**Industrija 5.0** ni nastala zaradi prebojnih tehnologij, temveč je bila definirana leta 2021 z belo knjigo Evropske komisije. Temelji na sodelovanju med človekom in strojem. V ospredju so okoljski predpisi EU, krožno gospodarstvo in zmanjševanje okoljskega vpliva. Cilj je povezati tehnološko učinkovitost s človeško kreativnostjo ter povečati odpornost podjetij, čeprav to hkrati pomeni višje stroške in manjšo konkurenčnost industrije EU.

**Industrija 6.0** združuje digitalne dvojčke, trajnost, napredno umetno inteligenco in humanoidne robote v simbiotske industrijske ekosisteme. Razmah napredne UI se je zgodil z uveljavitvijo ChatGPT do leta 2023, leto kasneje s humanoidnimi roboti, razvoj pa vključuje tudi kvantno računalništvo, biointegracijo, ki povezuje biološke in tehnološke sisteme in hiperpovezljivost med stroji, ljudmi in naravnimi procesi. Cilj Industrije 6.0 je vzpostaviti antifragilne ekosisteme, ki se ob motnjah ne le prilagajajo, temveč postajajo učinkovitejši in trajnejši.

**Industrija 7.0** je vizionarski koncept za obdobje po letu 203X (nedoločeno), ki predvideva popolno integracijo človeka, stroja in narave v regenerativne ekosisteme. Temelji na združitvi kvantnega računalništva in umetne inteligence, biološki integraciji s tehnologijo ter planetarni optimizaciji virov. Cilj je ustvariti samoobnavljajoče se sisteme, kjer nastopi globalna simbioza med industrijo, družbo in planetom.

#### Kompleksnost K industrijskih revolucij 3.0 → 7.0



Slika: Stopnje kompleksnosti pametnih tovarn

Pojav ene revolucije ne pomeni, da izginejo sistemi iz prejšnjih revolucij, temveč se vsi posodablajo, kopičijo in medsebojno spajajo v nove vrste. Stopnja kompleksnosti pametne tovarne K postaja kar enaka stopnji revolucije (slika). Vse sisteme, katerih del je tudi človek od dobe 3.0 do 7.0, je treba združiti v enega imenovanega pametne tovarna in kasneje pametni globalni industrijski ekosistem ipd. Zaradi kompleksnosti tehnologij tovarne same ne zmorejo več celotne transformacije. Potrebujemo nacionalni podporni center z inženiring svetovalci – ne znanstveniki. Izkušnje iz tujine kažejo, da mora biti razvoj industrijskih revolucij voden tudi na najvišjem političnem nivoju. Predsednik vlade mora prevzeti vlogo glavnega promotorja vizije in strategije. Industrijo 4.0 je inicirala in vodila ga. Angela Merkel, Družbo 5.0 na Japonskem premier Šinzo Abe, Kitajska ima politično načrtovane petletke. Brez vloge politike in države je razvoj premalo učinkovit.

## 2 KDO JE KOMPETENTEN ZA RAZVOJ UČINKOVITIH STRATEGIJ

Pri nas prevladuje zmotno prepričanje, da je razvoj strategij stvar ekonomske stroke. Strategija gospodarstva vključuje vse stroke v gospodarstvu in je izrazito transdisciplinarno področje. V industriji kot jedru gospodarstva so to tehnične in družboslovne stroke: strojništvo, elektrotehnika, mehatronika, kemija, farmacija, metalurgija, informatika, logistika, kakovost, organizacija, ekonomija, kadrovanje, itd. Industrijske strateške kompetence je možno pridobiti naprej s šolanjem v eni stroki, potem pa s prakso na čim več industrijskih področjih, za kar je potrebno vsaj trideset let prakse z zaposlitvijo v mnogih podjetjih industrije, nikakor ne v javnem sektorju. Tudi osebe v pokoju hitro izgubijo stik z dejanskim stanjem in so za uporabno strategijo nekompetentne.

Ko gledamo sestave raznih strateških svetov, ki naj bi svetovali ministrom, strankam, zbornicam, vidimo znana imena managerjev, podjetnikov, tajkunov, profesorjev, znanstvenikov, ipd. Nepoučen človek si misli: «Ja ti pa gotovo znajo.» Vendar so vsi ti kot svetovalci za gospodarski in družbeni razvoj nekompetentni. Kako je to mogoče?

Managerji, tajkuni in podjetniki praviloma poznajo le lastno podjetje ali ozek segment trga. Samo v industriji je preko 20.000 – dvajset tisoč tovarn. Torej vsakdo pozna 1/20.000 ali 0,05 promila industrije. Kar je dobro za eno družbo, je lahko nepomembno za druge, vendar tega posameznik ne ve. Lahko razvija odlično strategijo za svoje podjetje, a za gospodarsko celoto je nekompetenten. Znanstveniki delujejo v ločenem znanstvenem svetu, ki je močno oddaljen od realnosti industrije, zato so za razvoj gospodarskih strategij nekompetentni. Pravi strateški svetovalci so izkušeni inženirji iz industrijskega inženiringa in svetovanja, ki so več desetletij delali v številnih podjetjih in razumejo tehnologijo na strateškem nivoju ter njen vpliv na ljudi.

### 3 KAJ VKLJUČUJE STRATEGIJA

Nekatere države, npr. Kitajska, razvoj usmerjajo po sektorjih, vendar je tak pristop za Slovenijo neprimeren. Izločil bi številna kakovostna podjetja zunaj izbranih sektorjev, ki si zaslužijo podporo. Ker je dobrih podjetij premalo, si sektorskega modela ne moremo privoščiti.

Kazalnik dodane vrednosti na zaposlenega (dv/z) se je uveljavil kot merilo uspešnosti, vendar pogosto vodi v zmanjševanje števila zaposlenih namesto v rast dodane vrednosti. Posledica so kadrovske podhranjena podjetja brez razvojnih kompetenc, ki kratkoročno izboljšajo kazalnik, dolgoročno pa stagnirajo in ne zmorejo digitalne ter zelene preobrazbe. Resnična dodana vrednost podjetij so razvojne kompetence zaposlenih, predvsem sposobnost sinteze in ustvarjanja, ki je ključna za globalno konkurenčnost.

### 4 KONSENZ ZA INDUSTRIJO

Slovenija je tretja najbolj industrijska država v EU. Industrija ima okrog dvakrat višjo dodano vrednost od turizma kot izvoznika storitev. Industrija ustvarja glavnino izvoza, zato je najbolj ranljivi del družbe.

Če ima industrija probleme, potem ljudje zaposleni v industriji nehajo graditi hiše, kupovati stanovanja in njihovo realizacijo predstavijo za nekaj let na boljše čase – zmanjša se

gradbeništvo, ne kupijo novega avta, ampak se vozijo še kako leto dlje s starim – pade prodaja avtomobilov in z njo izdelava delov za njih po vseh dobavnih verigah, kar čutimo v Sloveniji. Ljudje ne gredo na morje, smučanje in zmanjša se turizem. V trgovinah kupujejo le najnujnejše. Ne kupujejo dragih oblek, temveč nosijo stare dlje. Ljudje ne hodijo več v gostilne, temveč kuhajo sami. Če ima industrija zmanjšan obseg dela, je zmanjšan tudi transport materialov in delov: tovornjaki, ladje, železnice, letala ... Kriza iz industrije se torej zelo hitro prenese v krizo storitev. V zahodnem svetu ljudje že ob napovedi krize – še predno nastopi, že začnejo zmanjševati porabo in delajo prihranke za krizo itd. Vedo, da v krizi podjetja odpuščajo ljudi. Storitve in industrija sta del istega organizma kot roke in noge npr. V razvitem svetu ljudje to že vedo. Pri nas se storitveni lobi trudi, da bi storitve postavili pred industrijo, ali celo skrivaj zavira razvoj industrije.

Ko se ob krizi na globalnih trgih upočasnijo industrija, se kriza takoj preseli v storitve – torej na vse. Zato moramo v Sloveniji priti do konsenza, da je industrija prva razvojna prioriteta države, ker je to najboljše za vse. EU je imenovala strategijo industrija 5.0 namesto družba 5.0 zato, da je čisto jasno, da je industrija prva. To je zato, da ne bi močan storitveni lobi prevzel razvoja v svoje roke in izpustil tako razvoj industrije kot tehnologije, ki sta jedro razvoja. Če pride do glasovanja, je v storitvah zaposlenih 3-krat več oseb kot v industriji. Pri glasovalnem kriteriju zmagajo vedno storitve (trgovine, banke, zavarovalnice, turizem, gostinstvo, transport) pred industrijo in preusmerijo državni denar v svoj žep. Potreben je dogovor o industrijski prioriteti, ker je to najboljše za vse.

### 5 KONKRETNE STRATEGIJE

Konkretne strategije za razvoj Slovenije so razdeljene na dva področja, in sicer na lastniško-podjetniške strategije, ki jih ustvarjajo podjetja sama, in državne, ki jih mora razvijati in voditi vlada z ministrstvi. Žal so te državne za celo Slovenijo najpomembnejše. Slovenija nazaduje, ker se v vladi in ministrstvih nihče od vplivnežev in odločevalcev ne zna ukvarjati s strateškim razvojem gospodarstva.

**Osrednja družbena kultura** bi morala biti **kultura izvozne super inovacijske družbe**. Brez kulture inovacij ni možno narediti bistvenih razvojnih dosežkov. Treba je fovšijo do znanja, ki zavira ves razvoj, spremeniti iz negativne v pozitivno obliko. To lahko naredi samo država. Jasno je tudi, da je dvomilijonski trg premajhen za rast gospodarstva in da je samo izvoz vir rasti in dodane vrednosti. Prodaja storitev turizma pa se dogaja v Sloveniji in ima okrog dvakrat nižjo dodano vrednost od pravega izvoza industrije, jo pa hoče storitveni lobi prikazovati kot nadomestilo za industrijo.

**Poslanstvo** gospodarstva Slovenije, ki bi lahko bilo: Ustvarjanje tehnološko zahtevnih končnih izdelkov in tehnologij z lastno blagovno znamko izdelanih v trajnostnih pametnih tovarnah z izvozom po svetu za dobrobit ljudi in okolja.

**Vizija** gospodarstva Slovenije: Slovenija je super inovacijska družba, ki ustvarja tehnološko zahtevne končne izdelke in tehnologije z lastno blagovno znamko v trajnostnih pametnih tovarnah in izvozom po vsem svetu za dobrobit ljudi in okolja.

### 5.1 Lastniško podjetniške strategije

**Strategija** gospodarstva Slovenije v **enem** stavku:

**Razvoj tehnološko zahtevnih KONČNIH izdelkov in tehnologij z lastno blagovno znamko in izvozom po vsem svetu, izdelanih v pametnih trajnostnih tovarnah za dobrobit zaposlenih in super inovacijske družbe.**

Če strategijo razgradimo v **nekaj** stavkov, dobimo:

1. Razvoj tehnološko zahtevnih KONČNIH izdelkov z lastno blagovno znamko in izvozom po vsem svetu.
2. Razvoj inovativnih tehnologij predelave materialov v izvozne izdelke. (Inovativne tehnologije predelave se dostikrat skrije v proizvodnji kot konkurenčno prednost in se ne izvaža.)
3. Razvoj pametnih trajnostnih tovarn po smernicah industrije 3.0 do 7.0 za dobrobit ljudi in super inovacijske družbe.

### 5.2 Izvedbene naloge politikov

Politiki niso več samo opazovalci razvoja, temveč je predsednik vlade z ministri tudi prvi promotor, lider, vlada strateški izvajalec. Izvedbene naloge **politikov** za izvedbo strategije v **enem** stavku so:

**Predsednik vlade in ministri so glavni promotorji in strateški liderji vizije in strategije gospodarstva, predvsem industrije 3.0–7.0 in kulture super inovacijske družbe z jedrom v Centru za strateški razvoj industrije, s šolanjem za STEM+ izobrazbo ob podpori znanstveno raziskovalnih institucij.**

Strateške naloge politikov po več področjih:

1. Predsednik vlade ob podpori ministrov je prvi promotor vizije in strategije, strateški vodja razvoja gospodarstva in super inovacijske kulture v družbi.
2. Vlada ustanovi Center za strateški razvoj industrije 3.0 do 7.0 in super inovacijske kulture.
3. Konsenz: industrija je prva razvojna prioriteta države in družbe.
4. Razvoj in uvedba STEM+ izobrazbe od vrtcev do postdoktorskega študija.
5. Ministrstvo izvede sanacijo šolstva.
6. Znanstvene in raziskovalne ustanove delajo v skladu s strategijami gospodarstva in za potrebe razvojnih jeder v tovarnah.

### 5.3 Razlaga gospodarske strategije

**1. Razvoj tehnološko zahtevnih KONČNIH izdelkov z lastno blagovno znamko in izvozom po vsem svetu**

Slovenija je ob tranziciji izgubila ključne proizvajalce končnih izdelkov (TAM, Litostroj, Tomos, ...) in postala podizvajalec. Dobaviteljski položaj ustvarja nizko dodano vrednost in visoko odvisnost. S končnim izdelkom se gradi blagovna znamka, lastna dobavna veriga, višja dodana vrednost in dolgoročna konkurenčnost. Proizvajalci delov ostanejo glavnina industrije na istočasnem drugem mestu.

**2. Razvoj inovativnih tehnologij predelave materialov v izvozne izdelke**

Razvoj inovativnih tehnologij predelave materialov v izvozne izdelke je danes največja

konkurenčna prednost Slovenije. Predelovalna tehnologija so znanja in veščine, stroji, naprave in orodja, energije, načrti, postopki, podatki in programi za predelavo materialov v izdelke, njihovo nadgrajevanje, vzdrževanje in reciklažo. Kompetence tehnologij predelave so tisto iz česar Slovenija danes ustvarja izvoz in najvišjo dodano vrednost, je največje bogastvo Slovenije, jedro njenega obstoja, glavna konkurenčna prednost, ki jo je treba razvijati in čuvati čim bolj.

### **3. Razvoj pametnih in trajnostnih tovarn po smernicah industrije 3.0 do 7.0 za dobrobit ljudi in super inovacijske družbe**

Dejansko je treba za strateški razvoj tovarn upoštevati celo lestvico industrijskih revolucij od 3.0 do 7.0. Najmanjše zunanjih inženiring izvajalcev tu ni več učinkovito, kot je v tretji industrijski dobi. Gre za izjemno transdisciplinaren kompleksen sistem zgradbe pametnih tovarn, ki ga tovarne same večinoma ne morejo razviti. Zato mora vlada Slovenije ustanoviti Center za strateški razvoj industrije z izkušenimi inženirji – ne znanstveniki. Podobne centre imajo že vse razvite države, razen Slovenije.

#### **5.4 Razlaga strateških nalog politike**

##### **1. Predsednik vlade ob podpori ministrov je prvi promotor vizije in strategije, strateški vodja razvoja gospodarstva in super inovacijske kulture v družbi.**

Praksa v tujini je pokazala, da je razvoj industrijske revolucije 4.0 in ostalih tako težaven, da ga mora voditi in promovirati na nivoju države predsednik-ica vlade. Prvi primer je nekdanja nemška premierka Angela Merkel, ki je leta 2011 začela s promocijo Industrije 4.0 in ko je odšla, je razvoj industrije 4.0 v Nemčiji bistveno upadel. Sledila je Japonska, kjer je leta 2016 Družbo 5.0, zgrajeno iz digitalnih dvojčkov, promoviral premier Šinzo Abe. Kitajska ima močno politično vodene razvojne petletke, s katerimi je prehitela ves svet. Vsi slovenski predsedniki in ministri so Industrijo 4.0, 5.0 lepo ignorirali, kot da je ni, morala pa bi biti jedro njihovega delovanja. Za to vlogo morajo politiki imeti kompetentne svetovalce, ki bi jih morali upoštevati. Predsednik vlade ima danes kompetenco razvojnega liderja in

nosilca razvojnih strategij. Če te vloge noče prevzeti, je država obsojena na relativno nazadovanje.

##### **2. Vlada ustanovi Center za strateški razvoj industrije 3.0 do 7.0 in super inovacijske kulture.**

Razvoj industrije po lestvici 3.0 do 7.0 je tako zahteven, da ga večina tovarn ne more sama izvesti. Zato je potreben poseben center za strateški razvoj industrije s pilotno postavitvijo vseh osnovnih tipov proizvodnje za treninge kadrov iz industrije. Center za strateški razvoj industrije 3.0-7.0 mora biti inženiring organizacija, ne raziskovalna ustanova. V njem morajo delati izkušeni industrijski inženirji – nikakor znanstveniki. Center bi moral imeti pilotne tovarne, podporo za razvoj končnih izdelkov, razvijati in širiti inovacijsko kulturo Slovenije s spreminjanjem negativne »fovšije« v pozitivno. Celoten razvoj na vseh področjih v Sloveniji je zavrt z negativno »fovšijo«. Sprememba mentalitete je možna le na daljše časovni obdobje s konstantnim večletnim propagiranjem, vodenim iz centra.

##### **3. Konsenz: industrija je prva razvojna prioriteta države in družbe**

Razlog konsenza v celi vladi in Sloveniji o prioriteti razvoja industrije je podan na začetku prispevka.

##### **4. Razvoj in uvedba STEM+ izobrazbe od vrtcev do postdoktorskega študija**

STEM (znanost, tehnologija, inženiring, matematika) izobrazba je temelj za razvoj kompleksnih interdisciplinarnih sistemov. V ZDA in razvitih državah so že razvili vse učne programe od vrtca do postdoktorskega študija. Brez poudarjanja inženirske izobrazbe (strojništvo, elektrotehnika, mehatronika, računalništvo, informatika, metalurgija, kemija, farmacija, biologija, itd.) razvoj v novih dobah 3.0–7.0 ni možen, ker zmanjka ustreznih kadrov in potrebnih znanj.

Pomembna je multidisciplinarna izobrazba za industrijo. Edina interdisciplinarna izobrazba danes, ki vključuje tako informatiko, mehanske sisteme, mehatroniko in elektrotehniko za gradnjo kompleksnih strojev, orodij, tehnoloških

procesov, strojnih skupin in tovarn je strojništvo, ki je najbolj celovita interdisciplinarna stroka za industrijo. Mnogi pojmujejo strojništvo kot izdelavo mehanskih delov za stroje, kar je huda zmota. Strojniki načrtujejo celotne stroje, linije, celice, obrate, izdelke z vso senzoriko, mehatroniko, računalništvom, informatiko, umetno inteligenco ipd. skupaj, saj drugače danes ni možno zgraditi sodobnih strojev, kamor spadajo tudi npr. popularni roboti, avtomobili, letala, droni, 3D tiskalniki, ipd.

### **5. Ministrstvo izvede sanacijo šolstva**

Šolskih programov je preveč, kakovost pa se znižuje zaradi financiranja po številu vpisanih, nižajo se kompetence in z njimi dodana vrednost. Podrobnosti poznajo že desetletja vsi, ki delajo v šolstvu, a noben minister ni rešil pomembne problematike.

### **6. Znanstvene in raziskovalne ustanove delajo v skladu s strategijami gospodarstva za potrebe razvojnih jeder v podjetjih**

Tudi znanost bi morali usmeriti v skladu z novimi strategijami v nove izdelke, tehnologije in pametne tovarne po industriji 3.0–7.0 za potrebe razvojnih jeder v podjetjih. Znanstveni dosežki, ki koristijo samo tujim družbam, za naše družbe pomenijo lahko tudi relativni zaostanek.

## **6 ZAKLJUČEK**

Sedanji industrijski izvoz Slovenije večinoma temelji na lastnem tehnološkem znanju in veščinah, kako materiale predelati v dele in sklope izdelkov za končne izdelke tujih kupcev. Kompetence tehnologije predelave materialov v izvozne izdelke so osnovno nacionalno bogastvo, vir visoke dodane vrednosti in suverenosti države. Zato je treba tehnološke kompetence za predelavo materialov kot glavno konkurenčno prednost čim bolj razvijati in čuvati.

Središče vsega bodočega razvoja Slovenije je Center za strateški razvoj industrije in super inovacijsko kulturo, ki ga ustanovi vlada in temelji na pristopu inženiringa z inženirji iz industrije – nikakor to ni še ena znanstvena ustanova. Naloga centra je tudi širjenje kulture super inovacijske družbe po celi Sloveniji s strokovno usmerjenimi medijskimi akcijami, in to več let neprestano, vključno s spremembo negativne »fovšije«, ki duši ves razvoj, v pozitivno. Potrebna je tudi zakonska podpora z dodatnimi razvojnimi zakoni za digitalizacijo, itd.

Slovenija zaostaja, ker politika nima jasne strateške opredelitve: industrija je vedno na prvem mestu, ker ignorira industrijske revolucije 4.0 in dalje, razvoj končnih izdelkov in ker nima centra za strateški razvoj industrije. Brez aktivne vloge politike, STEM+ izobraževanja, razvoja pametnih tovarn in končnih izdelkov Slovenija ne more napredovati.

Razvoj gospodarstva se začne z vodilnimi politikami. Dejansko smo prišli do stanja, ko je nujno ukrepanje države na strateških področjih. Posebno izjemno kompleksna in zahtevna industrijska transformacija tovarn zahteva propagiranje in zavzemanje predsednika vlade z ministri, drugače ni uspešno izvedljiva.

Strategije so pisane okvirno. Potreben je obsežen nadaljnji razvoj. Politiki bodo večinoma še naprej vztrajali na svojih strategijah, so pa opisane strategije temelj za razvoj strategij v vseh podjetjih in tu jih bodo nekateri vodje tudi upoštevali.

## ROBOTSKA CELICA ZA ČIŠČENJE IN BARVANJE PEŠČENIH JEDER ZA ODLITKE

**Hubert KOSLER<sup>1,2</sup>, Matej MERKAČ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>YASKAWA Slovenija d.o.o.

<sup>2</sup>YASKAWA Ristro d.o.o.

### IZVLEČEK

*Robotska celica opremljena z robotom Motoman tip GPI80 z 180kg nosilnosti, izvaja operacije čiščenje in barvanje peščenih jeder za odlitke. Dvo-prstno servo prijemalo je opremljeno z dvema zunanjimi robotskimi osmi. Med menjavo tipa jedra se zamenja zgolj prste prijemala. 3D Vision kamera se uporablja za prepoznavo pozicije jeder na vhodni paleti in za natančno pozicijo jedra vpetega v robotskem prijemalu.*

### 1. UVOD

Robotska celica Yaskawa je namenjena čiščenju srha na peščenih jedrih in barvanju očiščenih jeder. Robot prevzema peščena jedra iz vhodne palete, kjer so jedra odložena na vmesne letve. Pozicija jeder ni ponovljiva in robotska celica je opremljena z Vision sistemom za prepoznavo pozicije in orientacije jedra in natančen robotski odvzem. Z robotizacijo smo zmanjšali ročno manipulacijo s težkimi izdelki. Zagotovili smo ponovljivost čiščenja in barvanja jeder in pohitrili taktni čas priprave jeder. Posluževanje robotske celice je enostavno in hitro, operater robotske celice odpre krilna vrata, zamenja dve paleti in s potrditvijo na komandnem pultu, ponovno zažene robotsko celico.

### 2. TEHNOLOŠKE ZAHTEVE ZA ROBOTIZACIJO

#### *Peščena jedra*

Ovalnih in okroglih oblik do največjega premera 800mm in teže do največ 50kg. Jedra so odložena na leseno paletu dimezije 1200x800mm; dva ali največ tri jedra na posamezen nivo, odvisno od dimezije jedra. Nivoje jeder na paleti ločujeta dve vmesni letvi. Na robotski celici se bodo barvala tudi težja (do 100kg) in večja (dimezije do 1500mm) jedra. Pri zasnovi robotskega prijemala smo upoštevali največjo težo jedra 100kg.

#### *Čiščenje jedra*

Čiščenje jeder zajema odstranjevanje srha, ki nastane na delilnih ravninah orodja. Robot izvaja natikanjem jeder na šablono (matrico) pri čemer se odstrani višek peska oziroma se čisti srh na jedru. Med natikanjem ne nastopajo sile, ki bi vplivale na jedro ali na robota in posledično na natančnost operacije čiščenja. Robotska celica je opremljena z namensko postajo za šablone, opremljena s sistemom za hitro ročno menjavo šablone in tako prehod na čiščenje drugega tipa jedra. Kupec sam izdelava šablone za čiščenje jeder.

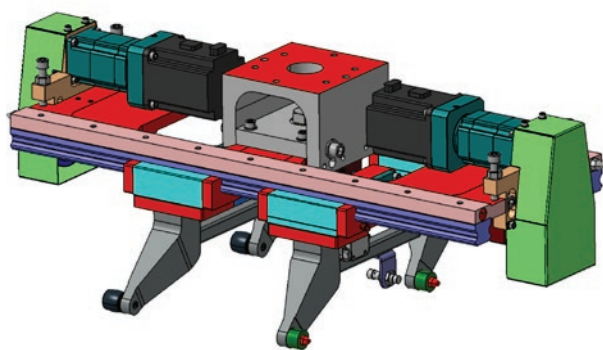
#### *Barvanje jedra*

Očiščena jedra robot potopi v bazen z barvo. V barvo se pomoči jedro in prsti robotskega prijemala. Pnevmatško prijemalo in robot ostanejo nad nivojem barve. Ko robot jedro dvigne nad bazen, ga nagne in ga počasi vrti. To gibanje povzroči enakomerno razlitje barve po jedru; višek barve odteče nazaj v bazen. Po barvanju robot odloži jedro na izhodno paletu. Med nivoje jeder vstavi vmesne letve, ki jih prenese direktno iz vhodne palete.

### 3. ZASNOVA ROBOTSKE CELICE

Na končni izgled celice, vplivajo poleg tehnoloških zahtev za čiščenje in barvanje, tudi ostale kupčeve zahteve: razpoložljivi prostor, možnost ročnega dela in posluževanje z uporabo dvigala, dostopnost v robotsko celico preko servisnih vrat,... Z upoštevanjem vseh tehnoloških zahtev, smo robotsko celico zasnovali s 6-osnim industrijskim robotom Motoman tip GP225 (225kg nosilnosti in polmer dosega  $R=2702\text{mm}$ ). Robot je opremljen z dvoprstnim paralelnim servo prijemalom. Vsak prst se upravlja ločeno z lastnim Yaskawa motorjem, ki je v krmilnik povezan kot robotska zunanja os. Prijemalo se upravlja preko robotskega pendanta – Teachbox. Robot je opremljen s poveznim paketom za dovod medijev in priklop dveh servo motorjev do zadnje robotske osi in ventilskim otokom, ki je montiran na tretjo robotsko os. Električni pomik prstov prijemala omogoča natančen nadzor nad pozicijo prsta na celotnem delovnem področju premikanja prsta. Prijemanje jedra (zapiranje prstov) se izvaja z dvojno kontrolo: kontrola pozicije in kontrola sile. Dovoljena sila se določa v % največje sile in se lahko določi za vsak tip jedra posebej. Oblika prstov bo zasnovana tako, da bo mogoče prijemat tudi letvice.

Prijemalo je zasnovano za ročno menjavo prstov ob prehodu na drugi tip jedra. Kontrola izbranega robotskega programa v kombinaciji s tipom prstov in matriko za čiščenje je sensorirana. Prsti in šablone so opremljeni z RFID čipi. Ob menjavi robotskega programa. se izvede kontrolo izbranih elementov.



Slika 1: Robotsko prijemalo



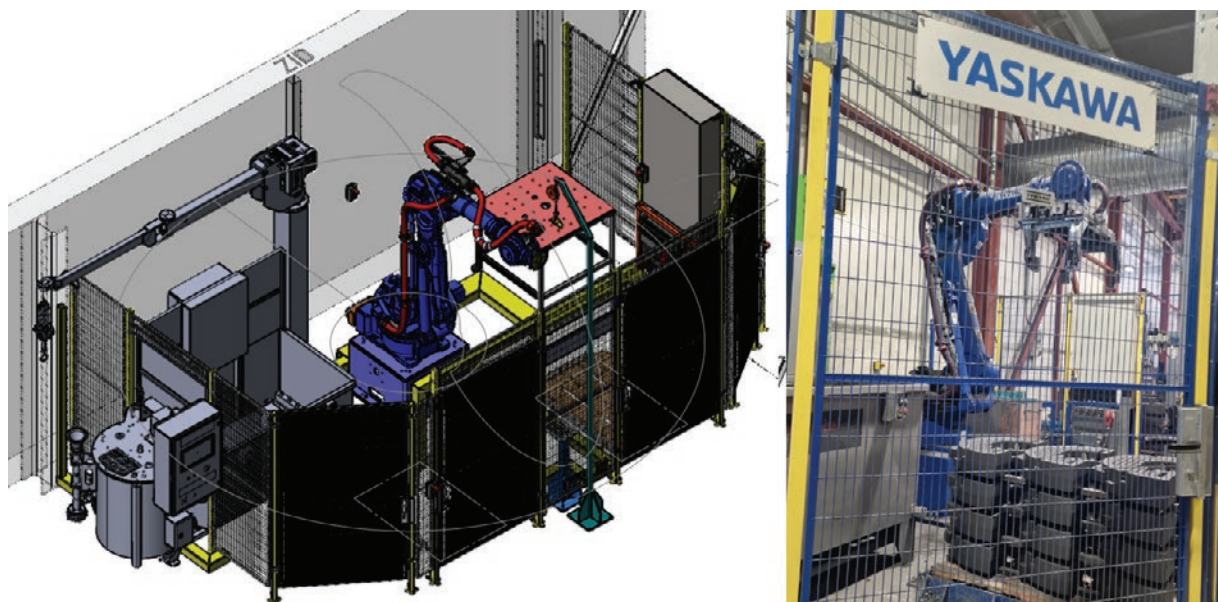
Slika 2: Srh na peščem jedru

#### 3.1 Vision sistem s 3D kamero

Robot uporablja 3D Vision sistem proizvajalca Mech-Mind za natančno prepoznavo pozicije jeder in letvic na vhodni paleti, ter za detekcijo pozicije posameznega jedra vpetega v robotskem prijemalu. Natančno positive jedra je potrebna zaradi čiščenje z natikanjem na matriko – med matriko in jedrom je natančno ujemanje brez rege.

Kamera je montirana v ohišje na katerem je avtomatska sklopka za ponovljivo prijemanje in odlaganje kamere. Kamera je ves čas priklopljena na napajanje in komunikacijsko povezana z robotskim krmilnikom. Ko robot uporablja kamero jo preko mehanske avtomatske sklopke vpne s prijemalom. Žična povezava je speljana do kamere kot zunanji povezni paket (ni speljana po robotu).

Z robotom vedno zagotovim optimalno razdaljo med kamero in objektom ki ga detektiramo. Robotska pozicija se prilagodi višini vhodne palete. Enako velja za primer, ko je kamera na nosilcu in se robot postavi z jedrom v vidno polje kamere. Z uporabo Vision sistema smo zagotovili natančne pozicije jeder na paleti in v robotskem prijemalu in tako izničili možnost poškodb jeder zaradi robotske manipulacije.



Slika 3: Robotska celica Yaskawa

### 3.2 Posluževanje

Robotska celica je opremljena z industrijskim računalnikom s HMI ekranom 19", ki povezuje vse glavne komponente robotske celice. Operater na enem mestu posluhuje z robotsko celico:

- izbira režima delovanja (start/stop,...)
- Prikaz trenutnega stanja in diagnostika napak
- Priprava receptur za programiranje novega tipa jedra: značilke Vision sistema, ...
- Prikaz slik zajetih s 3D Vision kamero

V avtomatskem režimu delovanja operater skrbi za menjavo palet in periodično čiščenje notranjosti robotske celice. Robotska celica vključuje dve paletni mesti z uvodnicami in senzoriko prisotnosti palete. Največja dimenzija vhodne in izhodne palete znaša 1500x800mm. Menjava palet z jedri poteka preko ročnih krilnih vrat varovana z elektromagnetnimi ključavnicami. Med menjavo palet robotska celica stoji – ne proizvaja kosov. Ko robot izprazni vsa jedra iz vhodne palete, je hkrati zapolnil izhodno paleto – obe paleti sta pripravljene za menjavo.

Robotska celica je obdana z zaščitno ograjo višine 2,7m, v kateri so predvidena še dvojna krilna ročna vrata z ročno ključavnico in varnostnim stikalom za programerje in serviserje. Kabina vsebuje vse potrebne varnostne elementa za zaščito delovnega mesta skladno z veljavnimi evropskim normam.

### 3.3 Programiranje

Programiranje robotske celice vključuje programiranje robotskih trajektorij in programiranje Vision Sistema. Izdelava robotske celice je vključevala programiranje za 2 različna tipa jeder. Programe za vsa ostaja jedra, pa pripravi kupec sam.

Programerji kupca so opravili 3 dnevno osnovno robotsko šolanje za programiranje Motoman robotov. Šolanje se izvaja v Demo centru v Yaskawa po program Yaskawa Academy. Drugi del šolanja, ki traja 2 dni, je namenjen delu z robotsko celico in Vision sistemom. Po opravljenem šolanju so samostojno izdelali program za nov tip jedra in izvedli zagon na robotski celici.

## 4. ZAKLJUČEK

Z robotizacijo procesa čiščenja in barvanja peščenih jeder smo izboljšali ergonomijo delovnega mesta. Taktni časi robotske celice so kar trikrat hitrejši od ročnega dela. Izdelali smo robotsko celico, ki je učinkovita in enostavna za uporabo in za programiranje. Takoj po prevzemu robotske celice je kupec začel pripravljati programe za nove tipe jeder.

Viri:

- [1] <http://yaskawa.eu.com/>

ROBOTSKA CELICA ZA ČIŠČENJE IN BARVANJE PEŠČENIH JEDER ZA ODLITKE

Hubert KOSLER<sup>1,2</sup>, Matej MERKAČ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>YASKAWA Slovenija d.o.o.

<sup>2</sup>YASKAWA Ristro d.o.o.

---

## OD TALINE DO KONČNEGA ODLITKA – AVTOMATIZIRANA LIVARSKA CELICA Z 3,500 T ZAPIRALNE SILE

**Maria YAKIMOVSKA, Vinko DREV, Andrej SMOLIČ**  
LTH Castings d.o.o.

### IZVLEČEK

*Podjetje LTH Castings d.o.o. že vrsto let sistematično nadgrajuje svoje proizvodne procese z uvajanjem naprednih rešitev avtomatizacije. V okviru oddelka Avtomatizacija procesov, v obratu Ljubljana, smo razvili in implementirali sodobno robotsko celico za tlačno litje, z zapiralno silo 3,500 t.*

*Robotska celica je zasnovana za strego tlačnega livarskega stroja ter za nadaljnjo obdelavo ulitkov skozi več tehnoloških operacij. Sistem vključuje dva robota – enega na talni vozni enoti za manipulacijo ulitkov med posameznimi postajami ter drugega na podstavku za graviranje iglične kode. Med ključne komponente sodijo vmesne odlagalne postaje, sistem za mazanje prijema, banja za hlajenje, izpihovalna in sušilna komora, obsekovalnik, žaga ter izhodni transportni trak. Proces se začne v tlačnem livarskem stroju, z litjem ulitkov, nato robot izvede lomljenje odvečnega materiala. Sledi hlajenje v vodni banji ter po potrebi izpihovanje in sušenje. Ulitek nato nadaljuje pot skozi obsekovanje in morebitno žaganje, pred zaključkom pa se izvede graviranje kode za sledljivost. Končni izdelek se odloži na izhodni trak.*

*Celoten proces deluje avtomatizirano, pri čemer je potreben le minimalen ročni poseg za praznjenje izhodnega traku in menjavo izmetnih zabojnikov, kar bistveno povečuje učinkovitost in zanesljivost proizvodnje.*

### 1 UVOD

Tlačno litje predstavlja enega ključnih proizvodnih procesov v sodobni livarski industriji, kjer so zahteve po visoki produktivnosti, kakovosti in sledljivosti izdelkov vse izrazitejše. Proizvodni proces vključuje več zaporednih operacij, kot so odvzem ulitka iz orodja, odstranjevanje odvečnega materiala, hlajenje ter nadaljnjo mehansko obdelavo, pri čemer je zagotovitev stabilnega in ponovljivega poteka ključnega pomena.

Zaradi kompleksnosti teh procesov in potrebe po zmanjševanju ročnih posegov postaja avtomatizacija nepogrešljiv element sodobnih proizvodnih sistemov. Uporaba robotskih celic omogoča natančno manipulacijo ulitkov, boljši nadzor nad procesom ter povečanje učinkovitosti in zanesljivosti delovanja.

V nadaljevanju je predstavljena avtomatizirana robotska celica za tlačno litje, ki omogoča celovito obdelavo ulitka od njegovega nastanka do končnega izdelka.

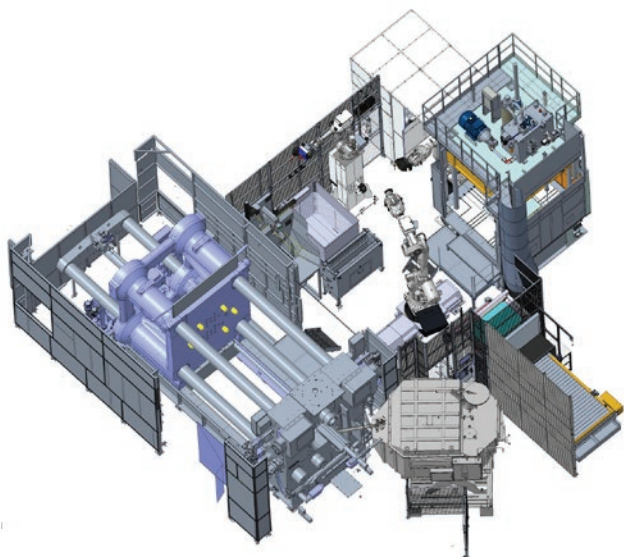
### 2 POTEK OBDELAVE ULITKA SKOZI ROBOTSKO CELICO

Potek obdelave ulitka v robotski celici je prilagojen tipu izdelka, vendar sledi osnovnemu zaporedju operacij. Proces se začne z odvzemom ulitka iz tlačnega stroja, kjer robot po zajemu preveri prisotnost kosa v prijemu. Prisotnost se potrdi z laserskim senzorjem, kar predstavlja pogoj za nadaljnje izvajanje procesa, vključno z mazanjem orodja na stroju. Po odvzemu se ulitek zajame s kamero, kjer se preveri prisotnost ostankov materiala («smrekic»), ki bi lahko ostali v orodju. Ta kontrola je ključna za zagotavljanje varnega in nemotenega nadaljevanja proizvodnje.

V naslednjem koraku robot izvede lomljenje odvečnega materiala, pri čemer se odpadni deli odložijo v izmetni zabojnik. Ulitek se nato ohladi v vodni banji, po potrebi pa sledi še sušenje. Nadaljnja obdelava vključuje obsekovanje ter, odvisno od zahtev izdelka, tudi razrez na žagi. Tudi pri teh operacijah je zagotovljeno zbiranje odpadnega materiala v izmetne zabojnike.

Pred zaključkom procesa se izvede graviranje iglične kode, ki omogoča sledljivost izdelka skozi proizvodni sistem. V kolikor je

potrebno, gre ulitek še skozi izpihovalno komoro, nato pa ga robot odloži na izhodni transportni trak. Na sliki 1 je prikazana celotna robotska celica z ključnimi postajami procesa.



Slika 1: Model avtomatizirane livarske celice

### 3 OPIS POSAMEZNIH POSTAJ V ROBOTSKI CELICI

V nadaljevanju so podrobneje predstavljene posamezne postaje robotske celice ter njihova funkcija v okviru celotnega procesa obdelave ulitka.

#### 3.1 Preverjanje prisotnosti smrekic

Po odvzemu ulitka iz tlačnega stroja se najprej preveri njegova prisotnost v prijemalu robota. To se izvaja z laserskim senzorjem, ki meri dolžino in potrdi, da je ulitek uspešno pobran. Prisotnost ulitka predstavlja tudi pogoj za nadaljnje korake procesa, vključno z mazanjem orodja na livarskem stroju.

Dodatno se izvede vizualna kontrola prisotnosti ostankov materiala (»smrekic«) s pomočjo industrijske kamere *Keyence IV4*. V primeru neuspešnega preverjanja se proces zaustavi, robot ostane v poziciji zajema slike, nadzorni sistem pa generira ustrezne napake. S tem preprečimo morebitna poškodba orodja in zagotovimo varno nadaljevanje procesa.

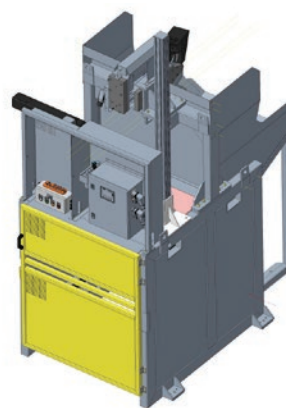
#### 3.2 Cona za lomljenje (škarje)

Cona za lomljenje je namenjena odstranjevanju odvečnega materiala z ulitka. Opremljena je z rezalnim mehanizmom (škarje), ki omogoča učinkovito ločevanje dolivkov in drugih presežkov. Odstranjeni materiali se zbira v izmetnem zabojniku.

Sistem omogoča tudi delovanje brez uporabe škarij v primeru motenj, pri čemer robot nadaljuje proces lomljenja z alternativnim načinom. Nadzorni sistem ob tem generira opozorila, kar omogoča pravočasno ukrepanje. V primeru, da rezalni mehanizem ne potrdi varnega stanja (npr. odprtosti), se proces zaustavi zaradi zaščite opreme.

##### – Izmetni zabojnik

Odvečni material se zbira v izmetnih zabojnikih oziroma vozičkih, ki jih je potrebno periodično menjati. Sistem operaterju s signalizacijo (svetlobni indikatorji) sporoča stanje napolnjenosti. Menjava je omogočena le v določenih časovnih oknih, ki so usklajena s ciklom celice, ter ob upoštevanju varnostnih pogojev (svetlobne zavese). Takšna zasnova zagotavlja varno in nemoteno obratovanje sistema.



Slika 2: Izmetni zabojnik

#### 3.3 Hladilna banja

Po odstranitvi odvečnega materiala se ulitek ohladi v vodni banji. Namen hlajenja je znižanje temperature ulitka na raven, primerno za nadaljnjo manipulacijo in obdelavo, ter preprečevanje deformacij materiala.

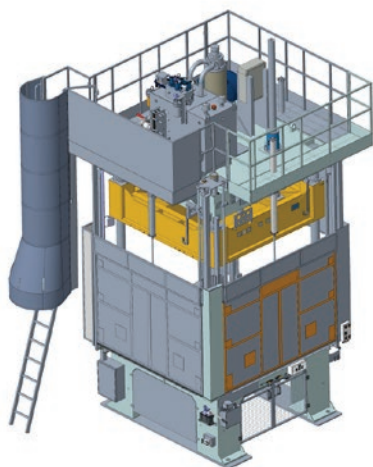
### 3.4 Sušilna komora

Po hlajenju se ulitek po potrebi usmeri v sušilno komoro, kjer se z uporabo zračnih šob odstrani odvečna voda s površine ulitka. Z uporabo sušilne komore zagotovimo ustreznost ulitka za nadaljnje operacije, ter preprečimo negativen vpliv vlage na kakovost obdelave.

### 3.5 Obsekovalnik

Obsekovalnik je namenjen mehanski obdelavi ulitka, pri kateri se odstranijo ostanki materiala na funkcionalnih površinah. Opremljen je z orodjem in senzoriko za zaznavanje prisotnosti ulitka ter pravilnega pozicioniranja.

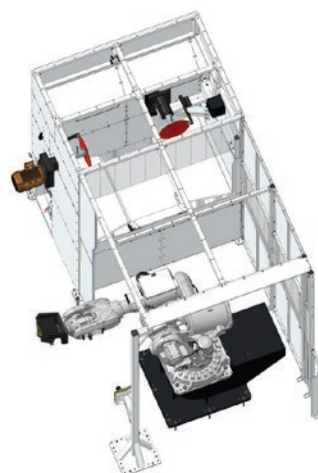
Parametri delovanja, kot so prisotnost kosa, lega in stanje izmetnih elementov, se spremljajo preko nadzornega sistema. S tem omogočimo zanesljivo delovanje in zmanjšamo možnost napak v procesu.



Slika 3: Obsekovalnik

### 3.6 Žaga

V primeru zahtev izdelka se ulitek dodatno obdela z razrezom na žagi. Delovanje žage je parametrično nastavljivo, pri čemer se upoštevajo različni programi, prijemala ter časovni parametri obdelave. Pravilna nastavitvev parametrov je ključna za zagotavljanje natančnosti reza in ponovljivosti procesa.

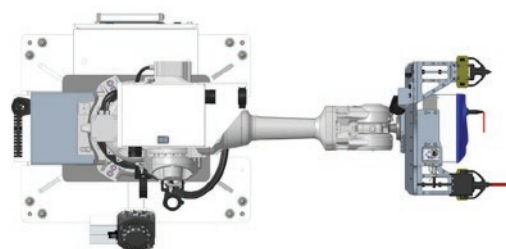


Slika 4: Žaga

### 3.7 Graviranje iglične kode

Postaja za graviranje omogoča označevanje ulitkov z iglično kodo za potrebe sledljivosti. Sestavljena je iz vpenjale postaje ter robota z gravirno glavo. Po graviranju se izvede kontrola kakovosti kode s kamero.

Sistem vključuje zamenljive vpenjale priprave, ki so kodirane, kar preprečuje uporabo neustrezne opreme. Za zagotavljanje pravilne pozicije gravure je potrebno natančno definirati referenčno točko v koordinatnem sistemu gravirne postaje.



Slika 5: Gravirni robot

### 3.8 Izpihovalna komora

Pred odlaganjem na izhodni trak se ulitek po potrebi dodatno obdela v izpihovalni komori. Z usmerjenimi zračnimi šobami se odstrani preostala voda iz lukenj in notranjih kanalov, kar izboljša kakovost končnega izdelka.



Slika 6: Izpihivalna komora

### 3.9 Izhodni transportni trak

Izhodni transportni trak je namenjen odlaganju in transportu končnih ulitkov iz celice. Opremljen je z varnostnimi elementi in senzoriko za zaznavanje napolnjenosti. Delovanje traku je avtomatizirano, vendar je za nemoteno obratovanje potrebno redno praznjenje. V primeru zapolnitve sistem samodejno zaustavi delovanje celice, s čimer preprečimo zastoje in poškodbe.

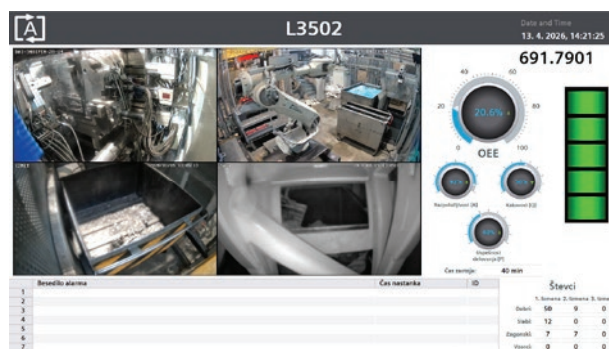


Slika 7: Izhodni transportni trak

#### – Vizualizacija in nadzor procesa

Nad izhodnim transportnim trakom je nameščen zaslon, ki operaterju omogoča spremljanje delovanja celice v realnem času. Na zaslonu so prikazani pogledi štirih kamer, nameščenih na ključnih mestih procesa. Kamere omogočajo nadzor nad stanjem tlačnega livarskega stroja, spremljanje delovanje robotske celice med posameznimi operacijami, nadzor napolnjenosti izmetnih zabojnikov ter spremljanje območja dodatne mehanske obdelave.

Poleg vizualnega nadzora so na zaslonu prikazani tudi ključni proizvodni kazalniki, kot so *OEE* («Overall Equipment Effectiveness») ter drugi pomembni podatki o stanju in učinkovitosti sistema. Takšna zasnova operaterju omogoča boljši pregled nad procesom ter hitrejše in učinkovitejše ukrepanje v primeru odstopanj.



Slika 8: Nadzorni zaslon za spremljanje delovanje procesa

## 4 SKLEP

Z implementacijo avtomatizirane robotske celice za tlačno litje smo dosegli pomemben napredek na področju optimizacije proizvodnega procesa. Integracija robotskega sistema in posameznih tehnoloških postaj omogoča zanesljivo, ponovljivo in učinkovito obdelavo ulitkov skozi celoten proces – od odvzema iz tlačnega stroja do končnega izdelka.

Rešitev bistveno zmanjšuje potrebo po ročnih posegih, povečuje produktivnost ter izboljšuje sledljivost in kakovost izdelkov. Dodatno integrirani nadzorni in vizualizacijski sistemi operaterju omogočajo boljši pregled nad procesom ter hitro odzivanje na morebitna odstopanja.

Kot dodatna nadgradnja sistema je predvidena integracija raziglevalnega stroja, ki bo omogočal avtomatizirano brušenje ulitkov na izbranih območjih glede na tip izdelka. S tem bo avtomatizirana tudi operacija, ki se trenutno izvaja ročno, kar bo dodatno zmanjšalo potrebo po ročnem delu ter še povečalo stopnjo avtomatizacije livarske celice.

Predstavljena rešitev predstavlja primer prakse uvajanja avtomatizacije v livarski industriji ter odpira možnosti za nadaljnje nadgradnje in optimizacijo proizvodnih procesov.

## AVR - AUTONOMOUS VERSATILE ROBOTICS

**Tomaž LASIČ**  
ABB d.o.o.

### IZVLEČEK

*Vizija razvoja v smeri avtonomne, vsestransko prilagodljive robotike - AVR. ABB roboti bodo razumeli okolje in načrtovali samostojno. Opravljali bodo več nalog, na več mestih, hitreje, varneje in pametneje. Z njimi bomo sodelovali naravno, tako kot sodelujemo drug z drugim.*

**ABB**



## AVR™ AUTONOMOUS VERSATILE ROBOTICS

Tomaž Lasič, Robert Logar ABB Robotics d.o.o.

© 2020 ABB. All rights reserved.

# AVR™ Autonomous Versatile Robotics

Avtonomna Vsestranska Robotika  
Nova generacija ABB ROBOTOV

Versatility → Autonomy → Generative AI

ABB Roboti bodo razumeli okolje in načrtovali samostojno.

Opravljalni bodo več nalog, na več mestih, hitreje, varneje in pametneje.



Z njimi bomo sodelovali naravno – tako, kot sodelujemo človek s človekom.



## Šest osnovnih blokov v smeri AVR™ Autonomous Versatile Robotics

SPOSOBNOSTI

- 01 Robot-človek interakcija
- 02 Zaznavanje
- 03 Inteligenca, Avtonomno sklepanje
- 04 Krmiljenje gibanja, varnost
- 05 Navigacija
- 06 Spretnost, prijetanje



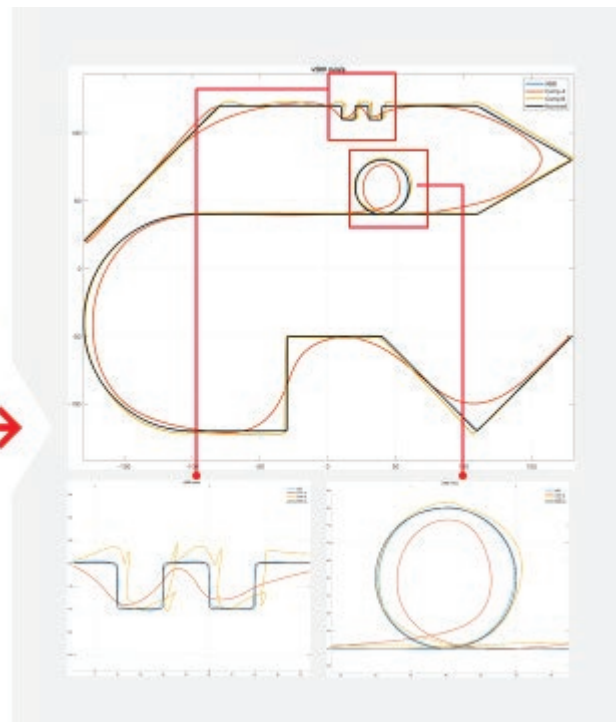
## Zmogljivost brez dodatnih nastavitvev



**Produktivnost - Kvaliteta**  
Izboljšane zmogljivosti brez dodatnih inženirskih naporov



**25%**  
Višja produktivnost za pick and place\*



© 2026 ABB. All rights reserved.

Stran 5

\*Source: RB T720 vs. RB T600

## PoWa – Nova družina robotov

Družina sodelujočih robotov za visoke hitrosti v industrijski uporabi

Najhitrejši sodelujoči robot 5 m/s

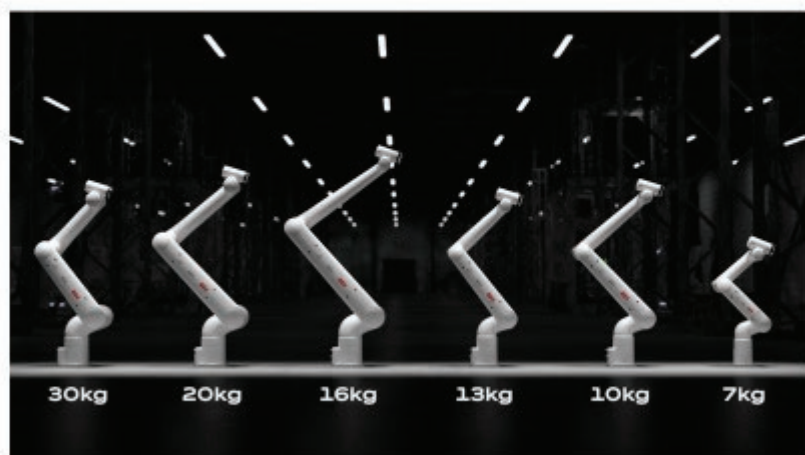
Signalni in fieldbus kabli znotraj robotske roke

IP65 (roka) / IP 67(zapestje) zaščita

ABB kvaliteta

Dodatna obremenitev na robotski roki

Natančnost pot 32% višja kot običajni COBOTi



© 2026 ABB. All rights reserved.

Stran 6

**ABB**

## OmniCore - EyeMotion

Enostavno zlaganje funkcionalnih blokov od vida do vodenja brez kolizij

**SIMPLICITY**  
Simple web interface through drag and drop functional blocks

Up to **90%** reduction in commission time

**INTELLIGENCE**  
Combined with unique automatic, collision-free path planning online

Up to **50%** reduction in cycle time

Supports **ALL** OmniCore-powered **ROBOTS**

© 2025 ABB. All rights reserved. | Stran 2

**ABB**

The advertisement features three main panels. The left panel, titled 'SIMPLICITY', shows a web interface with drag-and-drop blocks and a flowchart leading to a '90% reduction in commission time'. The middle panel, titled 'INTELLIGENCE', shows a person at a computer with a '50% reduction in cycle time' claim. The right panel, titled 'Supports ALL OmniCore-powered ROBOTS', shows a circular collage of various ABB robot models. The ABB logo is in the bottom right corner.

## Visual SLAM - za AMR

Zaznavanje okolice in navigacija na osnovi uporabe umetne inteligence

THE BREAKTHROUGH FOR AMR SOLUTIONS: VISUAL SLAM AND AMR STUDIO

Visual SLAM creates a 3D map to detect and track natural features in the environment.

Visual SLAM creates a 3D map by using off-the-shelf cameras to detect and track natural features in the environment, enabling AMRs to locate their position and navigate without requiring additional infrastructure. Additionally, the map updates itself automatically whenever changes in the environment are detected, ensuring that the AMR remains accurate and efficient.

**ABB**

The advertisement shows a 3D visualization of a warehouse environment with an AMR in the center. The environment is filled with stacks of goods. A 3D map is overlaid on the scene, showing the layout and the AMR's path. The ABB logo is in the bottom right corner.

## DIGITALIZACIJA SODELOVALNIH APLIKACIJ VIJAČENJA V AGILNIH PROIZVODNJAH

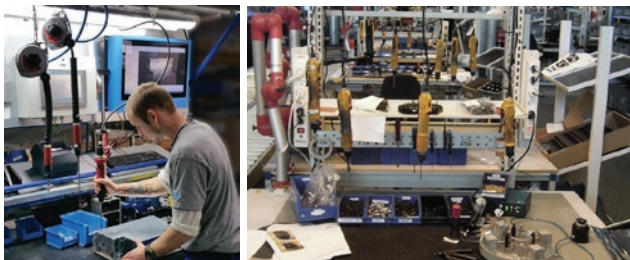
**Žiga GOSAR**  
ELVEZ, d.o.o.

### IZVLEČEK

*Projekt »Digitalization of collaborative Screwdriver Applications in Agile Productions« (Digi-SAAP) demonstrira agilno proizvodno okolje za vijačne aplikacije s sodelovalnimi roboti (kobot-i). Cilj projekta je razvoj sistema, ki omogoča hitro menjavo med nalogami z uporabo industrije 4.0. Avtomatizirano vijačenje zahteva natančno namestitve vsakega vijaka z ustreznim navorom, kar zagotavljamo s tehnologijo za zbiranje, zapisovanje in analizo podatkov v oblaku. V projektu smo razvili novo metodo učenja nalog vijačenja, ki je skrajšala čas menjave iz ur v nekaj minut. Na demonstracijskem mestu v podjetju ELVEZ d.o.o. smo preizkusili inovativno orodje CS-30 podjetja Spin Robotics, vključno s podatkovno integracijo preko Trendlog.io. Projekt se je pričel na ravni TRL 5 in končal na TRL 8. Cilj je povečati učinkovitost, zmanjšati človeške napore ter omogočiti digitalno in agilno proizvodnjo v evropski industriji.*

### 1 UVOD

Vijačenje predstavlja enega ključnih procesov v sodobni industrijski montaži, vendar je še vedno pogosto izvedeno ročno, kar povzroča nizko učinkovitost, večjo možnost napak ter obremenitve operaterjev. V avtomobilski industriji posamezen izdelek vsebuje tudi več kot 3.000 vijakov, pri čemer lahko vijačenje predstavlja do 40–50 % celotnega časa montaže. Zaradi trendov, kot so individualizacija izdelkov, manjše serije in zahteve po dolgoročni dobavi rezervnih delov, industrija prehaja na agilne in fleksibilne proizvodne sisteme [1].



Slika 1: Primer tipične montažne postaje

Tržni podatki dodatno potrjujejo velik potencial avtomatizacije vijačnih procesov. Po podatkih IFR je bilo leta 2017 prodanih 48.600 robotov za montažne naloge (13 % vseh robotov), od tega 73 % (35.500) za aplikacije spajanja, kot

so vijačenje, kovičenje in stiskanje. Segment je beležil 51 % rast glede na leto 2016 [2]. Trg sodelovalnih robotov (kobotov) je najhitreje rastoč segment robotike, z napovedano letno rastjo do 60 % do leta 2025. Do leta 2027 naj bi koboti predstavljali približno 30 % vseh prodanih robotov, pri čemer se ocenjuje, da bo 20 % uporabljenih v montažnih aplikacijah [3].

Za leto 2030 se ocenjuje, da bo približno 75 % kobotov v montaži uporabljenih za aplikacije spajanja, od tega 65 % za vijačenje. To predstavlja naslovljiv trg približno 35.000 kobotov za vijačne aplikacije. Takšni trendi kažejo na velik potencial za uvedbo digitaliziranih in avtomatiziranih rešitev, ki omogočajo večjo produktivnost, kakovost in prilagodljivost proizvodnje [2, 3].

Projekt »Digitalization of collaborative Screwdriver Applications in Agile Productions« (Digi-SAAP) naslavlja te izzive z razvojem digitaliziranega sistema za vijačenje s sodelovalnimi roboti, ki vključuje napredne metode učenja nalog, senzoriko sile in navora ter integracijo z oblaknimi platformami za analizo podatkov. Cilj je omogočiti hitro prilagoditev proizvodnje, izboljšati sledljivost procesa ter postaviti temelje za uvedbo pametnih proizvodnih sistemov v okviru Industrije 4.0 [4].

## 2 OPIS PRIPRAVE IN POSTOPKA DELA

Sistem združuje strojno in programsko opremo za doseganje agilnega, digitaliziranega in zanesljivega procesa vijachenja v industrijskem okolju. Rešitev temelji na tesni integraciji sodelovalnega robota, inteligentnega vijachnega orodja ter podatkovne infrastrukture Industrije 4.0, ki omogoča spremljanje in optimizacijo procesa v realnem času.

### 2.1 Strojna oprema

Osrednji element sistema je inteligentno vijachno orodje CS-30, ki je nameščeno na sodelovalnega robota (npr. UR5e). Orodje omogoča natančno vijachenje v območju 0,5–3 Nm in podpira vijake velikosti M1–M6. Ključna funkcionalnost vključuje nadzor navora in kota, kar zagotavlja ponovljivost in kakovost vsakega vijachnega spoja. Integriran senzor sile in navora omogoča zaznavanje kontakta s površino ter samodejno poravnavo orodja glede na os vijaka, kar zmanjšuje tveganje za poškodbe navojev [5].



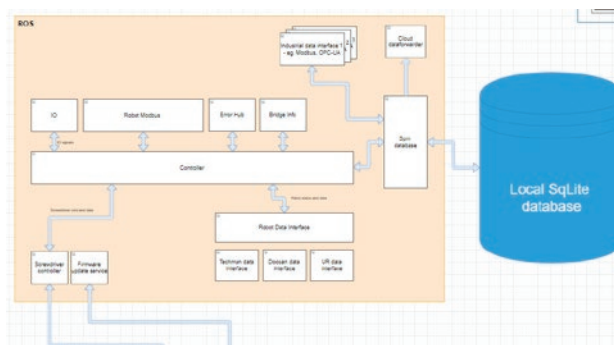
Slika 2: Vijačno orodje CS-30

Sistem vključuje tudi namensko krmilno enoto (Spin Controller Box), ki temelji na vgrajeni računalniški platformi. Ta enota upravlja komunikacijo med robotom, orodjem in zunanjimi sistemi. Podpira industrijske komunikacijske protokole, kot sta Modbus TCP in REST API, kar omogoča enostavno integracijo

v obstoječe proizvodne sisteme. Dodatno je sistem povezan z napravo Trendlog.io za zajem podatkov, ki omogoča prenos procesnih podatkov v oblak za nadaljnjo analizo. Celotna strojna zasnova omogoča hitro namestitvev (plug-and-produce) ter varno sodelovanje med človekom in robotom brez potrebe po dodatnih zaščitnih sistemih [6].

### 2.2 Programska oprema

Programska arhitektura sistema temelji na porazdeljenem pristopu, kjer večina logike deluje na krmilni enoti, medtem ko robot uporablja namensko aplikacijo (npr. URcap ali Techman komponento) kot uporabniški vmesnik. Ključni modul predstavlja nadzorni algoritem za vijachenje, ki upravlja celoten proces – od pozicioniranja do končnega privijanja.



Slika 3: Kratak pregled arhitekture programske opreme na krmilniku SpinBridge

Pomemben prispevek sistema je razvoj naprednih funkcij teach-in, ki omogočajo hitro učenje novih pozicij. Sistem uporablja podatke senzorjev sile za samodejno centriranje nad izvrtino in določitev optimalne orientacije orodja. S tem se čas programiranja skrajša iz ur na minute, kar bistveno izboljša fleksibilnost proizvodnje [7].

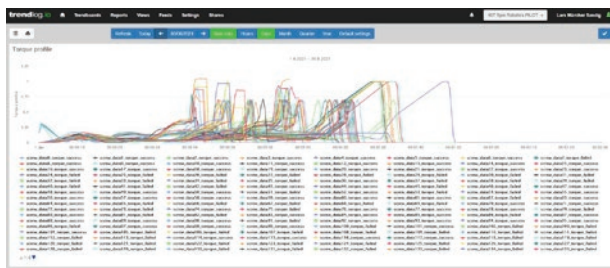
Na ravni Industrije 4.0 je implementirana povezava z oblačno platformo Trendlog.io, ki omogoča zajem, shranjevanje in analizo podatkov o procesu (navor, kot, časovni potek). Podatki se prenašajo preko REST API v JSON formatu, kar omogoča nadaljnjo obdelavo z metodami strojnega učenja za zaznavanje anomalij in optimizacijo procesa [8].

### 3 METODOLOGIJA

Metodologija dela v projektu Digi-SAAP temelji na iterativnem razvojnem pristopu, ki združuje razvoj strojne in programske opreme, validacijo v realnem industrijskem okolju ter integracijo tehnologij Industrije 4.0. Cilj metodologije je bil zagotoviti robustno, prilagodljivo in enostavno uporabno rešitev za avtomatizirano vijačenje v pogojih agilne proizvodnje.

V prvi fazi je bila izvedena analiza zahtev industrijskega okolja, predvsem na podlagi potreb podjetja ELVEZ d.o.o. Opredeljeni so bili ključni izzivi: dolgi časi programiranja, nizka fleksibilnost pri menjavi izdelkov ter pomanjkanje digitalnega nadzora nad kakovostjo vijačenja [4]. Na podlagi teh zahtev je bila zasnovana celotna arhitektura sistema, ki vključuje sodelovalnega robota, vijačno orodje in podatkovno infrastrukturo.

V drugi fazi je potekal razvoj in implementacija naprednih teach-in metod. Metodologija temelji na uporabi sensorike sile in navora, ki omogoča interaktivno učenje pozicij. Robot med učenjem zazna kontakt s površino, izvede večtočkovno zaznavanje robov izvrtine ter izračuna središče in orientacijo vijaka. Ta pristop bistveno zmanjša odvisnost od natančnega mehanskega pozicioniranja in omogoča hitro prilagoditev na nove produkte. Razvita rešitev je bila iterativno testirana in optimizirana z uporabo eksperimentalnih meritev natančnosti in časa učenja [2].



Slika 4: Podatkovna baza profilov vijačenja

Tretja faza metodologije vključuje vzpostavitev digitalne podatkovne verige. Vsi procesni podatki (navor, kot, časovni potek) se zajemajo na krmilni enoti in prenašajo v oblako platformo preko standardiziranih protokolov

(REST API, MQTT). Podatki so strukturirani v JSON obliki in shranjeni za nadaljnjo analizo. V tej fazi je bila razvita tudi metoda za pripravo podatkovnih nizov za strojno učenje, vključno s filtriranjem in normalizacijo signalov [10].

#### Random Forest

```
In [74]: M train_score_RF = pipeline_RandomForest.score(X_train, y_train)
print('Train score of trained model : {train_score_RF*100}')

validation_score_RF = pipeline_RandomForest.score(X_valid, y_valid)
print('Validation score of trained model: {validation_score_RF*100}')

test_score_RF = pipeline_RandomForest.score(X_test, y_test)
print('Test score of trained model : {test_score_RF*100}')

Train score of trained model : 97.10144927536231
Validation score of trained model: 100.0
Test score of trained model : 93.33333333333333
```

Slika 5: Predobdelava in delitev podatkovnih nizov vijačenja

V četrti fazi je bila izvedena analiza podatkov z uporabo algoritmov strojnega učenja. Uporabljen je bil klasifikacijski model (Random Forest), ki omogoča zaznavanje odstopanj v poteku navora med vijačenjem. Podatki so bili predobdelani tako, da so bili odstranjeni profili z manj kot 65 ali več kot 400 točkami, pri čemer je bilo iz skupno 113 podatkovnih nizov uporabljenih 99, ki so bili nato razdeljeni na učne, validacijske in testne množice. Model je bil treniran na eksperimentalnih podatkih in validiran z ločenim testnim naborom, kar je omogočilo oceno natančnosti in robustnosti sistema [11]. Rezultat testa kažejo, da lahko že z majhnim naborom podatkov izvedemo natančno klasifikacijo.



Slika 6: Postavitev demonstratorja Digi-SAAP

Končna faza metodologije je bila demonstracija sistema v realnem okolju. Demonstracija je bila izvedena v kontroliranem okolju, vendar na realnem industrijskem primeru. Sistem je dosegel visoko stopnjo tehnološke zrelosti (TRL 8), kar potrjuje njegovo pripravljenost za industrijsko uporabo.

### 3 REZULTATI

Rezultati projekta Digi-SAAP potrjujejo uspešno implementacijo celovitega sistema za digitalizirano in agilno vijačenje s sodelovalnimi roboti. Razvita rešitev je omogočila bistveno skrajšanje časa programiranja vijačnih operacij, kjer se je čas učenja novih nalog zmanjšal iz več ur na nekaj minut, kar predstavlja ključno izboljšavo za proizvodne sisteme z majhnimi serijami in pogostimi menjavami produktov.

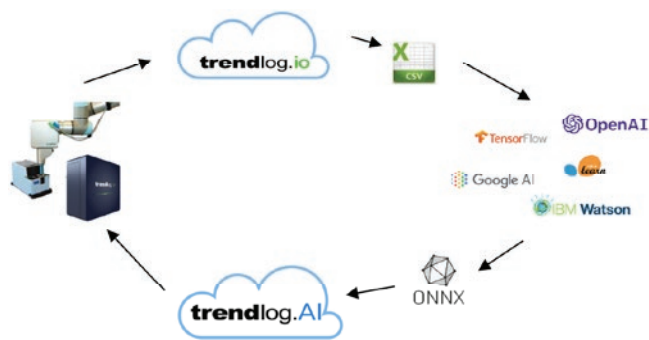
Sistem CS-30 je uspešno demonstriral stabilno delovanje v območju navora 0,5–3 Nm ter zanesljivo izvajanje vijačenja za vijake M1–M6. Integrirana funkcija nadzora navora in kota je omogočila dosledno zaznavanje kakovosti spojev ter zmanjšanje napak pri vijačenju. Uporaba senzorične sile je izboljšala natančnost pozicioniranja in zmanjšala potrebo po ročnih korekcijah operaterja.

Na področju digitalizacije je bila uspešno vzpostavljena povezava med krmilnim sistemom in oblachno platformo Trendlog.io. Podatki o navoru, kotu in časovnem poteku vijačenja so bili zajeti, shranjeni in vizualizirani v realnem času. Implementirani model strojnega učenja (Random Forest) je omogočil osnovno zaznavanje anomalij v vijačnih profilih, kar potrjuje potencial za nadaljnji razvoj sistemov napovednega vzdrževanja in avtomatske kontrole kakovosti.

Demonstracija na industrijskem primeru v podjetju ELVEZ d.o.o. je potrdila robustnost sistema v realnih pogojih proizvodnje ter njegovo primernost za uporabo v agilnih proizvodnih okoljih. Sistem je dosegel tehnološko zrelost TRL 8, kar pomeni pripravljenost za industrijsko implementacijo..

### 4 ZAKLJUČEK

Projekt Digi-SAAP je uspešno dokazal, da je mogoče z integracijo sodelovalnih robotov, pametnih vijačnih orodij in Industrije 4.0 bistveno izboljšati fleksibilnost in učinkovitost vijačnih procesov. Rešitev omogoča hitre menjave produktov, višjo kakovost in digitalno sledljivost proizvodnje.



Slika 7: Prihodnji razvoj AI/ML modela in distribucija (ONNX, edge, cloud)

V prihodnje je predviden nadaljnji razvoj umetne inteligence za natančnejše zaznavanje napak ter širitev podatkovne baze vijačnih profilov. Prav tako je cilj razširitev sistema na dodatne robotske platforme in optimizacija cloud-to-edge arhitekture za še hitrejšo obdelavo podatkov v realnem času.

Viri:

- [1] ElMaraghy, H.A. Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *Int J Flex Manuf Syst* 17, 261–276 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>
- [2] Future of Robotics Market - Analysis and Forecast to 2030, povezava: [Future of Robotics Size, Share, Industry, 2025 To 2030](#), dostopno: 13.4.2026
- [3] Interact Analysis: Collaborative Robot Market Report, 2020. Povezava: [IFR presents World Robotics Report 2020 - International Federation of Robotics](#), dostopno: 13.4.2026
- [4] TRINITY projekt: Digi-SAAP končno poročilo, 2021.
- [5] Spin Robotics: Tehnična dokumentacija CS-30, 2021.
- [6] TRINITY projekt: Digi-SAAP končno poročilo, 2021.
- [7] Universal Robots: URcap Development Guide, 2020.
- [8] Trendlog.io: Cloud API dokumentacija, 2021.
- [9] Siciliano, B., Khatib, O.: Springer Handbook of Robotics, Springer, 2016.
- [10] Trendlog.io: Dokumentacija podatkovnih tokov, 2021.
- [11] Pedregosa, F. et al.: Scikit-learn: Machine Learning in Python, JMLR, 2011

### Zahvala

Projekt Digi-SAAP je prejel sredstva za izvedbo projekta TRINITY iz programa Evropske unije za raziskave in inovacije Obzorje 2020 v okviru GA št. 825196.

## KAKO AGV-JI IN AMR-JI OPTIMIZIRAJO NOTRANJO LOGISTIKO PRI ŠKODA AUTO, TOYOTI IN DRUGOD

**Zdeněk ŠIBRAVA, Filip POSPÍŠIL**  
ServisControl Ltd.

### IZVLEČEK

V predstavitvi bomo prikazali možnosti avtomatizacije ravnanja z materialom v realnih proizvodnih okoljih z uporabo AGV in AMR rešitev, razvitih pri češkem proizvajalcu ServisControl. Poudarek bo na integraciji teh sistemov v obstoječe proizvodne procese ter na njihovem vplivu na učinkovitost, sledljivost in zanesljivost materialnih tokov.

Osrednji del predstavitve bodo konkretni primeri implementacij iz vodilnih avtomobilskih podjetij, kot sta ŠKODA AUTO in Toyota, kjer bodo predstavljeni scenariji uporabe ter način vključitve sistemov v vsakodnevno operativno delovanje.

Dodatno bodo predstavljeni izbrani projekti iz drugih panog, vključno z bolnišničnim okoljem, ki ponazarjajo prilagodljivost rešitev v različnih aplikativnih kontekstih ter zahtevah glede varnosti, higiene in logističnih procesov.

Cilj predstavitve je podati tehnično utemeljene vpogleda na podlagi dejanskih implementacij ter omogočiti razumevanje, kako je mogoče podobne rešitve učinkovito prenesti v različna industrijska okolja.

## Possible applications for AGV/AMR



### Palet transport

- Transportation of pallets of various sizes
- Mainly EUR and UK pallets but also others



### Towing transport

- Transporting large quantities of material over long distances
- Operator is required for loading and unloading
- Not for direct transport to the production line



### Transportation of boxes and trolleys

- The necessary loading and unloading from different sides
- Equally spread material
- Solution for boxes and trolley with wheels of different sizes



## RoboSherpa II

- Bidirectional or omnidirectional movement
  - Option to integrate a turntable
  - Differential drive
- Load capacity up to 500 kg
- Low ground clearance (220 mm)
- Wide range of customized superstructures



## RoboMec I / II / IV

- Omni-directional platform in real-time movement
- Maximum load capacity up to 1,500 kgs
- Usage of 8" , 10" or 12" Mecanum wheels
- Precise docking
- Wide range of customized superstructures



## RoboMec III 6x6

- Omni-directional platform in real-time movement
- Maximum load capacity up to 4 500 kg
- Usage of 15" Mecanum wheels
- Precise docking
- Option to modify to a 4x4 version



## RoboCaddy II

- Bidirectional movement
  - Differential drive
- Maximum load capacity up to 500 kg
- Control panel in an ergonomic position



## RoboCaddy III

- Omni-directional platform in real-time movement
- Maximum load capacity up to 750 kg
- Low ground clearance (220 mm)
- Option of extended version with extended loading area
- User interface via HMI panel for interaction with the operator



## RoboTruck

- Bidirectional movement
  - Differential drive
- Option for automatic coupling and uncoupling of the trailer
- One-way traffic only with locked trolleys
- Towing capacity up to 3,000 kg



## PRAKTIČNI PRIMJERI ISPRAVNOG ODABIRA 3D MJERNE TEHNOLOGIJE ZA SUVREMENE PROIZVODNE PROCESE

**Luka KURTALJ, Josip KOS, Maximilian HERCIGONJA, Tomislav HERCIGONJA**  
TOPOMATIKA d.o.o.

### SAŽETAK

*Odabir tehnologije i strategije 3D mjerenja ključan je korak u kontroli kvalitete proizvoda, a suvremeni proizvodni procesi zahtijevaju sve brža i sveobuhvatnija mjerenja. U tom kontekstu, suvremene napredne optičke 3D tehnologije mjerenja i industrijska računalna tomografija (CT) ističu se kao najbolji izbor.*

*S više od dva desetljeća iskustva u industrijskom 3D mjeriteljstvu, tvrtka TOPOMATIKA d.o.o. pruža čvrste temelje za pouzdan odabir i primjenu ovih tehnologija, omogućavajući visokokvalitetnu kontrolu i pouzdane rezultate u različitim proizvodnim procesima.*

*Ovaj rad donosi pregled praktičnih primjera za pravilan odabir tehnologije 3D mjernih sustava, uz karakteristične primjere iz proizvodnje polimernih proizvoda, lijevanja metala i automobilske industrije, posebno u segmentu vozila nove generacije (eng. NEV – New Energy Vehicles).*

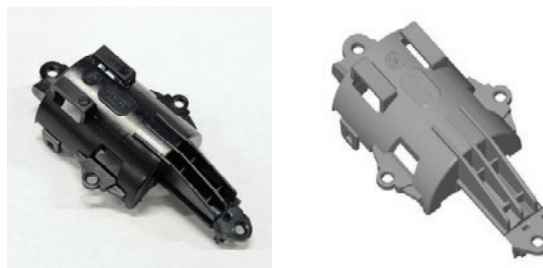
*Kroz rad su prikazani primjeri s rezultatima 3D mjerenja na podacima dobivenim pomoću sustava za optička 3D mjerenja ATOS i T-SCAN hawk 2, te industrijskog CT sustava ZEISS METROTOM. Obrada podataka i izrada mjernih izvješća provedena je u softverskom paketu ZEISS INSPECT, koji podržava sve navedene mjerne tehnologije.*

### 1 UVOD

Pravilnim odabirom 3D mjerne tehnologije moguće je značajno ubrzati razvoj novih proizvoda, optimizirati proizvodne procese te smanjiti rizik škartnih proizvoda.

Na početku je važno napomenuti da su sustavi za optička 3D mjerenja kao i industrijski CT sustavi zapravo industrijski 3D digitalizatori (ili 3D skeneri) kojima se prvo precizno 3D digitalizira geometrija proizvoda i digitalno zapisuje u računalu. Na taj način se na računalu dobije digitalna kopija ili digitalni blizanac stvarnog predmeta koji se koristi za daljnje radne zadatke.

Digitalni blizanac je na računalu zapisan kao poligonalna mreža trokuta koja detaljno opisuje oblik 3D digitaliziranog predmeta, a najčešće se digitalno zapisuje u .STL formatu.



Slika 1: Stvarni proizvod i njegov digitalni blizanac

Karakteristike poligonalne mreže trokuta u .STL formatu:

- univerzalno je prepoznata stoga je pouzdan izbor za razmjenu digitalnih blizanaca ili 3D modela raznih proizvoda
- gotovo svi korisnički programi (kao što su GrabCAD, MakerBot CloudPrint™, Cura, PrusaSlicer i dr.) koriste .STL datoteke za pripremu programa za 3D ispis
- iako je .STL odličan za 3D ispis jednostavnih i složenih oblika, ima ograničene mogućnosti u drugim područjima kao što je to boja, tekstura
- STL geometrija nije parametarska tako da nije moguće vršiti značajne– izmjene 3D modela

U usporedbi sa konvencionalnim metodama, 3D digitalizator bilježi cijelu površinu objekta, a ne samo pojedinačne točke poput taktilnih mjernih tehnologija.

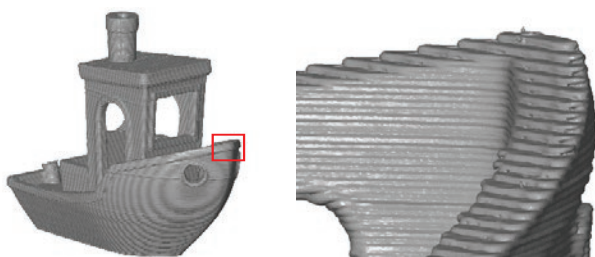
Općenito, budući da svaki postupak 3D digitalizacije rezultira digitalnim zapisom moguće ga je arhivirati za potrebe osiguranja i praćenja kvalitete.

Postupke 3D digitalizacije (3D skeniranja) najčešće koriste inženjeri, tehničari i dizajneri raznih struka za različite namjene, od kojih je to najčešće za:

- dimenzionalnu analizu – vrlo često u procesima kontrole kvalitete kada je potrebno usporediti geometriju stvarnog proizvoda i digitalnog 3D modela prema kojem je taj proizvod izrađen (referentna poligonalna mreža ili CAD model)
- povratno inženjerstvo – za digitalnu rekonstrukciju predmeta za koji ne postoji nikakva dokumentacija (niti digitalna niti papirnata)
- digitalnu proizvodnju – za direktan 3D ispis na temelju rezultata dobivenih 3D skeniranjem

Budući da ovaj rad donosi pregled i smjernice za pravilan odabir tehnologije 3D mjernih sustava za 3D mjerenje (dimenzionalnu analizu) potrebno je na raspolaganju imati certificirani mjeriteljski programski paket poput ZEISS INSPECT 3D programskog paketa.

3D digitalizatori korišteni za ovaj rad sa certificiranim mjeriteljskim programskim paketom ZEISS INSPECT svaki za sebe tvori 3D mjerni sustav koji garantira pouzdanost i kod najzahtjevnijih mjeriteljskih zadataka suvremene proizvodnje.



Slika 2: Rezultat 3D digitalizacije 3D ispisanog predmeta – kompletna poligonalna mreža trokuta (lijevo) i detalj sloja 3D ispisa od 0,2 mm (desno).

## 2 OPTIČKI 3D DIGITALIZATORI (3D SKENERI)

Na tržištu su danas dostupni 3D digitalizatori različite kvalitete i različitog cjenovnog ranga.

Kroz ovaj rad dan je pregled i smjernice za pravila odabir dva različita optička 3D digitalizatora mjeriteljskog ranga:

- ATOS – 3D digitalizator koji koristi strukturirano svjetlo za 3D digitalizaciju (slika 2)
- T-SCAN hawk 2 - koji koristi laserske zrake za 3D digitalizaciju (slika 3)



Slika 3: ATOS 3D digitalizator



Slika 4: T-SCAN hawk 2 3D digitalizator

U samom postupku 3D digitalizacije digitalizira se reflektirana svjetlost s površine objekta 3D skeniranja.

Prednosti optičkih 3D digitalizatora uključuju:

- mogućnost brzog snimanja površine, a time i cijelog proizvoda
- visoku razlučivost kada se traže sitni detalji površinskih struktura
- mobilnost sustava, 3D digitalizatori uglavnom lako prenosivi i prikladni za mjerenja u laboratoriju ili na terenu

Ograničenja uključuju:

- osjetljivost na sjajne, prozirne ili tamne površine, koje mogu ometati refleksiju svjetla
- kad je potrebno 3D mjeriti sjajne ili prozirne površine potrebno ih je matirati sprejom i obaviti 3D digitalizaciju zadane površine
- nemogućnost digitalizacije unutarnje i optički nevidljive geometrije objekta

## 2.1. ATOS – optički 3D digitalizator

ATOS je optički 3D digitalizator ili 3D skener je zasnovan na principu triangulacije, a dolazi s preciznošću mjeriteljskog ranga i kod najzahtjevnijih mjeriteljskih zadataka. Na mjerni objekt vrši projekciju uzoraka paralelnih linija i snima ih pomoću dvije digitalne kamere. Za svaki pojedini piksel u kamerama, 3D skener visokom preciznošću određuje trodimenzionalne koordinate pripadajuće točke sa digitalizirane stvarne površine.

Za rad sa ATOS 3D skenerom potreban je industrijski stalak ili robot sa kojeg se 3D digitalizira stvarni objekt. Ovisno o veličini, količini i zahtjevima radnog zadatka korisnici će odabrati konfiguraciju sa stalkom (Figure 5) ili robotom (ZEISS ScanBox robotizirana ćelija, Figure 6).



Slika 5: ATOS 3D skener na industrijskom stalku

ATOS 3D skener upotrebljava se za:

- precizno 3D mjerenje u postupcima kontrole kvalitete geometrijski zahtjevnih proizvoda kao što su alati za injekcijsko prešanje ili lijevanje metala i pripadajućih proizvoda
- za detaljnu analizu dimenzija proizvoda u industrijskoj proizvodnji
- za detaljnu analizu tolerancija oblika i položaja proizvoda u industrijskoj proizvodnji

## 2.2. Primjeri upotrebe ATOS 3D mjernog sustava

Optički 3D mjerni sustavi ATOS, danas su standardna 3D mjeriteljska rješenja u industrijskoj proizvodnji polimera i lijevanja metala. Njihova napredna tehnologija omogućava cjelovitu, beskontaktnu i brzu kontrolu geometrije proizvoda kroz cijeli proizvodni ciklus - od razvoja i alata, izrade prototipa, do serijske proizvodnje. Primjeri tipičnog plastičnog i metalnog proizvoda za 3D mjerenje ATOS sustavom:



Slika 6: 3D digitalizacija polimera i odljevka

3D mjerenja provedena s ATOS 3D digitalizatorima precizna su i brza, što omogućuje sveobuhvatnu geometrijsku analizu u pojedinim fazama proizvodnog procesa kod:

- Verifikacije CNC izrade alata i kalupa
- Kontrole geometrije jezgri, elektroda i umetaka alata ili kalupa
- Kontrole geometrije modalnih ploča
- 3D mjerenja odljevaka
- 3D mjerenja strojno obrađenih proizvoda

Rezultati mjerenja lako su čitljivi i najčešće prikazani grafički u mapi boja.

Prije implementacije ATOS sustava, proces otkrivanja izvora grešaka sa konvencionalnim pristupom bio je dugotrajan i neprecizan praćen kompliciranim izvještajima, najčešće u obliku tablica.

Kad govorimo o primjeni optičkih mjernih sustava u proizvodnji polimera, najčešće je za provjeru kvalitete izrade alata i samih polimernih proizvoda. U tipičnom projektu, uspoređuje se

rezultat 3D digitalizacije sa originalnom CAD geometrijom i provjerava postoje li na proizvodu zone s viškom ili manjkom materijala, odnosno je li tijekom hlađenja došlo do deformacije proizvoda.

Rezultati su jasno razumljivi prikazani u mapi boja po cijeloj površini ili po pojedinim presjecima. Tople boje predstavljaju višak materijala ili deformaciju u pozitivnom smjeru površine, a hladne boje manjak materijala ili u deformaciju u negativnom smjeru od gledane površine.



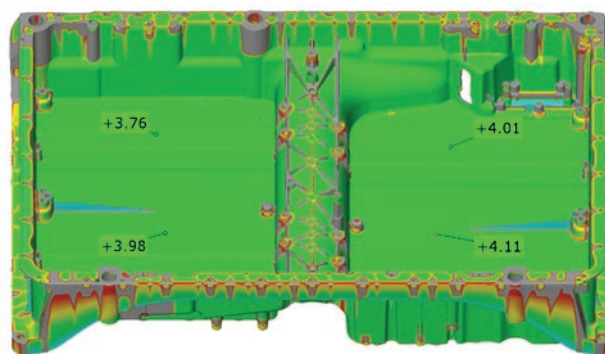
Slika 7: Postupak 3D digitalizacije

ATOS 3D digitalizatorima moguće je 3D digitalizirati proizvode veličine od nekoliko milimetara i naravno veće.

Izazovi kod proizvodnje lijevanjem metala slični su kao i kod polimera gdje se najčešće javlja deformacija odljevka zbog raznih utjecaja u proizvodnom procesu. No, odljevci uobičajeno nakon izrade se dodatno strojno obrađuju te je vrlo važno za taj postupak imati odljevak koji ima dovoljno materijala za strojnu obradu. Ukoliko odljevak nema dovoljno materijala, nema ga smisla strojno obrađivati.

U svrhu toga, u ljevaonicama se 3D digitalizatori upotrebljavaju upravo za mjerenje i provjeru odljevka prije strojne obrade. Svakako je potrebna i provjera dimenzija na kraju postupka proizvodnje, no međuprocena kontrola je u današnje vrijeme iznimno važna.

Detaljan, obostrani 3D sken omogućuje i analizu debljine stjenke.



Slika 8: Rezultati mjerenja odljevaka za razne namjene; provjera debljine stijenke odljevka

### 2.3. T-SCAN hawk 2 – optički 3D digitalizator

T-SCAN hawk 2 je prijenosni 3D skener nove generacije laganih laserskih 3D skenera, a dolazi s preciznošću mjeriteljskog ranga i izvrsnom lakoćom korištenja.

Ovaj 3D skener na mjerni objekt vrši projekciju laserskih linija koje se digitaliziraju pomoću dvije digitalne kamere. Za točke na laserskoj liniji koje 3D skener pomoću kamere vidi, 3D skener visokom preciznošću određuje trodimenzionalne koordinate pripadajućih točaka sa snimane površine.

T-SCAN hawk 2 je intuitivan za uporabu, a 3D skeniranje se vrši iz ruke operatera i lako se prilagođava pokretima ruke operatera.



Slika 9: 3D skeniranje za ZEISS T-SCAN hawk 2 ručnim 3D skenerom

Pomoću uređaja T-SCAN hawk 2, moguće je 3D skenirati predmete od različitih materijala i različitih površina, pružajući 3D mjerne rezultate visoke preciznosti i točnosti.

ZEISS T-SCAN hawk 2 upotrebljava se za:

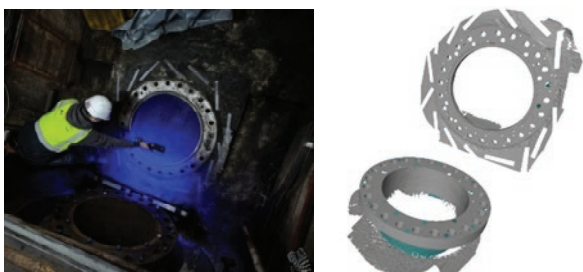
- 3D mjerenje i inspekciju u postupcima kontrole kvalitete kada je potrebna visoka mobilnost sustava
- brzu 3D digitalizaciju velikih objekata za potrebe povratnog inženjerstva, primjerice u održavanju
- analizu korozije i oštećenja u proizvodnji energije, nafte i plina (npr. hidroelektrane, termoelektrane, plinovodi i sl.)
- 3D skeniranje složenih oblika arhitektonske i muzejske građe

Budući da je ručni 3D digitalizator T-SCAN hawk 2 lako prenosiv i robusan sustav, 3D digitalizacija se bez problema provodi na mjestu gdje se mjerni objekt nalazi (npr. u industrijskim pogonima, hidroelektranama, halama itd.). Na taj se način objekt ne treba prenijeti u mjerni laboratorij, što je uobičajeno kod mnogih klasičnih metoda mjerenja.

Primjena 3D optičkih sustava kod rekonstrukcije turbina u elektranama.

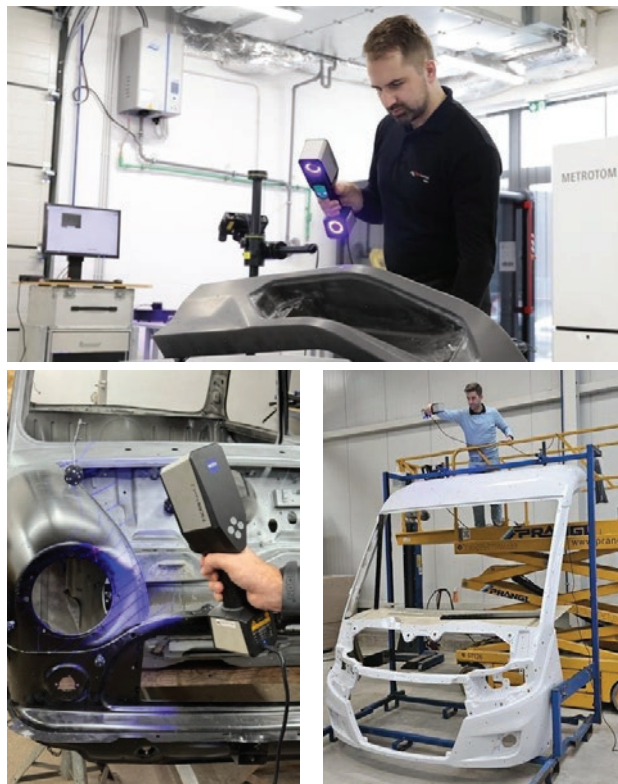
Do sada su uspješno digitalizirane peltonove, francisove i kaplanove turbine s ciljem određivanja njihovog stanja, kontrole geometrije, pripreme rekonstrukcije itd. Preciznim mjerenjem prirubnice postojeće turbine olakšana je izrada novih zamjenskih dijelova. Zbog nepravilnosti u radu nekoliko turbinskih agregata kontrolirane su i njihove kompletne geometrije.

Korištenje modernih 3D mjernih metoda mjerenja doprinijelo je znatnoj uštedi vremena kod planiranja i provođenja revitalizacija više turbina, izrade zamjenskih dijelova i sl.



Slika 10: 3D Digitalizacija (lijevo) i rezultat 3D digitalizacije prirubnice turbine u hidroelektrani (desno) sa T-SCAN hawk 2

Drugi primjeri upotrebe ručnog 3D digitalizatora su proizvodi također kompleksnih geometrija, no sa manje detalja kakvi se često 3D digitaliziraju sa ATOS 3D digitalizatorima.

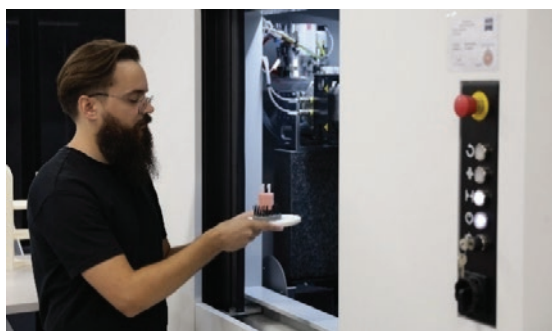


Slika 11: Primjeri tipičnih proizvoda za 3D digitalizaciju optičkim 3D digitalizatorima

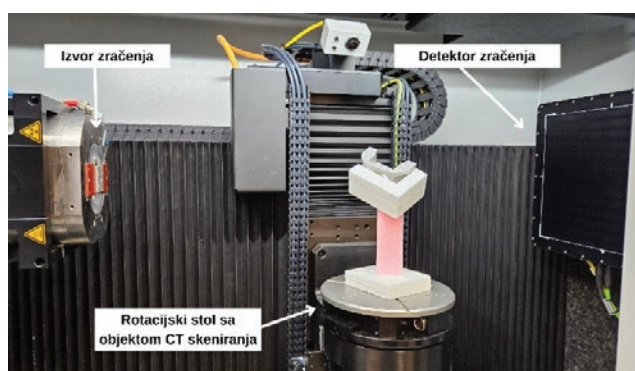
### 3 INDUSTRIJSKA RAČUNALNA TOMOGRAFIJA (CT)

Industrijska računalna tomografija, odnosno industrijski CT sustav koristi rendgensko zračenje kako bi digitalizirao geometriju objekta.

Objekt se prozračuje iz više kutova, a snimke (radiografske projekcije) se zatim softverski rekonstruiraju u trodimenzionalni prikaz, čime se dobiva prikaz unutarnje i vanjske geometrije objekta.



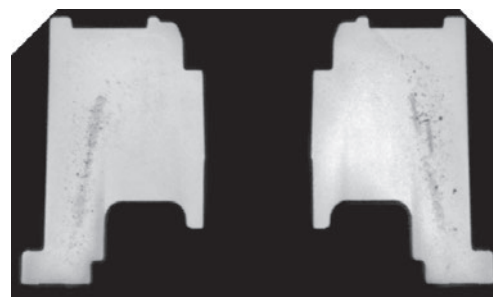
Slika 12: Postavljanje predmeta u radni prostor industrijskog CT sustava METROTOM 6 scout



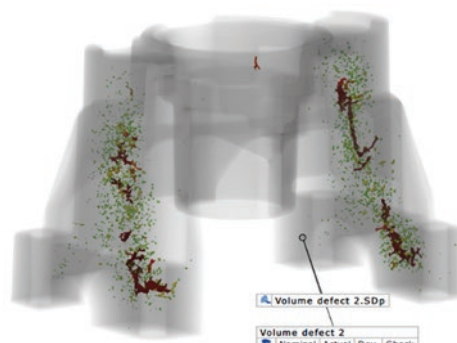
Slika 13: Predmet spreman za 3D digitalizaciju u industrijskom CT sustavu ZEISS METROTOM 6 scout

Prednosti tehnologije industrijske računalne tomografije (CT) uključuju:

- volumetrijsko snimanje koje omogućuje digitalizaciju i analizu unutarnje strukture objekta, uključujući šupljine, pukotine, poroznost ili uključine drugih materijala
- visoku preciznost koja je pogodna za kompleksne dijelove s unutarnjim geometrijama sa mogućnošću 3D digitalizacije s visokom rezolucijom
- analizu bez destrukcije koja omogućuje kontrolu kompleksnih objekata bez rezanja i sklopova bez rastavljanja
- 3D digitalizaciju jednog ili više proizvoda odjednom (ovisi o zahtijevanoj rezoluciji i dimenzijama proizvoda)



Slika 14: 2D prikaz poroziteta odljevka na zadanom presjeku



Slika 15: 3D prikaz poroziteta odljevka po cijelom unutrašnjem volumenu

Nedostaci tehnologije industrijske računalne tomografije (CT) uključuju:

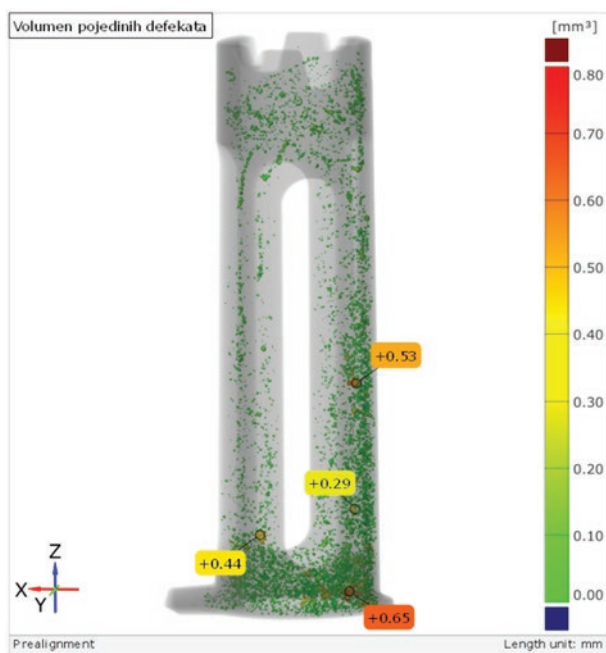
- visoka cijena opreme i održavanja
- ograničenja u veličini i gustoći materijala - gusti metalni dijelovi zahtijevaju snažnije izvore zračenja

### 3.1. Primjer analize poroznosti aluminijskih odljevaka

Kompjuterizirana tomografija idealan je alat za analizu poroznosti odljevaka u automobilske i avioindustriji. Konvencionalne metode analize uključuju rezanje uzoraka i evaluaciju mikroskopom, čime se uništava proizvod, što stvara dodatni nepotreban trošak. Nakon evaluacije CT tehnologijom, proizvod se može prodati ili ugraditi.

CT analiza poroznosti je kvantitativna metoda, odnosno moguće je automatski provjeriti odgovaraju li uzorci svim tolerancijama na poroznost koje su propisane za pojedini proizvod. Neki od uobičajenih pokazatelja su:

- Volumen pojedinih poroziteta
- Volumni udio poroziteta
- Udaljenost poroziteta do najbliže vanjske površine



Slika 16: Analiza poroznosti aluminijskih odljevaka

### 3.2. Digitalizacija i 3D mjerenje velikog broja malih plastičnih uzoraka

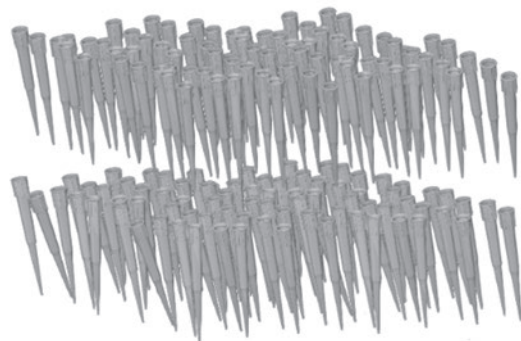
Potrošna plastika u medicini koristi se za izradu jednokratnih medicinskih proizvoda kao što su štrcaljke, vrhovi pipeta, autoinjektori i ambalaža.

Njena primjena omogućuje održavanje sterilnosti jer se svaki predmet koristi samo jednom, čime se značajno smanjuje rizik od infekcija. Osim toga, plastika doprinosi sigurnosti i higijeni u zdravstvenim ustanovama jer omogućuje čist i kontroliran kontakt s pacijentom ili uzorkom. Također, izrada plastičnih medicinskih proizvoda je relativno jeftina, što smanjuje troškove zdravstvene skrbi i omogućuje masovnu dostupnost takve opreme.

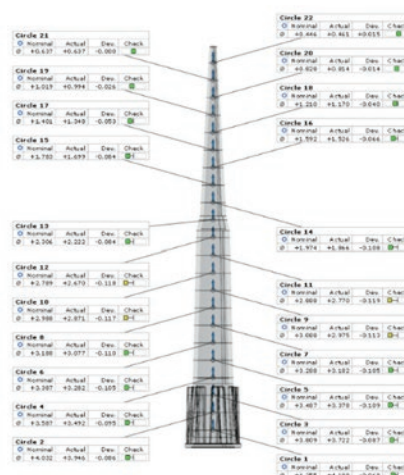
Ipak, kako bi se osigurala učinkovitost, pouzdanost i sigurnost potrošne medicinske plastike, potrebno je kontrolirati kvalitetu.

Korištenjem CT tehnologije moguće je jednim skenom digitalizirati veliki broj takvih uzoraka, a sam proces mjerenja potrebno je napraviti samo za jedan uzorak, dok se svi drugi automatski

rekalkuliraju, te se naposljetku dobije mjerni izvještaj za svaki uzorak.



Slika 17: Prikaz većeg broja 3D digitaliziranih pipeta odjednom



Slika 18: Dimenzionalna analiza vrha pipete

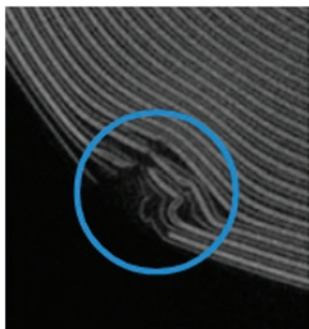
### 3.3. Primjer kontrole kvalitete baterijskih ćelija

Nadalje, kao što je navedeno u paragrafu 3. ovog rada, CT tehnologija idealna je za nerazornu analizu unutarnjih geometrija.

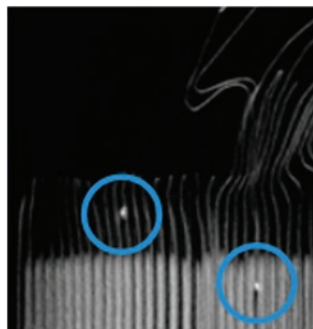
S obzirom na sve veći naglasak na korištenje električne energije u autoindustriji, što podrazumijeva korištenje baterijskih ćelija, ova tehnologija se sve više nameće kao jedna od glavnih za kontrolu kvalitete i razvoj baterijskih modula.

CT tehnologija omogućava:

- nerazornu kontrolu unutarnjih defekata kod baterijskih ćelija, kao na primjer detekciju tehničkih nečistoća, mikropukotina, delaminacija i deformacija unutar elektroda i separatora
- mjerenje oku nevidljivih geometrija, kao naprimjer izbočenje ili pomak elektroda (eng. „overhang“), čime se značajno doprinosi poboljšanju sigurnosti i performansi litij-ionskih ćelija u autoindustriji
- analizu zavara i spojeva na modulima bez rastavljanja sklopa, što uvelike pomaže kod donošenja zaključaka o kvaliteti istih
- praćenje degradacije unutrašnjosti ćelija nakon cikličkog punjenja i pražnjenja



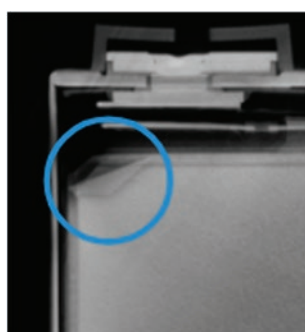
Slika 19: Pukotine i zračnosti u baterijskoj ćeliji



Slika 20: Metalne inkluzije u baterijskoj ćeliji



Slika 21: Analiza ostalih komponenti bat. ćelije



Slika 22: Oštećenje elektrode baterijske ćelije

Viri

- [1] Pilipović, A., Godec, A., Kos, J., 2024. Aditivna proizvodnja i 3D digitalizacija, Regionalni centar kompetentnosti u strukovnom obrazovanju u strojarstvu – Industrija 4.0 (SSŠ VG), Velika Gorica
- [2] Peričić, E., Perković, A., Kurtalj, L., Kos, J., Drvar, N., Hercigonja, T. 2025. Evaluation of battery cells and modules in the automotive industry using CT technology, IRT FORUM 2025, Portorož, Slovenija
- [3] Karič, D. 2021. Optično merjenje v serijski proizvodnji, IRT FORUM 2021, Portorož, Slovenija
- [4] Čatipović, N., Sršen, F., Vukšić, I., Jurčević, A., Kos, J., Kurtalj, L., Krolo, L., Kunac, K., Periša, K., Bošković, P., Peko, I., Ljumović, P., Bašić, A. 2024. Possibility of using CT imaging and 3D scanning for the purpose of advanced analysis of archaeological artefacts, MTSM 2024, Split, Croatia
- [5] Primjeri korištenja. <https://topomatika.hr/primjeri-industrije/> (accessed 13 April 2025).
- [6] ZEISS X-Ray Series. Make the invisible visible. <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/x-ray.html> (accessed 20 May 2025).

## NAČRTOVANJE OPTIMALNE TRAJKTORIJE ZA ROBOTSKO SKENIRANJE Z METODAMI UMETNE INTELIGENCE

**Karel CEROVŠEK<sup>1</sup>, Jakob FABJAN<sup>1</sup>, Kusai ALMAHAMID<sup>1</sup>, Marko MUNIH<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto

<sup>2</sup>Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

### IZVLEČEK

*V članku je predstavljen celovit pristop k avtomatizaciji robotskega 3D skeniranja objektov z neznano geometrijo, brez uporabe vnaprej pripravljenih CAD modelov. Predlagana metodologija združuje zajem geometrije z globinsko kamero, obdelavo oblaka točk ter generiranje kandidatnih pogledov na osnovi segmentirane triangulirane površine z uporabo generativnega modela umetne inteligence. Za izbor optimalnega nabora pogledov in določitev njihovega zaporedja je uporabljen algoritem, ki minimizira število potrebnih meritev in dolžino robotske trajektorije. Izvedba trajektorije je prilagojena kinematičnim omejitvam robota in realizirana v okolju ROS2 z uporabo orodij MoveIt. Eksperimentalna validacija na realnem sistemu je pokazala, da predlagani pristop omogoča doseganje kakovostne 3D rekonstrukcije, primerljive z ročnim skeniranjem, ob približno 30 % daljšem času izvajanja. Opisan pristop zagotavlja večjo ponovljivost, zmanjšano odvisnost od operaterja ter predstavlja obetavno rešitev za industrijske [1] in raziskovalne aplikacije.*

### 1 UVOD

Z naraščajočimi zahtevami po natančnosti, ponovljivosti in učinkovitosti v sodobnih proizvodnih procesih postaja zajem geometrijskih podatkov vse pomembnejši del industrijskih aplikacij [2]. Hkrati se v času digitalizacije povečuje zanimanje za ustvarjanje digitalnih dvojčkov kulturne dediščine. Tridimenzionalno (3D) skeniranje omogoča natančno analizo oblike objektov ter primerjavo izmerjenih podatkov z načrtovanimi specifikacijami, s čimer pomembno prispevajo k zagotavljanju kakovosti in dokumentiranju objektov.

V industrijskih okoljih je skeniranje pogosto avtomatizirano, zlasti kadar je na voljo natančen 3D CAD model skeniranega objekta. Takšen model omogoča vnaprejšnje načrtovanje gibanja robota in optimizacijo pozicij senzorja [3]. V primerih, kjer CAD model ni na voljo, se skeniranje pogosto izvaja ročno ali pa se slednji postopek sploh ne izvaja. Takšen pristop povečuje čas proizvodnje in zmanjšuje kvaliteto končnega izdelka.

Ne glede na stopnjo avtomatizacije predstavlja načrtovanje trajektorije enega ključnih izzivov

skeniranja. Pri robotskem skeniranju pa je načrtovanje gibanja še dodatno omejeno s kinematičnimi lastnostmi robota in delovnim prostorom, kar pogosto zahteva kompromis med več cilji. Problem je še posebej izrazit pri skeniranju objektov z neznano geometrijo, kjer klasični vnaprej določeni pristopi niso neposredno uporabni. Čeprav obstajajo različni CAD - odvisni, hevristični in optimizacijski pristopi, številni med njimi zahtevajo delno ročno nastavitve ali predhodno znanje o geometriji objekta, kar omejuje njihovo uporabo v takšnih primerih [4]. Za skeniranje geometrijsko nepoznanega predmeta so torej neprimerni.

### 2 METODOLOGIJA

V tem poglavju je predstavljen predlagani pristop za avtomatizacijo robotskega 3D skeniranja objektov (Slika 1) brez vnaprej znanega CAD modela. Metodologija temelji na kombinaciji zaznavanja geometrije z globinsko kamero in uporabo modela generativne umetne inteligence, določanju lege točk, ki predstavljajo možno pozicijo oz. pogled skenerja ter optimizaciji izbora teh pogledov v povezano

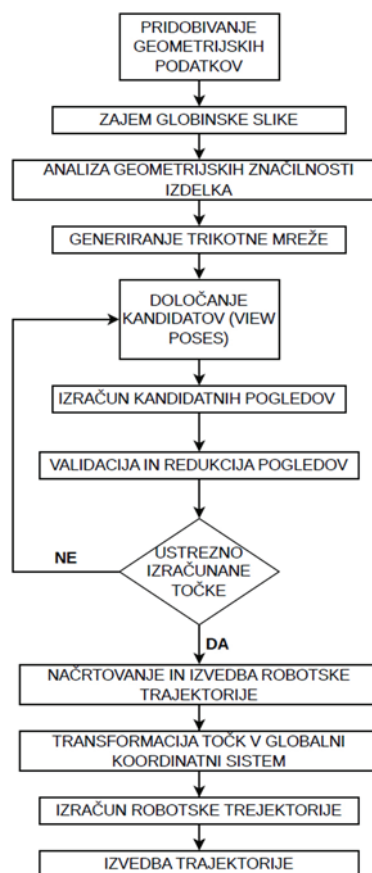
robotsko trajektorijo [3]. Ves postopek teče v ROS2 okolju.



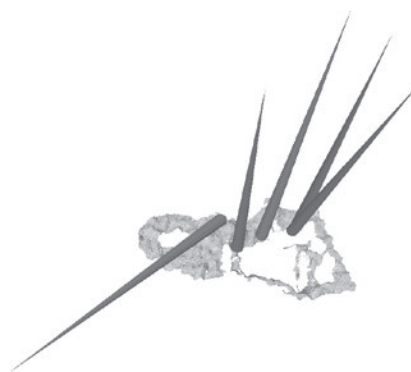
Slika 1: Robot med skeniranjem predmeta na vrtljivi mizi.

## 2.1 Pridobivanje geometrijskih podatkov

Postopek skeniranja (Slika 2) se začne z zajemom globinske slike objekta z uporabo globinske kamere, nameščene na vrh robota. Iz zajete globinske slike se izračuna oblak točk, ki predstavlja grobo geometrijo objekta v koordinatnem sistemu kamere. Zaradi šuma in nepopolnih meritev se nad oblakom točk izvede osnovno filtriranje, s katerim se odstranijo napačno zajeti podatki. Iz oblaka točk se z uporabo triangulacije (Slika 3) rekonstruira trikotna mreža, ki omogoča nadaljnjo geometrijsko analizo [5].



Slika 2: Grafični prikaz poteka celotnega algoritma.

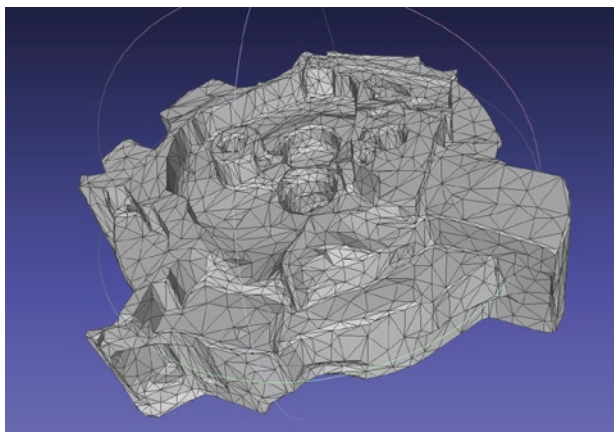


Slika 3: Triangulirana površina predmeta.

## 2.2 Uporaba generativnega modela umetne inteligence

V postopku avtomatiziranega 3D-skeniranja smo uporabili generativni model umetne inteligence, ki kot vhodni podatek prejme zgolj 2D barvno sliko obravnavanega predmeta. Model na podlagi naučenih vzorcev in naprednih metod rekonstrukcije iz slike ustvari oceno mrežnega

modela (mesh) (Slika 4), ki predstavlja geometrijo objekta. Tak pristop omogoča hitro in učinkovito generiranje 3D-oblik brez potrebe po kompleksnih senzorjih ali več pogledih. Pri tem pa se pojavi bistvena omejitev - ustvarjeni mesh je definiran v virtualnem koordinatnem sistemu in ne vsebuje informacij o dejanski poziciji in orientaciji realnega predmeta v delovnem prostoru robota. Posledično tak model ni neposredno uporaben za robotske aplikacije, kjer je ključna natančna umestitev objekta v delovni prostor robota. Za rešitev tega problema smo uporabili globinsko kamero, ki zajame prostorske podatke okolja, ter dodatno naučen temeljni model, ki omogoča poravnavo generiranega mesh modela z realnim predmetom. Ta proces vključuje transformacijo (translacija in rotacija), s čimer dosežemo natančno ujemanje med virtualno in fizično pozicijo in orientacijo objekta, kar je nujno za nadaljnjo robotsko manipulacijo in analizo.



Slika 4: Prikaz mrežnega modela, generiranega z uporabo umetne inteligence.

### 2.3 Določanje kandidatov lege točk - *view poses*

Na podlagi obdelane triangulirane površine algoritem določi množico kandidatov pogledov oziroma tako imenovanih *view poses*. Vsak *view pose* predstavlja potencialno lego senzorja, iz katere je del površine objekta ustrezno viden in dosegljiv. Pri določanju kandidatnih pogledov se upoštevajo kriteriji vidljivosti površine, primerna razdalja senzorja do objekta ter omejitve delovnega prostora robotskega manipulatorja [7]. Da bi vsaj deloma kompenzirali kinematično

omejenost robota, smo v postopek skeniranja dodali tudi vrtljivo mizo, kot prikazuje Slika 1. Na ta način smo bistveno skrajšali trajektorije za skeniranje in posledično izjemno skrajšali čas končnega skeniranja.

Uporaba vrtljive mize zahteva računsko dopolnjevanje pozicije pogledov skenerja, saj celoten algoritem (katerega del je tudi računanje rotacije zaradi mize) v končni fazi določi točke v koordinatnem sistemu robota, v katere potem ta premakne skener. Na podlagi teh podatkov ločen algoritem izračuna optimalno rotacijo mize v pravem trenutku, pri čemer se ob vsaki rotaciji ustrezno posodobi lega skeniranega predmeta. Posledično se s pomočjo znane rotacije mize preračunajo tudi položaji točk, ki jih mora robot obiskati, s čimer je zagotovljeno pravilno izvajanje trajektorije in celovit zajem pokritosti površine objekta. Če se spet vrnemo na postopek pridobivanja lege točk - algoritem na podlagi segmentirane trikotne mreže določi pozicije, v katerih se zagotovi pokritost vseh relevantnih površinskih delov - clustrov objekta. Za vsak cluster se izračunata središčna točka in povprečna normala površine, kar definira osnovno usmeritev in položaj kamere. Kandidatne poze so dodatno preverjene glede trkov in ostalih omejitev robotskega manipulatorja, pri čemer so neveljavne poze zavržene oz. če je mogoče, prilagojene. Na ta način se oblikuje nabor izvedljivih pogledov, ki pokrivajo celotno površino objekta.

Dobljeni kandidati so nato posredovani drugemu algoritmu, ki določi optimalen podnabor pogledov in njihovo zaporedje. Algoritem upošteva prispevek posameznega pogleda k pokritosti objekta ter prostorske odnose med pogledi, s čimer minimizira število potrebnih točk in skupno dolžino robotske trajektorije. Izračunane *view poses* so sprva določene v lokalnem koordinatnem sistemu algoritma. Te točke so nato transformirane v globalni koordinatni sistem robota, kjer se preveri njihova kinematična dosegljivost. Za vsako kandidatno lego se izračuna pripadajoča konfiguracija sklepov robota z uporabo inverzne kinematike, pri čemer se izločijo vse lege, ki niso izvedljive ali vodijo v singularne konfiguracije.

## 2.4 Načrtovanje in izvedba robotske trajektorije

Na podlagi izbranega zaporedja view poses je bila generirana zvezna trajektorija, ki zagotavlja gladko in zanesljivo gibanje robota med skeniranjem. Izvedba gibanja robota je bila realizirana z uporabo nizkonivojske storitve ServoJ, ki omogoča neposreden nadzor položajev sklepov robota.

Pri praktični izvedbi se je pokazalo, da krmilnik robota ne omogoča neprekinjenega izvajanja trajektorij, katerih posamezni premiki trajajo dlje od treh sekund. Takšni premiki so povzročili prehod robota v stanje napake, kar je zahtevalo ponastavitev sistema. Za odpravo te omejitve smo razvili algoritem, ki je daljše premike samodejno razdelil na več krajših segmentov, katerih čas izvajanja ne presega omenjene meje. S tem je bilo zagotovljeno neprekinjeno in zanesljivo izvajanje trajektorije brez prekinitev. Dodatni izziv je predstavljala pretvorba izračunanih view poses v sklepne konfiguracije robota. Ker lastna implementacija storitve za izračun inverzne kinematike ni zagotavljala stabilnega delovanja, smo robota definirali v okolju MoveIt. Z uporabo orodij, ki jih ta omogoča, so bile izračunane ustrezne sklepne konfiguracije za vsako lego točk, hkrati pa so bile upoštewane kinematične omejitve. Takšen pristop je omogočil zanesljivo pretvorbo koordinat ter natančno izvedbo načrtovane trajektorije v realnem robotskem sistemu.

## 3 ANALIZA REZULTATOV

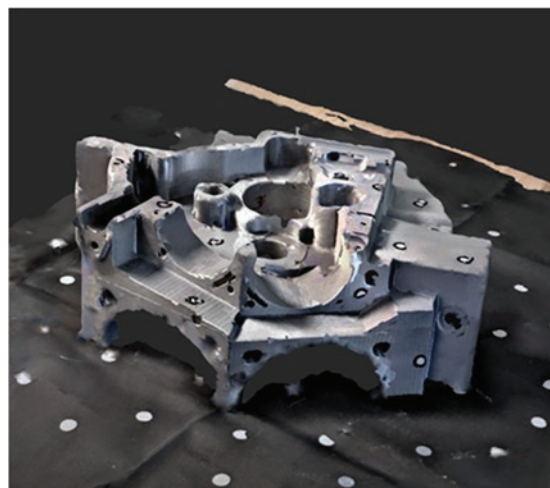
Predlagani sistem za avtomatizirano robotsko skeniranje je bil ovrednoten na realnem robotskem sistemu, sestavljenem iz kolaborativnega robota Dobot CR5, globinske kamere in 3D skenerja. Eksperimenti so bili izvedeni na predmetih z neznano geometrijo, za katere vnaprej ni bil na voljo CAD model. Namen eksperimentalne validacije je bil preveriti zmožnost sistema za samodejno določanje pogledov, potrebnih za zanesljivo izvedbo načrtovane trajektorije, ki rezultira v kakovostnem 3D modelu (Slika 5). Rezultati eksperimentov so pokazali, da predlagani avtomatizirani pristop

omogoča zanesljivo in ponovljivo skeniranje objektov brez predhodnega poznavanja njihove geometrije. Kakovost 3D modelov, pridobljenih z avtomatiziranim postopkom, je bila primerljiva s kakovostjo modelov, pridobljenih z ročnim skeniranjem. Površine objektov so bile enakomerno pokrite, brez večjih vrzeli ali izrazitega podvajanja meritev.



Slika 5: Rezultat avtomatiziranega 3D skeniranja.

Na Sliki 6 lahko opazimo predmet, ki je bil skeniran ročno. Skenirali smo ga s 3D skenerjem Revopoint Miraco Pro, ki zaseda mesto v nižjem cenovnem razredu in se ga ne uporablja za skeniranje z veliko natančnostjo. Vendar je bil zaradi relativno nizke teže in dimenzije več kot primeren za naše raziskovanje.



Slika 6: Rezultat ročnega skeniranja.

### 3.1 Razprava

Rezultati eksperimentalne validacije kažejo, da predlagani pristop omogoča učinkovito avtomatizacijo postopka 3D skeniranja objektov brez vnaprej znanega CAD modela. Avtomatiziran sistem dosega primerljivo kakovost 3D modelov v primerjavi z ročnim skeniranjem, pri čemer zagotavlja boljšo ponovljivost in manjšo odvisnost od izkušenj operaterja. To predstavlja pomembno prednost v aplikacijah, kjer je zahtevana konsistentna kakovost zajema podatkov. Časovna učinkovitost avtomatiziranega skeniranja je bila ocenjena z neposredno primerjavo trajanja celotnega postopka skeniranja z robotskim sistemom in ročnim skeniranjem. Za več testnih objektov z različno geometrijsko zahtevnostjo je bil izmerjen skupni čas, ki je vključeval vse faze skeniranja, od začetnega pozicioniranja do zaključka zajema podatkov. Pri ročnem skeniranju je bil postopek izveden s strani operaterja, medtem ko je bil pri avtomatiziranem skeniranju čas določen z izvedbo izračunane robotske trajektorije. Rezultati so pokazali, da je bil avtomatiziran postopek v povprečju približno 30% časovno daljši (Tabela 1).

Tabela 1: Primerjava časa skeniranja.

Objekt	Ročno [s]	Robot [s]	Razlika [%]
Objekt A	120	158	+31,7
Objekt B	95	123	+29,5
Objekt C	140	185	+32,1
<b>Povprečje</b>	<b>118</b>	<b>155</b>	<b>+31,1</b>

Izmerjena razlika v času skeniranja ne predstavlja končne ocene časovne učinkovitosti predlaganega sistema, temveč predvsem ponazarja trenutno stanje implementacije. Rezultati kažejo, da je avtomatizirano 3D skeniranje v obravnavani konfiguraciji počasnejše od ročnega postopka, vendar hkrati potrjujejo izvedljivost in stabilnost pristopa. Časovna razlika je v veliki meri posledica pridobivanja približka površine objekta z globninsko kamero in modelom generativne umetne inteligence. Pričakovati je, da bi z uporabo naprednejšega računanja pogledov časovna učinkovitost

avtomatiziranega skeniranja v prihodnje dosegla ali celo preseгла ročni pristop. Omejitve trenutnega sistema se kažejo tudi v uporabi relativno preprostega modela računanja in optimizacije pogledov, ki še ne izkorišča vseh razpoložljivih informacij o geometriji objekta in dinamiki robota.

### 4. SKLEP

V tem delu je bil predstavljen celovit pristop za avtomatizacijo robotskega 3D skeniranja objektov z neznano geometrijo. Predlagana metodologija združuje zaznavanje geometrije z globninsko kamero, izbor lege točk oz. pogledov z uporabo informacij o geometrijskih značilnostih predmeta z izračun možnih pogledov ter zanesljivo načrtovanje in izvedbo robotske trajektorije v realnem sistemu.

Eksperimentalni rezultati so pokazali, da avtomatiziran sistem dosega kakovost 3D modelov, primerljivo z ročnim skeniranjem, ob nekoliko daljšem času izvajanja. Kljub temu avtomatiziran pristop prinaša pomembne prednosti v obliki večje ponovljivosti, zmanjšane potrebe po človekovem posredovanju in možnosti nadaljnje optimizacije procesa.

Predstavljeni pristop predstavlja obetavno rešitev za avtomatizacijo 3D skeniranja v industrijskih in raziskovalnih aplikacijah, zlasti v primerih, kjer CAD model objekta ni na voljo. Nadaljnje delo bo usmerjeno v izboljšanje časovne učinkovitosti sistema ter uporabo naprednejših metod za računanje pogledov za še bolj optimalno načrtovanje trajektorij.

### 5. FINANCIRANJE

Raziskava je bila so-financirana s strani javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) preko letnega delovnega programa Rudolfovega.

Viri;

- [1] J. Smith, A. Müller, and F. Rossi, “Robotic 3D scanning for industrial quality inspection: Trends and challenges,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 123–135, 2022.
- [2] M.-K. Kim, J. C. Cheng, H. Sohn, and C.-C. Chang, “A framework for dimensional and surface quality assessment of precast concrete elements using BIM and 3D laser scanning,” *Automation in Construction*, vol. 49, pp. 225–238, 2015.
- [3] I. D. Lee, J. H. Seo, and B. Yoo, “Autonomous view planning methods for 3D scanning,” *Automation in Construction*, vol. 160, p. 105291, 2024.
- [4] GUO, Eryang; GAO, Yuelin; HU, Chenyang. An adaptive dynamic multi-swarm PSO algorithm based on topological structure for solving complex constrained optimization problems and its applications on UAV path planning. *Applied Soft Computing*, 2026, 114813.
- [5] J. Fabjan, A. Pišmo, V. Pungerčar, and S. Arh, “Primerjava naprednih 3D tehnologij za skeniranje pri nadzoru kvalitete industrijskih izdelkov,” *Vir znanja in izkušenj za stroko*, pp. 111–116, 2025.
- [6] Z. Zhang, “Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, no. 8, pp. 1097–1106, 2012.
- [7] Y. Zhang, H. Liu, and Z. Wang, “Robotic 3D scanning of unknown objects using reinforcement learning-based view planning,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 80, p. 102487, 2023.

## GEOMETRIJSKO-OPTIMIZACIJSKA KOMPENZACIJA REDUNDANCE ROBOTA NA LINEARNI TRAČNICI ZA VISOKO NATANČNE OPERACIJE

**Jožica PIŠKUR**

Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto

### IZVLEČEK

*Prispevek obravnava problem kinematične redundance industrijskega robota, nameščenega na linearni tračnici, pri izvajanju visoko natančnih manipulacijskih operacij. Zaradi dodatne prostostne stopnje sistem omogoča več različnih kinematičnih konfiguracij za doseganje iste kartezične pozicije, kar lahko vpliva na stabilnost gibanja in ponovljivost pozicioniranja. V prispevku je predstavljena geometrijsko-optimizacijska metoda za določanje položaja robota na linearni tračnici. Slednja temelji na analizi presečišča med geometrijskim modelom optimalnega dosega robota in premico gibanja zunanje osi. Opisana metoda prispeva k doseganju pozicij v matrični strukturi blizu robov delovnega prostora robota. Predlagani pristop vodi do determinističnega določanja položaja robota na tračnici za posamezne ciljne točke v matrični strukturi vzorcev ter zmanjšuje pojav kinematično neugodnih konfiguracij. Uporaba metode v praksi je pokazala, da pristop zagotavlja stabilno in ponovljivo pozicioniranje robota ter zagotavlja zadostno natančnost za izvajanje zahtevnih laboratorijskih operacij.*

### 1 UVOD

V industrijski praksi so robotski sistemi pogosto zasnovani za izvajanje ene dominantne naloge, pri čemer so delovni prostori, orientacije in zaporedja gibanj vnaprej definirani. V laboratorijskih in sorodnih okoljih pa robot pogosto izvaja več različnih manipulacijskih opravil znotraj iste delovne celice, kot so manipulacija vzorcev, sestavljanje komponent in natančno pozicioniranje orodij. Takšna raznolikost opravil zahteva večjo prilagodljivost delovnega prostora robota, kar v praksi pogosto pomeni uporabo dodatnih prostostnih stopenj, kot je linearna tračnica.

Z uvedbo dodatne osi sistem postane kinematično redundanten, kar pomeni, da ima več prostostnih stopenj oz. zunanjih kartezičnih koordinat, kot jih zahteva naloga vrha manipulatorja. Formalno je manipulatorski sistem redundanten, kadar je število sklepov  $N$  večje od števila neodvisnih zunanjih kartezičnih koordinat  $M$ , kar vodi do neskončnega števila možnih rešitev in  $(N - M)$  redundantnih prostostnih stopenj [1]. Redundanca sicer zagotavlja večjo fleksibilnost, vendar hkrati povzroča izzive pri stabilnosti gibanja, pojavu singularnosti in zagotavljanju visoke pozicijske natančnosti.

Obstoječe metode za reševanje redundance pogosto temeljijo na diferencialni inverzni kinematiki, formulirani kot optimizacijski problem – na primer s kvadratnim ali linearnim programiranjem ali algoritmi tipa Saturation in the Null Space (SNS). Omenjeni pristopi omogočajo obravnavo omejitev v sklepnem in kartezičnem prostoru [2, 3].

Čeprav so ti pristopi splošni in teoretično utemeljeni, so lahko za industrijske aplikacije zelo majhnimi tolerancami in strogo definirano geometrijo računsko zahtevni ali težje deterministični. Obstoječi programski paketi pa ponujajo rešitev za končno postavitev enostavnega delovnega okolja [4, 5], ne pa za kompleksne situacije. Prav obravnavi teh izzivov z namenskim geometrijskim pristopom je namenjen ta prispevek.

### 2 METODE

#### 2.1 Strojna oprema robotskega sistema

Opisan robotski sistem se uporablja za natančno manipulacijo vzorcev, razporejenih v vnaprej definirani matrični strukturi znotraj delovne celice. Ciljne pozicije vzorcev se nahajajo na robu dosegljivega delovnega prostora robota,

kar predstavlja poseben izziv z vidika kinematične stabilnosti, orientacije robota in ponovljivosti gibanja. Zaradi omejenega prostora za dostop in zahtevanih majhnih toleranc je potrebno natančno usklajevanje gibanja robota in linearne tračnice, pri čemer predlagana metoda zagotavlja stabilno in ponovljivo pozicioniranje brez ponovnega učenja vseh posameznih točk.

Robotski sistem, obravnavan v tem prispevku, je sestavljen iz industrijskega 6-osnega robota KUKA Agilus (Slika 1, spodaj). Ta je nameščen na linearni tračnici, ki predstavlja eno dodatno prostostno stopnjo gibanja. Takšna konfiguracija daje razširitev delovnega prostora robota in večjo prilagodljivost pri izvajanju različnih manipulacijskih opravil, hkrati pa sistem postane kinematično redundanten. Redundanca je v tem primeru posledica, da ima sistem več prostostnih stopenj, kot jih zahteva pozicioniranje in orientacija vrha manipulatorja v kartezičnem prostoru.

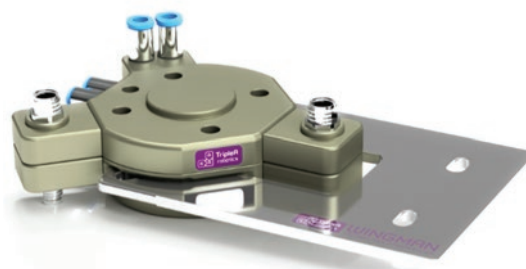
Linearna tračnica (Slika 1, zgoraj) predstavlja zunanjo os robota in je poravnana vzdolž nasprotne smeri osi  $X$  referenčnega koordinatnega sistema. Gibanje po tračnici omogoča translacijski pomik robota v vzdolžni smeri delovne celice in bistveno vpliva na izbiro kinematičnih konfiguracij robota. Položaj robota na tračnici neposredno vpliva na dosegljivost delovnega prostora, pojav singularnih leg ter stabilnost orientacije robota, kar predstavlja osrednji izziv pri načrtovanju gibanj v obravnavanem sistemu.



Slika 1: Zgradba robotskega sistema - zgoraj linearna tračnica, spodaj robot KR10 R900.

Na prirobnico robota je nameščena menjalna glava (Slika 2), zasnovana za hitro menjavanje

orodij z namenom izvajanja več različnih manipulacijskih opravil. Robot med delovanjem menjuje med več orodji, pri čemer menjalna glava zagotavlja uporabo enotnega mehanskega in funkcionalnega vmesnika. Takšna zasnova zagotavlja ponovljivo določanje položaja in orientacije koordinatnega sistema orodja, kar je še posebej pomembno pri aplikacijah z visoko zahtevano pozicijsko natančnostjo ter pri uporabi istega robotskega sistema za različne postopke brez ponovnega učenja vseh ciljnih točk. Pri opisanem pristopu smo za dosego cilja uporabili namensko razvito pnevmatsko prijemalo, ki je bilo nameščeno na menjalno glavo.



Slika 2: Menjalna glava

Gibanje robota je opisano z uporabo več koordinatnih sistemov, vključno z referenčnim koordinatnim sistemom, baznim koordinatnim sistemom robota in delovne celice ter koordinatnim sistemom orodja. Bazni koordinatni sistem je definiran glede na delovno celico in predstavlja referenco za vse ciljne točke v matrični strukturi, uporabljene v predlagani metodi. Natančna kalibracija baznega in orodnega koordinatnega sistema je ključnega pomena za pravilno delovanje geometrijsko-optimizacijske metode kompenzacije osi tračnice, saj morebitna odstopanja neposredno vplivajo na izračun kompenzacije in doseženo pozicijsko natančnost.

## 2.2 Geometrijsko optimizacijska kompenzacija redundance

Pri obravnavanem robotskem sistemu je dodatna prostostna stopnja, ki jo predstavlja linearna tračnica, uporabljena za razširitev delovnega prostora robota. Posledično postane sistem kinematično redundanten, saj je položaj vrha manipulatorja mogoče doseči z več različnimi kombinacijami sklepnih koordinat in položaja

robota na tračnici. Namen predlagane metode je določiti ustrezen položaj robota na tračnici tako, da je za podano ciljno točko zagotovljena stabilna in ponovljiva kinematična konfiguracija robota.

Problem je obravnavan v baznem koordinatnem sistemu delovne celice  $O_{dc}$ ,

$$O_{dc} = (X_{dc}, Y_{dc}, Z_{dc}, \varphi_{dc}, \theta_{dc}, \psi_{dc}), \quad (1)$$

kjer je  $X_{dc}$  koordinata po osi  $X$  glede na referenčni koordinatni sistem,  $Y_{dc}$  koordinata po osi  $Y$  glede na referenčni koordinatni sistem,  $Z_{dc}$  koordinata po osi  $Z$  glede na referenčni koordinatni sistem,  $\varphi_{dc}$  orientacija po osi  $X$  glede na referenčni koordinatni sistem,  $\theta_v$  orientacija po osi  $Y$  glede na referenčni koordinatni sistem ter  $\psi_{dc}$  orientacija po osi  $Z$  glede na referenčni koordinatni sistem. Gibanje linearne tračnice je omejeno na eno prostostno stopnjo vzdolž nasprotne osi  $X$ . Ciljna točka tj. položaj vzorca v matrični strukturi,  $P_v$ , ki jo mora doseči vrh manipulatorja, je opisana s kartezičnimi koordinatami  $P_v^{dc}$ ,

$$P_v^{dc} = (X_v, Y_v, Z_v, \varphi_v, \theta_v, \psi_v, E1_v). \quad (2)$$

V enačbi (2) je  $X_v$  koordinata ciljne točke  $P_v^{dc}$  po osi  $X$  glede na delovno celico (dc),  $Y_v$  koordinata  $P_v^{dc}$  po osi  $Y$  glede na delovno celico,  $Z_v$  koordinata  $P_v^{dc}$  po osi  $Z$  glede na delovno celico,  $\varphi_v$  orientacija  $P_v^{dc}$  po osi  $X$  glede na delovno celico,  $\theta_v$  orientacija  $P_v^{dc}$  po osi  $Y$  glede na delovno celico ter  $\psi_v$  orientacija  $P_v^{dc}$  po osi  $Z$  glede na delovno celico,  $E1_v$  koordinata ciljne točke  $P_v^{dc}$  glede na tračnico  $E1$  (nasprotna smer osi  $X$ ) glede na delovno celico. Orientacije  $\varphi_v, \theta_v, \psi_v$  za vsak vzorec so fiksne in so enake orientaciji izhodiščne pozicije, iz katere robot gre po vzorec. Razlika med orientacijami baznega koordinatnega sistema delovne celice in robota je zanemarljiva in jo v nadaljevanju ne obravnavamo. Zaradi omejitev programskega okolja krmilnika, ki ne omogoča uporabe matričnih struktur, so bile enačbe implementirane v komponentni (skalarni) obliki, z eksplisnim razpisom matričnih operacij.

### 2.2.1 Doseg robota

Optimalni doseg  $R$ , ki ni enak polnemu dosegu robota (npr. brez orodja je 901 mm), je modeliran

zgolj z geometrijsko razdaljo med vrhom manipulatorja v izhodiščni poziciji, predno gre po vzorec, in izhodiščem baznega koordinatnega sistema robota. Ta razdalja je izražena kot

$$R = \sqrt{(X_r - (-X_{E1}))^2 + Y_r^2 + Z_r^2}, \quad (3)$$

kjer  $(X_r, Y_r, Z_r)$  predstavljajo koordinate izhodiščne pozicije vrha manipulatorja glede na referenčni (globalni) koordinatni sistem robota na tračnici. Vrednost  $X_{E1}$  predstavlja položaj robota na tračnici, ki ima obratno smer kot  $X_r$ . Tako izničimo vpliv tračnice. Vrednost  $R$  predstavlja optimalni doseg robota za dano konfiguracijo.

### 2.2.2 Geometrijska interpretacija problema

Za dano ciljno točko oz. položaj vzorca  $P_v^{dc}$  in znan radij dosega  $R$  je množica vseh položajev vzorcev znotraj baznega koordinatnega sistema delovne celice (matrične strukture), ki jih robot doseže, opisana kot krogla s polmerom  $R$ , katere središče leži v ciljni točki vzorca  $P_v^{dc}$ . Hkrati je gibanje robota po linearni tračnici omejeno na premico, poravnano z osjo  $X$ . S tem je problem reduciran na iskanje presečišča med kroglo, ki predstavlja geometrijsko omejitev optimalnega dosega robota, in premico, ki predstavlja lege robota na linearni tračnici na osi  $X$ . Z iskanjem presečišča, omejenimi robnimi pogoji, kjer iščemo samo rešitve znotraj delovne celice, ter znanimi relacijami med referenčnim koordinatnim sistemom in koordinatnim sistemom delovne celice, tako dobimo pozicijo robota na tračnici.

### 2.2.3 Izračun kompenzacije osi tračnice

Iskanje presečišča obravnavamo v koordinatnem sistemu delovne celice. Središče krogle je enako  $P_v^{dc} = (X_v, Y_v, Z_v)$  z radijem  $R$ :

$$(X - X_v)^2 + (Y - Y_v)^2 + (Z - Z_v)^2 = R^2 \quad (4)$$

Premica, ki predstavlja lege robota na linearni tračnici, pa jo definiramo kot parametrično obliko:

$$X = X_{E1+R}^{dc}, X_{E1+R}^{dc} \in [X_{E1+R,min}^{dc}, X_{E1+R,max}^{dc}] \quad (5)$$

$$Y = Y_{E1+R,0}^{dc} \quad (6)$$

$$Z = Z_{E1+R,0}^{dc} \quad (7)$$

kjer je  $Y_{E1+R,0}^{dc}$  lega robota na tračnici po osi Y na koordinatni sistem delovne celice ter  $Z_{E1+R,0}^{dc}$  lega robota na tračnici po osi Z na koordinatni sistem delovne celice.

Pri tem sta  $X_{E1+R}^{dc} \in [X_{E1+R,min}^{dc}, X_{E1+R,max}^{dc}]$  skrajni vrednosti robota na tračnici glede na bazni koordinatni sistem delovne celice po osi X.

Če zgoraj omenjene enačbe (5-7) vstavimo skupaj v (4) dobimo:

$$(X_{E1+R}^{dc} - X_v)^2 = R^2 - (Y_{E1+R,0}^{dc} - Y_v)^2 - (Z_{E1+R,0}^{dc} - Z_v)^2. \quad (7)$$

Če iz enačbe (7) izpostavimo  $X_{E1+R}^{dc}$ , katerega iščemo dobimo:

$$X_{E1+R}^{dc} = X_v \pm \sqrt{R^2 - (Y_{E1+R,0}^{dc} - Y_v)^2 - (Z_{E1+R,0}^{dc} - Z_v)^2}. \quad (8)$$

Ker ima geometrijski problem praviloma dve simetrični rešitvi, je za praktično uporabo potrebno izbrati eno veljavno rešitev. V obravnavanem sistemu je izbira rešitve dodatno omejena z mehanskimi mejami tračnice ter zahtevo po stabilni orientaciji robota, zato je izbrana rešitev, ki ustreza omenjenim robnim pogojem. Dobljena vrednost  $X_{E1+R}^{dc}$  predstavlja optimalno koordinato linearne tračnice po osi  $X_{dc}$ . Ker pa KRL jezik obravnava premike linearne tračnice zgolj iz referenčnega koordinatnega sistema oz. koordinatnega sistema tračnice, kljub temu, da je točka definirana v koordinatnem sistemu delovne celice, moramo le to smiselno pretvoriti v ustrezen koordinatni sistem. To se izvede z linearno algebro in prej omenjenimi poenostavitvami, kot

$$E_v = -(X_{dc} - X_{E1+R}^{dc}). \quad (9)$$

Kot omenjeno je  $X_{dc}$  koordinata po osi X glede na referenčni koordinatni sistem. Ker je koordinata  $X_{E1+R}^{dc}$  oz. os po kateri poteka, vzdolž nasprotne smeri osi X glede na referenčni koordinatni sistem,

zato jo odštejemo. Prav tako smer gibanja linearne tračnice je vzdolž nasprotne smeri osi X glede na referenčni koordinatni sistem.

Na ta način je zagotovljeno, da izračunana kompenzacija osi tračnice vodi do kinematično ugodne konfiguracije in zmanjšuje pojav singularnih leg.

#### 2.2.4 Implementacija metode

Predlagana metoda je implementirana v programskem okolju robota kot del kinematičnega izračuna pred izvedbo gibanja. Izračun kompenzacije osi tračnice se izvede za vsako ciljno točko posebej. Točko, v katero pošljemo robota, še preverimo s funkcijo INVERSE, ki je vgrajena v Kuka krmilniku. V primeru neuspešnega preračuna s funkcijo INVERSE, vrednost  $E_v$  povečujemo in hkrati zmanjšujemo po manjših inkrementih, dokler preračun ni uspešen. Zaradi omejitev programskega okolja krmilnika so bile enačbe implementirane v komponentni obliki, brez uporabe matričnih operacij. Izračun temelji na osnovnih aritmetičnih operacijah, kar prispeva k hitremu in determinističnemu izvajanju. Metoda je integrirana v modularno strukturo robotskih programov, kar dopušča njeno uporabo pri različnih manipulacijskih opravilih brez potrebe po ponovnem učenju posameznih točk.

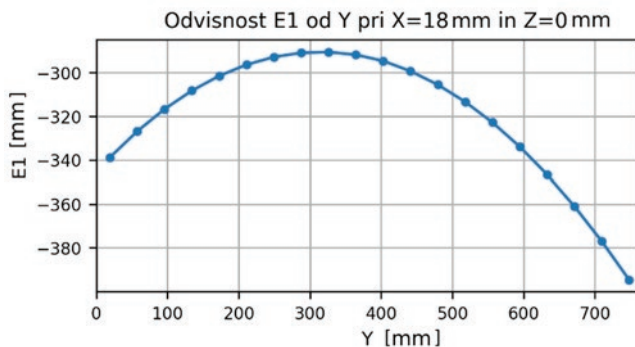
### 3 REZULTATI OPTIMIZACIJSKE METODE IN RAZPRAVA

Predlagana metoda za kompenzacijo položaja robota na linearni tračnici je bila preizkušena na realnem robotskem sistemu pri manipulaciji vzorcev v matrični strukturi znotraj delovne celice. Nekatero podrobnosti so zaradi specifičnosti sistema izpuščene. Analiza je bila usmerjena v vpliv ciljne točke na položaj tračnice ter stabilnost izbranih kinematičnih konfiguracij robota. Kljub temu se v praksi izkaže kot dovolj natančna za obravnavano aplikacijo.

#### 3.1 Obnašanje tračnice glede na ciljno točko

Na sliki *Slika 3* so prikazani položaji robota na linearni tračnici E1 pri doseganju posameznih ciljnih točk v matrični strukturi, pri vrednosti  $X = 18$  mm in  $Z = 0$  mm glede na koordinatni

sistem delovne celice. Iz rezultatov je razvidno, da se položaj tračnice sistematično spreminja glede na lego ciljne točke v delovni celici.



Slika 4: Odvisnost premika linerna tračnice E1 od Y pri X = 18 mm in Z = 0 mm.

V obravnavanem primeru se je položaj tračnice (os E1) gibal v območju od približno -395 mm do -290 mm. Najmanjše vrednosti so bile dosežene pri ciljnih točkah na robu matrične strukture (npr. A20 pri  $Y \approx 748$  mm), največje pa v sredinskem delu območja (npr. okoli točke A9).

V analiziranem območju se koordinata Y spremeni za približno 729 mm, pri čemer se vrednost E1 spremeni za približno 104 mm. Najvišje vrednosti E1 so dosežene v srednjem delu delovnega prostora, medtem ko se minimalne vrednosti pojavijo pri skrajnih legah tračnice.

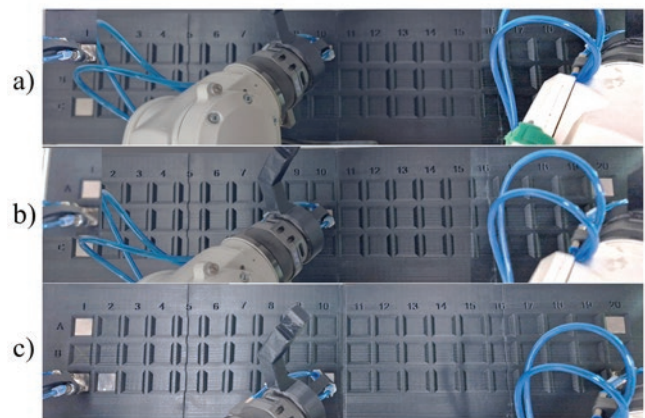
Spremembe položaja tračnice so zvezne, brez nenadnih skokov med zaporednimi točkami, kar vodi do stabilnega gibanja robota. Takšno obnašanje potrjuje, da metoda prilagaja položaj robota glede na lego ciljne točke in pri tem ohranja ugodno kinematično konfiguracijo robota.

### 3.2 Eksperimentalna validacija metode

Metoda je implementirana v krmilnik robota, pri čemer se izračun kompenzacije osi tračnice izvede za vsako ciljno točko posebej. Ponovno učenje posameznih točk ni potrebno.

Pri eksperimentalnem preizkusu robot uspešno doseže vse ciljne pozicije v matrični strukturi (glej sliko 5). Gibanje poteka stabilno, brez nenadnih sprememb orientacije ali nepredvidenih odzivov sistema. Pri pozicijah na robu delovnega prostora, kjer se običajno pojavljajo težave, metoda omogoča ustrezno prilagoditev položaja tračnice. S tem se zmanjšuje verjetnost prehoda v

kinematično neugodne konfiguracije ter izboljša stabilnost in ponovljivost pozicioniranja.



Slika 5: Prikaz eksperimentalnega poskusa. Matrična struktura oz. delovna celica je razdeljena na tri vrstice: (a) pobiranje iz prve vrstice na skrajnih pozicijah, (b) pobiranje iz druge vrstice na skrajnih pozicijah, (c) pobiranje iz tretje vrstice na skrajnih pozicijah.

### 3.3 Razprava

Rezultati potrjujejo, da je geometrijski pristop primeren za obravnavani problem kinematične redundance robota na linearni tračnici. Prednost metode je v njeni enostavnosti, saj omogoča neposreden izračun položaja robota brez uporabe iterativnih postopkov, kar je primerno za implementacijo v realnem času.

Predstavljeni rezultati so prikazani na eni izmed matričnih struktur, vendar je bila metoda uporabljena tudi na preostalih strukturah znotraj delovne celice oziroma več definiranih delovnih celic. Ker izračun temelji na geometrijskih relacijah med ciljno točko in delovnim prostorom robota, metoda ni omejena na posamezno razporeditev vzorcev.

Pri uporabi na različnih matričnih strukturah je bilo opaženo enako obnašanje osi tračnice, kjer se položaj sistematično prilagaja glede na lego ciljne točke, pri čemer so ohranjene zvezne spremembe in stabilne kinematične konfiguracije robota.

Omejitev metode predstavlja odvisnost od natančne kalibracije koordinatnih sistemov ter poenostavljen geometrijski model dosega robota..

## 4 ZAKLJUČEK

V prispevku je predstavljena geometrijsko-optimizacijska metoda za kompenzacijo položaja robota na linearni tračnici pri obravnavi kinematične redundance. Ta temelji na geometrijski interpretaciji problema kot presečišču med omejitvijo dosega robota in gibanjem po linearni osi, kar omogoča neposreden izračun položaja tračnice za posamezne ciljne točke.

Rezultati eksperimentalnega preizkusa kažejo, da metoda zagotavlja stabilno in ponovljivo doseganje ciljnih pozicij tudi v območjih blizu robov delovnega prostora robota. Položaj tračnice se pri tem zvezno prilagaja glede na lego ciljne točke, kar prispeva k stabilnosti gibanja in zmanjšanju kinematično neugodnih konfiguracij.

Prednost metode je v njeni enostavnosti in deterministični naravi, kar dopušča učinkovito implementacijo v realnem času brez potrebe po iterativnih postopkih. Primerna je za aplikacije z vnaprej znano razporeditvijo ciljnih točk.

Kot omejitev se izpostavlja odvisnost od natančne kalibracije koordinatnih sistemov ter uporaba poenostavljenega geometrijskega modela. Nadaljnje delo lahko vključuje razširitev metode z dodatnimi kriteriji, kot so optimizacija orientacije robota ali minimizacija gibanja sklepov.

## ZAHVALA

Raziskovalno delo avtorjev je bilo sofinancirano s strani Republike Slovenije, Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in inovacije, Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije ter Evropske unije – NextGenerationEU, preko projekta DIGITOP. Raziskavo je sofinancirala Agencija RS za raziskovalno in inovacijsko dejavnost (ARIS) preko letnega programa dela Rudolfovo.

Viri:

- [1] „Kinematika in dinamika robotov : diferencialna kin I COBISS Plus“. Pridobljeno: 9. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: <https://plus.cobiss.net/cobiss/si/sl/data/cobib/186214147/ferlj?format=detail>
- [2] A. A. Hassan, M. El-Habrouk, in S. Deghedie, „Inverse Kinematics of Redundant Manipulators Formulated as Quadratic Programming Optimization Problem Solved Using Recurrent Neural Networks: A Review“, *Robotica*, let. 38, št. 8, str. 1495–1512, avg. 2020, doi: 10.1017/S0263574719001590.
- [3] „Kinematic Control of Redundant Robots With Online Handling of Variable Generalized Hard Constraints I Request PDF“, *ResearchGate*, doi: 10.1109/LRA.2022.3190832.
- [4] „KUKA.PalletTech software for palletizing“, KUKA Germany. Pridobljeno: 6. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: [https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/software/application-software/kuka\\_pallettech](https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/software/application-software/kuka_pallettech)
- [5] „KUKA.FlexPal: Palletizing via Drag-and-Drop“, KUKA Germany. Pridobljeno: 6. januar 2026. [Na spletu]. Dostopno na: [https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/software/application-software/kuka\\_flexpal-palletizing-software](https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/software/application-software/kuka_flexpal-palletizing-software)

## HIBRIDNO PROGRAMIRANJE ROBOTOV KOT MOST MED DIGITALNIM DVOJČKOM IN REALNO CELICO: ENCY HYPER

**Nikolaj KONOV**  
KROKK, d. o. o.

### IZVLEČEK

*Industrijska robotika se je razvila do točke, ko mehanska zmogljivost robota pogosto ni več glavni omejitveni dejavnik. Ključni izziv postaja, kako hitro, varno in zanesljivo pripraviti robota na novo nalogo ter kako povezati virtualno pripravo programa z dejanskim obnašanjem proizvodne celice. Prispevek obravnava koncept hibridnega programiranja robotov, ki združuje online učenje, offline simulacijo in sprotno prilagajanje v enem delovnem toku. Na primeru platforme ENCY Hyper so predstavljeni osnovni gradniki takšnega pristopa ter pomen povezave z rešitvijo ENCY Robot pri zahtevnejših procesih.*

### 1 UVOD

V industrijski praksi se danes pogosto srečamo z vprašanjem, kako pripraviti robota, da bo zanesljivo opravljal novo nalogo, ne da bi pri tem predolgo ustavili proizvodnjo ali tvegali napake ob zagonu. Klasični pristopi so praviloma kompromis. Ročno učenje na robotu je neposredno in razumljivo, vendar zahteva čas ter prisotnost operaterja ob stroju. Tekstovno programiranje omogoča natančen nadzor, vendar je vezano na jezike posameznih proizvajalcev. Offline simulacija skrajša čas na stroju, toda pogosto ne zajame vseh posebnosti realne celice [1].

Zato se vse bolj uveljavlja pristop, ki online in offline programiranja ne obravnava kot nasprotij, temveč kot dopolnjujoča se dela istega procesa. V središču takšnega pristopa je digitalni dvojnik robotizirane celice, ki ni namenjen zgolj simulaciji, temveč omogoča sprotno preverjanje, popravljanje in optimizacijo programa [2].

### 2 OMEJITVE KLASIČNIH PRISTOPOV PROGRAMIRANJA

#### 2.1 Online učenje in tekstovno programiranje

Tekstovno programiranje predstavlja naslednjo stopnjo nadzora. Omogoča upravljanje gibanja, signalov, časovnih pogojev in logike procesa, vendar je povezano z veliko razdrobljenostjo.



Slika 1: Programiranje s krmilno enoto

Vsak proizvajalec robotov uporablja svoj sintaktični in logični okvir, zato se znanje težko prenaša med različnimi znamkami. Integratorji in končni uporabniki so zato pogosto vezani na točno določen ekosistem, kar podraži uvedbo novih rešitev.

#### 2.2 Offline simulacija in AI-podprti pristopi

Offline programiranje je prineslo pomemben napredek, saj omogoča pripravo programa brez zaustavitve proizvodnje. V virtualnem okolju je mogoče pripraviti razporeditev celice, simulirati trajektorije, preveriti kolizije ter ustvariti program,

še preden se delo prenese na realno opremo. Toda v praksi ostaja odprto vprašanje, kako dobro digitalni model dejansko predstavlja realno stanje. Manjša odstopanja v postavitvi, prijemanju ali parametrih opreme lahko pomenijo, da je treba program ob zagonu vseeno popravljati ročno [1].

Veliko pozornosti je usmerjene tudi v uporabo umetne inteligence pri programiranju robotov. AI lahko pomaga pri prepoznavanju objektov, tvorjenju osnovne logike ali avtomatizaciji rutinskih opravil. Kljub temu pri zahtevnejših industrijskih operacijah še ne more nadomestiti tehničnega razumevanja procesa [2].

Tabela 1: Primerjava pristopov programiranja robotov

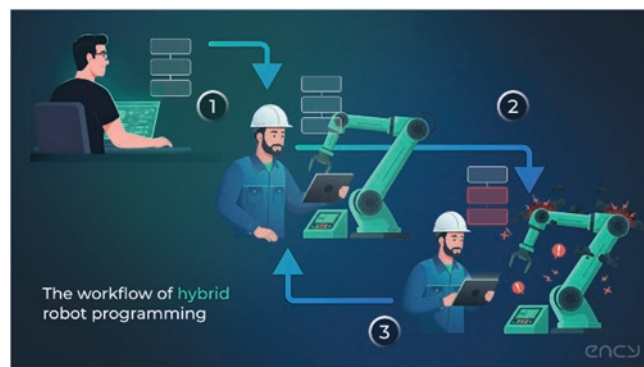
Pristop	Ključna značilnost
Online učenje	Neposreden stik z realno celico; slabost sta počasno točkovno delo in izpad proizvodnje.
Offline simulacija	Priprava brez izpada; slabost so odstopanja med modelom in realno celico.
AI-podpora	Pospeši rutinske naloge; omejitev je kompleksna tehnološka logika.
Hibridni pristop	Poveže simulacijo, preizkus in izvedbo v enem okolju.

### 3 HIBRIDNO PROGRAMIRANJE ROBOTOV

#### 3.1 Zasnova

Hibridno programiranje pomeni, da priprava, preverjanje in izvedba programa niso več ločene faze. Uporabnik dela v enotnem okolju, kjer lahko modelira celico, definira obdelovanec, pripravi logiko gibanja, izvede simulacijo ter nato preide na dejanski robot brez prekinjenega toka podatkov. Pomemben del tega koncepta je sprotno zrcaljenje realnega gibanja v digitalnem dvojniku. Tako inženir ali operater ne opazuje samo abstraktne simulacije, temveč hkrati spremlja, kaj se dogaja v dejanski celici in kako se to odraža v virtualnem modelu [1][2].

Praktična vrednost takšnega pristopa je predvsem v krajšem času zagona. Klasični cikel "simuliraj - izvozi - preizkusi - popravi na računalniku - znova izvozi" se skrajša, ker je mogoče del popravkov opraviti neposredno v povezanem okolju.



Slika 2: Faze hibridnega programiranja

#### 3.2 Gradniki platforme ENCY Hyper

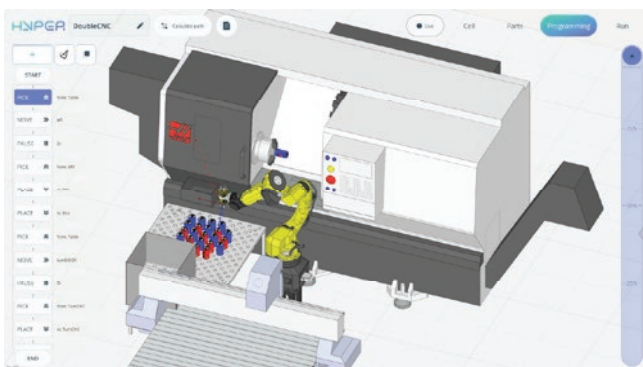
Platforma ENCY Hyper temelji na vizualnem pristopu. Namesto pisanja ukazov po vrsticah uporabnik sestavlja program iz logičnih blokov, kar znižuje vstopni prag za operaterje, hkrati pa ohranja dovolj nadzora za zahtevnejšo uporabo. Delovni tok je razdeljen na štiri med seboj povezane načine. V načinu »Cell Mode« se pripravi ali uvozi robotska celica. V načinu »Parts Mode« se določijo obdelovanci, prijemne točke in razporeditev kosov. »Programming Mode« (slika 3) je namenjen sestavljanju zaporedja operacij, simulaciji in prehodu v preizkus na realnem robotu, medtem ko »Run Mode« omogoča izvedbo in nadzor procesa v realnem času [1].



Slika 3: Način dela »Programming Mode«

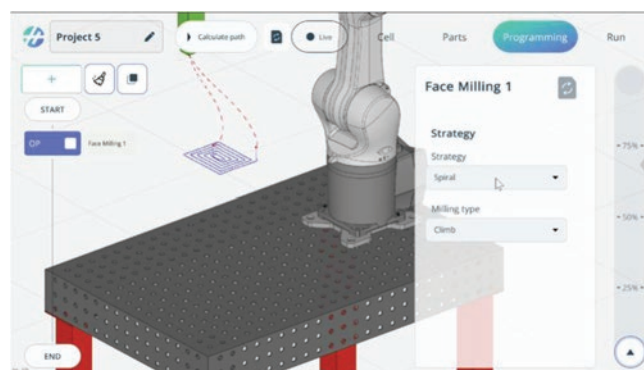
## 4 UPORABA PRI VSAKDANJIH IN ZAHTEVNEJŠIH NALOGAH

Kot samostojna rešitev je ENCY Hyper primeren predvsem za naloge, pri katerih je ključna hitra in pregledna priprava procesa: pick-and-place, paletizacija, pakiranje, posluževanje strojev (slika 4), montaža in osnovne vizualne kontrole [1]. Pri takšnih aplikacijah uporabniku ni treba programirati vsake točke posebej, ampak lahko operacije sestavi iz funkcionalnih gradnikov. To je posebej pomembno v okoljih z več različicami izdelkov, kjer so hitri prehodi med nalogami pomembnejši od skrajne optimizacije ene same serije.



Slika 4: Posluževanje strojev

Še večji pomen dobi platforma v povezavi z rešitvijo ENCY Robot. Ta deluje kot CAM-orientiran sistem za offline pripravo zahtevnejših trajektorij, medtem ko ENCY Hyper omogoča povezavo z realnim krmilnikom in prilagajanje procesa ob robotski celici. Takšna kombinacija je posebej zanimiva za robotsko rezkanje, varjenje, poliranje, nanos premazov in aditivno proizvodnjo, kjer je treba uskladiti geometrijo poti, orientacijo orodja in tehnološke parametre procesa [2]. Operater lahko na licu mesta popravlja hitrosti, orientacije ali zaporedje korakov, sistem v ozadju pa ob spremembah izvede potrebne preračune.



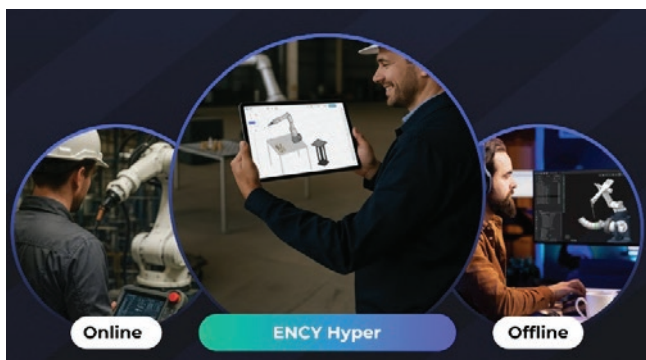
Slika 5: ENCY Hyper MAX in primer rezkanja

## 5 POMEN ZA INTEGRATORJE IN KONČNE UPORABNIKE

Za integratorje robotiziranih celic je hibridni pristop zanimiv predvsem zato, ker skrajša čas predaje delujočega sistema kupcu. Manj je potrebe po pisanju specifične programske kode za posamezno znamko, večji poudarek pa je na zasnovi procesa, digitalnem dvojniku in pripravi standardiziranega delovnega toka. Za končnega uporabnika to pomeni bolj pregledno uvajanje avtomatizacije ter lažje kasnejše prilagoditve [2]. Pomembna prednost je tudi v tem, da je tak pristop primeren tako za izkušene inženirje kot za operaterje na proizvodnji. Prvi lahko izkoristijo simulacijo in povezavo z naprednimi CAM-strategijami, drugi pa imajo na voljo vizualno okolje za vsakodnevno delo.

## 6 SKLEP

Sodobna industrijska robotika ne potrebuje le hitrejših in natančnejših robotov, temveč predvsem učinkovitejši način njihovega uvajanja v realne procese. Hibridno programiranje predstavlja odgovor na omejitve klasičnih pristopov, saj povezuje prednosti online dela, offline simulacije in sprotne prilagajanja v enoten tok.



Slika 4: Zasnova ENCY Hyper

Platforma ENCY Hyper kaže, da je mogoče digitalni dvojnik uporabiti ne le za pripravo in preverjanje, ampak tudi kot aktivni most do realne celice. V praksi to pomeni krajši zagon, manj iteracij pri popravkih, boljšo preglednost procesa in večjo dostopnost avtomatizacije za širši krog uporabnikov.

Viri:

- [1] Konov, N.: ENCY Hyper - Na novo definira, kako roboti razmišljajo, se gibljejo in sodelujejo, Računalniške novice, marec 2026.
- [2] ENCY Software: ENCY Hyper - Redefining How Robots Think, Move, and Collaborate, interno gradivo.

## ROBOTSKO ŠOKIRANJE IZDELKOV

**Matevž POŽAR, Gregor BIZJAK, Aleš TURK**  
Kolektor Mobility d.o.o. – Podružnica Postojna

### IZVLEČEK

*Validacija avtomobilskih komponent pogosto predstavlja časovno zahtevno obdobje razvoja izdelka. Interno razvita in v članku predstavljena metoda hitrega temperaturnega šokiranja z uporabo tekočih medijev bistveno pohitri manipulacijo in prenos toplote v samo notranjost izdelka. Zahtevnost testiranja zanesljivo identificira konstrukcijske pomanjkljivosti izdelkov in z večkrat krajšim časom testiranja v primerjavi s standardnimi temperaturnimi testi omogoča znatno pohitritev razvojnega procesa in lansiranja izdelkov na trg.*

### 1 UVOD

Zanesljivost avtomobilskih komponent je neposredno povezana z njihovo odpornostjo na temperaturne obremenitve, zato je temperaturno testiranje ključni del njihovega razvojnega procesa.

Standardne metode temperaturnega testiranja potekajo v klimatskih komorah, ki testiran izdelek ciklično segrevajo in ohlajajo. Takšne metode so zelo enostavne za uporabo, njihova slabost pa je počasno delovanje. V razvoju hibridnih izdelkov prav takšna testiranja predstavljajo ozko grlo procesa, ki omejuje število testiranj različnih variant izdelkov znotraj omejenega časovnega obdobja.

Z željo po metodi testiranja, ki služi kot hiter pokazatelj temperaturne odpornosti izdelkov, smo se poglobili v trenutne omejitve testiranj in zanje poskusili poiskati preprostejše rešitve.

### 2 OPIS IZZIVA

Temperaturna testiranja v standardni šok komori zaradi same enostavnosti uporabljajo zrak kot medij za prenos toplote iz grelnih in hladilnih elementov na testiran izdelek. V našem primeru izdelek v notranjosti zanesljivo doseže temperaturo okolice po 20 minutah. Ker je za ustrezno obremenitev izdelkov potrebnih več sto ali celo tisoč ciklov, skupno trajanje testiranja pogosto preseže tudi 20 dni.

Dolžina testiranj pa vpliva tudi na sam strošek testiranj. Zaradi visoke investicijske vrednosti

opreme se ta pogosto izvajajo v zunanjih akreditiranih laboratorijih, strošek posameznega testa takšne dolžine pa lahko hitro preseže 10.000 €. Poleg pa je potrebno upoštevati še stroške logistike, organizacije ter čakalno dobo.

Takšno izvajanje upočasnjuje razvoj izdelkov, zmanjšuje fleksibilnost spreminjanj konstrukcije in ne omogoča hitre validacije izboljšav.

### 3 ISKANJE REŠITVE

Glavni faktor, ki vpliva na dolžino testiranja, je čas, porabljen za segrevanje in ohlajanje testiranih izdelkov. Hitrost prestopa toplote na ali iz izdelka je večinoma odvisna od uporabljenega medija, hitrosti medija, toplotne izgube in temperaturna razlika.

#### 3.1 Teoretično ozadje

Ključnega pomena je izbran medij. Ta mora imeti visoko toplotno prestopnost, omogočati čim širše stabilno temperaturno območje ter biti enostaven ter varen za uporabo. Od preprostih in enostavno dostopnih medijev zgornjim zahtevam najbolj ustreza voda (Tabela 1) [1]. Temperaturni razpon vode v tekočem stanju je omejen od 0°C do 100°C, testiranja naših izdelkov pa večinoma zahtevajo testiranja v območju od -40°C do 105°C. Z dodajanjem aditivov vodi (npr. antifreeze) lahko na račun poslabšanja toplotne prestopnosti dosežemo širše temperaturno območje ter hitrejši prenos toplote na ter iz izdelka kot s prenosom toplote preko zraka.

Tabela 1: Primerjava toplotne prestopnosti enostavnih medijev

Medij	Toplotna prestopnost naravna konvekcija pri $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
Zrak	5 - 10
Olje	30 - 60
Voda	400 - 600

### 3.2 Eksperimentalni preizkus metode

Prvi eksperimentalni preizkus šokiranja izdelkov zajema dve posodi z vodo. V prvi je bila hladna voda z ledom, druga pa je bila nameščena na električni grelec, ki je ohranjal njeno vsebino na robu vrelišča. Izdelke z notranjim temperaturnim senzorjem smo priklopili na merilno napravo ter jih ročno premikali iz hladne v vročo vodo. S spremljanjem temperature in izhodnega električnega signala izdelkov smo ugotovili, da njihova notranjost zanesljivo doseže temperaturo okolice (vode) že v manj kot 30 sekundah. Metodo smo nadgradili z robotsko roko, ki je olajšala proces in povečala ponovljivost testiranja (Slika 1).



Slika 1: Eksperimentalna metoda šokiranja izdelkov v vodi nadgrajena z robotsko roko

### 3.3 Rezultati eksperimentalnega preizkusa

Po več deset ciklih so se na znanih kritičnih mestih izdelkov pojavile razpoke, ki jasno ponazarjajo šibke točke konstrukcije. S tem smo potrdili, da metoda povzroča temperaturne napetosti v izdelkih, ki so primerljive ali večje s tistimi v šok komori.

Zaradi pozitivnih rezultatov smo se odločili za nadaljnji razvoj trenutne eksperimentalne metode v bolj ponovljiv in nadzorovan proces.

## 4 AVTOMATIZIRANA TESTNA CELICA

Eksperimentalno metodo smo prenesli v ograjeno testno celico z robotsko roko v njeni sredini. Ta samodejno manipulira izdelke med vročo in hladno posodo. Vodo v vroči posodi ogrevamo z industrijskim termovanom, hladno pa hladimo z obdajanjem posode s suhim ledom. Posodi smo za večjo temperaturno stabilnost in prihranek energije dodatno toplotno izolirali, testno celico pa zavarovali z varnostnimi vrati in svetlobnimi zavesami (Slika 2).



Slika 2: Avtomatizirana tesna celica med izvajanjem temperaturnega šokiranja

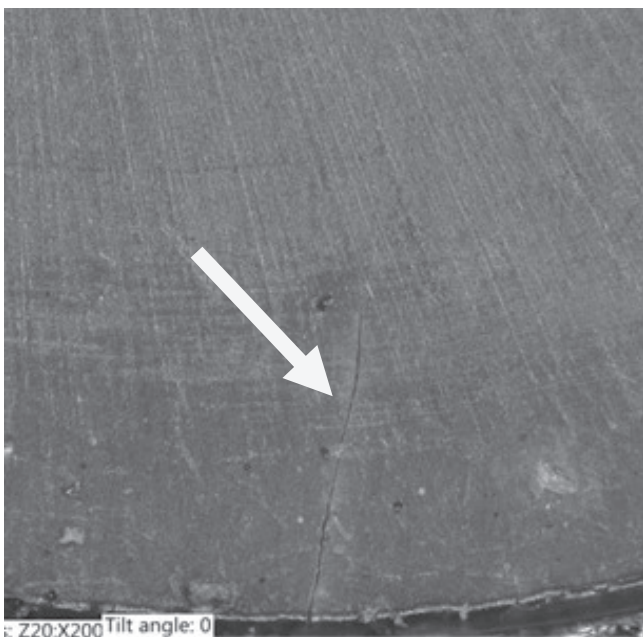
Takšen sistem omogoča natančno definiranje manipulacije in njenih parametrov (število ciklov, čas izdelkov v hladni in vroči posodi, hitrost manipulacije izdelkov, mešanje in odcejanje izdelkov v ter izven posode...), spremljanje električnih izhodov ter temperature vsakega izdelka posebej. V trenutni konfiguraciji lahko testna celica obratuje več ur, brez posegov operaterjev ali potrebe po nadzoru delovanja.

Avtomatizacija manipulacije veča ponovljivost ciklov in popolnoma odpravlja vpliv človeškega faktorja na rezultat.

#### 4.1 Analiza testiranih izdelkov

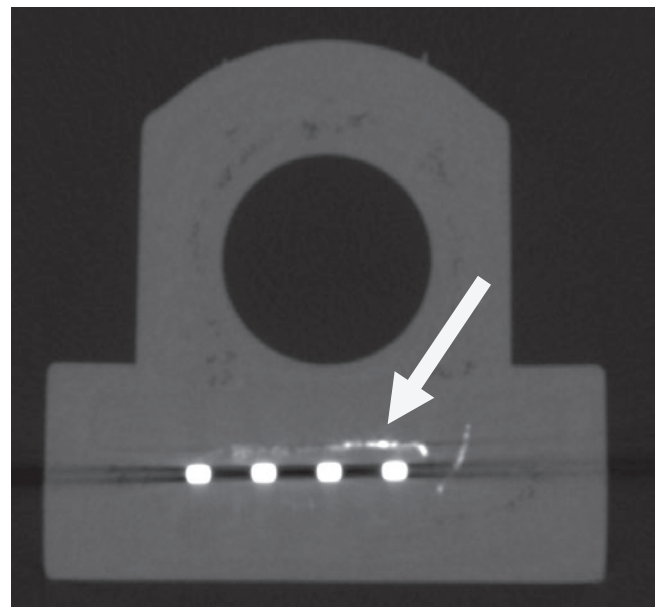
Učinkovitost nove metode temperaturnega šokiranja smo preizkusili na več tipih izdelkov. Te smo pred in po cikličnem šokiranju v vodi vizualno in funkcionalno analizirali ter zaznali pomembne spremembe.

Rezultati testiranj so jasno pokazali degradacijo izdelkov na enak način kot pri testih v klasičnih šok komorah. Na kritičnih mestih konstrukcije smo zaznali razpoke (Slika 3), značilne za temperaturno utrujanje materiala. Na podlagi ugotovljenih poškodb smo tolikokrat izvedli optimizacije konstrukcije ter ponovno testiranje, dokler nismo popolnoma odpravili pojavnost razpok.



Slika 3: Razpoka v materialu na kritičnem mestu izdelka po temperaturnem šokiranju

Novo metodo smo uporabili tudi pri testiranju izdelkov z obrizganimi elektronskimi komponentami s ciljem preverjanja tesnosti obrizga. V hladno vodo za šokiranje smo vmešali predpisano vsebnost soli ter s spremljanjem električnega signala izdelkov neprestano preverjali prodor slane vode v notranjost izdelkov. Po končanem testu smo izdelke analizirali tudi z računalniško tomografijo (CT), ki omogoča ne destruktiven vpogled v notranjo strukturo izdelka. Na podlagi rezultatov in zaporednih testiranj smo lahko optimizirali geometrijo izdelkov in izboljšali tesnost obrizga.



Slika 4: CT posnetek izdelka z zaznanimi sledmi soli v njegovi notranjosti

Z analizo smo potrdili, da metoda omogoča zanesljivo identifikacijo konstrukcijskih pomanjkljivosti ter bistveno hitrejše razvojne iteracije v primerjavi s klasičnimi klimatskimi testi.

#### 4.2 Prihranki avtomatizirane metode

Avtomatizirana celica v primerjavi s testiranjem v komori prinaša znatne časovne ter posledično tudi finančne prihranke testiranja (Tabela 2). V letu 2024 smo na dotičnem izdelku izvedli tri testiranja, zato ocenjeni skupni prihranek presega 35.000 € skupni časovni prihranek pa približno 60 dni.

Tabela 2: Primerjava testiranj za konkreten izdelek

Metoda testiranja	Čas testiranja [dan]	Cena testiranja [€]
Šokiranje v komori (zunanja izvedba)	22	12.386
Robotsko šokiranje (interna izvedba)	2	122

Predvsem pomembna pa je tudi večja fleksibilnost, saj lahko z novo metodo testiranja izvedemo takoj, brez čakanja na termin v laboratoriju.

## 5 TRAJNOSTNI UČINKI METODE

Metoda neposredno podpira razvoj projektov v skupni letni prodajni vrednosti višji od 16.000.000 €. Hitrejši razvoj pomeni hitrejšo validacijo in krajši čas do vstopa na trg.

Testna celica je bila skoraj v celoti izdelana iz odpisanih komponent drugih proizvodnih linij, kar zajema robotsko roko, konstrukcijo celice, svetlobne zavese, tipke, stikalne omare ter večina ostalih mehanskih elementov. S takšnim pristopom zmanjšujemo odpad in podaljšujemo življenjsko dobo opreme.

Uporabljen suhi led je izdelan iz recikliranega CO<sub>2</sub>, električna energija, potrebna za zagon opreme, pa je pridobljena iz lastnih obnovljivih virov, kar dodatno zmanjšuje ogljični odtis. Zaradi logistične poenostavitve smo zmanjšali tudi emisije ter transportne stroške.

## 6 EDINSTVENOST REŠITVE

Med razvojem rešitve nismo našli primerljive metode testiranja, ki bi združevala uporabo dveh tekočih medijev in avtomatske manipulacije za namen hitrega temperaturnega šokiranja izdelkov.

Inovacija ne temelji na kompleksni tehnologiji, temveč s preprostimi spremembami standardnih procesov dosega večkratno pohiترitev procesa. Rešitev je enostavno prilagodljiva različnim oblikam in zahtevam izdelkov, zato jo bomo razvijali in izboljševali tudi v prihodnje.

## 7 SKLEP

Razvita metoda robotskega temperaturnega šokiranja v tekočih medijih predstavlja učinkovito procesno inovacijo na področju razvoja avtomobilskih komponent. Omogoča bistveno hitrejši prenos toplote, krajše testne cikle ter pomembne finančne prihranke.

S tem se ne izboljšuje le stroškovna učinkovitost, temveč tudi kakovost razvojnega procesa. Hitrejše povratne informacije pa omogočajo več optimizacijskih korakov in posledično zanesljivejše izdelke.

Metodo redno uporabljamo v našem razvoju, saj predstavlja pomembno konkurenčno prednost pri razvoju zahtevnih hibridnih komponent.

Viri:

- [1] Wikipedija, Prenos toplote ([https://sl.wikipedia.org/wiki/Prenos\\_toplote](https://sl.wikipedia.org/wiki/Prenos_toplote))

## PRILAGAJANJE KAKOVOSTI VODE RAZLIČNIM INDUSTRIJSKIM NAMENOM

**Tadeja VOLAUŠEK**

Nanoten d. o. o.

### IZVLEČEK

Voda je ena ključnih surovin v industriji, saj se uporablja kot vhodna sestavina izdelkov, procesni medij, hladilno ali grelno sredstvo ter kot del sanitarnih in tehnoloških postopkov. Ker so načini uporabe vode zelo različni, se bistveno razlikujejo tudi zahteve glede njene kakovosti in stopnje obdelave. Članek obravnava vlogo vode v različnih industrijskih sektorjih ter predstavlja glavne metode priprave procesnih vod glede na njihov namen uporabe. Poseben poudarek je namenjen živilski, farmacevtski, energetske in elektronski industriji, kjer so zahteve po kakovosti vode najvišje. Zaključek izpostavlja pomen prilagojenih rešitev in sodobnih pristopov k upravljanju industrijskih vod.

### 1 UVOD

Voda ima v industriji izjemno pomembno in vsestransko vlogo. Uporablja se kot osnovna surovina, del tehnoloških procesov, nosilec energije ter kot sredstvo za čiščenje in zagotavljanje higienskih pogojev. Kakovost vode neposredno vpliva na stabilnost proizvodnih procesov, kakovost končnih izdelkov, obratovalne stroške ter življenjsko dobo opreme.

Osnovno načelo priprave industrijskih oziroma procesnih vod je, da mora biti njihova kakovost vedno prilagojena konkretni uporabi. Enotna rešitev ne obstaja, saj se zahteve med posameznimi panogami bistveno razlikujejo in so odvisne od tehnoloških, zakonodajnih in varnostnih dejavnikov.

### 2 VODA KOT VHODNA SUROVINA V PROIZVODNJI

V nekaterih industrijah voda ni le pomožno sredstvo, temveč postane sestavni del končnega izdelka. To zahteva izjemno visoko stopnjo nadzora in obdelave.

#### 2.1 Živilsko-predelovalna industrija

V živilski industriji se voda uporablja pri polnjenju pijač, pranju surovin, proizvodnji mlečnih izdelkov in pripravi konzervirane hrane. Kakovost uporabljene vode mora izpolnjevati

stroge higienske zahteve, ki pogosto presegajo zahteve za pitno vodo.

Najpogosteje se uporabljajo kombinacije mehanske filtracije, filtracije z aktivnim ogljem, UV-razkuževanja ter membranskih postopkov, kot je reverzna osmoza. Cilj obdelave je zagotoviti mikrobiološko stabilnost ter odstranitev organskih in anorganskih nečistoč.



Slika 1: Reverzna osmoza INOX IoT MO6 8''  
(Vir: Ecosoft)

#### 2.2 Farmaceutska industrija

Farmaceutska industrija zahteva najvišje standarde kakovosti vode. Uporabljajo se različne kategorije vode, kot so purified water, highly purified water in water for injections (WFI), pri čemer ima vsaka natančno predpisane mejne vrednosti.

Priprava vode vključuje destilacijo, dvojno reverzno osmozo, elektrodeionizacijo ter redno termično dezinfekcijo sistemov. Poseben pomen ima nadzor endotoksinov, ki lahko bistveno vplivajo na varnost zdravil.

### 3 VODA KOT TEHNOLOŠKI MEDIJ

V številnih panogah voda ne postane del izdelka, ima pa ključno vlogo pri delovanju tehnoloških procesov.

#### 3.1 Procesna voda

Procesna voda se uporablja za pranje sestavnih delov, raztapljanje surovin, transport materialov ter pripravo tehnoloških raztopin. Njena kakovost mora preprečevati korozijo, nalaganje oblog in onesnaževanje proizvodnih linij.

V kemični, tekstilni in petrokemični industriji se zahteve razlikujejo glede na pH-vrednost, trdoto, vsebnost raztopljenih soli in ionsko sestavo. Prilagoditev se dosega z mehčanjem, demineralizacijo, filtracijo oziroma membranskimi tehnologijami.

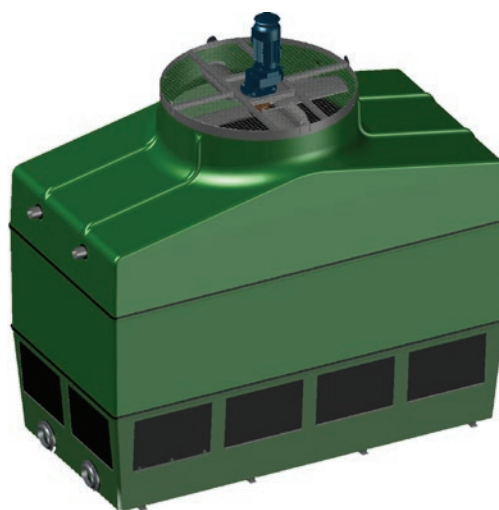
### 4 VODA ZA OGREVANJE IN HLAJENJE

V ogrevalnih in hladilnih sistemih voda deluje kot pomemben energetski medij, zato mora zagotavljati zanesljivo in učinkovito delovanje opreme.

#### 4.1 Hladilni sistemi

Hladilni stolpi in krožni hladilni sistemi so izpostavljeni koroziji, nalaganju vodnega kamna ter razmnoževanju mikroorganizmov. Neustrezno obdelana voda lahko vodi do zamašitev, zmanjšane toplotne učinkovitosti in višje porabe energije.

Priprava hladilne vode obsega mehčanje, filtracijo, doziranje inhibitorjev korozije ter nadzorovan biocidni tretma.



Slika 2: Hladilni stolp BV – CTP (Vir: Nanoten d.o.o.)

#### 4.2 Kotlovska voda

V kotlovskih sistemih morajo biti nečistoče skoraj popolnoma odstranjene. Raztopljene soli povzročajo nalaganje oblog, kar zmanjšuje prenos toplote in povečuje varnostna tveganja.

Za pripravo kotlovske vode se uporabljajo mehčanje, dekarbonizacija, demineralizacija, reverzna osmoza ter kemična stabilizacija sistema.

### 5 POSEBNE INDUSTRIJSKE APLIKACIJE

#### 5.1 Elektronska industrija

V mikroelektroniki se uporablja ultra-čista voda (UPW), ki vsebuje izjemno nizke koncentracije ionov, delcev in mikroorganizmov. Uporablja se predvsem za izpiranje silicijevih rezin, kjer že minimalne nečistoče povzročijo napake v izdelkih.

#### 5.2 Energetika

V energetiki, zlasti v elektrarnah s parnimi turbinami, je kakovost vode ključna za varno in učinkovito obratovanje. Uporabljajo se kombinirani sistemi mehčanja, demineralizacije, elektrodeionizacije ter stalni nadzor kemijske sestave vode.

## 6 KONCEPT ZLD

Koncept ZLD (Zero Liquid Discharge) ali “nični izpust tekočin” predstavlja vrhunec ekološkega inženiringa pri obdelavi industrijskih odpadnih vod. Gre za strateški proces upravljanja z vodami, pri katerem se vsa odpadna voda iz industrijskega obrata reciklira in ponovno uporabi, s čimer se popolnoma prepreči izpust tekočih odpadkov v okolje (vode, kanalizacijo ali tla).

Na koncu procesa namesto tekočih izpustov ostanejo le trdni odpadki, ki jih je mogoče varno odložiti ali celo predelati v uporabne surovine.

### 6.1 Glavni koraki ZLD procesa

Sistem ZLD ni ena sama naprava, temveč zaporedje tehnologij, ki postopoma zmanjšujejo prostornino odpadne vode:

- Predobdelava (Kemična in fizikalna): Podobno kot pri standardni obdelavi, se tukaj odstranijo suspendirane snovi, trdota (kalcij, magnezij) in organske nečistoče. To je ključno za zaščito membran v naslednjih fazah.
- Koncentriranje (Reverzna osmoza – RO): Voda se potisne skozi polprepustne membrane, ki zadržijo večino soli in mineralov. S tem procesom se pridobi do 90 % čiste vode, ki se vrne v proizvodnjo.
- Termična evaporacija (Uparjanje): Preostala visoko koncentrirana slanica se segreva v uparjalnikih. Voda izpari in se kondenzira kot čista destilirana voda, koncentrat pa postane še gostejši.



Slika 3: Uparjalnik ACS 6 (Vir: Veolia Water Technologies)

## 7 ZAKLJUČEK

Priprava procesnih vod je ključni dejavnik uspešne, varne in trajnostne industrijske proizvodnje. Zaradi raznolikih vlog vode je nujno, da so sistemi za njeno obdelavo prilagojeni specifičnim zahtevam posamezne panoge. Pravilna priprava vode izboljšuje kakovost izdelkov, zmanjšuje stroške vzdrževanja, podaljšuje življenjsko dobo opreme ter pomembno prispeva k trajnostnim ciljem industrije.

Viri:

- [1] Perry, R. H., Green, D. W.: *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill.
- [2] Metcalf & Eddy: *Wastewater Engineering – Treatment and Resource Recovery*, McGraw-Hill.
- [3] WHO: *Water Quality Guidelines*, World Health Organization.
- [4] Veolia Water Technologies Italia S.p.A.
- [5] Ecosoft 22 BV, Leuvensesteenweg 633, 1930 Zaventem, Belgium



## UVAJANJE ALTERNATIVNIH POLIMERNIH MATERIALOV V SERIJSKO PROIZVODNJO: OD LABORATORIJSKE VALIDACIJE DO STABILNEGA PROIZVODNEGA PROCESA

**David ČREŠNAR, Aleksander SEDOVŠEK**  
BSH Hišni aparati d.o.o., Nazarje

### IZVLEČEK

*Prispevek obravnava zamenjavo polimernih materialov na ročnih mešalnikih v podjetju BSH z vidika tehnične ustreznosti in procesne izvedljivosti. Cilj je ovrednotiti, kako laboratorijska testiranja podpirajo odločanje pri uvajanju cenovno ugodnejših alternativnih materialov v serijsko proizvodnjo. Izvedeni so bili primerjalni testi referenčnega in alternativnega polimernega materiala ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), vključno s kontroliranim injekcijskim brizganjem, določanjem MFI (Melt Flow Index), mehanskimi (natezni in upogibni preizkus) in termičnimi/termomehanskimi analizami (DSC – Differential Scanning Calorimetry, DMA – Dynamic Mechanical Analysis, TMA – Thermomechanical Analysis). Rezultati so pokazali primerljivost materialov pri ključnih lastnostih, hkrati pa so bili prepoznani izzivi pri procesnem oknu injekcijskega brizganja. S pripravo smernic za predelavo in s potrditvijo na kritičnih referenčnih komponentah, vključno s testi Life Time (LTT), aprobačijskimi in funkcijskimi testi, je bila dosežena stabilna serijska proizvodnja. Opisani pristop je omogočil masovno zamenjavo materiala na velikem številu sestavnih delov ter prihranil več kot 50 odstotkov časa (preliminarna ocena) pri potrjevanju komponent.*

### 1 UVOD

Sektor malih gospodinjskih aparatov se sooča z naraščajočimi pritiski, povezanimi z razpoložljivostjo surovin in njihovimi cenami. Pri materialih na osnovi akrilonitrila, butadiena in stirena (ABS) je trg v zadnjih letih doživel izrazite motnje v dobavnih verigah, kar je številna podjetja spodbudilo k iskanju alternativnih materialov in novih dobaviteljev. Tudi v podjetju BSH smo se soočili s podobnimi izzivi na področju ročnih mešalnikov kot tudi v drugih produktnih skupinah, kjer ABS predstavlja enega ključnih strukturnih materialov za brizgane komponente.

Zamenjava materiala pri obstoječih serijsko brizganih komponentah ni trivialna naloga, temveč zahteva sistematičen pristop, ki vključuje laboratorijsko karakterizacijo, prilagoditev procesnih parametrov in formalno potrditev komponent. Tradicionalni pristop, ki temelji na individualnem potrjevanju posameznih komponent z obsežnimi testi Life Time (LTT, testi življenjske dobe), aprobačijskimi in funkcijskimi testi, je pri velikem številu komponent časovno in stroškovno izjemno

zahteven. Potreba po učinkovitejši metodologiji je spodbudila razvoj strukturiranega procesa masovne zamenjave materialov.

V tem prispevku predstavljamo razviti pristop, ki temelji na primerjalni laboratorijski validaciji materialov, vzorčnih brizganjih, definiciji procesnega okna in potrditvi omejenega nabora kritičnih referenčnih komponent. Praktične izkušnje kažejo, da tak pristop omogoča več kot 50-odstotni prihranek časa (preliminarna ocena) v primerjavi s konvencionalnim postopkom individualnega potrjevanja vsake komponente.

### 2 METODOLOGIJA

Razvita metodologija obsega štiri medsebojno povezane faze (slika 1), ki skupaj tvorijo celovit proces uvajanja alternativnega polimernega materiala v serijsko proizvodnjo.



Slika 1: Diagram poteka procesa uvajanja alternativnega materiala

## 2.1 Laboratorijska karakterizacija materialov

V prvi fazi smo izvedli poglobljeno karakterizacijo referenčnega in alternativnega materiala. Vzorci so bili predelani z injekcijskim brizganjem na stroju KraussMaffei CX 50-180 pri enakih procesnih pogojih, kar je zagotovilo primerljivost rezultatov.

Nabor preizkusov je bil zasnovan tako, da zajema tri dimenzije tveganja, ki bi se pri zamenjavi materiala brez ustrezne validacije pokazale šele kot odpovedi v življenjski dobi aparata, torej v fazi, v kateri je korekcija najdražja.

Natezni preizkus po standardu ISO 527 določa E-modul, natezno trdnost in raztezek pri pretrgu. Te vrednosti opisujejo obnašanje komponent pri statičnih in dinamičnih obremenitvah med normalno uporabo aparata. S tem zmanjšujemo tveganje krhkega loma ali čezmerne deformacije komponent pri obremenitvah, ki jim bodo izpostavljene med celotno življenjsko dobo.

Upogibni preizkus po standardu ISO 178 dopolnjuje natezni preizkus z določitvijo togosti pri upogibni obremenitvi, ki je značilna za tankostenske brizgane komponente, kot so ohišja, pokrovi in nosilni elementi. S tem preprečujemo zvijanje ali pokanje komponent med montažo oziroma pri pritrjevanju z vijaki.

Diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC) določa toplotne prehode materiala, kot sta steklasti prehod in tališče, meritev časa indukcije oksidacije (OIT) pa podaja odpornost materiala proti oksidativni degradaciji pri povišanih temperaturah. Na izdelku se to odraža v dolgoročni stabilnosti lastnosti komponent v bližini elementov, ki se med delovanjem aparata segrevajo. Prezgodnje staranje in degradacija materiala bi se sicer pokazala šele po več mesecih obratovanja v testih Life Time (LTT) oziroma med dejansko življenjsko dobo aparata [1].

Dinamična mehanska analiza (DMA) pri frekvenci 1 Hz dopolnjuje DSC z meritvijo dinamičnega E-modula v odvisnosti od temperature. Medtem ko DSC zazna temperaturne prehode, DMA pokaže, kako se dejanska togost materiala spreminja pri

obratovalnih temperaturah. Komponenta, ki je pri 23 °C zadovoljivo toga, se lahko pri 90 °C znatno zmečča in postane funkcionalno neustrezna, kar predstavlja tveganje, ki ga brez tovrstne analize ni mogoče zaznati.

Termomehanska analiza (TMA) določa linearni koeficient temperaturnega raztezanja (CTE), ki je ključen pri komponentah v stiku s kovinskimi elementi, kot so vijaki, osi ali motorji. Različna CTE materialov pri termičnem obremenjevanju ustvarjata napetosti, ki lahko sčasoma povzročijo razpoke, izgubo prednapetja ali dimenzijska odstopanja.

Indeks tečenja taline (MFI) po standardu ISO 1133 predstavlja posredni kazalnik pretočnosti taline in molekulske mase. Različen MFI pomeni tudi različno procesno okno pri injekcijskem brizganju. Uporaba enakih procesnih parametrov kot pri referenčnem materialu bi pri alternativnem materialu lahko povzročila nepopolno zapolnjeno gravuro orodja, prelivanje materiala ali nastanek notranjih napetosti, ki bi se lahko kasneje pokazale kot razpoke med montažo, v okviru LTT ali celo kasneje v življenjski dobi aparata [2].

## 2.2 Definicija procesnega okna injekcijskega brizganja

Lastnosti materialov se neposredno odražajo v procesnem obnašanju pri injekcijskem brizganju, zato smo na serijskih orodjih v drugi fazi referenčne komponente najprej nabrizgali z alternativnim materialom. Ugotovljene razlike v MFI in karakteristikah krčenja (skrčka) materiala so zahtevale prilagoditev procesnih parametrov, kot so tlak pri preklopu, pot plastificiranja in višina naknadnega tlaka.

Na podlagi sistematičnega preizkušanja smo definirali procesno okno za alternativni material, ki tako interno v BSH kot tudi pri zunanjih izvajalcih zagotavlja serijsko stabilen proces injekcijskega brizganja in posledično skladne komponente. Rezultati vzorčnih brizganj so bili dokumentirani v obliki priporočil za nastavitev parametrov procesa injekcijskega brizganja.

## 2.3 Potrditev referenčnih komponent

V tretji fazi smo določili sklop kritičnih referenčnih komponent z najvišjim tveganjem glede na mehanske obremenitve, toplotne obremenitve in estetske zahteve. Te komponente smo podvrgli celovitemu procesu potrjevanja, ki je vključeval LTT, aprobacijske in funkcijske teste v skladu s potrditvenim postopkom ter internimi standardi podjetja BSH. Uspešna potrditev referenčnih komponent je predstavljala osnovo za masovno zamenjavo materiala v celotni skupini komponent brez individualnega testiranja vsake posamezne komponente. S tem smo laboratorijsko analizo potrdili kot verodostojen kazalnik stanja materiala.

## 2.4 Masovna zamenjava materiala

V zadnji fazi smo vzpostavili dokumentirani postopek masovne zamenjave materiala. Vsaka komponenta je bila potrjena na podlagi meril referenčnih komponent, rezultatov laboratorijske karakterizacije in definiranega procesnega okna. Sledljivost sprememb je bila zagotovljena z internim sistemom dokumentiranja sprememb materialov.

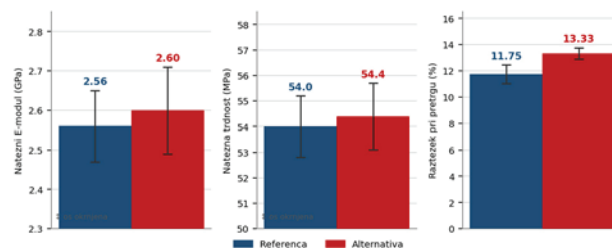
## 3 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 3.1 Mehanske lastnosti

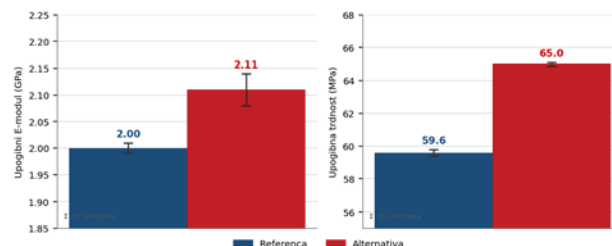
Rezultati nateznih in upogibnih preizkusov so zbrani v tabeli 1. Alternativni material izkazuje nekoliko višje vrednosti nateznega E-modula (+1,6 %), natezne trdnosti (+0,7 %) in raztezka pri pretrgu (+12,7 %) (slika 2) ter upogibnega E-modula (+5,0 %) in upogibne trdnosti (+9,1 %) (slika 2). Standardne deviacije so pri obeh materialih primerljive.

Tabela 1: Primerjava mehanskih lastnosti materialov

Lastnost	Referenca	Alternativa
Natezni E-modul (GPa)	2,56 ± 0,1	2,60 ± 0,1
Natezna trdnost (MPa)	54,0 ± 1,2	54,4 ± 1,3
Raztezek pri pretrgu (%)	11,8 ± 0,7	13,3 ± 0,4
Upogibni E-modul (GPa)	2,0 ± 0,1	2,1 ± 0,1
Najv. upogibna trdnost (MPa)	59,6 ± 0,2	65,0 ± 0,1



Slika 2: Natezne lastnosti materialov



Slika 2: Upogibne lastnosti materialov

Povečana togost in trdnost alternativnega materiala sta najverjetneje posledica prisotnosti delno kristalinične faze akrilonitrila, kar potrjuje DSC-analiza. Ta lastnost je lahko ugodna z vidika strukturne trdnosti, hkrati pa potencialno kritična pri montaži komponent z zatičnimi spoji, kjer bi povečana togost lahko povzročila pokanje.

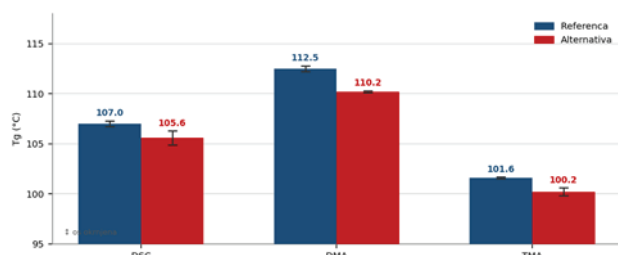
### 3.2 Toplotne in termomehanske lastnosti

DSC-analiza je razkrila eno glavnih razlik med materialoma: pri alternativnem materialu je bil zaznan endotermni pik pri  $\sim 127,7^\circ\text{C}$  ( $\Delta H_m = 0,45 \text{ J/g}$ ), ki pri referenčnem materialu ni prisoten. Ta pik nakazuje prisotnost delno kristalinične faze, verjetno povezane z morfologijo akrilonitrilnega kopolimera. Med ohlajanjem je bila zaznana kristalizacija pri  $\sim 90^\circ\text{C}$ . To lahko vpliva na dimenzijsko stabilnost brizganih komponent, ki so lahko po ohlajanju nekoliko manjše v primerjavi z referenčnim materialom, pri katerem kristalizacija med ohlajanjem ni prisotna [1], [3].

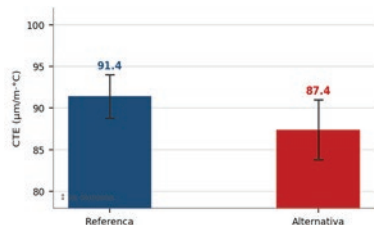
Steklasti prehod ( $T_g$ ), določen z DSC, je pri referenčnem materialu nekoliko višji ( $107,0^\circ\text{C}$  proti  $105,6^\circ\text{C}$ ), kar se potrjuje tudi z DMA ( $112,5^\circ\text{C}$  proti  $110,2^\circ\text{C}$ ) in TMA ( $101,6^\circ\text{C}$  proti  $100,2^\circ\text{C}$ ) (slika 4). Razlika približno  $2^\circ\text{C}$  je za večino aplikacij zanemarljiva, vendar lahko postane relevantna pri komponentah, ki delujejo pri temperaturah nad  $100^\circ\text{C}$ , saj se v tem

območju lahko začnejo izražati razlike v mehanskem odzivu materiala [4].

Linearni koeficient temperaturnega raztezanja (CTE) je pri alternativnem materialu nižji ( $87,4 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  proti  $91,4 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ) (slika 3), kar ugodno vpliva na dimenzijsko stabilnost [5].



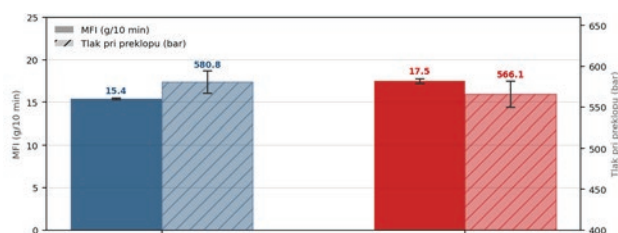
Slika 4: Steklasti prehod (T<sub>g</sub>) – primerjava z DSC, DMA in TMA



Slika 5: Linearni koeficient temperaturnega raztezka (CTE)

### 3.3 Procesno okno in priporočila za brizganje

Vzorčna brizganja so pokazala, da alternativni material pri enakih procesnih nastavitvah dosega nižji tlak pri preklopu (566 bar proti 581 bar) in manjšo blazinico taline (2,5 mm proti 3,9 mm). Razlog je višji MFI (17,5 g/10 min proti 15,4 g/10 min pri 220 °C/10 kg) (slika 4), ki nakazuje boljšo pretočnost taline, kar je verjetno povezano z razlikami v molekularni strukturi in morfologiji materiala ter delno pogojeno s taljenjem delno kristalinične faze.



Slika 4: MFI in tlak pri preklopu – primerjava materialov

Brizganje referenčnih komponent z uporabo postopka injekcijskega brizganja je potekalo v skladu s pričakovanji (glede na rezultate karakterizacije) ter priporočili za predelavo materiala. Pri pripravi procesa so bile upoštevane izkušnje s predhodnih testiranj in obstoječe tehnološke smernice, kar je omogočilo stabilen proces in doseganje ustrezne kakovosti komponent.

Cilj brizganja referenčnih komponent je bil vzpostaviti zanesljivo osnovo za nadaljnje vrednotenje in primerjavo alternativnega materiala v pogojih serijske proizvodnje. Posebna pozornost je bila namenjena ključnim procesnim parametrom, kot so temperatura taline, temperatura orodja, tlaki brizganja, hitrost brizganja in pogoji hlajenja, saj ti neposredno vplivajo na mehanske lastnosti, dimenzijsko stabilnost in estetsko kakovost izdelkov.

Poleg procesne stabilnosti so bile ocenjene tudi estetska kakovost, dimenzijska natančnost in funkcionalna ustreznost komponent. Vse izdelane referenčne komponente so uspešno izpolnile zahtevana merila, kar potrjuje ustreznost vzpostavljenega procesnega izhodišča za nadaljnjo primerjavo z alternativnim materialom.

Z ustrezno prilagoditvijo tlaka pri preklopu, poti plastificiranja in višine naknadnega tlaka je bilo definirano stabilno procesno okno. Ključni parametri so bili dokumentirani in urejeni kot tehnično priporočilo za predelavo alternativnega materiala.

### 3.4 Potrditev referenčnih komponent in učinkovitost pristopa

Potrditev na kritičnih referenčnih komponentah je bila izvedena v skladu s konvencionalno metodologijo podjetja BSH, ki vključuje LTT, aprobacijske in funkcijske teste. Vse referenčne komponente so uspešno prestale potrjevanje. Na podlagi teh rezultatov primerjalne laboratorijske analize materialov je bila sprejeta odločitev o masovni zamenjavi materiala v celotnem portfelju komponent, ki temeljijo na referenčnem materialu.

Primerjava med konvencionalnim pristopom (individualno potrjevanje vsake komponente) in razvitim agilnim procesom kaže, da slednji

omogoča več kot 50-odstotni prihranek časa ter znižanje stroškov. Ocena prihranka časa temelji na primerjavi povprečnega časa validacije komponent po konvencionalnem in novem postopku. To je v skladu z ugotovitvami o prednostih metodologij zmanjšane obsega testiranja pri ustrezno validiranih zamenjavah materialov.

#### 4 ZAKLJUČEK

Razvita metodologija za uvajanje alternativnih polimernih materialov v serijsko injekcijsko brizganje temelji na sistematični analizi lastnosti materialov. Omenjene lastnosti neposredno vplivajo na procesno obnašanje materiala in funkcionalnost končnih komponent. Ključni elementi metodologije so laboratorijska karakterizacija materiala, optimizacija procesnega okna in validacija na kritičnih referenčnih komponentah, kar omogoča učinkovito in zanesljivo izvedbo masovne zamenjave materiala v serijski proizvodnji.

Primerjalna analiza referenčnega in alternativnega materiala je pokazala visoko stopnjo primerljivosti v večini ključnih mehanskih, termičnih in procesnih lastnosti. Alternativni material izkazuje nekoliko višjo togost in boljšo pretočnost taline, hkrati pa so bile identificirane specifične razlike v termičnem obnašanju materiala, povezane s prisotnostjo delno kristalinične faze. Te razlike vplivajo predvsem na dimenzijsko stabilnost pri injekcijskem brizganju in na mehanski odziv komponent pri povišanih temperaturah, zaradi česar je bila potrebna prilagoditev procesnih parametrov.

Predlagani pristop omogoča več kot 50-odstotni prihranek časa pri potrjevanju komponent v primerjavi s konvencionalnim individualnim potrjevanjem. Dodatne prednosti metodologije so strukturirano odločanje na podlagi eksperimentalnih podatkov, zmanjšanje obsega validacijskih aktivnosti, standardizirane smernice za predelavo materiala ter učinkovitejše obvladovanje tveganj v celotnem življenjskem ciklu produkta.

Toda metodologija v industrijskem okolju predstavlja ne le optimizacijo postopka potrjevanja materialov, temveč tudi pomemben

element odpornosti podjetja proti motnjam v dobavnih verigah. Geopolitične napetosti, pandemije in druge krizne razmere so v zadnjih letih pokazale, kako hitro lahko to vodi do omejene dobavljivosti polimernih surovin. Podjetje z vzpostavljeno metodologijo za hitro laboratorijsko karakterizacijo in validacijo alternativnih materialov se lahko na takšne razmere odzove bistveno hitreje in učinkoviteje, kar danes predstavlja pomembno konkurenčno prednost.

V tem kontekstu je laboratorijska karakterizacija materiala ne le razvojni strošek, temveč tudi naložba v zanesljivost in stabilnost proizvodnega procesa.

Viri:

- [1] Fiorio, R., Villanueva Díez, S., Sánchez, A., D'hooge, D. R., Cardon, L.: Influence of Different Stabilization Systems and Multiple UVA Aging/Recycling Steps on Physicochemical, Mechanical, Colorimetric, and Thermal-Oxidative Properties of ABS. *Materials*, 13(1), 212, 2020. DOI: 10.3390/ma13010212
- [2] Myers, M., Mulyana, R., Castro, J. M., Hoffman, B.: Experimental Development of an Injection Molding Process Window. *Polymers*, 15(15), 3207, 2023. DOI: 10.3390/polym15153207
- [3] Fiorio, R., Araújo, C. F., Cardon, L., D'hooge, D. R.: A Statistical Analysis on the Effect of Antioxidants on the Thermal-Oxidative Stability of Commercial Mass- and Emulsion-Polymerized ABS. *Polymers*, 11(3), 362, 2019. DOI: 10.3390/polym11030362
- [4] Saenz, F., Otarola, C., Valladares, K., Rojas, J.: Evaluation of Dynamic Properties in ABS and PLA Thermoplastics Across Frequency Ranges. *Scientific Reports*, 15, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-26846-9
- [5] Khina, A. G., Bulkatov, D. P., Storozhuk, I. P., Sokolov, A. P.: Coefficient of Linear Thermal Expansion of Polymers and Polymer Composites: A Comprehensive Review. *Polymers*, 17(23), 3097, 2025. DOI: 10.3390/polym17233097

UVAJANJE ALTERNATIVNIH POLIMERNIH MATERIALOV V SERIJSKO PROIZVODNJO: OD  
LABORATORIJSKE VALIDACIJE DO STABILNEGA PROIZVODNEGA PROCESA

David ČREŠNAR, Aleksander SEDOVŠEK

BSH Hišni aparati d.o.o., Nazarje

---

## IZBOLJŠANJE LASTNOSTI RECIKLIRANEGA PA66 GF15 Z RAZLIČNIMI DODATKI

**Silvester BOLKA<sup>1</sup>, Tamara ROZMAN<sup>1</sup>, Rajko BOBOVNIK<sup>1</sup>, Aljaž KOLAR<sup>2</sup>,  
Bojan BREZNIK<sup>2</sup>, Primož HABERMAN<sup>2</sup>, Blaž NARDIN<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fakulteta za tehnologijo polimerov

<sup>2</sup>O.P.S. Breznik d.o.o.

### IZVLEČEK

V prispevku bomo predstavili vpliv dodatkov na lastnosti mehansko recikliranega PA66 GF15 (poliamida 66 z dodanimi 15 % steklenih vlaken), ki je namenjen za brizganje tehničnih izdelkov. Na Fakulteti za tehnologijo polimerov smo komparativno izvedli na dvopolžnem ekstruderju. V rPA66 GF15 matrico smo dodajali zmleti odpad krakov vetrovni elektrarn, najmanjšo frakcijo odpadnega prahu poliestrskega duroplasta, drsno sredstvo in kompatibilizator. Pripravili smo 18 serij z različnimi recepturami in tako študirali vpliv posameznih dodatkov na lastnosti in predelovalne lastnosti rPA66 GF15. Za izvedbo karakterizacije smo preizkušance pripravili s postopkom brizganja skladne z oblikama ISO 527 tip 1BA in ISO 178 oz. ISO 179. V prispevku bomo predstavili vpliv dodatkov tako na toplotne kot mehanske lastnosti in tudi na predelavo. Dodatek zmletega odpadnega krakov vetrovni elektrarn je zvišal togost in trdnost in znižal žilavost. Dodatek odpadnega prahu poliestrskega duroplasta je zvišal hitrost kristalizacije in zvišal togost in trdnost pri minimalni količini. Dodatek kompatibilizatorja je izboljšal adhezijo med dodatki in matrico. Dodatek drsnega sredstva je znižal togost in trdnost, izboljšal pa je disperzijo dodatkov in zvišal dimenzijsko stabilnost. Izvedbe z višjo togostjo in trdnostjo so primerne za brizganje zahtevnih tehničnih izdelkov in s tem je odprta pot za izbiro tudi recikliranih termoplastičnih kompozitov za napredne aplikacije. Delo smo opravili na Fakulteti za tehnologijo polimerov in v podjetju O.P.S. Breznik d.o.o. v okviru projekta DeremCo.

### 1 UVOD

Recikliranje polimerov postaja vse bolj priljubljeno, predvsem zaradi naraščajočih stroškov primarnih polimerov in vpliva na okolje. Podjetjem omogoča ponovno uporabo odpadnih in slabših izdelkov, s čimer se zmanjšajo stroški končnih izdelkov. Pri mehanskem recikliranju se lastnosti materialov spremenijo, zato reciklata pogosto ni mogoče uporabiti samostojno, temveč ga je treba zmešati z originalnim materialom ali pa za povrnitev mehanskih lastnosti uporabiti ustrezno nadgradnjo [1,2].

V okviru projekta DeremCo, ki vključuje 30 evropskih partnerjev, je cilj vzpostaviti sistemsko rešitev krožnega gospodarstva za ponovno uporabo kompozitnih materialov v novih izdelkih z visoko dodano vrednostjo. Poseben izziv predstavljajo duroplastični kompoziti, kot so kraki vetrovni elektrarn, ki so običajno sestavljeni iz epoksi smole in steklenih vlaken. Ker so duroplasti premreženi, jih ni mogoče preprosto pretaliti kot termoplaste, zato se pogosto zmeljejo

in uporabijo kot polnilo z nizko ceno v novih kompozitih [3-7].

Namen te raziskave je bil preučiti vpliv različnih dodatkov na recikliran poliamid 66 s 15 % steklenih vlaken (PA66 GF15). PA66 je delnokristalinični termoplast z visoko natezno trdnostjo, togostjo in toplotno stabilnostjo. Z dodajanjem zmletega duroplastičnega odpadnega krakov vetrovni elektrarn (rGFRP) in poliestrskega mlevca (O1) smo želeli izboljšati mehanske lastnosti ob uporabi kompatibilizatorjev za boljše medfazno adhezijo.

### 2 TEORETIČNE OSNOVE

PA66 se uporablja v zahtevnih industrijskih aplikacijah zaradi svoje kemijske odpornosti in mehanske vzdržljivosti. Njegova kristalinična struktura prispeva k togosti in toplotni stabilnosti, medtem ko amorfnost zagotavlja odpornost proti udarcem. Pri recikliranju PA66 pride do degradacije polimernih verig, kar poslabša mehanske lastnosti, zato je uporaba

ojačeval in aditivov ključna za ohranjanje kakovosti materiala [4-7].

Za doseganje optimalnih lastnosti kompozitov je pogosto treba dodati kompatibilizatorje, ki zmanjšajo medfazno napetost med matrico in ojačitvijo. V raziskavi so bili uporabljeni kompatibilizatorji na osnovi termoplastičnega poliuretana (TPU). Drsna sredstva se dodajajo za izboljšanje pretočnosti taline in zmanjšanje trenja med predelavo, kar izboljša disperzijo polnil [4,5,7].

Slabost brizganja je hiter proces ohlajanja, kar lahko privede do nizke stopnje kristaliničnosti. Z dodajanjem drobnih, dobro zmletih trdih delcev (kot je poliestrski kompozitni mlevec) lahko ustvarimo kristalizacijska jedra, ki pospešijo tvorbo kristalov PA66 matrice in izboljšajo morfološko strukturo kompozita.

### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

#### 3.1 Uporabljeni materiali

Uporabljeni so bili naslednji materiali:

- polimerna matrica: recikliran poliamid 66 s 15 % steklenih vlaken (rPA66 GF15),
- ojačevalo 1: mlevec poliestrskega kompozita s frakcijo pod 125  $\mu\text{m}$ , ki deluje kot nukleacijsko jedro (O1),
- rGFRP: zmleti duroplastični odpad krakov vetrnih elektrarn (epoksi smola s steklenimi vlakni) (rGFRP),
- drsno sredstvo: Cesa Slip 6103 na polietilenski osnovi (DS) in
- kompatibilizator: TU S 5265 (K).

Sestava vzorcev je navedena v Tabeli 1.

#### 3.2 Priprava vzorcev

Pripravljenih je bilo 18 različnih receptur (Tabela 1). Komponente so bile natančno zatehtane in homogenizirane. Mešanje je potekalo na dvopolžnem ekstruderju LabTech LTE 20-44 (premer polžev 20 mm, L/D 44:1) pri temperaturah od 250 °C do 280 °C. Izdelan granulat je bil uporabljen za brizganje testnih preizkušancev na stroju Krauss Maffei CX 50-180.

Tabela 1: Sestava vzorcev za kompvndiranje

Vzorec	rGFRP (%)	O1 (%)	DS (%)	K (%)	rPA66 GF15 (%)
Vzorec 0	0	0	0	0	100
Vzorec 1	0	0,1	0	0	99,9
Vzorec 2	0	0,5	0	0	99,5
Vzorec 3	0	0,1	0	0,5	99,4
Vzorec 4	0	0,5	0	0,5	99
Vzorec 5	30	0	0	0	70
Vzorec 6	30	0	0	0,5	69,5
Vzorec 7	30	0,1	0	0	69,9
Vzorec 8	30	0,5	0	0	69,5
Vzorec 9	30	0,1	0	0,5	69,4
Vzorec 10	30	0,5	0	0,5	69
Vzorec 11	30	0	1	0	69
Vzorec 12	30	0	1	0,5	68,5
Vzorec 13	30	0,1	1	0	68,9
Vzorec 14	30	0,5	1	0	68,5
Vzorec 15	30	0,1	1	0,5	68,4
Vzorec 16	30	0,5	1	0,5	68
Vzorec 17	30	0,1	0	0,5	69,4

#### 3.3 Laboratorijski testi

Upogibni in natezni preizkusi so bili opravljeni na napravi Shimadzu AG-X plus v skladu z ISO 178 oziroma ISO 527-1. Za vsak vzorec je bilo opravljenih pet meritev. Pri upogibnem preizkusu smo vrednotili upogibni E modul ( $E_f$ ), maksimalno upogibno trdnost ( $\sigma_{fM}$ ) ter raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti ( $\epsilon_{fM}$ ). Pri nateznih preizkusih smo vrednotili natezni E modul ( $E_t$ ), natezno trdnost ( $\sigma_m$ ) in raztezek pri pretrgu ( $\epsilon_{tb}$ ). Termo-dinamične lastnosti smo vrednotili z napravo Perkin Elmer DMA 8000. Vzorce smo segrevali z 2 °C/min od 25 °C do 250 °C v zračni atmosferi. V načinu z dvojno prižemo smo uporabili frekvenco 1 Hz in amplitudo 20  $\mu\text{m}$ . Termogravimetrične analize (TGA) smo izvedli na instrumentu Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Vzorec smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa ga izotermno

držali pri 550 °C 20 min v kisikovi atmosferi (20 mL/min). Udarne preizkuse smo izvedli na napravi Dongguan Liyi Test Equipment, tip LY-XJJD5, v skladu s standardom ISO 179. Razdalja med podporama je bila 60 mm, za udarne preizkuse smo uporabili kladivo z energijo 2 J, za zarezne udarne preizkuse 1 J.

#### 4 REZULTATI

Togost materiala se je z dodajanjem duroplastičnega odpada (rGFRP) močno povečala. Najvišji upogibni E modul ( $E_f$ ) je dosegel vzorec 5 z vrednostjo 5,11 GPa, kar je znatno več od reference (3,20 GPa). To potrjuje, da reciklirana steklena vlakna iz vetrnic delujejo kot učinkovita ojačitev. Tudi upogibna trdnost se je povečala, največ pri vzorcu 5 (140,8 MPa). Poliestrski mlevec je imel manjši, a pozitiven vpliv na upogibne lastnosti, zlasti v kombinaciji s kompatibilizatorjem.

Referenčni vzorec 0 je imel modul okoli 3,2 GPa, medtem ko so vzorci z dodatki dosegli bistveno višje vrednosti. Natezna trdnost ( $\sigma_m$ ) se je gibala med 79,5 in 91,1 MPa. Zanimivo je, da je dodatek duroplastičnega odpada povzročil povečanje raztezka pri pretrgu pri vseh vzorcih, kar je bilo najbolj izrazito pri vzorcu 10 (5,91 %).

Tabela 2: Zbrani rezultati upogibnih testov

Vzorec	$E_f$ (GPa)	$\sigma_{fM}$ (MPa)	$\epsilon_{fM}$ (%)
Vzorec 0	3,20	114,6	6,92
Vzorec 1	3,22	113,6	6,95
Vzorec 2	3,30	114,8	6,97
Vzorec 3	3,04	107,7	7,09
Vzorec 4	3,32	113,4	6,94
Vzorec 5	5,11	140,8	5,63
Vzorec 6	4,35	134,3	6,40
Vzorec 7	4,93	137,8	5,95
Vzorec 8	4,95	136,1	5,85
Vzorec 9	4,86	137,1	6,08
Vzorec 10	4,82	136,7	6,11
Vzorec 11	4,46	130,8	6,29
Vzorec 12	4,81	132,9	5,93
Vzorec 13	4,70	131,1	5,89
Vzorec 14	4,57	131,0	6,06
Vzorec 15	4,72	128,9	6,00
Vzorec 16	4,33	125,9	6,41
Vzorec 17	4,94	139,5	6,05

Tabela 3: Zbrani rezultati nateznih testov

Vzorec	$E_t$ (GPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_{tb}$ (%)
Vzorec 0	4,73	85,1	4,15
Vzorec 1	4,74	85,1	4,55
Vzorec 2	4,72	88,6	4,84
Vzorec 3	4,04	79,5	4,48
Vzorec 4	4,28	81,9	4,54
Vzorec 5	7,03	90,7	5,27
Vzorec 6	6,21	88,8	4,16
Vzorec 7	7,20	90,6	5,35
Vzorec 8	7,07	88,5	5,61
Vzorec 9	7,06	89,5	5,61
Vzorec 10	6,78	86,5	5,91
Vzorec 11	6,72	89,7	5,16
Vzorec 12	6,89	90,5	5,04
Vzorec 13	6,39	91,1	4,43
Vzorec 14	6,07	90,3	4,66
Vzorec 15	6,39	87,5	4,82
Vzorec 16	5,93	84,6	5,72
Vzorec 17	7,18	87,5	5,15

Vzorci, ki ne vsebujejo duroplastičnega odpada vetrnih elektrarn, imajo nižje vrednosti upogibnega E modula. Nasprotno vpliva dodatek duroplastičnega odpada, ki bistveno poveča upogibni E modul, pri čemer je bila najvišja vrednost (5,11 GPa) izmerjena pri vzorcu 5. Poliestrski mlevec le delno vpliva na povečanje modula, pri čemer je največji učinek opazen pri kombinaciji z duroplastičnim odpadom in kompatibilizatorjem. Kompatibilizator sam po sebi ne zviša upogibnega E modula; v nekaterih primerih ga celo zniža, medtem ko drsno sredstvo večinoma znižuje upogibni E modul, z izjemo vzorca 12, kjer je bil modul povišan.

Maksimalna upogibna trdnost vzorcev se giblje med 107,7 in 140,8 MPa, s povprečno vrednostjo 128,2 MPa. Dodatek duroplastičnega odpada povzroči očitno zvišanje upogibne trdnosti, pri čemer je bila največja sprememba, izmerjena pri vzorcu 17. Poliestrski mlevec zviša upogibno trdnost, še posebej v kombinaciji z duroplastičnim odpadom in kompatibilizatorjem. Kompatibilizator zviša upogibno trdnost le v določenih primerih, medtem ko drsno sredstvo v večini primerov upogibno trdnost zniža.

Rezultati upogibnega raztezka se poslabšajo pri vseh vzorcih, ki se jim doda duroplastični odpad vetrnih elektrarn. Povzamemo lahko, da

večji delež steklenih vlaken v novonastalem kompozitu zviša upogibni E modul in maksimalno upogibno trdnost ter zniža upogibni raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti. Učinek poliestrskega mlevca na vzorce ni enoten, saj se lahko raztezek zviša ali zniža, odvisno od deleža in kombinacije dodatkov. Podoben trend pokaže drsno sredstvo, ki v nekaterih primerih zviša upogibni raztezek, a ga v drugih zniža. Kompatibilizator v večini vzorcev zviša vrednosti upogibnega raztezka pri maksimalni upogibni trdnosti.

Najvišje vrednosti nateznega E modula so bile izmerjene pri vzorcih z duroplastičnim odpadom vetrnih elektrarn, medtem ko so imeli vzorci brez ojačeval najnižje vrednosti. Najvišjo vrednost (7,20 GPa) je imel vzorec s kombinacijo matrice PA66, duroplastičnega odpada in nižje vsebnosti poliestrskega mlevca (vzorec 7). Vzorci z večinskimi deležem matrice PA66 s steklenimi vlakni so imeli najnižje vrednosti zaradi manjšega deleža steklenih vlaken. Dodatek poliestrskega mlevca v manjših količinah (0,1 %) je bil bolj učinkovit pri zvišanju nateznega E modula, vendar to ni veljalo za vse kombinacije. Kompatibilizator in drsno sredstvo sta v večini primerov znižala natezni E modul.

Najvišja natezna trdnost (91,1 MPa) je bila izmerjena pri vzorcu 13, najnižja (79,5 MPa) pa pri vzorcu 3. Večina vzorcev z duroplastičnim odpadom je imela višjo natezno trdnost, čeprav so nekateri vzorci z dodanim duroplastičnim odpadom (npr. vzorec 8) dosegli nižjo vrednost od pričakovane. Dodatek večje količine (0,5 %) poliestrskega mlevca je zvišal natezno trdnost, z izjemo določenih kombinacij z drsnim sredstvom. Kompatibilizator je večinoma negativno vplival na natezno trdnost, razen pri kombinaciji z duroplastičnim odpadom in drsnim sredstvom. Drsno sredstvo je imelo bolj izrazit vpliv na zvišanje natezne trdnosti kot na natezni E modul.

Vrednosti raztezka pri natezni trdnosti so znašale med 4,10 % in 5,34 %, s povprečno vrednostjo 4,66 %. Dodatek duroplastičnega odpada je zvišal raztezek pri natezni trdnosti, prav tako tudi večja količina poliestrskega mlevca. Izjema sta vzorca 13 in 14, kjer je bil raztezek nižji zaradi kombinacije z duroplastičnim odpadom in drsnim sredstvom. Kompatibilizator je zvišal raztezek le v

kombinaciji s poliestrskim mlevcem in duroplastičnim odpadom, medtem ko ga je drsno sredstvo večinoma znižalo.

Raztezek pri pretrgu se je gibal med 4,15 % in 5,91 %. Duroplastični odpad je zvišal raztezek pri pretrgu pri vseh vzorcih, najbolj pri vzorcu 10 (5,91 %). Dodatek poliestrskega mlevca v večji količini (0,5 %) je zvišal vrednost raztezka pri pretrgu pri večini vzorcev, razen v kombinaciji z duroplastičnim odpadom in drsnim sredstvom (vzorec 14). Podoben trend je opažen tudi pri dodatku v manjši količini (0,1 %), saj je znižal raztezek pri vzorcu 13 in vzorcu 15. Kompatibilizator je zvišal raztezek pri pretrgu le v kombinaciji z duroplastičnim odpadom in poliestrskim mlevcem ter v kombinaciji z duroplastičnim odpadom, poliestrskim mlevcem in drsnim sredstvom. Drsno sredstvo je v večini primerov znižalo raztezek pri pretrgu, razen pri vzorcu 12, kjer se je vrednost zvišala za 0,88 %.

DMA analiza je potrdila rezultate statičnih testov. Vzorci z duroplastičnim odpadom so izkazali višji dinamični E modul pri 30 °C. Na krivuljah tan  $\delta$  je bilo opaziti, da imajo vzorci z ojačevali nižje vrhove, kar pomeni bolj elastično deformacijo in manjšo sposobnost dušenja vibracij zaradi višje togosti. Pri vzorcih z epoksi duroplastom je bil viden vrh tan  $\delta$  pri okoli 123 °C, kar ustreza steklastemu prehodu epoksi matrice.

Dodatek duroplastičnega odpada vetrnih elektrarn je pri primerjavi vzorcev z in brez dodatka zvišal dinamični E modul pri 30°C pri vseh vzorcih. Pri vzorcih z višjim modulom sta na krivuljah zaznana dva »onseta«, ki ustrezata začetkom steklastih prehodov PA66 in epoksi matrice. Poliestrski mlevcec večinoma zviša dinamični E modul, a lahko v določenih kombinacijah s PA66 in drugimi dodatki povzroči njegovo znižanje. Kompatibilizator ima manjši vpliv na zvišanje modula, medtem ko drsno sredstvo le minimalno vpliva na spremembo; v nekaterih primerih prispeva k rahlemu zvišanju modula.

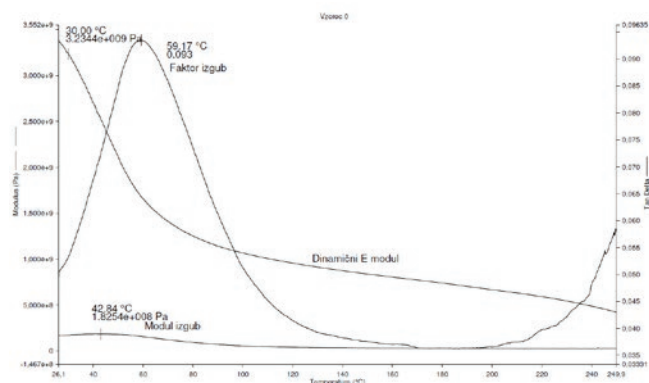
Tabela 4: Zbrani rezultati DMA testov

Vzorec	E' pri 30 °C (GPa)	T <sub>g</sub> pri tan δ (°C)	Tan δ (-)	(-)	
Vzorec 0	3,234	59,1	/	0,093	/
Vzorec 1	3,050	58,5	/	0,094	/
Vzorec 2	3,376	59,4	/	0,098	/
Vzorec 3	2,958	57,8	/	0,090	/
Vzorec 4	3,272	58,7	/	0,096	/
Vzorec 5	4,195	57,3	126,1	0,087	0,064
Vzorec 6	3,835	59,1	120,8	0,085	0,051
Vzorec 7	4,099	57,2	125,9	0,083	0,061
Vzorec 8	4,278	57,2	125,3	0,083	0,064
Vzorec 9	4,296	58,1	122,0	0,081	0,061
Vzorec 10	4,174	57,8	122,6	0,083	0,060
Vzorec 11	4,053	57,9	123,9	0,084	0,057
Vzorec 12	4,229	58,1	121,5	0,083	0,060
Vzorec 13	4,107	57,7	122,8	0,081	0,061
Vzorec 14	4,205	57,7	123,5	0,082	0,059
Vzorec 15	4,415	56,8	120,8	0,082	0,062
Vzorec 16	4,085	57,3	120,4	0,083	0,056
Vzorec 17	4,203	57,4	122,4	0,081	0,059

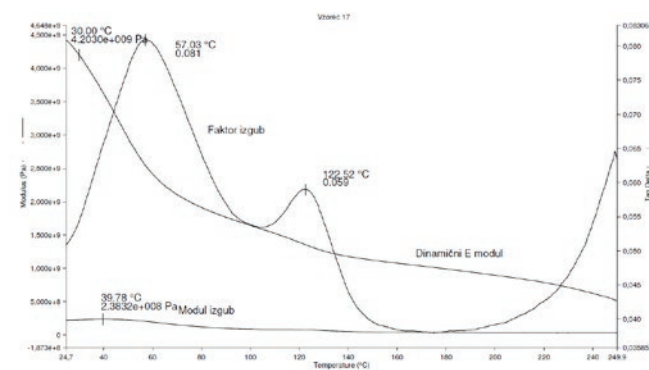
Pri vzorcih brez duroplastičnega odpada je vrh modula izgub (E'') zaznan pri nižjih temperaturah, medtem ko se pri vzorcih z dodatkom epoksi matrice pojavi drugi vrh pri višjih temperaturah. Dodatek duroplastičnega odpada zviša modul izgub pri nižjih temperaturah in premakne T<sub>g</sub> PA66 proti višjim temperaturam, razen v nekaterih primerih, kjer ga pomakne nižje. Poliestrski mlevec vpliva minimalno, vendar povzroči rahlo zvišanje modula izgub in premik T<sub>g</sub> pri določenih vzorcih. Kompatibilizator nima večjega vpliva, vendar lahko povzroči manjša zvišanja modula izgub in premike T<sub>g</sub> proti nižjim temperaturam. Dršno sredstvo vpliva v manjši meri – rahlo zviša modul izgub pri nizkih temperaturah, a pri premikih vrhov ni opazen jasn trend.

Dodatek duroplastičnega odpada vpliva na zmanjšanje faktorja izgub in premik temperature T<sub>g</sub> PA66. Z dodatkom se pri višjih temperaturah pojavi T<sub>g</sub> epoksi matrice. Poliestrski mlevec ima manjši vpliv na faktor izgub pri T<sub>g</sub> PA66, medtem ko lahko zviša faktor izgub pri T<sub>g</sub> epoksi matrice. Kompatibilizator ima minimalen vpliv na faktor izgub, vendar v nekaterih primerih prispeva k njegovemu znižanju ter premiku temperature T<sub>g</sub> epoksi matrice proti nižjim vrednostim. Dršno sredstvo večinoma povzroči manjše znižanje faktorja izgub pri T<sub>g</sub> PA66, medtem ko pri višjih temperaturah ni jasnega trenda sprememb.

Zaključimo lahko, da dodatek duroplastičnega kompozita prispeva k višji togosti novonastalega kompozita pri temperaturi 30 °C in določeni frekvenci, kar je skladno z rezultati nateznih in upogibnih preizkusov. Ta modifikacija izboljšuje novonastali kompozit in prispeva k boljšim viskoelastičnim lastnostim pri sobni temperaturi. Vrednosti E'' pri temperaturi T<sub>g</sub> PA66 so višje pri vzorcih, ki ne vsebujejo dodatka duroplastičnega odpada vetrnih elektrarn. Razlog višanja E'' so lahko slabe medpovršinske interakcije med termoplastično matrico in duroplastičnim odpadom vetrnih elektrarn. Vzorec z najnižjim faktorjem izgub pri T<sub>g</sub> PA66 je vzorec 15, kar pomeni da vzorec kaže bolj elastične lastnosti in sprošča manj toplote v okolico. Material je bolj tog in kaže večjo strukturno stabilnost ter manjše dušenje vibracij. Ravno obratne lastnosti kaže vzorec 2, ki ima najvišji izmerjen faktor izgub. Ta



Slika 1: DMA meritev vzorca 0



Slika 2: DMA meritev vzorca 17

kaže večje sproščanje toplote, kar pomeni da lažje sprejme vibracije. Je tudi bolj odporen proti utrujanju, a hkrati manj tog.

Temperatura degradacije (Tabela 5) se zniža, ko dodamo reciklat duroplastičnega kompozita. Pri prvem razpadu razpade termoplastična matrica, kompatibilizatorji in duroplastična matrica.

Tabela 5: Zbrani rezultati TGA testov

Vzorec	T <sub>d1</sub> (°C)	Razpad <sub>1</sub> (%)	Razpad <sub>2</sub> (%)	Ostane (%)
Vzorec 0	456,1	82,2	4,0	11,7
Vzorec 1	455,9	81,4	3,6	13,4
Vzorec 2	439,1	82,1	2,6	13,8
Vzorec 3	428,7	82,3	1,7	14,4
Vzorec 4	412,9	79,0	4,0	15,4
Vzorec 5	408,0	64,7	2,7	30,8
Vzorec 6	399,6	70,6	3,7	23,9
Vzorec 7	406,5	65,9	2,3	30,2
Vzorec 8	405,9	65,5	1,9	30,9
Vzorec 9	404,9	66,4	1,9	30,3
Vzorec 10	406,7	67,2	1,9	29,1
Vzorec 11	412,0	69,0	2,4	26,8
Vzorec 12	409,3	64,8	3,9	29,6
Vzorec 13	407,1	66,6	2,1	29,4
Vzorec 14	408,1	67,0	1,9	29,1
Vzorec 15	406,4	66,0	1,8	30,5
Vzorec 16	406,4	69,2	1,9	27,3
Vzorec 17	412,4	66,1	2,8	29,6

Prvi razpad kompozita, ki predstavlja največji padec mase, poteka v dušikovi atmosferi, kar kaže na razgradnjo organskega materiala. Drugi razpad kompozita nastopi, ko je vzorec pri 550 °C izpostavljen kisikovi atmosferi, kar kaže na izgorevanje preostalega ogljika. Končni ostanek po razgradnji sestavljajo termično stabilne anorganske snovi, ki v našem primeru predstavljajo steklena vlakna.

Pri primerjavi rezultatov vzorcev opazimo, da je delež evaporacije med vzorci podoben, pri čemer so razlike majhne. Delež prvega razpada (Razpad 1) v inertni atmosferi je višji pri vzorcih od vzorca 0 do vključno vzorca 4 in nižji pri vzorcih, ki vsebujejo duroplastični odpad vetrnih elektrarn. Pri vzorcih z dodatkom duroplastičnega odpada smo izmerili nižjo temperaturo prvega razpada (T<sub>d1</sub>), kar je posledica zgodnejše

degradacije epoksidne matrice. Poleg tega vsebujejo večje količine steklenih vlaken, kar prispeva k manjšemu deležu prve degradacije (Razpad 1).

Matrica PA66 se skoraj popolnoma razgradi med prvo degradacijo (Razpad 1) in pusti minimalne ostanke, ki so lahko podvrženi nadaljnji razgradnji. Referenčni vzorec 0, ki vsebuje le matrico PA66 s steklenimi vlakni, ima najvišjo temperaturo prve degradacije (T<sub>d1</sub>), kar kaže na visoko toplotno stabilnost kompozita. Med prvim razpadom matrice PA66 nastajajo saje, ki pri drugem razpadu (Razpad 2) reagirajo s kisikom.

Poliestrski mlevce s steklenimi vlakni, drsno sredstvo in kompatibilizator nimajo pomembnega vpliva na razpad novonastalega kompozita, saj rezultati razpadov različnih vzorcev ne kažejo statistično značilnih razlik. Poliestrski mlevce prispeva k večjemu deležu steklenih vlaken, kar je vidno iz deleža ostanka, ki se povečuje z vsebnostjo mlevca.

Vrednosti udarne žilavosti so se gibale med 23,3 in 31,2 kJ/m<sup>2</sup>. Dodatek ojačeval je na splošno znižal udarno žilavost glede na referenco, vendar je dodatek drsnega sredstva v večini primerov to lastnost nekoliko izboljšal. Najvišjo žilavost (31,2 kJ/m<sup>2</sup>) je imel vzorec 2 (0,5 % poliestrskega mlevca). Pri zarezni udarni žilavosti je bila referenca najboljša (7,3 kJ/m<sup>2</sup>), dodatki pa so vrednost znižali na povprečno 5,8 kJ/m<sup>2</sup>.

Vzorci brez dodatka duroplastičnega odpada iz vetrnih elektrarn so imeli višje vrednosti udarne žilavosti v primerjavi s tistimi, ki so ga vsebovali. Opazen je trend, da višji delež PA66 zvišuje udarno žilavost, kar pomeni višjo odpornost proti krhkim lomom. Dodatek duroplastičnega odpada je minimalno izboljšal udarno žilavost le pri vzorcu, ki je vseboval večji delež poliestrskega mlevca in kompatibilizatorja. Poliestrski mlevce je v večini primerov izboljšal udarno žilavost, razen kadar je bil prisoten tudi duroplastični odpad, in je kompatibilizator ni. Najvišjo vrednost udarne žilavosti, 31,2 kJ/m<sup>2</sup> je imel vzorec, sestavljen iz matrice PA66 s steklenimi vlakni in 0,5 % poliestrskega mlevca. Kompatibilizator je izboljšal udarno žilavost le pri nekaterih vzorcih, medtem ko je drsno sredstvo večini vzorcev zvišalo udarno žilavost.

Tabela 6: Zbrani rezultati udarne in zarezne udarne žilavosti vzorcev

Vzorec	Udarne žilavost (kJ/m <sup>2</sup> )	Zarezna udarna žilavost (kJ/m <sup>2</sup> )
Vzorec 0	30,1	7,3
Vzorec 1	30,5	6,5
Vzorec 2	31,2	6,7
Vzorec 3	28,9	7,1
Vzorec 4	28,2	6,5
Vzorec 5	27,1	6,2
Vzorec 6	23,3	-
Vzorec 7	29,1	6,3
Vzorec 8	27,2	5,3
Vzorec 9	27,7	5,6
Vzorec 10	28,6	5,6
Vzorec 11	29,7	5,9
Vzorec 12	29,0	5,8
Vzorec 13	28,2	5,6
Vzorec 14	27,5	5,5
Vzorec 15	31,1	6,1
Vzorec 16	29,5	6,3
Vzorec 17	25,2	5,6

Zarezna udarna žilavost je bila v primerjavi z vzorci, ki so ga vsebovali, višja pri vzorcih brez duroplastičnega odpada. Najvišjo vrednost zarezne udarne žilavosti (7,3 kJ/m<sup>2</sup>) je imel referenčni vzorec brez dodatkov, medtem ko je duroplastični odpad znižal vrednost pri vseh vzorcih. To pomeni, da so vzorci brez duroplastičnega odpada bolje absorbirali energijo in so bili bolj odporni proti lomu. Poliestrski mlevec je v nekaterih primerih zvišal zarezno udarno žilavost, zlasti kadar je bil dodan le matrici ali kadar je bil prisoten skupaj z drugimi ojačevali in dodatki. Učinkovitost kompatibilizatorja pri zvišanju zarezne udarne žilavosti ni sledila jasnemu trendu. Pri vzorcih, ki so vsebovali drsno sredstvo, smo večinoma izmerili višjo zarezno udarno žilavost.

Z materialom smo v podjetju O.P.S. Breznik d.o.o. brizgali dva izdelka. To sta bila montažni ključ za filter za vodo in klini. Material se je pokazal kot dobra krožna alternativa, saj oba izdelka dosegata zahtevane tako mehanske kot optične lastnosti.

## 5 SKLEP

Osredotočili smo se na mehansko recikliranje kompozitov, natančneje PA66 s steklenimi vlakni, ki smo mu dodajali frakcije duroplastičnega odpada vetrnih elektrarn in poliestrskega mlevca, ter dodatke, kot sta kompatibilizator in drsno sredstvo. Cilj raziskave je bil ustvariti stoddostno reciklirani kompozit, ki bi bil primeren za uporabo v zahtevnih okoljih. Takšen kompozit mora odražati odlične mehanske lastnosti, kot sta visoka togost in trdnost, ter je hkrati odporen na utrujanje. Uspešno smo naredili osemnajst različnih serij testnih vzorcev, ki smo jim izmerili mehanske in termične lastnosti. V času karakterizacije vzorcev smo se soočili z različnimi izzivi, saj je bilo nekatere metode potrebno prilagoditi ali optimizirati. Rezultate meritev lastnosti smo nato interpretirali in med seboj primerjali različne serije vzorcev.

Raziskava je uspešno potrdila možnost uporabe recikliranega PA66 GF15 v kombinaciji z industrijskimi odpadki duroplastičnih kompozitov.

Glavne ugotovitve so:

1. Dodatek zmletega epoksidnega duroplasta iz vetrnic (do 30 %) deluje kot močno ojačevalo, ki zviša upogibni E modul za več kot 50 % (do 5,11 GPa) in izboljša natezno trdnost.
2. Poliestrski mlevec deluje kot nukleacijsko sredstvo, ki pospeši kristalizacijo PA66, kar je ključno za stabilnost procesa brizganja.
3. Kompatibilizatorji izboljšajo adhezijo na medfaznih površinah, vendar lahko v nekaterih kombinacijah znižajo togost, zato je njihovo doziranje potrebno optimizirati.
4. Drsna sredstva izboljšajo disperzijo polnil in povečajo dimenzijsko stabilnost, čeprav lahko rahlo znižajo trdnost.
5. Uporaba recikliranih materialov v zahtevnih aplikacijah, kot so "Montažni ključ za filter za vodo in Klini" kot demonstratorji, je realna in ekonomsko upravičena v okviru krožnega gospodarstva.

Ti rezultati odpirajo pot za širšo uporabo recikliranih termoplastičnih kompozitov v naprednih tehničnih izdelkih, kjer se zahteva visoka togost in toplotna obstojnost.



Slika 3: Klini brizgani v podjetju O.P.S. Breznik d.o.o.



Slika 4: Montažni ključ za filter za vodo brizgan v podjetju O.P.S. Breznik d.o.o.

Viri:

- [1] B.T. Åström, Manufacturing of Polymer Composites, *Manuf. Polym. Compos.* (2018). <https://doi.org/10.1201/9780203748169>. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108596>.
- [2] R.J. Palmer, Polyamides, Plastics, *Encycl. Polym. Sci. Technol.* (2003). <https://doi.org/10.1002/0471440264.PST251>.
- [3] C. Gültürk, H. Berber, Effects of mechanical recycling on the properties of glass fiber–reinforced polyamide 66 composites in automotive components, *E-Polymers.* 23 (2023). <https://doi.org/10.1515/epoly-2023-0129>.
- [4] M. Colledani, S. Turri, M. Diani, V. Mathes, M. Colledani, M. Diani, S. Turri, Introduction, Context, and Motivations of a Circular Economy for Composite Materials, (2022) 1–15. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22352-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22352-5_1).
- [5] A. Aksit, N. Geis, M. Aksit, V. Altstädt, Properties of Styrene-Maleic Anhydride Copolymer Compatibilized Polyamide 66/Poly (Phenylene Ether) Blends: Effect of Blend Ratio and Compatibilizer Content, *Mater.* 2020, Vol. 13, Page 3400. 13 (2020) 3400. <https://doi.org/10.3390/MA13153400>.
- [6] C. Zweben, *Composite Materials, Mech. Eng. Handb.* (2015) 1–37. <https://doi.org/10.1002/9781118985960.MEH110>.
- [7] A. Pegoretti, Recycling concepts for short-fiber-reinforced and particle-filled thermoplastic composites: A review, *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 4 (2021) 93–104. <https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2021.03.004>.

Izjava o omejitvi odgovornosti: Ta projekt je financiral Evropski sklad za regionalni razvoj (ESRR) v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev št. 101084037. Vendar so izražena stališča in mnenja izključno avtorjev in ne odražajo nujno stališč in mnenj Evropske unije ali Izvajalske agencije Evropskega sveta za inovacije in MSP (EISMEA). Niti Evropska unija niti organ, ki dodeljuje sredstva, zanje ne moreta biti odgovorna.



**Funded by  
the European Union**

## OJAČITEV MEHANSKO RECIKLIRANEGA PETG Z ODPADNIM DUROPLASTOM ZA APLIKACIJE V BRIZGANJU IN 3D TISKU

**Tamara ROZMAN, Silvester BOLKA, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN**  
Fakulteta za tehnologijo polimerov

### IZVLEČEK

*V prispevku bomo predstavili uporabo mehansko recikliranega PETG (polietilen tereftalat glikola) z izboljšanimi lastnostmi tako za brizganje kot za 3D tisk.*

*Na Fakulteti za tehnologijo polimerov smo za pripravo termoplastičnega kompozita uporabili recikliran PETG, kateremu smo dodali zmleti in presejani odpad duroplastičnih kompozitov. Pripravili smo tri različne recepture, ki smo jih sušili z dvema različnima tehnikama sušenja pred predelavo. Da smo dosegli zahtevane lastnosti pripravljene kompozita smo v vse izvedbe dodali še ustrezen kompatibilizator, ki je zagotovil dobre medfazne interakcije med odpadnim duroplastom in reciklirano PETG matrico. Recikliranemu kompozitu smo izmerili mehanske in toplotne lastnosti. Testne preizkušance smo pripravili s tehnologijama brizganja in 3D FGF tiska, kjer je 3D tisk izveden direktno iz granulata. Karakterizacija rezultatov je pokazala, da 3D FGF tisk pri žilavosti celo presega vrednosti brizganih kosov ne glede na količino dodanega odpadnega duroplasta. Razviti material je primeren tudi za uporabo za 3D tisk velikega formata, kar odpira nove možnosti za izdelavo orodij za predelavo predvsem duroplastičnih kompozitov in hkrati za brizganje tehničnih izdelkov.*

*Izvedba je lep primer krožnega gospodarstva v okviru projekta DeremCo. Pokazali smo, da lahko z lastnim znanjem na obstoječi opremini naredimo termoplastične kompozite za različne aplikacije.*

### 1 UVOD

Krožno gospodarstvo predstavlja sodoben trajnostni pristop, ki s ponovno uporabo materialov iz zavrženih izdelkov podaljšuje njihovo življenjsko dobo ter prinaša pomembne ekonomske, okoljske in socialne koristi. Polimerni materiali in njihovi kompoziti so v zadnjem stoletju zaradi nizkih stroškov, odličnih mehanskih lastnosti in kemične odpornosti postali ključna inovacija, ki uspešno nadomešča tradicionalne materiale, kot so les, kovina in steklo [1]. Vendar pa predelavo teh materialov, zlasti higroskopskih polimerov, kot so polietilen tereftalat glikol (PETG), poliamidi (PA) in polikarbonati (PC), močno ovira vezava vlage [2,3]. Voda se v prostem volumnu materiala z vodikovimi vezmi pritrdi na polimerne verige, med procesom brizganja ali 3D tiska pa se ta vlaga spremeni v paro. To ne povzroči le vidnih estetskih napak, kot so srebrne lise, ožgane sledi in zračni mehurčki, temveč lahko v najhujših primerih zaradi nastanka visokega tlaka pare privede do resnih poškodb polža brizgalnega stroja. Še bolj kritične so skrite strukturne napake, ki vključujejo zmanjšanje

molekulske mase, padec modula elastičnosti ter znižanje temperature steklastega prehoda ( $T_g$ ). Vse to je mogoče odkriti z natančnimi analizi metodami [2, 4]. Da bi zagotovili optimalno kakovost končnih izdelkov, je nujno pravilno predhodno sušenje, pri čemer se tehnologije razvijajo od klasičnih sušilnikov na vroči zrak do kompleksnih vakuumskih enot in sistemov, ki uporabljajo sevalno toploto [5]. Ker proces termičnega sušenja velja za najdražji in energetsko najbolj potraten korak v celotni verigi recikliranja, je ključnega pomena optimizacija parametrov. Nezdostno sušenje namreč vodi v degradacijo, medtem ko predolgo izpostavljanje toploti povzroči razbarvanje in toplotno razgradnjo termoplastov [6].

Glavni namen te raziskave je bilo izdelati vzorce kompozitov in ugotoviti vpliv vlage ter sušenja na njihove toplotne, mehanske in reološke lastnosti.

### 2 DEREMCO PROJEKT

Cilj projekta DeremCo je vzpostaviti sistemsko, medsektorsko rešitev krožnega gospodarstva, ki temelji na povpraševanju, ki bo

omogočila stroškovno učinkovito ponovno uporabo kompozitnih materialov in komponent po uporabi v novih izdelkih z visoko dodano vrednostjo. DeremCo je projekt EU\_I3, ki traja do maja 2026 in vključuje 30 evropskih partnerjev iz Italije, Finske, Avstrije, Španije, Slovenije, Belgije in Portugalske. V projektu sodeluje tudi 7 slovenskih partnerjev: Fakulteta za tehnologijo polimerov, Veplas, O.P.S. Breznik, Technol, Tehnos, Turnaplast in CAP.

### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

#### 3.1 Uporabljeni materiali

Za osnovni material smo uporabili recikliran polietilen tereftalat glikol (rPETG Caracol), ki nam ga je dobavilo podjetje Caracol iz Italije. Kot polnilo smo dodali odpad duroplastičnih kompozitov TECHNOL2 (TECHNOL1-FTPO1-FTPO6) podjetja Technol iz Izole. Gre za steklena vlakna z nenasičeno poliestrsko smolo, in sicer presejano frakcijo z velikostjo delcev pod 125  $\mu\text{m}$ . Za kompatibilizator pa smo uporabili komercialno dostopni modificirani TPU s trgovskim imenom Kuramiron U TU-S5265 (TU v Tabeli 1), ki smo ga kupili od podjetja Kuraray, Nemčija.

#### 3.2 Priprava vzorcev

Izdelali smo 6 serij vzorcev, njihova sestava je prikazana v Tabeli 1. Pred kompavndiranjem smo material sušili pri 70 °C do vlažnosti 0,025 %.

Sušenje je potekalo v dveh sušilnikih. Prvi je sušilnik Memmert UFE 500. Material smo vstavili v sušilno komoro na pladnjih, temperatura sušenja je bila nastavljena na 70 °C. Za sušenje na drugem sušilniku Vismec Drywell 14 touch smo izbrali predhodno pripravljen program, material pa smo pri tem vstavili v 15 L silos. Program na sušilniku Vismec za material je bil sledeči: nasipna gostota 0,60 kg/L, pretok zraka 3,7 m<sup>3</sup>/kg, rosišče -40 °C, temperatura sušenja 65 °C in čas sušenja 360 min. Vlago smo izmerili pred in po sušenju, pri čemer smo zasledovali čas sušenja in nastavljeno temperaturo.

Vse materiale smo ločeno zmešali in ekstrudirali na dvopolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je bil 20 mm, razmerje L/D 44:1, obrati 400 vrtljajev na minuto,

temperaturni profil je naraščal od lijaka (180 °C) do šobe (210 °C). Po kompavndiranju smo proizveden filament zračno ohladili in narezali na granule dolžine približno 5 mm in premera 2 mm.

Brizganje je potekalo na stroju Krauss Maffei 50-180 CX s premerom polža 30 mm. Temperaturni profil je naraščal od lijaka (225 °C) do šobe (245 °C). Temperatura orodja je bila nastavljena na 25 °C, čas hlajenja pa na 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 15 barov, obrati polža pa na 60 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 50 mm/s, zadnji 1 mm pa na 20 mm/s.

3D tiskanje je bilo izvedeno na 3D tiskalniku Tumaker Pro Dual Direct Drive. Temperatura šobe je bila nastavljena na 235 °C, temperatura mize na 80 °C, hitrost tiskanja je bila 350 mm/min, višina sloja pa je znašala 0,2 mm.

Tabela 1: Sestava vzorcev za kompavndiranje

Vzorec	rPETG (%)	TECHNOL2 (%)	TU (%)
Vzorec 1 Vismec	78	20	2
Vzorec 1 Memmert	78	20	2
Vzorec 2 Vismec	72,5	25	2,5
Vzorec 2 Memmert	72,5	25	2,5
Vzorec 3 Vismec	67	30	3
Vzorec 3 Memmert	67	30	3

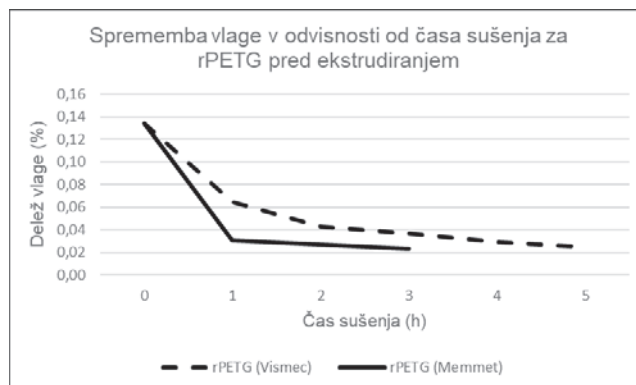
#### 3.3 Laboratorijski testi

Za določanje vsebnosti vlage smo uporabili analizator vlage Mettler Toledo HX 204, Moisture Analyzer. Vlago smo merili vsako uro od začetka sušenja. Upogibni in natezni testi so bili opravljeni na napravi Shimadzu AG-X plus v skladu s standardom ISO 178 oziroma ISO 527-1. Za vsak vzorec je bilo opravljenih pet meritev. Pri upogibnem testu smo vrednotili upogibni E modul ( $E_f$ ), maksimalno upogibno trdnost ( $\sigma_{fM}$ ) ter raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti ( $\epsilon_{fM}$ ). Pri nateznih testih smo vrednotili natezni E modul ( $E_t$ ), natezno trdnost ( $\sigma_m$ ) in raztezek pri pretrgu

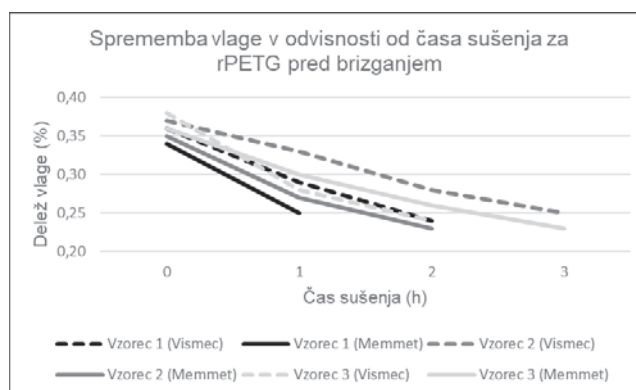
( $\epsilon_{tb}$ ). Termo-dinamične lastnosti smo vrednotili z napravo Perkin Elmer DMA 8000. Vzorce smo segrevali z 2 °C/min od 25 °C do 120 °C v zračni atmosferi. V načinu z dvojno prižemo smo uporabili frekvenco 1 Hz in amplitudo 20  $\mu$ m. Analizo DSC smo opravili na diferenčnem dinamičnem kalorimetru Mettler Toledo, DSC 2 v atmosferi dušika (20 mL/min), kjer smo vzorce segrevali in ohlajali v temperaturnem območju od -50 do 280 °C s hitrostjo segrevanja oz. ohlajanja 10 K/min. Termogravimetrične analize (TGA) smo izvedli na instrumentu Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Vzorec smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa ga izotermno držali pri 550 °C 20 min v kisikovi atmosferi (20 mL/min). Udarne preizkuse smo izvedli na napravi Dongguan Liyi Test Equipment, tip LY-XJJD5, v skladu s standardom ISO 179. Razdalja med podporama je bila 60 mm, za udarne preizkuse smo uporabili nihalo z energijo 4 J, za zarezne udarne preizkuse pa nihalo z energijo 2 J. Meritve indeksa tečenja taline (MFI) so bile izvedene v skladu s standardom ISO 1133 pri temperaturi 235 °C in konstantno obremenitvijo 2,16 kg, na napravi znamke LIYI MFI LY-RP.

#### 4 REZULTATI

Analiza vsebnosti vlage je pokazala, da je rPETG pred sušenjem zaradi svoje higroskopske narave vseboval 0,134 % vlage (Slika 1). Začetne vrednosti njegovih kompozitov po kompavndiranju pa so bile še višje, in sicer med 0,34 % in 0,38 % (Slika 2). Za preprečevanje defektov in strukturne degradacije je bilo material potrebno posušiti pod ciljno vrednost 0,025 %, pri čemer se je sušilnik Memmert izkazal za znatno hitrejšega v začetni fazi, saj je v prvi uri odstranil 77 % vlage, cilj pa dosegel v treh urah. Sušilnik Vismec je bil procesno počasnejši in je za doseg ciljne vlažnosti potreboval pet ur (Slika 1).



Slika 1: Graf spremembe vlage v odvisnosti od časa sušenja za rPETG pred postopkom kompavndiranja v sušilnikih Vismec in Memmert



Slika 2: Graf spremembe vlage v odvisnosti od časa sušenja za kompozite pred postopkom brizganja v sušilnikih Vismec in Memmert

Upogibni testi kompozitov rPETG so pokazali, da na upogibni E modul vpliva predvsem vsebnost dodatkov, saj se togost s povečevanjem njunega deleža zvišuje, medtem ko vrsta uporabljenega sušilnika nanj nima bistvenega vpliva (Tabela 2). Nasprotno pa način sušenja močno vpliva na upogibno trdnost in raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti, saj so brizgani vzorci, sušeni v sušilniku Memmert, dosegali od 4,2 % do 15,5 % višjo trdnost in boljšo duktilnost kot tisti iz Vismeca, saj hitrejša sušenja na pladnjih prepreči dolgotrajno termično in oksidativno degradacijo. Podoben trend je bil zaznan pri 3D tiskanih FGF vzorcih, kjer je sušenje v Memmertu vodilo do opazno višjih vrednosti maksimalne upogibne trdnosti (pri Vzorcju 2 celo za 16,9 %) in upogibnega E modula, pri čemer brizgani vzorci na splošno ohranjajo višjo togost in homogenost, tiskani vzorci pa zaradi specifične mikrostrukture in mikropraznin izkazujejo večjo prožnost.

Tabela 2: Zbrani rezultati upogibnih testov

Vzorec	$E_f$ (GPa)	$\sigma_{fM}$ (MPa)	$\epsilon_{fM}$ (%)
Vzorec 1 Vismec	2,5±0,0	61,7±7,5	2,7±0,5
Vzorec 1 Memmert	2,4±0,0	64,3±3,9	3,0±0,4
Vzorec 2 Vismec	2,6±0,0	54,6±3,9	2,2±0,2
Vzorec 2 Memmert	2,6±0,0	63,0±2,5	2,7±0,2
Vzorec 3 Vismec	2,8±0,1	50,6±2,8	1,9±0,1
Vzorec 3 Memmert	2,8±0,0	49,2±5,1	1,8±0,2
Vzorec 1 Vismec_FGF	2,1±0,1	63,4±4,3	4,0±0,1
Vzorec 1 Memmert_FGF	2,5±0,1	74,1±4,0	3,9±0,1
Vzorec 2 Vismec_FGF	2,3±0,2	59,1±1,4	3,4±0,2
Vzorec 2 Memmert_FGF	2,9±0,2	67,2±2,0	3,2±0,1
Vzorec 3 Vismec_FGF	2,5±0,1	53,6±1,3	2,8±0,1
Vzorec 3 Memmert_FGF	2,7±0,2	61,7±3,0	2,9±0,1

Natezni testi kompozitov so pokazali, da brizgani vzorci zaradi bolj homogene mikrostrukture dosegajo višje vrednosti nateznega E modula in natezne trdnosti kot 3D tiskani FGF vzorci, slednji pa zaradi slojevite strukture in mikropraznin izkazujejo večjo razteznost, ter s tem boljše žilavost. Rezultati so močno odvisni od pogojev predhodne priprave, saj so vzorci, sušeni v sušilniku Vismec, dosegali do 11,7 % višjo natezno trdnost (53,0 MPa proti 46,8 MPa) in nekoliko višji natezni E modul (3,63 GPa) kot tisti iz Memmerta (Tabela 3). To se pripisuje manjši stopnji hidrolitične razgradnje ob učinkovitejši odstranitvi vlage. Razlike med sušilnikoma so praktično zanemarljive le pri Vzorcju 3, ki ima najvišji delež dodatkov (TECHNOL30 TU3), natezni E modul znaša okoli 4,2 GPa ne glede na uporabljeno tehniko sušenja, kar potrjuje, da dodatek odpadnega duroplasta učinkovito zvišuje togost materiala.

Tabela 3: Zbrani rezultati nateznih testov

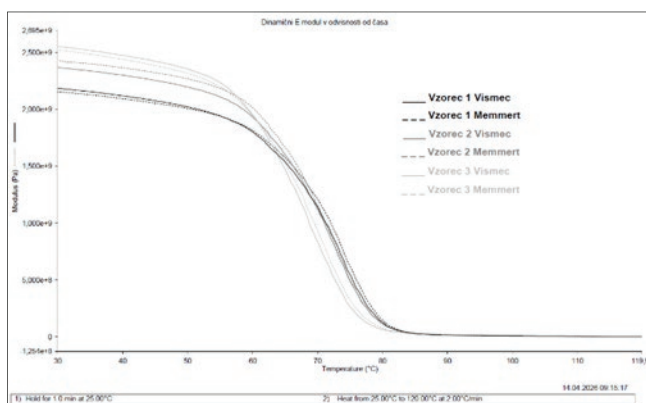
Vzorec	$E_t$ (GPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_{tb}$ (%)
Vzorec 1 Vismec	3,6±0,2	53,0±2,1	3,1±0,2
Vzorec 1 Memmert	3,6±0,4	46,8±3,7	2,6±0,2
Vzorec 2 Vismec	3,8±0,1	49,2±2,7	2,7±0,4
Vzorec 2 Memmert	3,8±0,1	54,5±1,0	3,0±0,2
Vzorec 3 Vismec	4,2±0,2	45,7±1,3	2,3±0,1
Vzorec 3 Memmert	4,2±0,1	45,8±3,6	2,3±0,2
Vzorec 1 Vismec_FGF	3,5±0,2	45,5±1,4	4,3±0,4
Vzorec 1 Memmert_FGF	3,5±0,2	48,5±1,2	4,1±0,2
Vzorec 2 Vismec_FGF	3,7±0,1	44,6±2,2	3,4±0,4
Vzorec 2 Memmert_FGF	3,7±0,1	46,8±2,7	3,8±0,2
Vzorec 3 Vismec_FGF	4,2±0,1	43,2±1,0	3,2±0,2
Vzorec 3 Memmert_FGF	4,2±0,1	39,4±2,4	3,2±0,4

Dinamična mehanska analiza (DMA) vzorcev rPETG je razkrila, da dodatek zmlatega odpadnega duroplasta (TECHNOL2) in kompatibilizatorja (TU) deluje kot ojačitev in ne kot mehčalo, saj se dinamični E modul ( $E'$ ) pri 30 °C z večanjem deleža teh komponent zviša za približno 17 % (z 2,18 na 2,54 GPa) (Tabela 4). Razlike v začetni togosti med sušilnikoma Vismec in Memmert so zanemarljive, vendar Memmertovi vzorci izkazujejo nekoliko višje temperature pri vrhu modula izgub ( $E''$ ), kar nakazuje na rahlo višjo stabilnost polimernih segmentov zaradi krajšega časa sušenja in s tem manjše termične razgradnje. Temperatura steklastega prehoda se med različnimi formulacijami spreminja minimalno (v razponu od 81–83 °C), medtem ko se temperatura držanja oblike (HDT) z dodajanjem TECHNOL2 in TU izboljša za približno 3,4 %, kar povečuje dimenzijsko stabilnost materiala. Pri 3D tiskanih FGF vzorcih so rezultati  $T_g$  praktično identični med obema sušilnikoma, kar potrjuje, da je temperaturna odzivnost materiala v veliki meri

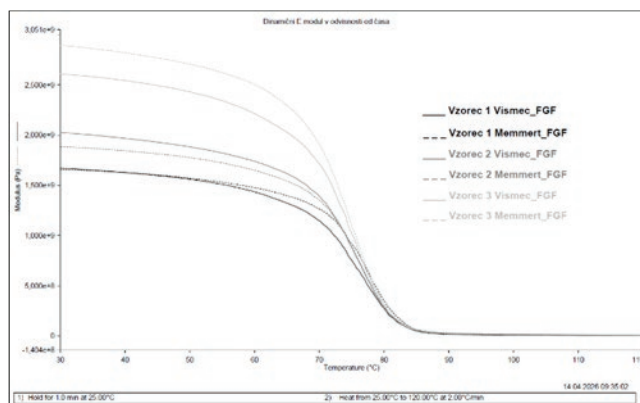
neodvisna od načina sušenja. Primerjava krivulj dinamičnega E modula brizganih in 3D tiskanih vzorcev je prikazana na Slikah 3 in 4.

Tabela 4: Zbrani rezultati DMA testov

Vzorec	E' pri 30 °C (GPa)	T <sub>g</sub> pri tan δ (°C)	Tan δ (-)	HDT (°C)
Vzorec 1 Vismec	2,19	82,2	1,173	75,3
Vzorec 1 Memmert	2,17	82,8	1,230	75,7
Vzorec 2 Vismec	2,37	81,7	1,146	74,8
Vzorec 2 Memmert	2,43	81,4	1,145	74,9
Vzorec 3 Vismec	2,55	78,9	1,16	72,5
Vzorec 3 Memmert	2,52	79,7	1,092	73,2
Vzorec 1 Vismec_FGF	1,67	87,0	1,156	77,4
Vzorec 1 Memmert_FGF	1,66	87,3	1,217	78,5
Vzorec 2 Vismec_FGF	2,03	85,8	1,129	77,8
Vzorec 2 Memmert_FGF	1,87	86,3	1,134	77,9
Vzorec 3 Vismec_FGF	2,61	84,6	1,078	78,1
Vzorec 3 Memmert_FGF	2,90	85,4	1,079	78,3

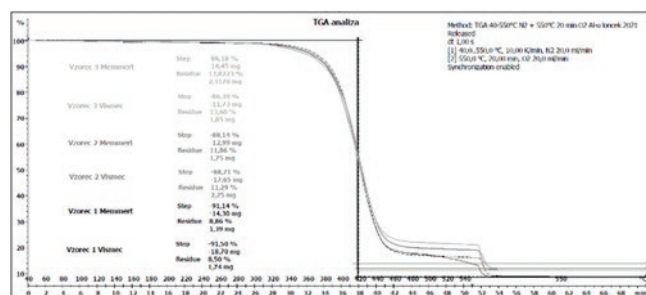


Slika 3: Zbrani rezultati dinamičnega E modula brizganih vzorcev



Slika 4: Zbrani rezultati dinamičnega E modula 3D tiskanih vzorcev

Rezultati TGA analize (Slika 5) so pokazali, da temperatura degradacije (okoli 424 °C) ostaja zelo podobna ne glede na uporabljen sušilnik, kar pomeni, da izbira sušilnika ne vpliva bistveno na termično stabilnost materiala. Z višjo vsebnostjo dodatkov (TECHNOL2 in TU) se opazi rahlo zmanjšanje razpada in povečanje ostanka po izgoritvi, kar kaže na večji delež anorganskih komponent ali dodatkov, ki se ne razgradijo popolnoma.



Slika 5 : Zbrani rezultati TGA analize

Rezultati diferenčne dinamične kalorimetrije (DSC) prikazani v Tabeli 5 kažejo, da izbira sušilnika ključno vpliva na temperaturo steklastega prehoda (T<sub>g</sub>), medtem ko so razlike v specifični toploti (C<sub>p</sub>) manj izrazite. Vrednosti T<sub>g</sub>, določene pri drugem segrevanju, so bile v večini primerov višje pri vzorcih, sušenih v sušilniku Vismec (npr. 74,2 °C v primerjavi z 72,7 °C pri Vzorcju 2), kar potrjuje njegovo večjo učinkovitost pri odstranjevanju vlage. Preostala vlaga v materialu namreč deluje kot mehčalo, ki povečuje gibljivost polimernih verig in posledično znižuje T<sub>g</sub>, kar je bilo še posebej opazno pri prvem

ohlajanju, kjer so bile razlike med sušilnikoma še izrazitejše. Edino pri vzorcu z najvišjim deležem dodatkov (Vzorec 3) je bil zaznan obraten trend, sicer pa analize niso pokazale večjih razlik, ki bi nakazovale na morebitno termično degradacijo materiala zaradi izbire sušilne tehnike.

Tabela 5: Zbrani rezultati DSC

Vzorec	2. segrevanje		1. ohlajanje	
	T <sub>g</sub> (°C)	C <sub>p</sub> (J/gK)	T <sub>g</sub> (°C)	C <sub>p</sub> (J/gK)
Vzorec 1 Vismec	74,2	0,134	70,2	0,171
Vzorec 1 Memmert	72,7	0,138	66,2	0,169
Vzorec 2 Vismec	72,0	0,153	67,3	0,126
Vzorec 2 Memmert	71,0	0,142	67,0	0,091
Vzorec 3 Vismec	69,9	0,137	64,8	0,126
Vzorec 3 Memmert	69,9	0,122	66,2	0,156

Rezultati udarne in zarezne udarne žilavosti so prikazani v Tabeli 6. Pri vseh treh formulacijah je mogoče opaziti, da imajo vzorci, sušeni v Vismecu, višjo ali primerljivo udarno žilavost kot tisti, sušeni v Memmertu, kar kaže na rahlo prednost sušilnika Vismec v učinkovitosti sušenja ali boljše stabilnost materiala med obdelavo. Pri zarezni udarni žilavosti se vrednosti gibljejo od 1,0 do 2,0 kJ/m<sup>2</sup> za vzorce iz Vismeca in od 1,1 do 1,7 kJ/m<sup>2</sup> za vzorce iz Memmerta. Tudi vrednosti brez zarezne so bolj razpršene, vendar večinoma višje pri vzorcih iz Vismeca, npr. Vzorec 1 brez zarezne ima 7,7 kJ/m<sup>2</sup> (Vismec) proti 6,0 kJ/m<sup>2</sup> (Memmert). Vpliv dodatka TU ni bil enosmeren – pri večji vsebnosti (TECHNOL2 in TU) vrednosti udarne žilavosti celo nekoliko upadejo, kar bi lahko bila posledica povečane togosti materiala, ki zmanjša sposobnost absorpcije energije pred prelomom.

Pri primerjavi udarne žilavosti vzorcev, izdelanih z metodo 3D tiska in z brizganjem, je opaziti izrazito višje vrednosti pri 3D tiskanih materialih. Vrednosti teh vzorcev dosegajo okoli 17 do 20 kJ/m<sup>2</sup>, medtem, ko brizgani vzorci kažejo nižje vrednosti. Razlog za ta pojav je najverjetneje v drugačni mikrostrukturi, ki jo prinaša slojevita

izdelava pri 3D tisku, kjer je boljše kontrola poroznosti in optimizirana usmerjenost vlaken in slojev, kar izboljšuje absorpcijo energije ob udarcu. Poleg tega proces 3D tiskanja povzroči drugačne pogoje strjevanja in vezave med sloji, kar dodatno prispeva k izboljšanim mehanskim lastnostim.

Tabela 6: Zbrani rezultati udarne in zarezne udarne žilavosti vzorcev

Vzorec	Udarne žilavost (kJ/m <sup>2</sup> )	Zarezna udarna žilavost (kJ/m <sup>2</sup> )
Vzorec 1 Vismec	7,7±1,2	2,0±0,6
Vzorec 1 Memmert	6,0±0,3	1,7±0,2
Vzorec 2 Vismec	5,0±0,5	1,0±0,4
Vzorec 2 Memmert	6,5±0,4	1,3±0,1
Vzorec 3 Vismec	3,9±0,2	1,6±0,3
Vzorec 3 Memmert	4,2±0,5	1,1±0,1
Vzorec 1 Vismec_FGF	19,8±4,1	-
Vzorec 1 Memmert_FGF	12,5±2,1	-
Vzorec 2 Vismec_FGF	19,1±1,9	-
Vzorec 2 Memmert_FGF	19,1±3,8	-
Vzorec 3 Vismec_FGF	17,4±1,6	-
Vzorec 3 Memmert_FGF	20,3±2,1	-

Rezultati meritev indeksa tečenja taline (MFI) za kompozite rPETG (Tabela 7) so pokazali jasen vpliv izbrane tehnike sušenja, saj so bile vrednosti v vseh primerih višje pri vzorcih, sušenih v sušilniku Memmert, kar nakazuje na nižjo viskoznost taline v primerjavi s sušilnikom Vismec. Najizrazitejša razlika je bila opažena pri formulaciji Vzorca 3, kjer je razlika med sušilnikoma znašala kar 4,9 g/10 min, kar potrjuje visoko občutljivost te sestave na prisotnost ostankov vlage. Te povišane vrednosti MFI, ki se pri vzorcih iz Memmerta gibljejo med 14,2 in 18,9 g/10 min, so neposredna posledica nepopolnega sušenja in s tem povezane hidrolitične razgradnje,

saj rPETG v prisotnosti vlage hitro razpada zaradi cepitve estrskih vezi. Poleg vpliva vlage na viskoznost vpliva tudi sama vsebnost dodatkov, saj so bili pri obeh sušilnikih najvišji indeksi izmerjeni pri Vzorc 2, kar lahko nakazuje na nižjo povprečno molsko maso osnovnega reciklata ali večji delež nizkomolekularnih komponent v tej specifični mešanici.

Tabela 7: Zbrani rezultati MFI

Vzorec	MFI (g/min)
Vzorec 1 Vismec	12,4±1,2
Vzorec 1 Memmert	14,2±0,8
Vzorec 2 Vismec	18,3±1,4
Vzorec 2 Memmert	18,9±1,1
Vzorec 3 Vismec	12,3±1,1
Vzorec 3 Memmert	17,2±0,5

## 5 SKLEP

Na podlagi celovite analize razvitih termoplastičnih kompozitov na osnovi rPETG lahko potrdimo, da je kakovost sušenja eden najbolj kritičnih dejavnikov, ki določajo končne lastnosti materiala. rPETG se je zaradi svoje izrazite higroskopne narave namreč izkazal za material, pri katerem molekule vode ne ostanejo le na površini, temveč prodrejo globoko v notranjost polimerne strukture, kar zahteva dolgotrajno in precizno obdelavo.

Primerjava sušilnih sistemov je razkrila pomembne procesne razlike. Sušilnik Memmert je pri rPETG omogočil izjemno hitro znižanje vlage v začetni fazi (77 % padec v prvi uri), kar pripisujemo statični izpostavljenosti materiala na pladnjih. Vendar pa rezultati DSC analize kažejo, da sušilnik Vismec, kljub počasnejšemu delovanju, zagotavlja učinkovitejšo končno odstranitev vlage, kar se odraža v višji temperaturi steklastega prehoda. Pri rPETG je to ključno, saj preostala vlaga deluje kot mehčalo in znižuje  $T_g$ , hkrati pa v talini povzroča hidrolitično razgradnjo. To potrjujejo tudi meritve indeksa tečenja taline, kjer so vzorci iz Memmerta kazali višje vrednosti, kar nakazuje na nižjo viskoznost zaradi cepitve polimernih verig v prisotnosti vlage. Raziskava je uspešno potrdila, da dodatek zmlatega odpadnega duroplasta (TECHNOL2) deluje kot učinkovito ojačevalo in ne le kot polnilo. Dinamična

mehanska analiza je pokazala, da se z dodajanjem duroplasta dinamični E modul pri 30 °C zviša za približno 17 %, kar pomeni znatno povečanje togosti materiala. Pri nateznih lastnostih brizgani vzorci sicer dosegajo višjo trdnost in modul zaradi homogene strukture, vendar pa 3D FGF tisk prinaša izjemne prednosti pri žilavosti. Eden najpomembnejših zaključkov je ugotovitev, da 3D tiskani vzorci po udarni žilavosti močno presegajo brizgane kose, ne glede na vsebnost odpadnega duroplasta. Vrednosti udarne žilavosti so pri 3D tisku so dosegale med 17 in 20 kJ/m<sup>2</sup>, medtem ko so brizgani vzorci dosegali le med 3,8 in 7,7 kJ/m<sup>2</sup>. Ta pojav pripisujemo specifični slojeviti mikrostrukturi in mikroprazninam, ki so značilne za 3D tisk in omogočajo boljšo absorpcijo energije ob udarcu.

Z delom v okviru projekta DeremCo smo dokazali, da je mogoče z lastnim znanjem na obstoječi opremi predelati rPETG v visokotehnološki kompozit, primeren tako za brizganje tehničnih izdelkov kot za 3D tisk velikega formata. Za prihodnje raziskave pa bi bilo smiselno vključiti še dodatne analize metode, kot je FT-IR spektroskopija, da bi natančneje ocenili stopnjo kemične razgradnje vezi zaradi vlage, ter optimizirati razmerja kompatibilizatorja za še boljšo medfazno adhezijo. Na podlagi rezultatov lahko trdimo, da razviti material odpira nove možnosti za trajnostno izdelavo orodij in kompleksnih industrijskih komponent iz reciklatov.

Viri:

- [1] Marcello Colledani, Stefano Turri, Systemic Circular Economy Solutions for Fiber Reinforced Composites, Springer Nature, first ed., Milan, Italija, 2022.
- [2] Slideshare, Polymer Extrusion problems & Defects. <https://www.slideshare.net/slideshow/polymer-extrusion-problems-defects/76597123>, 2017 (dostopno, april 2026).
- [3] The Madison Group, The Importance of Properly Preparing Resins for Injection Molding. <https://madisongroup.com/the-importance-of-properly-preparing-resins-for-injection-molding/>, 2021 (dostopno, april 2026)).
- [4] G. Baschek, G. Hartwig, F. Zahradnik. Effect of water absorption in polymers at low and high temperatures, *Polymers*. 40 (1999) 3433–3441. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00560-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00560-6).

- [5] Arun S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, third ed., Classification and selection of industrial dryers, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2006, pp. 3–33.
- [6] Florentine J.S. Nieuwmeyer, Kees van der Voort Maarschalk, Herman Vromansa. Granule breakage during drying processes, International Journal of Pharmaceutics. 329 (2007) 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.08.017>.

Izjava o omejitvi odgovornosti: Ta projekt je financiral Evropski sklad za regionalni razvoj (ESRR) v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev št. 101084037. Vendar so izražena stališča in mnenja izključno avtorjev in ne odražajo nujno stališč in mnenj Evropske unije ali Izvajalske agencije Evropskega sveta za inovacije in MSP (EISMEA). Niti Evropska unija niti organ, ki dodeljuje sredstva, zanje ne moreta biti odgovorna.



**Funded by  
the European Union**

## CAN 3D PRINTING REPLACE THE ORIGINAL? AN EXPERIMENTAL ANSWER FROM INDUSTRIAL PRACTICE

Nenad DRVAR<sup>1</sup>, Tomislav HERCIGONJA<sup>1</sup>, Antonio HORVAT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOPOMATIKA D.O.O.

<sup>2</sup>SIGNUM MAX D.O.O.

### EXTRACT

*When a critical component fails and a replacement is no longer available, the choice is simple: give up or build a better part. This paper presents exactly such an engineering challenge through a student assignment (<sup>2</sup>): the reconstruction of a damaged plastic release button for a carry-on luggage handle, using only the equipment available in the laboratory, without relying on external resources or numerical simulations.*

*The process began with digitization using an ATOS 3D scanner and the creation of a CAD model, but simply replicating the original proved naïve. Testing prototypes on a universal testing machine confirmed that faithful copying also transfers every design flaw of the original, leading to repeated failure after a simulated multi-year usage cycle.*

*Instead of relying on assumptions, the solution came through direct validation. By using a testing machine and the ARAMIS DIC system for optical strain measurement during mechanical tests, we forced the material to reveal exactly where the highest stresses occur. Based on these measurements, targeted design changes were implemented, resulting in a functional and reliable replacement component. This proves that with rigorous measurement and accessible laboratory equipment, 3D printing ceases to be a mere prototyping tool and becomes a serious answer to industrial maintenance challenges.*

## 1 INTRODUCTION

Finding the replacement components for products which are no longer available on the market will often pose a challenge.

This paper presents a task [1] given to a student of Technical college in Bjelovar to perform the engineering task: perform the redevelopment process of a damaged plastic release button (see Figure 1) for a carry-on luggage handle by using only tools that are available to him. In this case it was the industrial equipment at the time (2020) available in TOPOMATIKA d.o.o. ([2] ZEISS ATOS 3D scanners, Geomagic Design X reverse engineering tools, UTM Inspekt table 20 kN Hegewald&Peschke [3], DIC ARAMIS 3D camera and additive manufacturing technologies).

The goal was to test if experiments and direct measurements on prototypes can be sufficient to redevelop a functional replacement that meets the mechanical requirements and functionality of the original damaged release button.

## 2 METHODS

The damaged release button of the original handle (Figure 1) was first 3D scanned used ZEISS ATOS Q and then exact digital copy was reverse engineered by using Geomagic Design X software to create a complete and symmetric CAD model of the pre-damaged part.



Fig. 1: Top: original part, bottom: final version of redeveloped part

Handle which accommodates release button was also 3D digitized. That allowed us to perform

virtual assembly (*Figure 2, 3*) in order to test if reconstructed button will again fit and to see how much space inside the handle is left for new part.

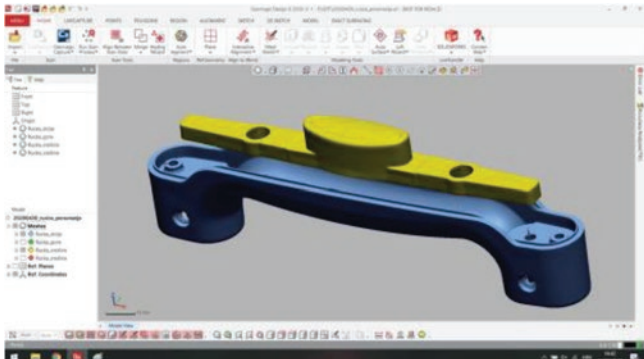


Fig. 2: reverse engineered part with ATOS 3D scanned bottom part of the handle

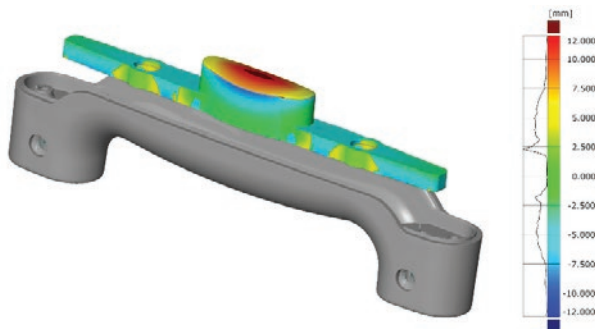


Fig. 3: virtual assembly test, colors show distance from release button outer surface to the handle internal surface. Histogram shows how many points are in each distance.

The reconstructed button (a pretty much exact copy of original button with no modifications) was then 3D printed using FDM technology on a Zortrax M200 printer with three different polymer materials: Z-ABS, Z-ASA Pro, and Z-ULTRAT. How it fits can be seen in *Figure 5*.

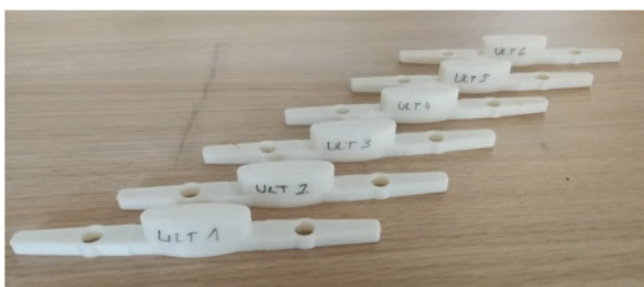


Fig. 4: reconstructed 3D printed parts in Z-ULTRAT [1]

A total of 18 samples were produced for testing purposes.

We asked our colleagues to try to use the handle, and we observed that during the usage some tend to overload the button, because inside handle there was nothing to stop button from going too low. This movement caused release button to bend and we suspected that it is one of the main reasons why original component failed.



Fig. 5: Top: unloaded, middle: typical load, bottom: overload

Since original button was broken and thus not available any more, because remaining part of the button objectively felt very rigid we decided to use all 3 types of 3D printed parts to perform ARAMIS displacement measurement of the actual deflections (*Figure 6*) during the typical usage and to see what kind of overloading can be performed manually in the original mechanism.

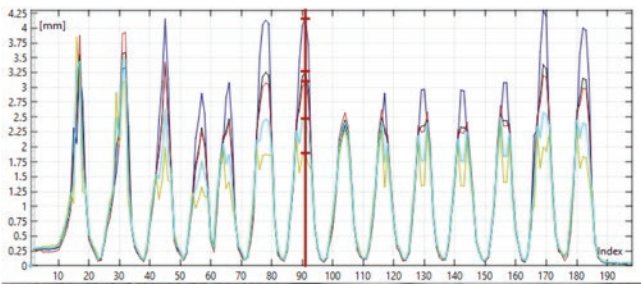
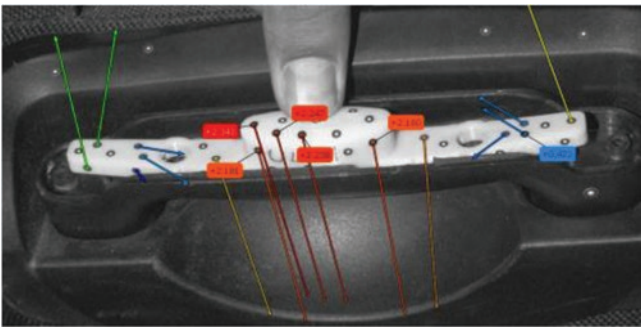


Fig. 6: Top: ARAMIS deflection measurement during typical usage, 3D printed Z-ULTRAT, bottom: diagram showing displacements during typical loads and overloads

For further testing in case of Z-ULTRAT it was decided that displacement in range of 2-2,4 mm will be considered typical and displacements above it as overloaded.

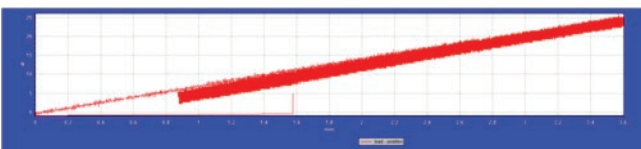
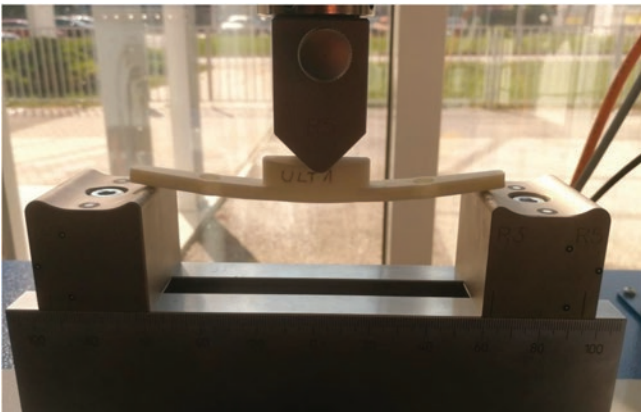


Fig. 7: Top: 3 point bending release button abuse simulation, bottom force-displacement curve

Slow cycling loading in 3-point bend test (amplitude of 2,7 mm for Z-ULTRAT) shown in Figure 7 was performed on the samples with original shape to determine if 3D printed parts are

suitable enough or injection molding will be required to produce final parts. 600 cycles were performed, considering normal 10 times bag usage for travel within period of 3 years (20 button presses per trip were assumed).

After the abuse simulation, samples were 3D scanned after cyclic tests and compared with original shape to visualize if there is significant deformation that would interfere with further usage.

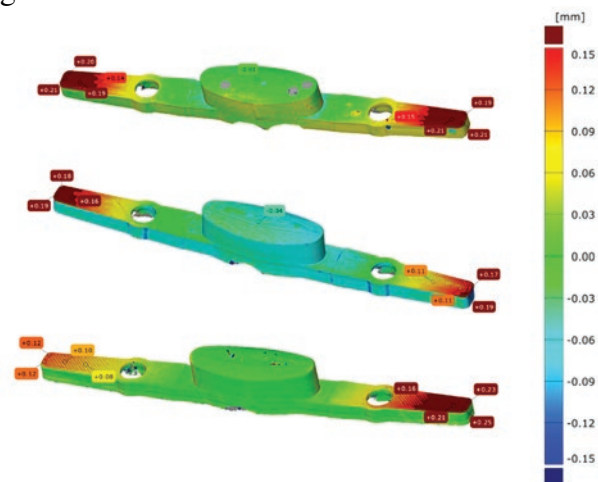


Fig. 8: Top: Z-ASA Pro, middle: Z-ABS, bottom: Z-ULTRAT

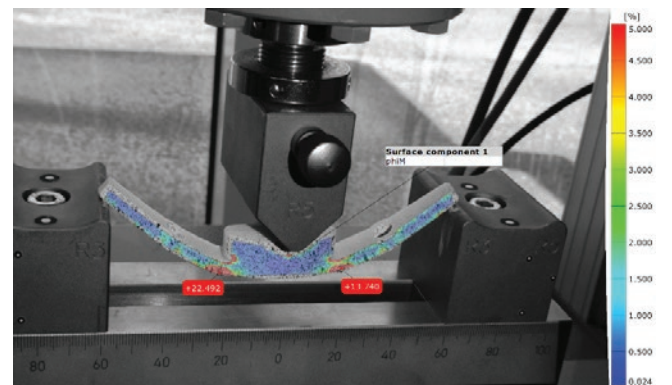


Fig. 9: 3 point bending with ARAMIS surface deformation measurement, 3D printed part

Those tests (Figure 8) proved that replacements could be used without modifications (largest residual deformation was in Z-ULTRAT 0,25 mm), however, by performing additional static 3-point bend test together with ARAMIS DIC strain measurements it can be seen that same area where original button broke will again be critical (Figure 9).

Based on the conducted tests two additional modifications were performed: added radius 3 mm where button meets the holder and thickness of the part was increased from 1,75 mm to 2,5 mm (considering entire time that new part needs to fit back into the handle), *Figure 10*.

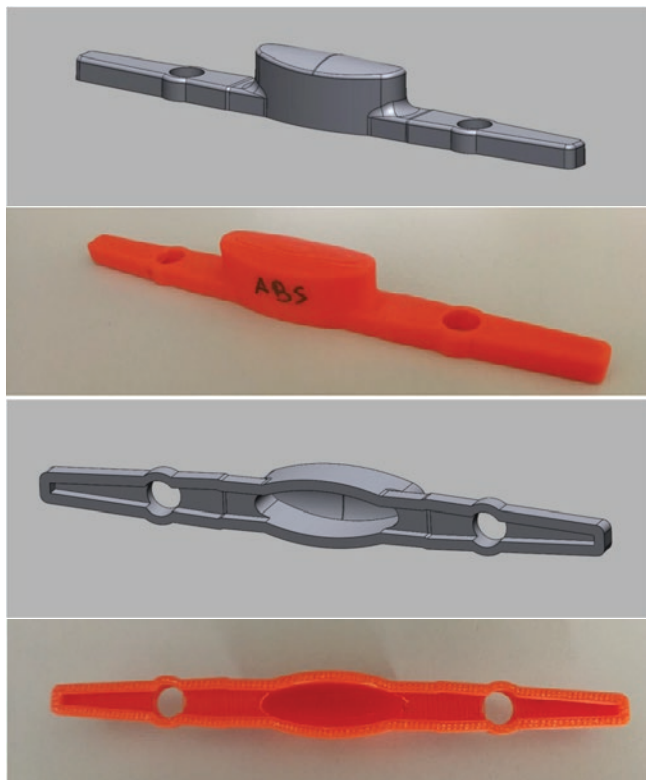


Fig. 10: Redeveloped part with two modification, added radius and increased wall thickness

### 3 RESULTS

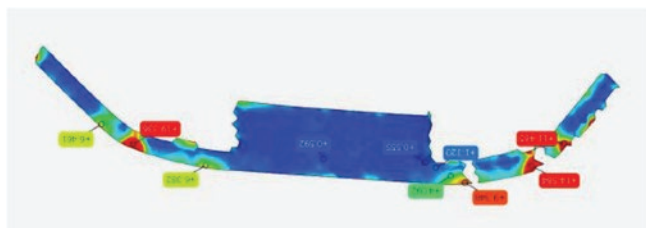


Fig. 11: shifting of critical zones in ARAMIS DIC measurement, final 3D printed part

Static 3-point bend test of reconstructed button showed that local strain extreme has now moved further away from the original critical area (*Figure 11*), towards the guiding hole. By looking at *Figure 6* it is clear that this happened after applying the amount of displacement that can not be done manually inside the handle. This proved that 3D

printed part with applied structural changes can be successfully used as a replacement part even though it was made on a desktop Zortrax 3D printer. Z-ULTRAT demonstrated the best performance with the highest flexural strength (54 MPa) and Shore D hardness (73.4). The redesigned button made of Z-ULTRAT showed the least deformation and highest resistance to static and dynamic loads.



Fig. 12: 3-point overloaded bend test of final part

### 4 CONCLUSIONS

Performed experiments showed that by combining ATOS 3D scanning, reverse engineering, load testing, ARAMIS DIC and displacement measurements and FDM 3D print technology enabled quick and efficient reconstruction of plastic components that were no longer available on the market. The use of the ARAMIS measurement system provided critical information that helped to decide on required design change. FEM simulations were not performed, because it was proven that engineering approach that included just experiments and load tests still work well together with modern shape and deformation measurement technologies. In future we plan to full-field compare strain measurements with FEM. Please note that even though we used small desktop 3D printer, we did not analyze 3D printed part shape stability, repeatability and consistency of mechanical properties, which should be also taken into account during similar reconstructions or direct additive productions.

#### References:

- [1] Antonio Horvat, REKONSTRUKCIJA, ADITIVNA IZRADA I FUNKCIONALNO TESTIRANJE ZAMJENSKE PLASTIČNE KOMPONENTE, završni rad, Veleučilište u Bjelovaru, 2020
- [2] [www.topomatika.hr](http://www.topomatika.hr)
- [3] [www.ispitivanje.com](http://www.ispitivanje.com)

## DIGITALNA NIT: POVEZOVANJE RAZVOJA IN PROIZVODNJE

**Andrej ZUPAN, Miha TRČEK**  
CADACM Lab, d. o. o.

### IZVLEČEK

Zanesljiv prenos inženirskih podatkov iz razvoja v proizvodnjo zahteva neprekinjen digitalni tok informacij – digitalno nit – ki se začne pri 3D CAD modelu ter nadaljuje skozi pripravo tehnoloških podatkov, planiranje procesov in simulacijo proizvodnje. Ključno je, da 3D model predstavlja enotni vir podatkov in enotni vir resnice, iz katerega nastajajo kosovnice, tehnološki postopki, delovna navodila in vhodni podatki za simulacije proizvodnje. V povezanem podatkovnem okolju informacije prehajajo med področji brez ročnega prepisovanja ali podvajanja, kar omogoča usklajeno delovanje razvoja, tehnologije in proizvodnje. Ključen korak je prehod iz konstrukcijske kosovnice (EBOM) v proizvodno kosovnico (MBOM), kjer se izdelek strukturira glede na operacije, montažne sklope, materiale ter določi odločitev »make or buy«. MBOM predstavlja neposreden vhod za tehnološki plan. Digitalna nit zagotavlja sledljivost, nadzor nad verzijami in usklajenost med produktno ter procesno strukturo, kar omogoča hitro odzivanje na spremembe ter neposredno vpliva na stroške, čas uvedbe in zanesljivost proizvodnje.

### 1 UVOD

Pri razvoju in lansiranju novih izdelkov se podjetja pre pogosto soočajo z razdrobljenostjo podatkov in prekinitvami v informacijskem toku. Osrednji problem predstavlja otočna organiziranost procesov, ki vodi v nastanek t. i. informacijskih silosov. Tipičen primer takšne ločenosti se kaže v razkoraku med razvojem in proizvodnjo. Razvojni inženirji namreč podatke ustvarjajo in upravljajo znotraj svojih okolij (CAD, PDM), tehnologi in proizvodni inženirji pa delujejo v povsem ločenih sistemih, pri čemer med njimi ni vzpostavljenega samodejnega prenosa informacij ali neposrednega vpogleda v najnovejše razvojne verzije in zgodovino sprememb.

### 2 POSLEDICE INFORMACIJSKIH VRZELI

Zaradi opisane informacijske vrzeli med inženiringom in proizvodnjo prehod podatkov poteka ročno ali zgolj polavtomatsko, sistemom pa manjka zmožnost sprotnega sledenja statusu povezanih informacij. Takšen način dela prinaša vrsto negativnih posledic, ki neposredno vplivajo na učinkovitost in stroške:

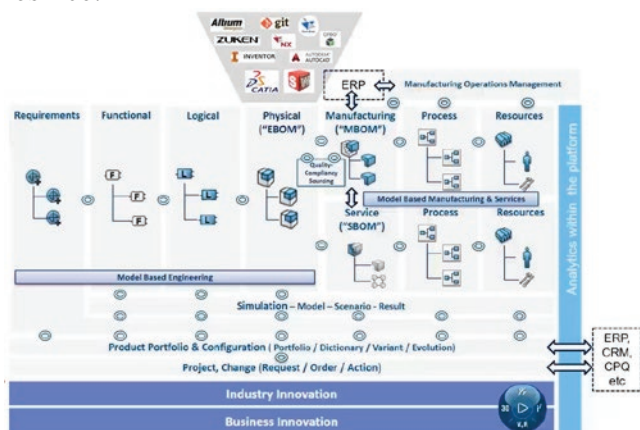
- **Dejavnosti brez dodane vrednosti** (Non-value-added work): Iskanje aktualnih tehničnih informacij, usklajevanje med oddelki in ročno prepisovanje inženirskih podatkov za potrebe proizvodnje zahtevajo ogromno časa. To podaljšuje čase razvoja in tehnologije ter strokovnemu kadru jemlje čas, ki bi ga lahko produktivneje porabili za inovacije in optimizacijo.
- **Povečano tveganje za napake**: Vsako ročno prepisovanje povečuje možnost napak in povzroča neposredna neskladja med razvojem izdelka ter tehnološkimi postopki.
- **Obvladovanje sprememb**: Zaradi odsotnosti samodejnih povezav proizvodnja nima konstantnega in transparentnega vpogleda v zadnje razvojno stanje izdelka. Ko v razvoju nastopi nujna sprememba, se zato informacija o tem pre pogosto prepozno prenese naprej, uporaba zastarelih podatkov pa neposredno vodi v nepotrebno ponovno delo, izmet materiala in zamude.
- **Izguba sledljivosti**: Zaradi takšnega nepovezanega načina dela se izgubi jasen pregled nad celotno zgodovino nastajanja izdelka. Prav tako ni mogoče natančno slediti življenjskemu ciklu posameznega podatka – torej komu, kdaj in na podlagi česa pripisati določeno tehnično odločitev. Posledično je ob

pojavo proizvodnih neskladnosti ali reklamacij izjemno zahtevno identificirati izvorni vzrok napake in zanesljivo preprečiti njeno ponovitev.

### 3 VZPOSTAVITEV DIGITALNE NITI IN ENOTNEGA VIRA RESNICE

Informacijske silose najučinkoviteje odpravimo z uvedbo digitalne niti v enotnem PLM okolju. Konceptualni model tega podatkovnega pretoka na primeru platforme 3DEXPERIENCE prikazuje Slika 1.

V praksi različni oddelki in poslovne domene isti izdelek opišejo s različnimi in specifičnimi nabori podatkov, ki jih potrebujejo za svoje delo. Zato vsakemu od njih pripada lastna, namenu prilagojena struktura istega izdelka. Ker so vse te strukture v skupnem okolju med seboj neposredno povezane, zagotavljajo enoten vir resnice.



Slika 1: Digitalna podatkovna nit

Digitalna nit se začne s strukturo zahtev (Requirements), kjer definiramo tehnične specifikacije in pogoje, ki jih mora izdelek izpolnjevati. Sledi funkcionalna struktura (Functional), ki določa, kaj mora izdelek početi, ter logična struktura (Logical), ki predstavlja arhitekturo sistema. V logični strukturi definiramo povezave med komponentami, kot so kontrolerji, programsko opremo (software), senzorji in mehanskimi sklopi še pred modeliranjem fizičnih delov.

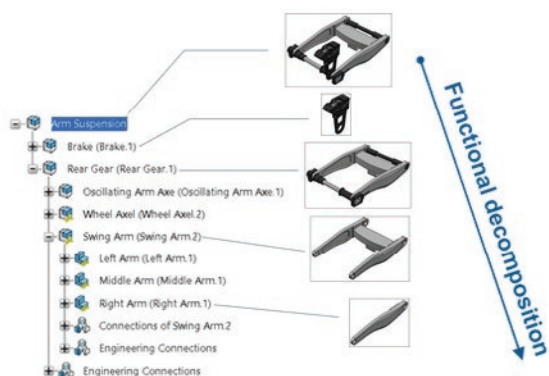
Do te točke govorimo o sistemskem inženiringu oziroma pristopu MBSE (*Model-Based Systems Engineering*). Čeprav ta stopnja za

manj kompleksne izdelke ali določene industrije ni vedno nujna, se pa vsa podjetja, ki izdelujejo fizične izdelke, neizogibno srečajo z naslednjo strukturo v digitalni niti: inženirska kosovnica (EBOM – Engineering Bill of Materials), ki opredeli fizične komponente in sestave izdelka. Iz te inženirske kosovnice (EBOM) nato neposredno sledi proizvodna kosovnica (MBOM – Manufacturing Bill of Materials), ki bo podrobneje opisana v nadaljevanju. MBOM ni le seznam delov, temveč osnova za celoten proizvodni inženiring. Na njeni podlagi se določi tehnološki plan (Process), ki definira točen vrstni red operacij sestavljanja, ter struktura virov (Resources), ki vključuje stroje, orodja in delovna mesta, potrebna za izdelavo. Digitalna nit pa se tukaj ne ustavi, saj omogoča tudi vzpostavitev servisne kosovnice (SBOM), skupaj z ustreznimi servisnimi plani in viri, kar zagotavlja učinkovito vzdrževanje izdelka skozi celotno življenjsko dobo.

Ključna prednost takšnega okolja je, da so vse te strukture med seboj neposredno povezane. To nam omogoča vpogled v realnem času (real-time) nad vsemi povezavami (linki), kar pomeni, da je vsaka sprememba v razvoju vidna in obvladljiva v vseh naslednjih fazah – od proizvodnje do servisa.

#### 3.1 Inženirska kosovnica EBOM – Engineering Bill of Materials

Inženirska kosovnica (EBOM) je osrednji vir podatkov o fizični zasnovi izdelka, ki nastane v razvoju ali konstrukciji. Kot primarna struktura definira funkcionalno sestavo (kako izdelek deluje), pri čemer platforma 3DEXPERIENCE s pomočjo CAD vtičnikov omogoča združevanje podatkov iz različnih CAD orodij v enotno drevesno strukturo. To inženirjem in zunanjim partnerjem omogoča sočasno delo na skupnem modelu. Poleg 3D geometrije EBOM vključuje tudi vse razvojno določene ne-3D komponente, ki so potrebne za funkcionalno delovanje izdelka.

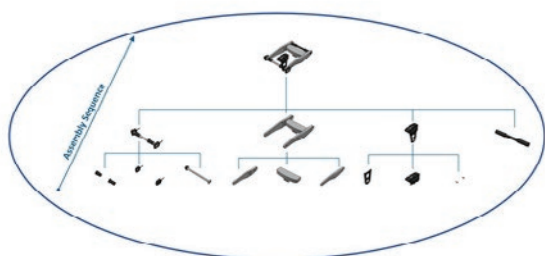


Slika 2: Inženirski BOM

### 3.2 Proizvodna kosovnica MBOM – Manufacturing Bill of Materials

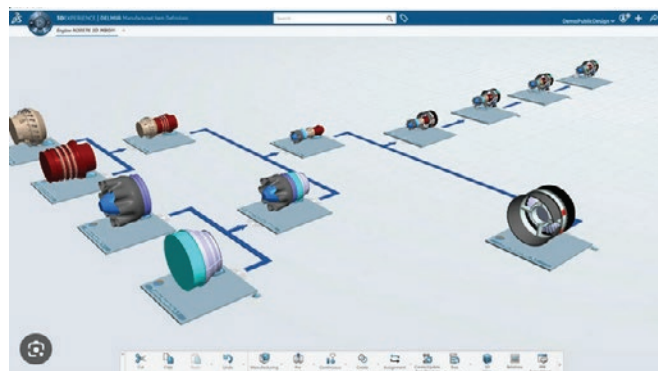
Medtem ko EBOM definira, kako je izdelek zasnovan, proizvodna kosovnica (MBOM) določa, kako bo ta izdelek dejansko izdelan in sestavljen. Gre za dekompozicijo izdelka s proizvodnega vidika, kjer se inženirski podatki transformirajo v izvedbene. V fazi gradnje MBOM tehnologiji sprejemajo ključne odločitve, kako bo ta izdelek proizveden:

1. **Definicija geometrije po proizvodnih korakih:** Komponente, ki so v razvoju združene po funkciji (EBOM), se v MBOM-u reorganizirajo v vmesne proizvodne sestave, ki odražajo dejanske korake na liniji. Glede na naravo dela se določi tip kosovnice: Assembly MBOM za montažne procese več komponent ali Fabrication MBOM za izdelavo posameznih delov (npr. iz surovca v končno obliko). Takšna definicija geometrije po korakih določa natančno stanje izdelka v vsakem trenutku, kar je ključna osnova za načrtovanje namenskih orodij, robotskih celic in montažnih priprav.



Slika 3: Proizvodna kosovnica MBOM

2. **'Make or Buy' odločitev:** Pri gradnji MBOM se za vsako komponento določi, ali bo kupljena ali proizvedena v hiši, kar v 3DExperience PLM platformi sproži uporabo specifičnih podatkovnih modelov. Za dele iz zunanje nabave (Buy) sistem prioritizira logistične podatke in dobavitelje, medtem ko deli iz lastne proizvodnje (Produced) zahtevajo razširjeno strukturo z informacijami o načinu izdelave in pod-komponentami.
3. **Definicija surovcev (Raw Material) in poraba materiala:** V MBOM se za posamezne dele, ki so v EBOM-u definirani le kot končna geometrija, natančno določi, iz česa so narejeni. Vključijo se surovci (npr. profili, pločevine, palice, plošče), ki v 3D modelu niso neposredno prisotni. Poleg specifikacije materiala se določijo tudi normativi porabe, kar je ključna podlaga za nadaljnjo logistično načrtovanje surovin in spremljanje zalog.



Slika 4: 3D dekompozicija MBOM-a

### 3.3 Mehanizmi obvladovanja MBOM

Učinkovita digitalna nit zahteva stroge mehanizme, ki zagotavljajo, da sta razvojni in proizvodni pogled vedno usklajena, hkrati pa mora sistem omogočati, da je celotna struktura ustvarjena čim bolj enostavno in intuitivno. Platforma 3DEXPERIENCE v ta namen uporablja namenska orodja in kontrolne procese:

- **Orodja za lažje ustvarjanje kosovnic:** Proces kreiranja MBOM je neposredno podprt s 3D okoljem, ki omogoča vizualno spremljanje postopne gradnje izdelka (3D Product Buildup). Tehnolog v realnem času

opazuje, kako se izdelek fizično sestavlja plast za plastjo, kar omogoča, da se proizvodna struktura oblikuje hitro in z minimalnim naporom. Sistem vključuje tudi določeno stopnjo avtomatike, ki olajša prenos inženirskih podatkov v proizvodno strukturo in zmanjša možnost napak pri ročnem vnosu.

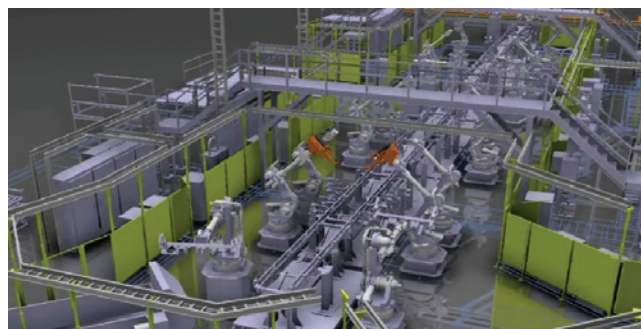
- **Dinamične povezave in obvladovanje sprememb:** Pri ustvarjanju MBOM se med strukturama vzpostavijo različni linki. Ti ne delujejo le kot statične povezave, temveč kot aktivni nadzorniki, ki samodejno zaznajo vsako spremembo geometrije ali strukture v EBOM-u in o tem takoj opozorijo v proizvodnem pogledu. V tem trenutku ima tehnolog na voljo več odločitev: če sprememba ne vpliva na sam proces izdelave ali montaže, jo lahko ignorira in obdrži trenutno stanje, v nasprotnem primeru pa sproži izdelavo nove revizije ali posodobi obstoječo strukturo.
- **Življenjski cikel in zgodovina (Lifecycle & History):** Vsak element v EBOM in MBOM predstavlja samostojen podatek s svojo digitalno "osebno izkaznico", kar omogoča neodvisno upravljanje razvojnih in proizvodnih informacij:
  - Maturity Graph (Graf zrelosti): Podatek prehaja skozi neodvisna stanja (npr. *In Work, Frozen, Released*), kar v realnem času sporoča, ali je vsebina še v delu ali že uradno potrjena za proizvodnjo.
  - Revision History (Zgodovina revizij): Sistem samodejno beleži vse verzije in spremembe. To omogoča natančen vpogled v razvoj obeh kosovnic ter ohranja jasne relacije med njunimi različnimi razvojnimi stopnjami.
  - History (Sledljivost dogodkov): Poleg tehničnih verzij sistem beleži vsako interakcijo – kdo, kdaj in zakaj je izvedel določeno dejanje. Takšen "sistemski spomin" zagotavlja popolno transparentnost nad odločitvami, ki so oblikovale končni proizvodni proces.

### 3.4 Širitev digitalne niti v proizvodne procese

Digitalna nit se po definiciji MBOM-a ne ustavi, temveč se neposredno preljuje v operativno izvedbo. MBOM služi kot osnova za gradnjo procesnega plana, kjer določimo natančen vrstni red operacij, čase izdelave in tehnološke parametre. Vsaka operacija je neposredno povezana z MBOM komponentami ter viri na liniji – od specifičnih strojev in orodij do usposobljenosti delovnih mest. Ta integracija omogoča vzpostavitev 3D replike proizvodnje, kjer načrte povežemo s 3D delovnimi navodili, ki delavcu nudijo vizualne prikaze komponent in postopkov, vedno usklajene z aktualno dokumentacijo.

Digitalna nit se nato razširi v načrtovanje postavitve tovarne (Plant Layout) za preverjanje logistike in materialnih tokov znotraj virtualnega okolja. Povezanost podatkov omogoča, da se vsaka sprememba na 3D modelu izdelka takoj odrazi v celotni podatkovni verigi; tako lahko na primer vnaprej zaznamo, da bi sprememba geometrije ali teže dela poslabšala ergonomijo na delovnem mestu.

## 4 TRANSFORMACIJA PODATKOV V VREDNOST IN POT DO AI PODPRTEGA VIRTUALNEGA DVOJČKA



Slika 5: Virtualni dvojček

Vzpostavitev digitalne niti prinaša merljivo dodano vrednost pri poslovanju podjetja:

- **Hitrejši vstop na trg (Accelerated Time-to-Market):** Z vzporednim inženiringom lahko proizvodnja začne s pripravo že med razvojem, saj ima stalen vpogled v EBOM. Enoten vir resnice tudi drastično zmanjša nepotrebno ponovno delo in napake zaradi zastarelih podatkov. Izjemen časovni prihranek dosežemo tudi s ponovno uporabo (re-use) celotnih, že preverjenih struktur, ki jih skupaj s pripadajočo sledljivostjo enostavno prenesemo na nove projekte, kjer z enostavnimi orodji nadziramo kateri podatki so relevantni in kateri ne.
- **Znižanje stroškov:** Digitalna nit predstavlja podlago za nadaljnjo optimizacijo zalog, ki temelji na realnih normativih porabe v MBOM-u. Zmanjševanje izmeta zaradi usklajenih podatkov in krajši časi tehnološke priprave neposredno znižujejo operativne stroške. Povezanost informacij skozi celoten proces zagotavlja, da podjetje ne izgublja sredstev zaradi napak, ki bi sicer nastale zaradi neuskklajenosti med različnimi oddelki.
- **Agilnost pri spremembah in kakovost:** Digitalna nit omogoča takojšnjo analizo vpliva vsake razvojne spremembe na proizvodnjo. S sklenjeno zanko (Closed-loop Feedback) pa se informacije z linije neposredno vračajo v razvoj za hitro optimizacijo izdelka. Celoten proces upravljanja sprememb poteka skozi določene postopke potrjevanja, kar zagotavlja popolno in natančno sledljivost – v vsakem trenutku je jasno razvidno, kdo, kaj, kdaj in zakaj je izvedel določeno spremembo in kakšne so bile posledice. Takšen nadzor je ključen v zahtevnih industrijah, saj zagotavlja vrhunsko kakovost in popolno transparentnost nad vsakim posegom v strukturo izdelka.

Vzpostavljena digitalna nit med oddelki predstavlja živo relacijsko hrbtenico za vzpostavitev virtualnega dvojčka (Virtual Twin). Za podjetje to pomeni prehod iz statičnega načrtovanja v dinamično digitalno repliko realnega stanja, kjer so vsi podatki med seboj neločljivo povezani, kar omogoča izvajanje verodostojnih simulacij in optimizacijo

proizvodnih scenarijev še pred začetkom fizične izdelave.

S tem virtualni dvojček postane ključno orodje za napovedovanje rezultatov in preverjanje odločitev v varnem digitalnem okolju, kar drastično zmanjša tveganja pri uvajanju novih izdelkov, skrajša čas do začetka masovne proizvodnje ter podjetju zagotavlja vrhunsko odzivnost na tržne spremembe.

Dassault Systèmes to vizijo nadgrajuje z neposredno integracijo umetne inteligence v platformo 3DEXPERIENCE v obliki treh specializiranih asistentov: **Aura** povezuje informacije iz zahtev, projektov in procesov sprememb ter ekipam pomaga ohranjati kontekst in doslednost, **Leo** podpira inženirske odločitve pri tehničnih izzivih, ki segajo od zasnove izdelka do industrializacije, **Marie** pa ekipam pomaga pri raziskovanju kompleksnih pojavov s področja materialov in kemije. Strateško partnerstvo z NVIDIA, sklenjeno leta 2026, to platformo dodatno utrjuje z gradnjo industrijskih modelov AI, utemeljenih na fizikalnih zakonih in validiranih industrijskih podatkih, kar virtualnemu dvojčku omogoča prehod iz opisnega v napovedovalno orodje.

## 5 ZAKLJUČEK

Digitalna nit ni le tehnična povezava med bazami podatkov, temveč strateški temelj sodobne industrije. Z odpravo informacijskih silosov in vzpostavitvijo živega pretoka podatkov podjetja preidejo iz reaktivnega reševanja napak v proaktivno obvladovanje celotnega življenjskega cikla izdelka. Vzpostavitev virtualnega dvojčka tako ne pomeni le koraka k digitalizaciji, temveč zagotavlja dolgoročno konkurenčnost, kjer so hitrost, kakovost in stroškovna učinkovitost rezultat popolne podatkovne usklajenosti.



## OD DOLGE K PRAVI ŽIVLJENJSKI DOBI: EVROPSKO ORODJARSTVO V DOBI KRATKIH CIKLOV

**Sebastjan KOTNIK, Peter FAJS**  
TECOS, Razvojni center orodjarstva Slovenije

### IZVLEČEK

*V sodobni proizvodnji se spreminja paradigma razvoja izdelkov – od dolgih razvojnih ciklov in maksimalne robustnosti k hitrim iteracijam, prilagodljivosti trgu in optimizirani življenjski dobi. Evropski pristop tradicionalno temelji na natančni optimizaciji, robustnosti in dolgi življenjski dobi orodij, medtem ko azijski modeli poudarjajo hitrost razvoja, serijsko razmišljanje in iterativni pristop.*

*Prispevek najprej obravnava razlike med pristopi skozi primere iz orodjarstva, vključno z uporabo aluminijastih orodij, epoksidnih gravur in aditivnih tehnologij za prototipne in pilotne serije. Na tej osnovi je uveden koncept “prave življenjske dobe”, ki pomeni ekonomsko optimalno življenjsko dobo orodja glede na trg, serijo in čas.*

*V drugem delu je analizirana vloga generativne umetne inteligence (GAI) v CAD okoljih kot orodja za pospeševanje razvoja. Predstavljene so razlike med parametričnim modeliranjem, topološko optimizacijo in generativnim oblikovanjem ter pomen podatkovno vodenih pristopov in nadomestnih modelov.*

*Na podlagi literature in industrijskih primerov so prikazani potencialni učinki, kot so zmanjšanje mase, zmanjšanje števila iteracij in skrajšanje razvojnega časa. Prispevek zaključuje, da generativni pristopi ne nadomeščajo inženirja, temveč razširjajo prostor možnih rešitev ter predstavljajo pomembno priložnost za povečanje konkurenčnosti evropskega orodjarstva.*

### 1 UVOD

V sodobni industriji razvoja izdelkov prihaja do izrazite spremembe paradigme. Tradicionalni pristopi, ki temeljijo na dolgih razvojnih ciklih, visoki robustnosti in optimizaciji do skrajnih meja, se postopoma umikajo novim zahtevam trga. Te narekujejo hitrejše uvajanje izdelkov, večjo prilagodljivost in bistveno krajši čas od ideje do realizacije.

Glavni dejavniki teh sprememb so pospešen tehnološki razvoj, digitalizacija in globalizacija, ki omogočajo hiter prenos znanja in proizvodnje. Hkrati se spreminjajo tudi potrošniške navade, ki vse bolj poudarjajo personalizacijo, stalne novosti in kratke življenjske cikle izdelkov. Posledično so podjetja prisiljena skrajševati razvojne procese in uvajati strategije, kot je minimalno sprejemljiv produkt (MVP), kar pomeni, da se izdelki na trg lansirajo hitreje in se nato iterativno izboljšujejo.

V tem kontekstu se postavlja vprašanje, ali je tradicionalni evropski pristop k razvoju in orodjarstvu še vedno optimalen.

### 2 PRELOM PARADIGME: REDEFINICIJA ŽIVLJENJSKE DOBE ORODIJ

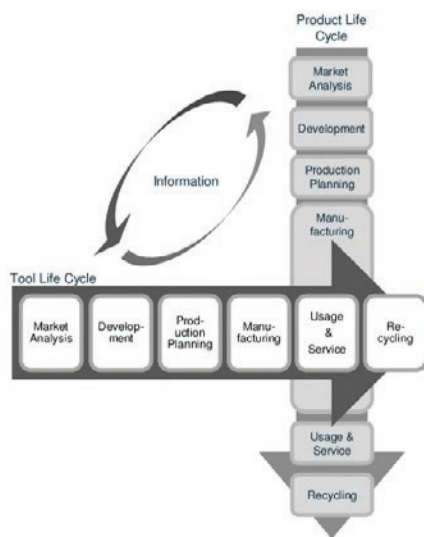
Evropsko orodjarstvo je zgodovinsko zgrajeno na principih visoke kakovosti, natančnosti in dolge življenjske dobe. Orodja so pogosto dimenzionirana za več milijonov ciklov, kar zagotavlja zanesljivost in stabilnost proizvodnje. Tak pristop pa prinaša tudi visoke začetne stroške ter dolge razvojne čase, ki niso vedno skladni z dinamiko sodobnih trgov.

Zato se uveljavlja nov koncept, ki življenjsko dobo orodja definira kot ekonomsko optimalno glede na konkretno aplikacijo. Namesto maksimalne obstojnosti postaja ključno vprašanje, ali je življenjska doba usklajena s pričakovano serijo, časom prisotnosti izdelka na trgu in investicijskimi omejitvami.

Tak pristop omogoča uporabo alternativnih tehnologij, kot so aluminijaste gravure ali orodja iz umetnih mas. Aluminijaste gravure omogočajo hitrejšo izdelavo, krajše ciklusne čase in zadostno obstojnost za srednje velike serije. Po drugi strani tehnologije, kot je 3D tisk (npr. SLA), omogočajo

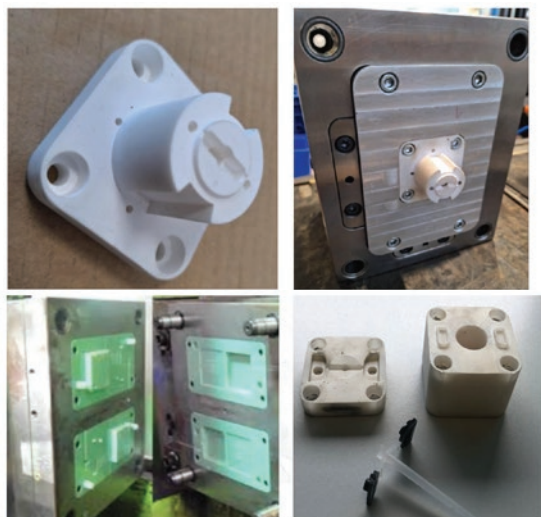
izjemno hitro izdelavo prototipnih orodij, ki so primerna za testiranje konceptov in zgodnje faze razvoja.

### 3 PRIMERJAVA RAZVOJNIH MODELOV: EVROPA IN AZIJA



Slika 1: Povezava med življenjskim ciklom izdelka in življenjskim ciklom orodja ter vloga informacijskega kroga

Seveda imajo takšne rešitve tudi omejitve, predvsem v smislu mehanske obstojnosti, dimenzijske stabilnosti in omejene uporabe določenih materialov. Kljub temu pa omogočajo bistveno hitrejše iteracije, kar je v mnogih primerih ključnega pomena.



Slika 2: Gravure iz umetnih mas

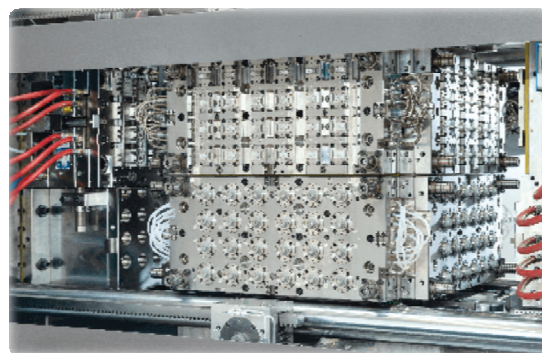
Razlike med evropskim in azijskim pristopom k razvoju izdelkov so izrazite. Evropski model temelji na natančnosti, robustnosti in optimizaciji, pri čemer se veliko pozornosti namenja detajlom in dolgoročni zanesljivosti. Posledica tega so daljši razvojni cikli in višji stroški, vendar tudi visoka kakovost končnih izdelkov.

Nasprotno pa azijski model temelji na serijskem razmišljanju, hitrih iteracijah in pragmatičnem pristopu k razvoju. Orodja se pogosto obravnavajo kot potrošna investicija, ki jo je mogoče prilagajati in nadgrajevati skozi življenjski cikel izdelka. Tak pristop omogoča hitrejšo odzivanje na tržne spremembe, vendar lahko vodi do nižje začetne kakovosti.

Ključni izziv evropske industrije je, kako ohraniti svojo tradicionalno prednost v kakovosti, hkrati pa povečati hitrost razvoja.

Kljub omenjenim izzivom evropska orodjarska podjetja ostajajo med tehnološko najnaprednejšimi na svetu. Podjetja, kot so Haidlmair GmbH, Otto Männer GmbH in Foboha GmbH, predstavljajo primere uspešne integracije avtomatizacije, digitalizacije in naprednih proizvodnih tehnologij.

Za ta podjetja je značilna visoka stopnja avtomatizacije, vključno z robotiziranimi obdelovalnimi celicami, avtomatsko menjavo orodij in elektrod ter integriranimi sistemi za upravljanje proizvodnje (MES). Posebej pomemben je koncept t. i. »lights-out« proizvodnje, kjer proizvodni procesi potekajo neprekinjeno brez prisotnosti operaterjev.



Slika 3: Proizvodnja kompleksnih multi-cavity orodij (CUBE Moulds) [1]

Takšne rešitve omogočajo visoko produktivnost, ponovljivost in natančnost, hkrati pa zmanjšujejo vpliv človeškega faktorja in stroškov dela.

#### 4 GENERATIVNA UMETNA INTELIGENCA V CAD OKOLJIH

V zadnjih letih se kot pomembno orodje za pospeševanje razvoja uveljavlja generativna umetna inteligenca. Ta omogoča prehod od klasičnega načrtovanja k raziskovanju prostora možnih rešitev.

Pri parametričnem modeliranju inženir neposredno definira geometrijo in spreminja posamezne parametre, pri čemer se generira ena rešitev naenkrat. Topološka optimizacija predstavlja nadgradnjo tega pristopa, saj na podlagi fizikalnih zakonitosti išče optimalno porazdelitev materiala, vendar običajno vodi do ene same rešitve.

Generativni pristop pa temelji na definiciji ciljev in omejitev, pri čemer sistem sam generira več alternativnih rešitev. Te se lahko vrednotijo glede na različne kriterije, kot so masa, togost, stroški ali proizvodne omejitve. Tak pristop pogosto vključuje uporabo podatkovno vodenih metod in nadomestnih modelov, ki omogočajo hitrejše ocenjevanje rešitev brez potrebe po polnih numeričnih simulacijah [2][3].

Ključna prednost generativnega pristopa je v tem, da omogoča hkratno obravnavo več rešitev in s tem boljše razumevanje kompromisov med različnimi kriteriji



Slika 4: Primerjava klasičnega, generativnega in proizvodno prilagojenega CAD modeliranja komponente [4]

#### 5 INTEGRACIJA UMETNE INTELIGENCE V RAZVOJNI CIKEL

Uporaba umetne inteligence se ne omejuje zgolj na generativno oblikovanje, temveč zajema celoten življenjski cikel izdelka. V fazi načrtovanja omogoča avtomatizacijo ponavljajočih se nalog, zaznavanje napak in kolizij ter generiranje standardnih komponent. V kombinaciji s simulacijami omogoča tudi zgodnjo validacijo rešitev, kar zmanjšuje število iteracij in stroške razvoja [5][6].

V širšem kontekstu umetna inteligenca omogoča tudi prediktivno vzdrževanje, optimizacijo virov, napovedovanje povpraševanja ter upravljanje tveganj. S tem postaja ključni element digitalne transformacije proizvodnih podjetij.

Kljub številnim prednostim pa ostajajo tudi izzivi, povezani z zahtevami po velikih količinah podatkov, interoperabilnostjo modelov ter sprejemanjem novih tehnologij v industrijskem okolju [7][8].



Slika 5: Uporaba umetne inteligence in strojnega učenja v PLM sistemih za avtomatizacijo in optimizacijo procesov [9]

## 6 RAZPRAVA

Rezultati analize potrjujejo, da prihodnji razvoj evropskega orodjarstva ne temelji na opuščanju obstoječih prednosti, temveč na njihovi nadgradnji in prilagoditvi novim tržnim in tehnološkim pogojem. Tradicionalni poudarki evropskega pristopa, kot so visoka kakovost, robustnost konstrukcij ter poglobljeno inženirsko znanje, ostajajo pomembni diferenciacijski dejavniki, vendar se v sodobnem okolju vse bolj soočajo z omejitvami v smislu daljših razvojnih ciklov in manjše prilagodljivosti.

Eden ključnih trendov je premik od absolutnega optimiranja življenjske dobe orodij k konceptu projektne pogojene, ekonomsko optimalne življenjske dobe. V tem okviru se uveljavljajo tudi alternativni proizvodni pristopi, kot so uporaba gravur iz aluminija in umetnih mas, zlasti v fazah razvoja, testiranja in proizvodnje manjših serij. Takšne rešitve omogočajo bistveno skrajšanje razvojnega časa in zmanjšanje stroškov, pri čemer zavestno sprejemajo omejitve glede trajnosti in obrabe. S tem postaja življenjska doba orodja funkcija konkretnega projekta, njegovih količinskih zahtev in časovnih omejitev.

Pomembno dopolnilo tem pristopom predstavljajo digitalne tehnologije, zlasti generativno modeliranje in umetna inteligenca. Generativni pristopi omogočajo prehod od determinističnega, linearnega načrtovanja k raziskovalno usmerjenemu procesu, kjer se simultano generira in vrednoti več alternativnih rešitev. S tem se bistveno poveča učinkovitost iskanja optimalnih konstrukcijskih rešitev ter zmanjša potreba po zaporednih iteracijah. Vendar pa vloga inženirja ostaja osrednja, saj je odgovoren za ustrezno definicijo robnih pogojev, interpretacijo rezultatov in končno odločanje.

Pri implementaciji teh pristopov je ključna njihova integracija v obstoječe razvojne in proizvodne procese. Učinkovitost generativnih metod je neposredno povezana s kakovostjo vhodnih podatkov, razpoložljivostjo simulacijskih modelov ter stopnjo digitalne zrelosti organizacije. Posledično generativna umetna inteligenca ne predstavlja zgolj tehnološke inovacije, temveč zahteva tudi organizacijske in procesne spremembe.

## 7 ZAKLJUČEK

Prehod od koncepta dolge življenjske dobe k ekonomsko optimalni življenjski dobi predstavlja pomembno spremembo paradigme v razvoju izdelkov in orodij. Namesto maksimalne robustnosti postaja v ospredju optimizacija, ki upošteva celoten kontekst izdelka, vključno s tržnimi zahtevami, velikostjo serije, časom razvoja in stroškovno učinkovitostjo.

Evropska industrija ima v tem procesu pomembno izhodišče, saj razpolaga z visoko ravno tehničnega znanja, napredno proizvodno infrastrukturo in dolgo tradicijo kakovostnega inženiringa. Vendar pa ohranjanje konkurenčnosti v globalnem okolju zahteva tudi povečanje hitrosti razvoja ter večjo prilagodljivost. To vključuje tako uporabo digitalnih tehnologij, kot so generativno modeliranje, umetna inteligenca in avtomatizacija, kot tudi pragmatične proizvodne pristope, ki omogočajo hitrejšo validacijo in uvedbo izdelkov na trg.

Generativna umetna inteligenca pri tem predstavlja pomembno podporno orodje, ki omogoča raziskovanje širšega prostora rešitev in hitrejšo optimizacijo konstrukcij. Kljub temu ne nadomešča inženirja, temveč razširja njegove zmožnosti ter podpira bolj informirano in učinkovito odločanje.

Na podlagi izvedene analize lahko zaključimo, da bo konkurenčnost evropskega orodjarstva v prihodnje temeljila na sposobnosti združevanja tradicionalnih prednosti z novimi tehnološkimi pristopi. Ključni izziv ostaja doseganje ravnotežja med kakovostjo in hitrostjo razvoja, pri čemer tehnologija predstavlja sredstvo, končne odločitve pa ostajajo v domeni človeka.

Viri:

- [1] Otto Männer GmbH: Proizvodnja kompleksnih multi-cavity orodij (CUBE Moulds), promocijsko gradivo podjetja, dostopno na spletu, 2024.
- [2] Yüksel, N., Börklü, H. R.: A Generative Deep Learning Approach for Improving the Mechanical Performance of Structural Components, *Applied Sciences*, 14(9), 3564, 2024.
- [3] Koul, P.: A Review of Generative Design Using Machine Learning for Additive Manufacturing, *Advances in Mechanical and Materials Engineering*, 41, 145–159, 2024.

- [4] Dassault Systèmes: 3DEXPERIENCE platform – generative design materials, dostopno na spletu, 2026.
- [5] Peckham, O., et al.: Artificial Intelligence in Generative Design: A Structured Review of Trends and Opportunities, *Designs*, 9(79), 2025.
- [6] Buga, A., Borzan, M., Trif, A.: Artificial Intelligence in the CAD Process: Machine Learning Models, Generative Optimisation, and Their Impact on Design, *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 23(1), 2025.
- [7] Villena Toro, J.: Machine Learning in Design Engineering and Manufacturing, Linköping University, 2023.
- [8] Shafiee, S.: Generative AI in Manufacturing: A Literature Review of Recent Applications and Future Prospects, *Procedia CIRP*, 132, 1–6, 2025.
- [9] WavePLM: AI & ML in PLM – Automation and Workflow Optimization, dostopno na spletu, 2026.



## GRENKI MEDVEDKI: LEKCIJE IZ HARIBO PRENOVE ERP SISTEMA

Peter KORENČAN<sup>1</sup>, Dejan GMAJNER<sup>2</sup>, Tomaž OREHEK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Korenčan in družabniki, Peter Korenčan s.p.

<sup>2</sup>Biostile d.o.o.

<sup>3</sup>MM KOLIČEVO d.o.o.

### IZVLEČEK

*Digitalna preobrazba in posodobitev informacijskih sistemov sta danes nepogrešljivi za ohranjanje konkurenčnosti in učinkovitosti v sodobni kosovni proizvodnji. Kljub jasnim poslovnim ciljem pa takšni projekti prinašajo resna tveganja – tudi dobro zasnovana implementacija lahko ob napačnem pristopu ogrozi kontinuiteto celotne dobavne verige. Prispevek obravnava odmevno študijo primera uvedbe sistema SAP S/4HANA v podjetju Haribo, ki nazorno prikazuje, kako pomanjkljivo načrtovanje ohromi delovanje podjetja v ključnem trenutku. Analizirani so tehnični izzivi migracije podatkov, poslovne posledice v dobavni verigi (25-odstotni padec prodaje, prazne police v trgovskih verigah) in strateške napake pri izbiri termina zagona, testiranju ter upravljanju sprememb. Na podlagi primera in dolgoletnih izkušenj iz industrije je predstavljen konkreten vodnik za podjetja, ki načrtujejo prehod na celovite ERP rešitve – od popisa obstoječih procesov, priprave testnih scenarijev, izbire ponudnika in usposabljanja uporabnikov do skrbi v začetnem obdobju uporabe.*

### 1 UVOD

V sodobnem industrijskem in proizvodnem okolju so celovite programske rešitve, kot je sistem za načrtovanje virov podjetja (ERP), temelj uspešnega poslovanja. Podjetja se za prenovo informacijskih sistemov odločajo zaradi potrebe po standardizaciji procesov, boljši sledljivosti in večji odzivnosti na zahteve trga. Kljub jasnim prednostim pa so tovrstni projekti izjemno kompleksni in povezani z visokimi tveganji.

Pričujoči prispevek podrobno analizira študijo primera uvedbe sistema SAP S/4HANA v nemškem slaščičarskem velikanu Haribo ter iz nje črpa ključne nauke za vodenje tovrstnih transformacij. V drugem poglavju je opisan potek implementacije in njene posledice, v tretjem so analizirani vzroki težav, v četrtem pa je predstavljen strukturiran vodnik za uvedbo ali nadgradnjo ERP sistema v proizvodnem podjetju.

### 2 OPIS IMPLEMENTACIJE: OD PRIPRAVE DO POSLEDIC

Prehod na nov ERP sistem v podjetju Haribo ni bil zgolj tehnološka nadgradnja, temveč celovita preobrazba poslovnih procesov. Projekt je bil zastavljen z namenom poenotenja razdrobljenega

informacijskega okolja in podpore mednarodni širitvi podjetja, ki v svojih tovarnah izdeluje več kot 1.500 različnih artiklov [1].

#### 2.1 Priprava na prehod

Pred uvedbo sistema SAP S/4HANA je Haribo uporabljal močno heterogeno IT-infrastrukturo: vsaka od 16 tovarn v 10 državah je delovala na ločenem ERP sistemu, pri čemer so nekateri izmed njih segali v 80. leta prejšnjega stoletja [1][2]. Priprava je zajemala načrtovanje prehoda s tako razdrobljenega okolja na poenoten, standardiziran sistem in je zahtevala izjemno kompleksen načrt prenosa glavnih podatkov (t. i. master data) o materialih, dobaviteljih in izdelkih.

Mapiranje starih procesov v nove standarde ter prilagoditev specifičnih poslovnih pravil, ki so se v podjetju nabrala skozi desetletja, sta bila med najzahtevnejšimi deli projekta [2][3]. Haribo je bil tudi eno prvih nemških podjetij, ki je uvedlo SAP S/4HANA v polnem obsegu funkcionalnosti [3], kar pomeni, da v trenutku zagona ni mogel računati na obsežen nabor izkušenj drugih zgodnjih uporabnikov.

## 2.2 Izvedba (zagon sistema)

Zagon novega sistema (angl. go-live) se je zgodil oktobra 2018 [1][2]. Podjetje se je odločilo za obsežen in skorajda hkraten prehod na novo platformo, pri čemer so bile zajete vse ključne zaledne funkcionalnosti. Takoj po preklopu so se pokazale težave z nezdržljivostjo starih in novih podatkovnih struktur ter procesov. Poslovni procesi, kot so bili modelirani v novem sistemu, se niso ujemali z dejanskim operativnim delovanjem podjetja [3][4]. Uradni predstavnik podjetja je pozneje priznal, da so bile dobavne motnje obsežnejše od predvidenih [5].

## 2.3 Posledice

Najbolj boleč udarec je podjetje doživelo v dobavni verigi. Sistem ni omogočal zanesljivega sledenja surovin in zalog, kar je neposredno vplivalo na zmožnost načrtovanja proizvodnje in odpreme blaga [6]. Čeprav so bila skladišča polna, informacijski sistem ni omogočal pravilnega razporejanja zalog ter priprave pošilk za transport. Izdelki niso pravočasno prispeli do velikih nemških trgovskih verig, posledica pa so bile prazne police in javna kritika v nemških medijih [1].

V ključnem prodajnem obdobju leta 2018 je podjetje zabeležilo 25-odstotni padec prodaje svojih najbolj znanih izdelkov – zlatih medvedkov (Gold Bears) [1][2][6]. Namesto načrtovanega znižanja operativnih stroškov je bilo Haribo prisiljeno zaposliti dodatno delovno silo za ročno obdelavo naročil, dobavne zmogljivosti pa so se povrnile šele v naslednjih mesecih [5].

## 3 ANALIZA VZROKOV IN POSLEDIC

Javno dostopni viri ne razkrivajo vseh internih podrobnosti projekta, saj podjetje ni objavilo podrobnega tehničnega poročila [3]. Kljub temu analize neodvisnih strokovnjakov in poznejši komentarji podjetja omogočajo identifikacijo štirih ključnih sklopov vzrokov, ki so se medsebojno okrepili.

## 3.1 Neprimeren čas zagona

Odločitev za zagon oktobra 2018, neposredno pred vrhuncem nemške zimske in praznične prodajne sezone, je bila usodna [2]. Ko so se pojavile prve težave, podjetje ni imelo časovnega blažilnika za reševanje napak. Kimberling je opozoril, da je pri projektih takšnega obsega pogosta napaka oblikovanje časovnice, ki predpostavlja idealno stanje in ne upošteva dolgoročnih stroškov nepričakovanih zapletov [4].

## 3.2 Pomanjkljivo testiranje

Sistem pred produkcijskim zagonom ni bil zadostno preizkušen v scenarijih, ki bi pokrili kompleksnost Haribojeve dobavne verige. Kimberling je javno izrazil dvom, kako je bilo sploh mogoče, da motenj v procesih dobavne verige niso odkrili pred zagonom – po njegovih besedah bi učinkoviti sistemski testi in t. i. conference room pilots morali razkriti tveganja pravočasno [4]. Ta vrzel pri preverjanju je temeljni vzrok, saj je dopustila, da so se napake odkrivale šele v produkciji.

## 3.3 Kompleksnost prilagajanja in migracije

Zaradi zgodovinskega spleta ločenih sistemov v 16 tovarnah je imel Haribo izredno veliko količino heterogenih glavnih podatkov – več kot 1.500 artiklov s pripadajočimi recepturami, kosovnicami in dobaviteljskimi povezavami [3]. Poskus, da bi nov standardiziran sistem deloval enako kot stari, močno prilagojeni sistemi, je povzročil tehnične konflikte. Namesto da bi procese pred uvedbo poenostavili, je podjetje poskušalo obdržati preveč izjem iz starega okolja [4][6]. Analiza Panorama Consulting opozarja, da so bili poslovni procesi po zagonu preprosto pokvarjeni in nezdržljivi z novo programsko opremo, kar kaže na prepozno izvedeno prenovo procesov [6].

## 3.4 Upravljanje sprememb in vodstveni nadzor

Zaposleni na operativni ravni niso bili ustrezno pripravljene za delo z novim sistemom niti za reševanje izjem in napak v novem okolju. Kimberling poudarja, da je v takšnih projektih

nepogrešljiva močna vodstvena vpetost in aktivno upravljanje projekta, ki preprečuje nekontrolirano stopnjevanje težav [4].

### 3.5 Medsebojno ojačanje vzrokov

Četudi bi lahko posamezen izmed naštetih vzrokov sam po sebi povzročil manjše motnje, je bila usodna prav njihova kombinacija: prepozna prenova procesov je pomenila, da je sistem dobil v uporabo procese, ki jih ni mogel podpirati; pomanjkljivo testiranje je preprečilo, da bi se to razkrilo pred zagonom; izbrani termin oktobra 2018 je odvzel vsak maneverski prostor za popravke; pomanjkljivo upravljanje sprememb pa je onemogočilo učinkovito ročno premostitev.

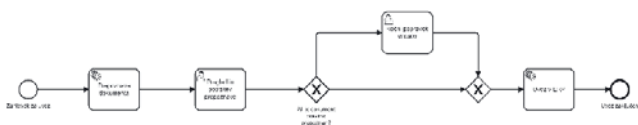
## 4 VODILA ZA UVEDBO ALI NADGRADNJO ERP SISTEMA

Na podlagi analize Haribojeve izkušnje in uveljavljenih industrijskih praks v nadaljevanju podajamo strukturiran vodnik za vodenje prehoda na nov ERP sistem. Vsak korak izhaja iz konkretne napake ali izpuščene aktivnosti, ki jo prepoznamo v primeru Haribo [4][6].

### 4.1 Popis trenutnih procesov (as-is)

Izhodišče vsake ERP-transformacije je temeljit popis obstoječega stanja. Vsi ključni poslovni procesi – od prejema naročila, nabave surovin, načrtovanja proizvodnje, skladiščenja in odpreme do fakturiranja – morajo biti dokumentirani tako, kot dejansko potekajo v praksi. V popis morajo biti vključeni tudi neformalni obvoji (workarounds) in izjeme, ki jih zaposleni uporabljajo vsakodnevno – prav te so namreč najpogostejši vir težav po zagonu. Popis naj izvedejo procesni analitiki skupaj z uporabniki, ki proces dejansko izvajajo. Rezultat mora biti procesni diagrami (primer

Slika 1) podkrepljeni z dodatnimi opisi.



Slika 1: Primer procesnega diagrama

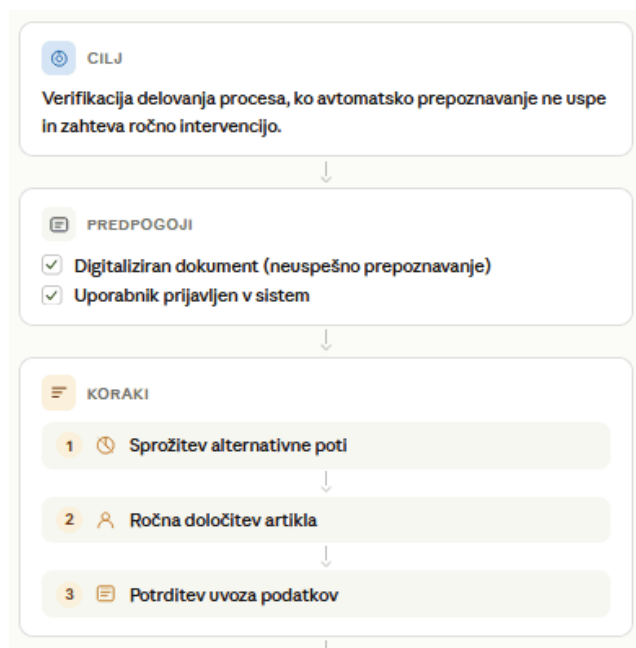
### 4.2 Priprava optimiziranih procesov (to-be)

Popisu mora slediti kritični pregled: katere aktivnosti ustvarjajo vrednost, katere so podedovane iz preteklosti, kje so podvajanja in ozka grla. Ciljni procesi naj bodo čim bližje standardnim, v ERP sistemu že podprtim tokovom dela – ne digitalizirana kopija trenutnega stanja, ampak poenostavljena različica, usklajena z najboljšimi praksami panoge. Prav ta korak je bil v primeru Haribo pomanjkljivo izveden [4][6].

### 4.3 Priprava testnih primerov

Ciljni procesi morajo biti prevedeni v konkretne testne primere, ki bodo pozneje služili za primerjavo ponudnikov, pri testiranju rešitve in pri usposabljanju. Testni primeri naj pokrivajo osnovne scenarije (happy path) – tipično naročilo, dobavo, fakturiranje; alternativne scenarije in izjeme (primer na

Slika 2) – delno dobavo, vračilo, nujno naročilo, reklamacijo, manjkajočo surovino; ter robne in stresne primere – hkratno obdelavo velikega števila naročil, zaključek meseca, sezonske vrhunce.



Slika 2: Alternativni testni primer

#### 4.4 Pridobivanje ponudb skozi testne primere

Namesto klasičnega razpisa priporočamo pristop demonstracije skozi testne primere. Podjetje vsem ponudnikom posreduje enak nabor testnih scenarijev in od njih zahteva, da na delujočem sistemu prikažejo, kako bi vsak posamezen scenarij izvedli. Ponudbe postanejo neposredno primerljive, razkrije se, kateri ponudnik sistem res pozna, in jasno se pokažejo točke, kjer bo potrebna prilagoditev.

#### 4.5 Izbira ponudnika

Pri odločitvi je treba sistematično ovrednotiti tri dimenzije: sposobnost pokritja testnih scenarijev s standardno funkcionalnostjo (manj prilagoditev pomeni manj tveganja); tehnologijo rešitve – arhitekturo, skalabilnost, integracije, zrelost platforme; ter ceno celotne življenjske dobe (TCO) – ne le začetno investicijo, temveč licence, vzdrževanje, nadgradnje in prilagoditve v obdobju petih do sedmih let. Najcenejši ponudnik v začetni fazi je pogosto najdražji v celotnem življenjskem ciklu.

#### 4.6 Načrt implementacije za vse deležnike

Načrt mora vključevati ne le razvojno in IT-ekipo, temveč tudi poslovne uporabnike, vodstvo, skladišče, proizvodnjo, nabavo, prodajo in zunanje partnerje. Opredeliti mora mejnike, odgovornosti, točke odločanja in scenarije za primer neuspeha (rollback plan). Prav odsotnost takšnega načrta je v Haribu privedla do tega, da so morali po zagonu na hitro najeti dodatno delovno silo za ročno obdelavo naročil [1].

#### 4.7 Testiranje rešitve na realnih podatkih

Pred produkcijskim zagonom mora biti sistem preizkušen z dejanskimi podatki iz produkcijskega okolja. To vključuje funkcionalno testiranje, integracijsko testiranje med moduli, sprejemno testiranje uporabnikov (UAT), obremenitveno testiranje v sezonskih pogojih in migracijsko testiranje. Kimberling izrecno poudarja, da bi učinkoviti sistemski testi morali razkriti težave, kakršne je doživel Haribo, še pred zagonom [4].

Če UAT odkrije težavo, je bil uspešen – ne neuspešen.

#### 4.8 Reševanje odstopanj pred zagonom

Vsa odstopanja, ki jih testiranje razkrije, je treba sistematično evidentirati, razvrstiti po kritičnosti in rešiti pred zagonom. Vodstvo mora biti pripravljeno odložiti datum zagona, če kritična odstopanja niso odpravljena. Zagon nedokončane rešitve pod časovnim pritiskom je eno najpogostejših izhodišč ERP-katastrof.

#### 4.9 Usposabljanje in simulacija dejanskega dela

Usposabljanje naj ne bo zgolj predstavitev zaslonov, temveč simulacija dejanskega dela posameznega uporabnika v novem sistemu. Vsak uporabnik naj v testnem okolju izvede svoj tipičen delovni dan. Šele takrat se pokažejo dejanski pomisleki, ki jih na prezentaciji ne bi bilo mogoče slišati.

#### 4.10 Naslavljanje pomislekov uporabnikov

Pomisleki niso ovira, ampak dragocen vir informacij. Če izkušen uporabnik pravi "tako ne bo šlo", je pogosto zaznal nekaj, česar projektna ekipa ni predvidela. Projektni vodja mora aktivno spodbujati povratne informacije in vsak pomislek javno nasloviti – bodisi s prilagoditvijo procesa, bodisi s pojasnilom. Ignoriranje pomislekov vodi v tihi odpor, ki se izrazi kot vzporedno vodenje evidenc v Excelu.

#### 4.11 Zagon v najmanj neprimernem obdobju

Idealnega termina za zagon ERP sistema ni – vedno nekaj pomembnega poteka. Izbrati je treba najmanj neprimerno obdobje: nizko sezono, čas po zaključku meseca, obdobje z manjšim obsegom naročil in vsaj nekaj tednov časovnega blažilnika do naslednjega prodajnega vrhunca. Haribo je storil natanko nasprotno – zagon je postavil oktobra 2018, tik pred vrhunec nemške zimske prodajne sezone [1][2].

## 4.12 Pozorna skrb v začetnem obdobju (hypercare) 5 SKLEP

Takoj po zagonu mora podjetje vzpostaviti obdobje intenzivne podpore (hypercare), običajno štiri do osem tednov. Na voljo morajo biti izkušeni svetovalci ponudnika, dnevni pregledi odprtih težav, jasna eskalacijska pot za kritične napake in vodstvena pripravljenost za hitro sprejemanje odločitev. Pozorno je treba spremljati ključne indikatorje poslovanja – pravočasnost dobav, stanje zalog, hitrost obdelave naročil – da se morebitna odstopanja zaznajo takoj.

## 4.13 Pet dodatnih načel za vsakdan

Poleg zgornjih procesnih korakov velja upoštevati pet načel, ki naj vodijo vsakodnevne odločitve pri vseh projektih digitalizacije:

Prvič, jedrni procesi podjetij so v veliki meri standardizirani – namesto dokazovanja lastne unikatnosti naj podjetje išče, kako standardne funkcionalnosti rešijo njegove izzive.

Drugič, serijske (out-of-the-box) rešitve vsebujejo najboljše prakse mnogih podjetij in omogočajo redne nadgradnje.

Tretjič, lažje je prilagoditi proces kot sistem – pisanje kode po meri ustvarja trajen tehnološki dolg.

Četrtič, kar sistem omogoča, naredite v sistemu - izogibajte se vzporednim sistemom, četudi je funkcionalnost komu še tako mamljiva.

Petič, kar ni v sistemu, se ni zgodilo - podatek, ki obstaja le v vzporednem Excelu, za podjetje ne sme obstajati.

Zgodba podjetja Haribo je močan opomnik, da informacijska prenova presega zgolj namestitve nove programske opreme; gre za globok poseg v organizacijsko strukturo in kulturo podjetja. Analiza primera pokaže, da posamezne napake same po sebi morda ne bi bile usodne, v kombinaciji pa so povzročile 25-odstotni padec prodaje v najbolj občutljivem obdobju leta.

Predstavljen vodnik v poglavju 4 ponuja konkretno zaporedje korakov, ki naj jih podjetje opravi pred, med in po zagonu novega ERP sistema. Dve vodili sta pri tem ključni: celovito testiranje v realnih scenarijih z realnimi podatki in izbira termina zagona, ki upošteva poslovni cikel podjetja. Digitalizacija je uspešna šele takrat, ko so ljudje, procesi in tehnologija popolnoma usklajeni – usklajenost pa ni stvar sreče, ampak discipline v vsakem od opisanih korakov.

### VIRI:

- [1] Sanders, J.: How a troubled SAP S/4HANA migration caused a gummy bear shortage in Germany, TechRepublic, januar 2019.
- [2] Olavsrud, T.: 18 famous ERP disasters, dustups, and disappointments, CIO.com, 2025.
- [3] White, K.: SAP S/4HANA implementation turns Haribo sales sour, LinkedIn Pulse, 2019.
- [4] Kimberling, E.: Lessons from the SAP Transformation Problems at Haribo, Third Stage Consulting, 2022.
- [5] Goldenberg, B.: Haribo can't bear SAP S/4HANA implementation, TechTarget SearchSAP, 2019.
- [6] 5 Lessons Learned From The Haribo ERP Failure, Panorama Consulting Solutions, 2021.



## NAPREDNE TEHNOLOŠKE REŠITVE PRI SERIJSKI OBDELAVI PRECIZNIH IZVRTIN

**Branko UŠAJ**  
BTS Company d.o.o.

### IZVLEČEK

*Vse večje zahteve kupcev po zniževanju cen in vse krajših dobavnih rokih silijo podjetja k vse večji optimalizaciji postopkov obdelav. Cilj vsakega podjetja je uporaba rezilnega orodja s katerim bodo hitro in učinkovito izdelali kakovosten in natančen izdelek. S pravilno izbiro tehnologije izdelave in rezilnega orodja dosežemo zelo kakovostno obdelavo in zelo ugodno razmerje med kakovostjo obdelave in ceno orodja. Eden od postopkov obdelav je tudi povrtavanje, ki je zelo ekonomičen postopek zlasti v primerjavi z izstruževanjem. S postopkom povrtavanja lahko dosežemo večkratno skrajšanje časa obdelave in bistveno nižji strošek na obdelan kos. Običajna povrtala večjih dimenzij so izdelana z nalotanimi ploščicami ali pa imajo privijačene ploščice in nastavljiv premer. V obeh primerih je potrebna zamudna logistika za obnovo orodja ali umerjanje orodja, ki lahko predstavlja izziv za uporabnike. Rešitev za to predstavlja uporaba povrtal RX Urma, ki so zasnovana z namenom znižanja stroškov na izvrtino, kar dosežemo z visokimi parametri obdelave in odpravo potrebe po nastavitvi orodja. S tem povečamo produktivnost in skrajšamo zastojne čase na stroju na minimum v primerjavi s postopkom izstruževanja. Poleg tega z njimi dosežemo najvišje standarde natančnosti in zanesljivosti v proizvodnji. Prednost povrtal je edinstveni modularni sistem z izmenljivimi ploščicami, ki omogoča zamenjavo ploščic v tolerančnem območju  $\mu\text{m}$  v le nekaj sekundah. Povrtala imajo konstantno natančnost premera in dolgo življenjsko dobo, zato ni potrebna dodatna nastavitvev orodja, posledično pa dosežemo zelo kakovostno obdelavo in zelo ugodno razmerje med kakovostjo obdelave in ceno orodja.*

### 1 UVOD

Cilj vsakega podjetja je uporaba rezilnega orodja s katerim bodo hitro in učinkovito izdelovali kvaliteten in natančen izdelek. V današnjem hitro razvijajočem se industrijskem okolju je optimizacija proizvodnih procesov ključnega pomena za povečanje produktivnosti in zmanjšanje stroškov. S pravilno izbiro tehnologije izdelave in s pravilno izbiro rezilnega orodja dosežemo zelo kakovostno obdelavo in zelo ugodno razmerje med kakovostjo obdelave in ceno orodja. Pri izbiri orodja igra zelo pomembno vlogo pravilna izbira tehnologije, stroj na katerem bo potekala obdelava in togost ter natančnost vpetja orodja. Klasični postopki obdelave so zamudni in dragi, zato je potrebno nenehno iskati nove rešitve. V preteklosti so podjetja obdelovala tolerančne izvrtine manjših premerov s povrtali, večjih premerov pa s postopki izstruževanja. V sodobni proizvodnji se podjetja soočajo z vedno višjimi zahtevami. Zaradi ozkih toleranc, kompleksnih geometrij z velikimi prekinitevami in specifičnimi zahtevami glede površine je natančna obdelava komponent

zahtevna. Izbira pravega orodja in koncepta obdelave je ključnega pomena za zagotavljanje učinkovitosti in kakovosti. Poleg natančnega upoštevanja določenih toleranc rešitve švicarskega proizvajalca orodij URMA omogočajo tudi učinkovito obdelavo v najtežjih pogojih ne glede na to, ali gre za prekinjene reze, trde materiale ali posebne površinske obdelave. URMA ponuja inovativne rešitve z edinstvenimi modularnimi sistemi, ki ponujajo maksimalno prilagodljivost RX izmenljivih glav v razponu premerov od 7.600 mm do 200,200 mm. Rezalne robove v območju  $\mu\text{m}$  zamenjamo v nekaj sekundah – brez ponovnega nastavljanja koncentričnosti in to z natančnostjo pozicioniranaja  $< 0,004$  mm pri vsaki menjavi ploščice. Ta sistem zagotavlja konstantno natančnost, maksimalno življenjsko dobo orodja in visoko zanesljivost procesa. Zahvaljujoč zamenljivim rezalnim glavam povrtal RX je mogoče orodje optimalno prilagoditi materialu, ki ga obdelujemo. To omogoča visoko stopnjo fleksibilnosti in stroškovne učinkovitosti. Posebna prevleka in geometrija rezalnega robu

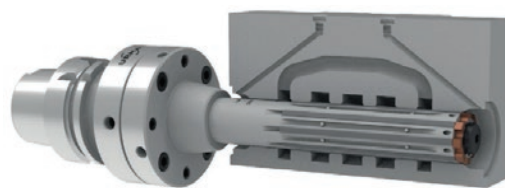
zagotavljata odlično kakovost površine in dimenzijsko natančnost vsakega rezalnega robu.

- Jeklo
- Lito železo
- Aluminij in aluminijeve zlitine
- Titan in titanove zlitine
- Baker, medenina in bron
- Plastika
- Težko obdelovalni materiali



Slika 1: RX serija povrtal z izmenljivo ploščico

Strokovnjaki v podjetju URMA razvijajo in izdelujejo precizna orodja, ki so posebej prilagojena zahtevam naročnikov. Za posebne izzive se uporabljajo prilagojene geometrije orodij. Te so natančno usklajene z naročnikovimi zahtevami, materialom obdelovanca in proizvodnimi pogoji. Pri izbiri tehnologije obdelave in orodja za aplikacijo, lahko z uporabo orodij izdelanih po meri bistveno izboljšamo konkurenčnost. Pri nekaterih obdelavah s standardnim rezilnim orodjem ne dosežemo željene učinkovitosti. S pomočjo specialnega rezilnega orodja izdelanega po meri lahko združimo več obdelovalnih operacij. S tem bistveno skrajšamo čas obdelave, izboljšamo kakovost obdelave in posledično ceno obdelave.



Slika 2: Primer obdelave hidravličnega cilindra

## 2 NATANČNO POVRTAVANJE KOMPLEKSNIH IZVRTIN

Izbira pravega orodja in koncepta obdelave je ključnega pomena za zagotavljanje učinkovitosti in kakovosti. Poleg natančnega upoštevanja določenih toleranc omogočajo orodja URMA tudi učinkovito obdelavo v najtežjih pogojih ne glede na to, ali gre za prekinjene reze, trde materiale ali posebne površinske obdelave.



Slika 3: Primer povrtavanja kompleksnih izvrtin

Poleg tega izdelujejo monoblok orodja za povrtavanje RM, razvija in izdelujejo pa tudi orodja za povrtavanje po meri, glede na naročnikove zahteve. To pomeni, da prejmete rešitev po meri za vsako specifično uporabo.



Slika 4: RM serija povrtal

### 3 TRAJNOSTNO IN UČINKOVITO

URMA nudi tudi namensko obnovo orodja. S tem podaljšujemo življenjsko dobo orodja in zmanjšamo potrebo po novem orodju v proizvodnji. Tako prihranimo vire in energijo, ter prispevamo k zmanjševanju odpadkov. Rezultat: ohranjamo natančnost in zmogljivost, hkrati pa delujemo trajnostno. Njihova zavezanost trajnosti se odraža na različnih področjih njihovega dela. URMA se zanaša na inovativne pristope za varstvo okolja hkrati pa zagotavlja učinkovitost in trajnost izdelkov. Z brušenjem rezalnih robov in obnovo orodij se URMA osredotoča na odgovorno uporabo materialov. Od izbire visokokakovostnih surovin do optimalne uporabe virov med proizvodnjo: zahvaljujoč preiščeni zasnovi orodij uporabljajo minimalno količino redkih surovin in karbidnih trdin. Za uvajanje okoljske ozaveščenosti in družbene odgovornosti v celotni dobavni verigi se URMA zanaša na IntegrityNext, vodilno platformo za spremljanje trajnosti in skladnosti pri javnih naročilih. Tako URMA zagotavlja da dobavitelji upoštevajo globalne standarde ESG (okoljski, socialni in upravljavski).

### 4 SISTEM RX MEDIUM

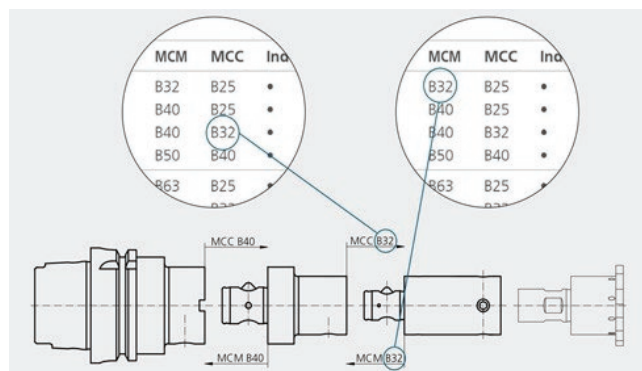


Slika 5: Sistem RX MEDIUM

Modularni sistem RX MEDIUM omogoča povrtavanje v območju  $\varnothing 35,601 - 140,600$  mm. Prednosti sistema so:

- Enostavno rokovanje
- Integrirana kompenzacijska naprava

Sestava sistema je zelo enostavna z upoštevanjem kode za ujemanje.

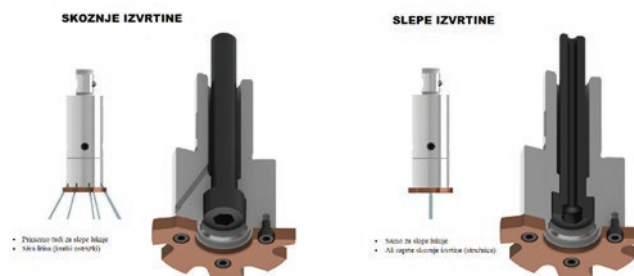


Slika 6: Obravnavanje kod ujemanja URMA

Pomebno je, da pri sestavi upoštevamo predpisane sile vijačenja

### 5 VRSTE DOVODA HLADILNE TEKOČINE

Pri povrtavanju moramo zagotoviti dovolj velik tlak in čistočo, ter pravilno koncentracijo hladilno mazalnega sredstva.



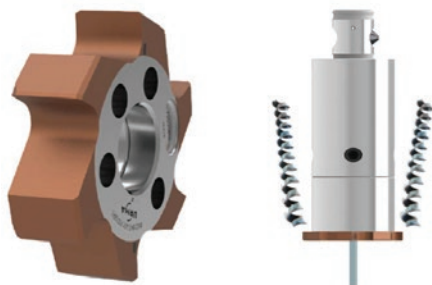
Slika 7: Dovod hladilne tekočine

### 6 SMER TOKA ODREZKOV

Glede na vrsto izvrtine imamo na izbiro dve opciji. Pri obdelavi slepe izvrtine se odločimo za orodje z ravnim žlebljenjem, kjer potujejo odrezki v nasprotni smeri podajanja. V primeru skoznje izvrtine pa uporabimo orodje z levim žlebljenjem, kjer potujejo odrezki v smeri podajanja.

Ravno žlebljen

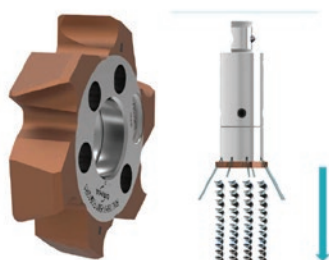
- Za slepe luknje
- Skozi izvrtine
- Tok odrezkov v nasprotni smeri podajanja



Slika 8: Ravno žlebljenje

Levo spiralno žlebljen

- Samo skozi izvrtine
- Tok odrezkov v smeri podajanja



Slika 9: Levo spiralno žlebljenje

## 7 NASTAVITEV POVRTALA

Za doseganje optimalnih rezultatov je bistvena popolna koncentričnost orodja. Za kompenzacijo napak koncentričnosti držala in vretena stroja se uporabljajo nastavljive vpenjalne glave. Koncentričnost je mogoče meriti z različnimi metodami:

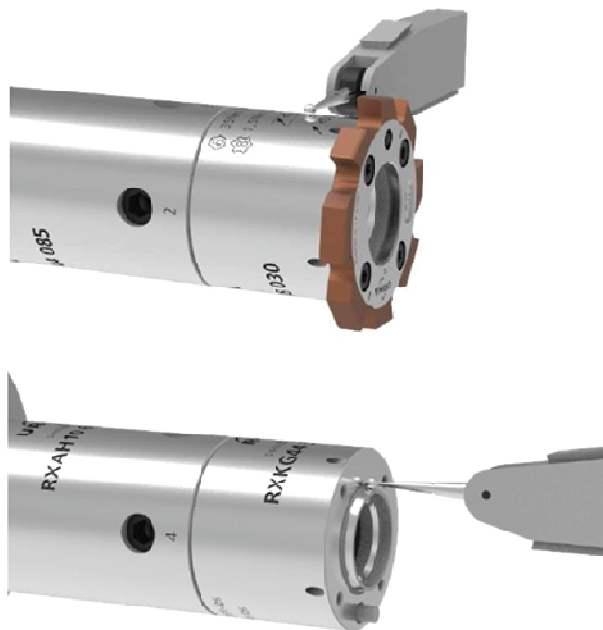
- Preko označene točke za preverjanje izteka na nosilcu rezila

Sredine orodja RX so izdelana z visokimi tolerancami. Ta metoda zagotavlja sprejemljivo natančnost in je enostavna za uporabo.

- Kratki konus skozi držalo ploščice

Za doseganje najboljših rezultatov povrtavanja je orodje z odlično centričnostjo absolutno nujno.

Z razstavljenim povrtalom izmerite kratki konus neposredno na držalih ploščic. Ta metoda ravnanja zagotavlja visoko natančne rezultate merjenja. Cilj je toleranca  $\varnothing < 0,005$ .



Slika 10: Nastavitev opleta

Pred nastavitvijo se je potrebno prepričati, da so vsi nastavitveni vijaki popolnoma odvit. Nato vstavimo orodje v vreteno stroja in nastavimo opletanje neposredno v vretenu stroja na največ 5  $\mu\text{m}$  (idealno  $< 3 \mu\text{m}$  s štirimi radialnimi nastavitvenimi vijaki).



Slika 11: Nastavitev opleta na stroju

## 8 MENJAVA REZILNE PLOŠČICE

Pri menjavi ni potrebno vzeti stebila iz držala orodja. Potrebno je le odstraniti vpenjalne vijake in izrabljeno rezilno ploščico. Ko smo odstranili rezilno ploščico, previdno očistimo steblo in preverimo, da je nepoškodovano. Nato namestimo novo ploščico. Pri namestitvi moramo biti pozorni na pozicionirni zatič in rahlo privijemo vpenjalne vijake. Za križno privijanje vijakov je potrebno uporabiti priporočeni momentni izvijač s Torx nastavkom.



Slika 12: Menjava rezilne ploščice

## 9 STRATEGIJE OBDELAVE – KONČNA OBDELAVA

Pri pripravi tehnologije moramo upoštevati naslednje:

- Pri vstopu v pilotno izvrtino z orodjem za fino obdelavo moramo zmanjšati hitrost ( $n = 50\text{--}500$  vrt/min), dokler se rezalni vložek za povrtavanje popolnoma ali deli vodilnih ploščic ne zaskočijo. Praviloma velja: "fz vstop" = "fz obdelava".
- Nato povečajte število vrtljajev na izbrano vrednost in dokončajte celotno izvrtino brez prekinitve pomika.
- Odmik orodja izvedemo pri 50–80 % manjši hitrosti ( $n$ ) in približno 3–5-kratniku hitrosti pomika pri obdelavi ( $v_f$  mm/min).

## 10 PRIMER POVRTAVANJA NOSILCA

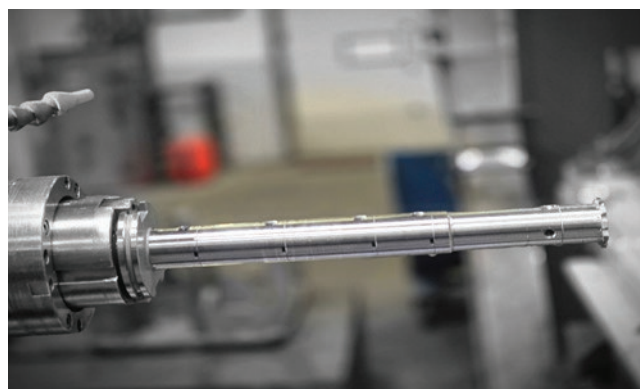
Stranka z več desetletji izkušenj pri proizvodnji strojnih delov, strojev in komponent po naročilu pri svojem delu uporablja povrtala in sisteme za izstruževanje. Ker so postopki, ki jih je uporabljal časovno zamudni, smo ponudili rešitev z uporabo povrtal URMA na izmenljive enjalne ploščice. Najprej smo popisali obstoječe stanje in nato predlagali rešitev in izvedli zagon aplikacije ob sodelovanju tehnologa iz URME.

Najprej smo sestavili modularni sistem. Pri vijachenju smo uporabili moment ključ, saj ima proizvajalec na vsakem orodju predpisan moment vijachenja.



Slika 13: Predpisani moment vijachenja na orodju

Po sestavi sistema smo izvedli meritev orodja na Toolpreseterju in podatki meritev poslali operaterju. Sledilo je vpetje orodja na stroj in odstranitev rezilne ploščice ter nastavitve opleta. Po nastavitvi smo ponovno namestili rezilno ploščico jo privijačili z moment ključem na predpisano vrednost.



Slika 14: Pripravljeno orodje

Parametri obdelave so bili prilagojeni aplikaciji. Za vstop smo uporabili naslednje parametre:

$v_c$	(m/min)	20
$f_z$	(mm)	0.15
$v_f$	(mm/min)	122

Nato smo parametre povečali na:

$v_c$	(m/min)	80
$f_z$	(mm)	0.15
$v_f$	(mm/min)	509

Na izstopu orodja smo ponovno prilagodili parametre



Slika 15: Vrtanje

Postopek vrtanja smo izvedli brez težav. Obdelava je ustrezala zahtevam naročnika. Zahvaljujoč krajšemu času cikla in dolgi življenjski dobi orodja je stranka lahko dosegla visoke prihranke pri obdelavi.

## 11 ZAKLJUČEK

Z uporabo povrtal RX uporabniki dosežejo učinkovito optimizacijo proizvodnega procesa. Primer uporabe je pokazal 90% skrajšanje časa obdelave v primerjavi s postopkom izstruževanja in zelo dobro kakovost obdelane površine izvrtine. Z uporabo teh povrtal je podjetje izboljšalo svojo produktivnost in odpravilo potrebo po nadaljnji obdelavi. S povrtali RX so dosegli stabilno kakovost obdelave izvrtin in velike prihranke.

Glavne koristi, ki jih prinaša uporaba povrtal RX v serijski proizvodnji:

- Znižanje stroškov na kos in povečanje produktivnosti
- Visoka natančnost pozicioniranja in dolga življenjska doba orodja
- Modularna zasnova za različne dolžine in premere orodja
- Enostavna uporaba in hitra menjava ploščic

Viri:

- [1] Interno gradivo
- [2] <https://www.bts-company.com/>
- [3] <https://www.urma-group//>

## DIGITALNI DVOJČEK ZA ENERGETSKO UČINKOVITOST IN OPTIMIZACIJO PROIZVODNJE V PODORO POMORSKI INDUSTRIJI

**Filip Jure VUZEM<sup>1,3</sup>, Boštjan DOLŽAN<sup>2</sup>, Hugo ZUPAN<sup>1,3</sup>, Marko ŠIMIC<sup>3</sup>,  
Niko HERAKOVIČ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> DIGITEH d.o.o.

<sup>2</sup> ISKRA, d.o.o.

<sup>3</sup> Laboratorij LASIM, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

### IZVLEČEK

*Pomorska industrija se pri zelenem in digitalnem prehodu sooča z vse večjimi zahtevami po učinkovitejši rabi energije, nižjih emisijah in boljšem obvladovanju proizvodnih procesov. Pri tem imajo pomembno vlogo rešitve, ki povezujejo energetske podatke, proizvodnjo in napovedne modele v enoten operativni sistem. V okviru projekta Inno2Mare je bil razvit samogradni digitalni dvojček za upravljanje energije. Rešitev je bila zasnovana za uporabo v pomorski industriji, pilotno pa uvedena v podjetju Iskra Kranj, kjer je bilo zaradi dobrega poznavanja proizvodnih procesov mogoče učinkovito preveriti delovanje sistema v realnem industrijskem okolju. Modularni digitalni dvojček povezuje meritve energije, podatke o realizaciji proizvodnje in vremenske vplive. Na osnovi pridobljenih podatkov omogoča napovedovanje porabe, nudi podporo pri odločanju in postopno avtomatizacijo energetskega upravljanja. Doseženi so bili 5 % prihranki energije in 22 % izboljšanje upravljanja porabe energije. Razvit napovedni model deluje med 90 in 95% natančnostjo napovedi. Sistem je razvit na način, ki omogoča hiter in enostaven prehod na druga industrijska področja.*

### 1 UVOD

Zeleni in digitalni prehod v pomorski industriji zahteva boljši nadzor nad porabo energije, večjo prilagodljivost proizvodnih sistemov ter učinkovitejšo uporabo razpoložljivih virov. Klasični pristopi, pri katerih se energija, proizvodnja in podporni sistemi obravnavajo ločeno, ne omogočajo dovolj natančnega vpogleda v dejansko stanje in ne dajejo dovolj dobre osnove za optimizacijo.

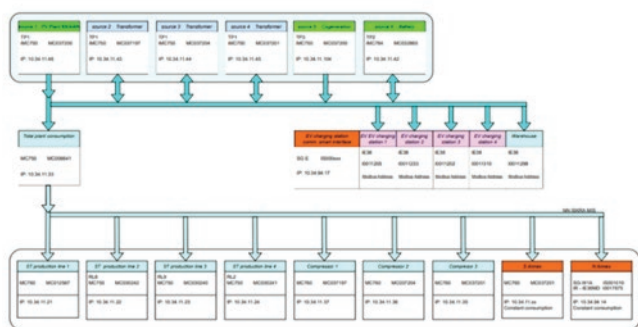
Za učinkovito upravljanje je potreben enoten pogled na celoten sistem. To pomeni povezavo med meritvami energije, podatki o proizvodnji, vplivih okolja in modeli za napovedovanje prihodnjega stanja. Takšna povezava omogoča hitrejše odzivanje, boljše odločanje in postopno avtomatizacijo upravljanja.

V okviru projekta Inno2Mare je bil zato razvit sistem, ki združuje zajem podatkov, njihovo obdelavo, napovedovanje porabe in podporo upravljanju energije. Pilotna uvedba je bila izvedena v podjetju Iskra Kranj, kjer je bilo mogoče delovanje sistema preveriti v znanem realnem proizvodnem okolju.

### 2 IZHODIŠČA IN PILOTNO OKOLJE

Podjetje Iskra Kranj predstavlja energetska zahtevno in tehnološko raznoliko proizvodno okolje, ki je bilo primerno za razvoj in preverjanje digitalnega dvojčka. V sistem so vključeni različni proizvajalci električne energije, kot so sončna elektrarna, kogeneracijski sistem, baterije in elektroenergetsko omrežje. Med pomembnejše porabnike električne energije sodijo proizvodne linije, proizvodna periferija, kompresorske postaje, polnilne postaje za viličarje ter polnilna infrastruktura za električna vozila. Takšna zasnova okolja dobro odraža značilnosti kompleksnih energetskega sistemov, prikazanih na Sliki 1, kakršni se pojavljajo tudi v pomorski industriji.

Ključno izhodišče za razvoj sistema je bilo spoznanje, da so relevantni podatki v industrijskem okolju velikokrat na voljo, vendar praviloma ostajajo razpršeni med različnimi merilnimi, nadzornimi in informacijskimi sistemi. Posledično je celovit vpogled v energetska stanje omejen, povezava med porabo električne energije in dejansko realizacijo proizvodnje pa ni vedno dovolj jasna za učinkovito analizo in optimizacijo.



Slika 1: Blokovna shema porabnikov in proizvodnikov električne energije ter energijskih tokov.

## 2.1 Ključni izzivi

Pri vzpostavljanju sistema so bili prepoznani značilni izzivi sodobnih industrijskih okolij. Elektroenergetsko omrežje je razvejano in se zaradi razvoja proizvodnje ter postopnih tehnoloških nadgradenj stalno spreminja. Merilna mesta niso vzpostavljena na vseh relevantnih vozliščih, oprema različnih proizvajalcev pa uporablja različne komunikacijske pristope, kar oteži poenotenje zajema podatkov.

Dodaten izziv predstavlja povezovanje energetskih podatkov s proizvodnimi dogodki, zlasti v okoljih, kjer del procesov še vedno vključuje ročne ali polavtomatske operacije. Zaradi tega je bilo treba zasnovati rešitev, ki omogoča povezovanje več virov podatkov, prilagoditev obstoječi infrastrukturi ter postopno nadgradnjo sistema brez večjih posegov v obratovanje.

## 3 ZASNOVA REŠITVE

Zasnova digitalnega dvojčka je temeljila na postopni nadgradnji obstoječega proizvodnega in energetskega okolja. Cilj razvoja je bil vzpostaviti enoten sistem, ki omogoča zanesljiv zajem podatkov, njihovo povezovanje, analizo ter uporabo za napovedovanje in podporo pri upravljanju energije.

Pomemben korak je predstavljala nadgradnja merilne infrastrukture, s katero je bil omogočen zajem ključnih električnih veličin in boljši vpogled v obratovalno stanje sistema. S tem je bil zajem podatkov poenoten in ustvarjeni so bili pogoji za

natančnejše spremljanje porabe električne energije.

Sočasno so bile izvedene tudi nadgradnje proizvodnega dela sistema. Te so vključevale posodobitve posameznih proizvodnih procesov, uvedbo dodatnih senzornih rešitev za spremljanje realizacije ter izboljšanje povezljivosti med posameznimi elementi proizvodnega okolja. Na ta način je bilo omogočeno bolj dosledno povezovanje energetskih podatkov s stanjem in dinamiko proizvodnje.



Slika 2: Realni procesi – povezava v digitalni dvojček.

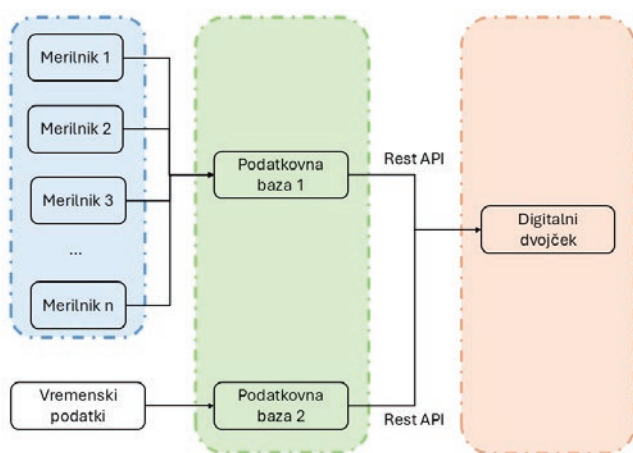
Ključni element zasnove je bila centralizacija podatkov iz več virov v skupno podatkovno okolje. Takšna zasnova predstavlja osnovo za vzpostavitev digitalnega dvojčka, saj omogoča sočasno obravnavo energetskega in proizvodnega vidika obratovanja. Preslikava realnega sistema v digitalni dvojček je prikazana na Sliki 2.

Pomembna prednost izbranega pristopa je v tem, da ne zahteva zamenjave obstoječe infrastrukture, temveč omogoča postopno uvajanje rešitev v skladu z razvojem proizvodnega sistema in razpoložljivostjo podatkov. S tem je zagotovljena večja prilagodljivost pri uvajanju ter boljša možnost prenosa rešitve v druga industrijska okolja.

### 3.1 Struktura podatkov in povezovanje virov

Digitalni dvojček temelji na podatkih, saj le-ti tvorijo enotno informacijsko osnovo za spremljanje in analizo sistema. V podatkovno strukturo so vključene meritve električne energije, časovni zaznamki, podatki o realizaciji proizvodnje in pripadajoči metapodatki, po potrebi pa tudi podatki o vremenskih pogojih in zunanjih vplivih.

Podatki se v sistem prenašajo iz centralnih podatkovnih baz in drugih razpoložljivih virov prek ustreznih komunikacijskih povezav, prikazano na Sliki 3. Posebna pozornost je bila namenjena njihovi uskladitvi, standardizaciji in pripravi za nadaljnjo obdelavo, saj je kakovost vhodnih podatkov neposredno povezana z zanesljivostjo in uporabnostjo digitalnega dvojčka ter napovednih modelov.



Slika 3: Blokovni diagram toka podatkov.

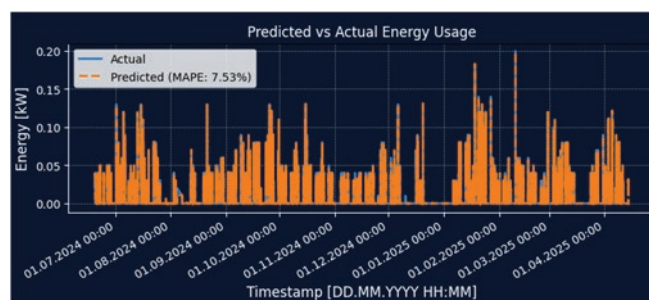
Tako vzpostavljena podatkovna osnova omogoča enoten pregled nad zgodovinskim in trenutnim stanjem sistema ter predstavlja temelj za napovedovanje porabe, analizo obratovalnih vzorcev in nadaljnji razvoj funkcij za podporo pri odločanju. Modularna zasnova hkrati omogoča enostavno vključevanje dodatnih virov podatkov in širitev sistema na druge procese, proizvodne linije ali industrijska področja.

### 3.2 Napovedni modeli in algoritmi za upravljanje z energijo

Na vzpostavljeni podatkovni osnovi je bil izveden razvoj napovednih modelov in algoritmov

za upravljanje z energijo. Cilj tega dela je bil oblikovati rešitve, ki na osnovi zgodovinskih in sprotih podatkov omogočajo napovedovanje porabe električne energije ter podporo pri učinkovitejšem upravljanju energetskega sistema.

Za napovedovanje je bilo uporabljenih več napovednih modelov, ki so bili združeni v ensemble pristop. S tem je bila dosežena večja robustnost napovedovanja, saj takšna zasnova zmanjšuje vpliv napak napovedi posameznega napovednega modela in omogoča stabilnejše delovanje pri različnih vzorcih obratovanja. V pilotnem okolju je bila dosežena natančnost napovedi med 90 in 95 %, kar predstavlja dobro osnovo za uporabo napovedi pri upravljanju energije. Slika 4 prikazuje primer natančnosti napovedi.



Slika 4: Realne in napovedane vrednosti energije za posamezno napravo.

Naloga algoritmov za upravljanje z energijo je bila podpora pri odločanju na osnovi pričakovanih obremenitev, razpoložljivih virov in napovedi porabe energije, pridobljenih s pomočjo napovednih modelov. Na ta način je mogoče pravočasno prepoznati spremembe v porabi električne energije ter ustrezneje prilagajati delovanje sistema. Takšen pristop omogoča boljšo izrabo razpoložljivih virov, zmanjševanje energetskega konca ter bolj usklajeno delovanje posameznih porabnikov.

Pomembna značilnost razvitega pristopa je tudi njegova modularnost. Napovedne modele in algoritme je mogoče nadgrajevati in spreminjati skladno z razpoložljivostjo novih podatkov, spremembami v proizvodnem procesu in zahtevami uporabniškega okolja. S tem je omogočena nadaljnja optimizacija sistema ter prilagoditev rešitve različnim industrijskim področjem.

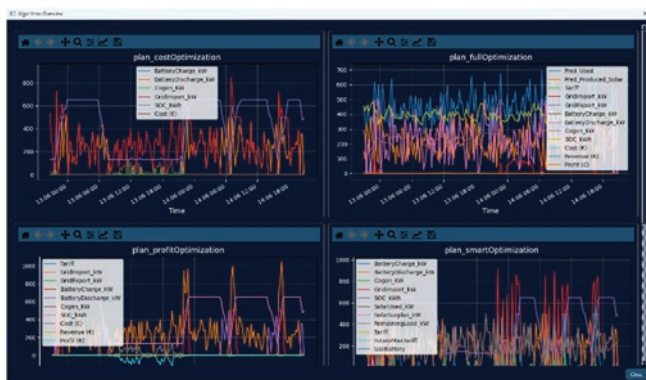
## 4 REZULTATI REŠITVE

Pilotna uvedba sistema v podjetju Iskra Kranj je potrdila njeno uporabnost v realnem proizvodnem okolju. Vzpostavljen je bil enoten sistem za spremljanje porabe električne energije, realizacije proizvodnje in vpliva vremenskih pogojev, kar omogoča boljši pregled nad delovanjem celotnega sistema.

Pomemben rezultat je bila vzpostavitev poenotene podatkovne osnove, ki omogoča časovno usklajen pregled nad ključnimi podatki. S tem je bil dosežen boljši vpogled v obratovalno stanje sistema ter jasnejša povezava med energetskimi in proizvodnimi dogodki.

Razvit sistem dosega 5 % prihrankov energije ter 22 % izboljšanje upravljanja porabe energije v proizvodnem okolju. Rezultati kažejo, da je mogoče z boljšim povezovanjem podatkov, napovedovanjem prihodne porabe energije in podporo pri odločanju doseči merljive izboljšave brez večjih posegov v obstoječo infrastrukturo. Slika 5 prikazuje grafični prikaz rezultatov algoritmov za upravljanje z energijo.

Pomemben rezultat predstavlja tudi delovanje napovednega modela, ki je dosegal med 90 in 95 % natančnost napovedi.



Slika 5: Grafični prikaz rezultatov algoritmov za upravljanje z energijo.

Rezultati so potrdili tudi ustreznost modularne zasnove sistema. Rešitev omogoča nadaljnje nadgradnje, vključevanje dodatnih virov podatkov in prilagoditev drugim industrijskim okoljem.

## 5 SKLEP

Razvoj in pilotna uvedba digitalnega dvojčka ter sistema za napovedovanje porabe energije v podjetju Iskra Kranj sta potrdila, da je mogoče s premišljenim povezovanjem energetskih, proizvodnih in okoljskih podatkov vzpostaviti učinkovito podporo za upravljanje energije v zahtevnih industrijskih okoljih. Sistem je omogočil boljši pregled nad delovanjem proizvodnega sistema, zanesljivejše napovedovanje porabe ter bolj usklajeno odločanje pri upravljanju energetskih virov.

Doseženi prihranki energije, izboljšano upravljanje porabe ter visoka natančnost napovednega modela potrjujejo, da razvit sistem predstavlja uporabno in tehnično zrelo osnovo za nadaljnjo optimizacijo rabe energijskih virov.

Posebna vrednost rešitve je v njeni modularni zasnovi, ki omogoča postopno uvajanje, nadgradnjo in prilagoditev različnim industrijskim okoljem. Čeprav je bila rešitev vsebinsko razvita za podporo pomorski industriji, pilot pa izveden v podjetju Iskra Kranj, zasnova omogoča hiter prenos tudi na druga področja, kjer so pomembni energetska učinkovitost, stabilno obratovanje in podatkovno podprto odločanje. Takšen pristop predstavlja dobro osnovo za širšo industrijsko uporabo ter nadaljnji razvoj naprednih rešitev za digitalni in zeleni prehod.

### Izjava o financiranju:

Raziskovalno delo je bilo financirano oziroma izvedeno v okviru projekta INNO2MARE - Krepitev zmogljivosti za odličnost slovenskih in hrvaških inovacijskih ekosistemov za podporo digitalnemu in zelenemu prehodu pomorskih regij, ki ga financira Evropska unija v okviru programa Obzorje Evropa, projekt št. 101087348.

## MAZIVA ZA PLINSKE MOTORJE IN NJIHOVA DIAGNOSTIKA

Jošt MOHORKO, Aleš HROBAT, Milan KAMBIČ  
Olma d.o.o.

### IZVLEČEK

Plinski motorji predstavljajo specifično skupino pogonskih agregatov, pri katerih so pogoji mazanja bistveno drugačni kot pri dizelskih ali bencinskih motorjih. Razlog za to so predvsem različna sestava plinastih goriv, odsotnost mazalnih komponent v gorivu ter izraziti kemijski vplivi zgorevanja. Visoke toplotne obremenitve, prisotnost dušikovih oksidov (NO<sub>x</sub>), žveplovih spojin in halogenov ter variabilni obratovalni režimi povzročajo pospešeno degradacijo maziva, zlasti v obliki oksidacije, nitracije in nastajanja kislih produktov.

Zaradi teh specifičnih pogojev ima pravilna izbira maziva – z ustrezno alkalno rezervo, nadzorovano vsebnostjo sulfatnega pepela in optimizirano aditivno formulacijo – ključno vlogo pri zagotavljanju zanesljivega obratovanja in dolge uporabne dobe motorja. Poleg tega postaja sistematična diagnostika maziva nepogrešljiv element vzdrževanja, saj omogoča zgodnje odkrivanje degradacijskih procesov, optimizacijo intervalov menjave olja ter preprečevanje mehanskih poškodb.

Prispevek obravnava ključne mehanizme staranja maziv, vpliv sestave goriva na formulacijo olj ter sodobne metode spremljanja njihovega stanja, s poudarkom na interpretaciji rezultatov analize v realnih obratovalnih pogojih.

### 1 UVOD

Plinski motorji danes predstavljajo pomemben del energetskega sistema, zlasti v kogeneraciji, bioplinarnah in industrijskih aplikacijah. Njihova ključna prednost je visoka učinkovitost in možnost uporabe različnih goriv, vendar ravno ta fleksibilnost predstavlja največji izziv za mazanje. Za razliko od dizelskih motorjev:

- gorivo ne vsebuje mazalnih komponent,
- proces zgorevanja generira več reaktivnih plinov,
- kontaminacija olja ni primarno mehanska, temveč kemična.

Plinski motorji lahko uporabljajo:

- zemeljski plin (relativno čist),
- bioplin,
- deponijski plin (zelo agresiven – halogeni, H<sub>2</sub>S).

To pomeni, da mazivo deluje v kemijsko zelo dinamičnem okolju, kjer mora hkrati:

- nevtralizirati kisline,
- preprečevati depozite,
- ščititi površine pred obrabo.

Zaradi navedenih specifičnosti plinski motorji zahtevajo celovit pristop k strategiji mazanja, ki vključuje tako ustrezno izbiro maziva kot tudi sistematično spremljanje njegovega stanja. Le z razumevanjem medsebojnega vpliva goriva, obratovalnih pogojev in maziva je mogoče zagotoviti zanesljivo, varno in ekonomsko učinkovito obratovanje.

### 2 POSEBNOSTI MAZANJA PLINSKIH MOTORJEV

Mazanje plinskih motorjev ima posebne zahteve zaradi specifičnih pogojev izgorevanja in vrste plinov, ki zahtevajo drugačno obravnavo olja kot pri klasičnih motorjih. Nekatere posebnosti prikazuje slika 1.

#### 2.1 Ključna razlika – kemijska degradacija namesto mehanske

Pri klasičnih motorjih je degradacija pogosto povezana s:

- sajami,
- razredčenjem z gorivom,
- mehansko obrabo.

<p><b>Visoke temperature izgorovanja</b></p> <p>Plinski motorji delujejo pri višjih temperaturah izgorovanja, kar povzroča hitrejšo oksidacijo olja.</p>		 <p>Kislinska korozija</p>
<p><b>Več nečistoč in kislin</b></p> <p>Različni posebni plini (bioplín, deponijski plín, sintezni plín) pogosto vsebujejo <b>nečistoče</b> (žveplo, halogeni, delci), kar povečuje nevarnost <b>korozije</b>.</p>	 <p>Silikatne obloge</p>	 <p>Spremembe vira plina</p>
<p><b>Možnost nalaganja silikatov</b></p> <p>Posebni plini lahko vsebujejo silikate, ki povzročajo nastanek trdih oblog v motorju.</p>	<p><b>Cilj mazanja:</b>                  Zagotavljanje zaščite pred korozijo, oksidacijo in nalaganjem oblog ter podaljšanje uporabne dobe motorja.</p>	
<p><b>Nestabilna kakovost plina</b></p> <p>Kakovost posebnih plinov (bioplín, deponijski plín, sintezni plín) niha, kar vpliva na stabilnost mazalnega olja.</p>		

Slika 1: Posebnosti mazanja plinskih motorjev (vir: [1])

Pri plinskih motorjih pa dominirajo:

- nitracija ( $\text{NO}_x$  reakcije),
- oksidacija,
- nastanek kislin.

To potrjuje tudi literatura, kjer je poudarjeno, da mora olje prenesti degradacijo zaradi zgorevanja plina ter učinkovito zavirati procese oksidacije in nitracije. [2]. Kakovost plina močno vpliva na formulacijo maziva. Prisotnost:

- žvepla → zahteva višjo alkalno rezervo,
- halogenov → povečuje tveganje za korozijo,
- $\text{CO}_2$  in vlage → spodbuja nastanek kislin.

Olja se zato razlikujejo glede na konstrukcijo motorja in obratovalne pogoje ter vključujejo [3]:

- neaditivirana mineralna olja,
- srednje do visoko pepelna detergentna olja,
- olja brez pepela

Plinski motorji zahtevajo specifičen pristop k mazivom, saj je degradacija olja primarno posledica kemijskih procesov zgorevanja, predvsem nitracije [3].

## 2.2 Vpliv sestave plina

Vpliv kakovosti plina na zahteve za olje prikazuje tabela 1.

Tabela 1: Vpliv kakovosti plina na zahteve za olje

Vrsta plina	Ključni izziv	Zahteva za olje
zemeljski plin	visoke temperature zgorevanja	olja z nizko vsebnostjo pepela
bioplín	$\text{CO}_2$ , vlaga	večja odpornost na kisline
deponijski plin	halogeni, $\text{H}_2\text{S}$	visoka alkalna rezerva

Prisotnost halogenov vodi v tvorbo močnih kislin ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ), ki povzročajo:

- korozijo ležajev,
- poškodbe cilindrov,
- degradacijo aditivov.

## 2.3 Sulfatni pepel – kritični kompromis

Sulfatni pepel je eden ključnih parametrov formulacije. Pozitivni učinki sulfatnega pepela so:

- preprečuje posedanje ventilov,
- ščiti sedeže ventilov.

Negativni učinki sulfatnega pepela pa so:

- depoziti na batih,
- zamašitev katalizatorjev,
- povečana obraba.

Pepel nastaja iz kovinskih aditivov (Ca, Zn, P, Mg), zato mora biti formulacija natančno uravnotežena [3].

## 2.4 Zahteve sodobnih plinskih motorjev

Sodobni plinski motorji dosegajo višje specifične moči, kar pomeni višje tlake in temperature v zgorevalnem prostoru. Posledično so maziva izpostavljena večjim termičnim in kemijskim obremenitvam, kar zahteva naprednejše formulacije z izboljšano odpornostjo proti oksidaciji in nitraciji [4].

Ustrezno formulirana maziva omogočajo podaljšanje intervalov menjave in zmanjšanje neplaniranih zaustavitvev, kar neposredno vpliva na ekonomiko obratovanja [4].

## 3 MEHANIZMI DEGRADACIJE OLJA

### 3.1 Nitracija – dominantni proces

Nitracija je kemična reakcija med:

- ogljikovodiki v olju,
- dušikovimi oksidi iz zgorevanja.

Posledice nitracije so [3]:

- hitro povečanje viskoznosti,
- tvorba lakov in oblog, ki povzročajo zalepljenje batnih obročkov,
- eksponentno poslabšanje stanja olja.

Pomembno: nitracija ni linearni proces – ko se enkrat začne, se pospešuje.

### 3.2 Oksidacija

Oksidacija je odvisna predvsem od temperature in prisotnosti katalitičnih kovin. Posledice oksidacije so:

- nastanek kislin,
- povečanje viskoznosti,
- tvorba mulja.

### 3.3 Interakcija nitracije in oksidacije

V praksi oba procesa potekata hkrati, kar vodi v:

- kompleksno degradacijo,
- težavno interpretacijo analiz.

Zato je nujna uporaba metod, kot je FTIR.

## 4 DIAGNOSTIKA MAZIV

### 4.1 Zakaj je analiza olja ključna

Analiza olja ni samo kontrola maziva, temveč:

- diagnostika motorja,
- napoved okvar,
- osnova za optimizacijo intervalov menjave.

Gre za eno najučinkovitejših metod spremljanja stanja sistemov [2]. Analiza olja omogoča zgodnje odkrivanje obrabe, kontaminacije in degradacije ter pomembno prispeva k zmanjšanju neplaniranih izpadov [5]. Slika 2 prikazuje nekatere posledice oksidacije in nitracije olja ter izbrane diagnostične metode za analizo olja.



Slika 2: Nekatere diagnostične metode za analizo olj (vir: [1])

## 4.2 Ključni analizni parametri

### Viskoznost

Viskoznost je najpomembnejša fizikalna lastnost – določa debelino filma [2]. Spremembe viskoznosti olja za plinske motorje kažejo:

- višja viskoznost → oksidacija, nitracija,
- nižja viskoznost → razredčenje.

### TBN (Skupno bazno število)

TBN je kazalnik alkalne rezerve:

- zmanjšanje = iztrošenost aditivov,
- pomembno pri kislih plinih.

Alkalna rezerva (TBN) je ključna za nevtralizacijo kislin, pri čemer OEM proizvajalci pogosto določajo mejo uporabe olja pri približno 50 % začetne vrednosti [6].

### TAN (Skupno kislinsko število)

TAN je kazalnik kislin:

- povečanje = degradacija,
- pogosto spremlja nitracijo.

### iPH (initial pH – začetni pH)

Posebej pomemben kazalnik pri bioplenu, saj zazna močne kisline še pred spremembo TAN [2].

### FTIR analiza

Analiza IR s Fourierjevo transformacijo omogoča določitev “prstnega odtisa” olja [2]:

- zazna oksidacijo,
- zazna nitracijo,
- identificira kontaminacijo.

### Spektrometrija (ICP)

Ta metoda omogoča [2]:

- analizo obrabnih kovin,
- spremljanje aditivov,
- zaznavo kontaminantov.

### PQ indeks

Zazna skupno količino železnih delcev, ne glede na njihovo velikost [2].

### Vsebnost vode

Voda je eden najbolj kritičnih kontaminantov, saj:

- pospešuje oksidacijo,
- zmanjšuje mazalno sposobnost [2].

## 5 INTERPRETACIJA REZULTATOV

### 5.1 Trendna analiza

Posamezna analiza nima prave vrednosti – ključni so trendi:

- stabilnost → normalno stanje,
- pospešene spremembe → alarm.

Primer poročila analize olja z razvidnimi trendi v tabelarični in grafični obliki prikazuje slika 3.

### 5.2 Vpliv dolivanja olja

Pri plinskih motorjih je poraba olja relativno visoka, kar:

- razredčuje kontaminante,
- “zamegli” dejansko stanje [3].

To predstavlja pogost vir napak pri interpretaciji rezultatov.

### 5.3 Individualni “podpis” motorja

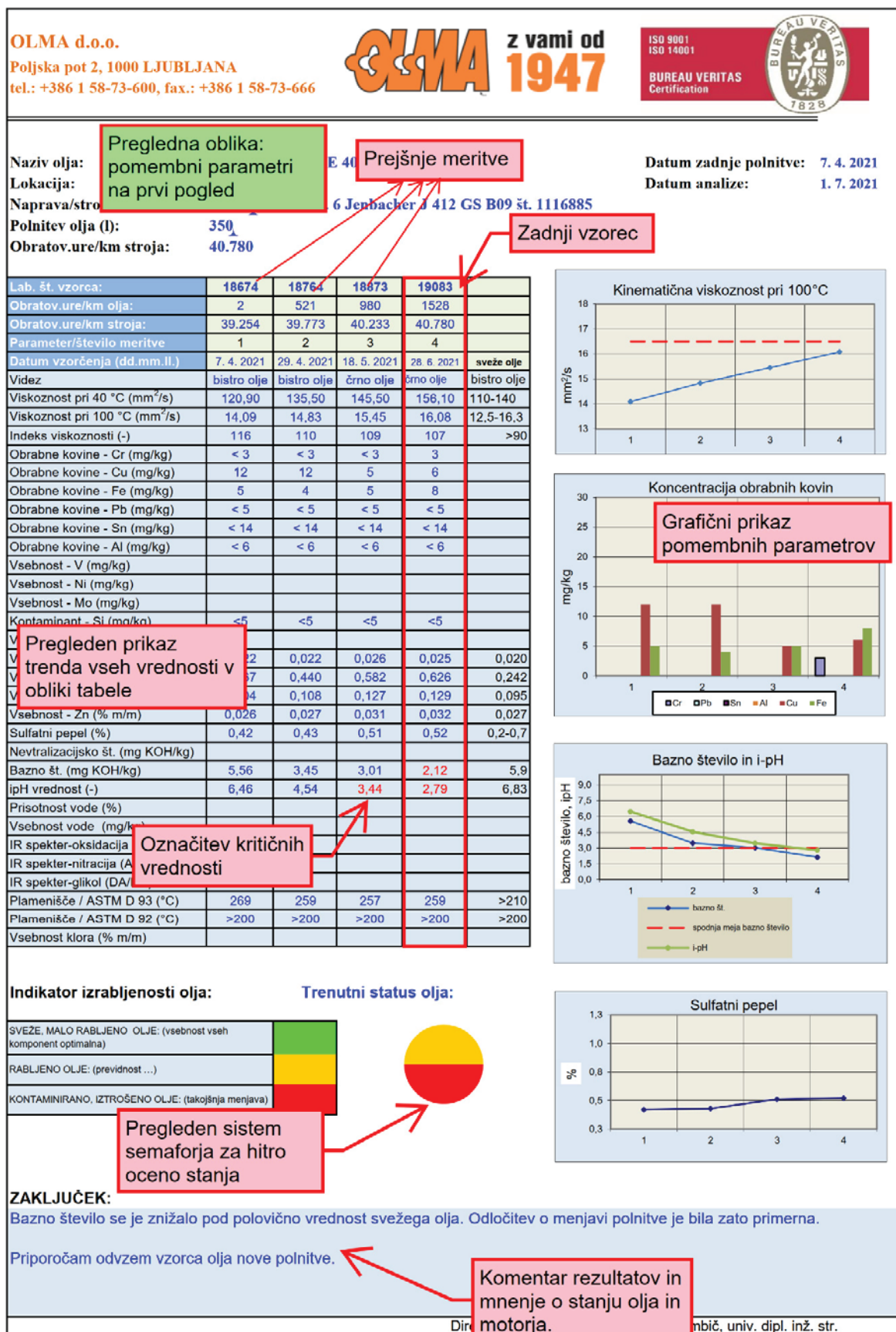
Vsak motor ima svoj vzorec obrabe:

- ni univerzalnih mej,
- potrebna je zgodovina podatkov.

## 6 OBRATOVALNI PARAMETRI IN VPLIV NA MAZIVO

### 6.1 Temperatura olja

Prenizka temperatura olja poveča nitracijo. Optimalno temperaturno območje olja je približno 82 °C–85 °C [3].



Slika 3: Primer poročila analize olja za plinske motorje (vir: lastni)

## 6.2 Razmerje zrak–gorivo

Razmerje med zrakom in gorivom neposredno vpliva na nitracijo:

- maksimum je pri približno 18:1–19:1,
- t. i. *lean–burn* motorji (motorji z revno zmesjo) zmanjšajo nitracijo [3].

## 6.3 Obratovalni režimi

Nestabilno delovanje lahko povzroči:

- lokalno povišane temperature,
- nepopolno zgorevanje,
- povečano degradacijo.

## 7 PRAKTIČNA PRIPOROČILA

Zanesljivo obratovanje plinskih motorjev zahteva usklajeno upravljanje maziva, goriva in obratovalnih pogojev.

### Spremljanje olja

Redna analiza olja je nujna. Spremljati je treba:

- viskoznost,
- TBN/TAN,
- oksidacijo in nitracijo,
- obrabne kovine,
- vodo in kontaminante.

### Interpretacija rezultatov

Odločilni so trendi, ne posamezne meritve. Upoštevati je treba dolivanje olja, režime obratovanja in kakovost goriva.

### Intervali menjave

Fiksni intervali niso optimalni. Analiza olja omogoča podaljšanje intervalov, zmanjšanje tveganj in nižje stroške.

### Obratovalni pogoji

Ključni vplivi:

- temperatura olja,
- razmerje zrak–gorivo (AFR),
- stabilnost obratovanja,
- učinkovitost hlajenja.

Neoptimalni pogoji pospešujejo degradacijo maziva (nitracija, oksidacija) in obrabo komponent.

## 8 SKLEP

Maziva za plinske motorje niso standardna motorna olja, temveč visoko specializirani sistemi, kjer je kemija pomembnejša od mehanike. Glavne ugotovitve so:

- nitracija je ključni degradacijski mehanizem,
- formulacija olja (pepel, TBN) mora biti prilagojena gorivu,
- analiza olja je nepogrešljivo diagnostično orodje.

Brez sistematične diagnostike ni mogoče:

- optimizirati intervalov menjave,
- preprečiti okvar,
- zagotoviti zanesljivega obratovanja.

Viri:

- [1] Lastni grafični prikazi na osnovi literature [2–6]
- [2] Gas Engine Oil Analysis, [Elektronski]. Available: [https://www.wearcheck.co.za/shared/WearCheck\\_Gas\\_Engine\\_Oil\\_Analysis\\_ds93.pdf](https://www.wearcheck.co.za/shared/WearCheck_Gas_Engine_Oil_Analysis_ds93.pdf). [Poskus dostopa 31. 3. 2026].
- [3] L. Leugner, Natural Gas Engine Lubrication and Oil Analysis, Noria Corporation, [Elektronski]. Available: <https://www.machinerylubrication.com/Read/524/natural-gas-engine-oil-analysis>. [Poskus dostopa 31. 3. 2026].
- [4] Natural gas engine oil delivers more up time, Infineum International Limited, [Elektronski]. Available: <https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/natural-gas-engine-oil/>. [Poskus dostopa 31. 3. 2026].
- [5] Natural gas engine analysis, Mobil, [Elektronski]. Available: <https://mobilserv.mobil.com/pdfs/natural-gas-engine-analysis.pdf>. [Poskus dostopa 31. 3. 2026].
- [6] Chevron, Natural Gas Engine Oil Considerations, [Elektronski]. Available: [https://www.chevronlubricants.ca/content/dam/external/industrial/en\\_us/sales-material/brochures/Natural\\_Gas\\_Engine\\_Oil\\_Considerations.pdf](https://www.chevronlubricants.ca/content/dam/external/industrial/en_us/sales-material/brochures/Natural_Gas_Engine_Oil_Considerations.pdf). [Poskus dostopa 31. 3. 2026].

## NOVI POSTOPKI PRI ANALIZI TEHNIČNE ČISTOSTI

**Matjaž MENCEJ**  
Carl Zeiss d.o.o

### IZVLEČEK

*Analiza tehnične čistosti je v zadnjih letih postala eden ključnih elementov zagotavljanja kakovosti v sodobni industriji. Zaradi miniaturizacije komponent, elektrifikacije pogonov ter vedno višjih zahtev glede zanesljivosti izdelkov postaja nadzor nad kontaminacijo kritičen dejavnik za uspešno delovanje sistemov. Delci, veliki le nekaj mikrometrov, lahko povzročijo obrabo, blokade ali celo popolno odpoved komponent, zlasti v hidravličnih, elektronskih in mehanskih sistemih visoke natančnosti.*

*Tradicionalno je bila analiza tehnične čistosti pogosto razumljena kot zahteva kupcev, zlasti v avtomobilski industriji. Vendar pa se je njena vloga bistveno razširila. Danes predstavlja pomembno orodje za razumevanje proizvodnih procesov, optimizacijo tehnologij ter zmanjševanje stroškov, povezanih z reklamacijami in odpovedmi izdelkov. Analiza ne omogoča zgolj kvantifikacije delcev, temveč tudi identifikacijo njihovega izvora, kar omogoča ciljno izboljševanje procesov.*

### 1 STANDARD VDA 19.1 – NOVA GENERACIJA ANALIZE TEHNIČNE ČISTOSTI

Standard VDA 19.1 predstavlja osnovo za izvajanje analiz tehnične čistosti komponent. Z izdajo 3. verzije (2025) prihaja do pomembnih sprememb, ki bistveno nadgrajujejo prejšnjo izdajo iz leta 2015.

Ena ključnih sprememb je prehod iz klasičnega laboratorijskega pristopa v celovit sistemski pristop. Nova izdaja standarda ne obravnava več analize kot izoliranega postopka, temveč kot del širšega procesa, ki vključuje razvoj izdelka, proizvodnjo, kontrolo kakovosti in upravljanje dobaviteljev. Poudarek je na strategiji analize, ki temelji na oceni tveganj in funkcionalnih zahtevah komponent.

Pomembna novost je uvedba dveh jasno definiranih pristopov: standardne in proste analize. Standardna analiza temelji na vnaprej določenih parametrih in omogoča visoko ponovljivost ter primerljivost rezultatov med različnimi laboratoriji. Prosta analiza pa omogoča prilagoditev parametrov glede na specifične zahteve aplikacije ali kupca, kar je še posebej pomembno pri razvojnih projektih.

Nova izdaja standarda uvaja tudi pomembne metrološkijske elemente, kot so ocena merilne negotovosti, validacija metod in preverjanje učinkovitosti ekstrakcije. To pomeni, da analiza tehnične čistosti postaja bolj znanstveno utemeljena in primerljiva med različnimi laboratoriji in organizacijami.

Poleg tega standard razširja področje analize na manjše delce, tudi pod 50  $\mu\text{m}$ , kar je neposredno povezano z razvojem elektronskih komponent, elektromotorjev in sistemov z zelo majhnimi tolerancami. Pomembna novost je tudi vključitev SEM/EDX analize kot standardiziranega dela procesa.

### 2 METODE EKSTRAKCIJE – TEMELJ ZANESLJIVE ANALIZE

Ekstrakcija delcev iz površine komponent predstavlja prvi in ključni korak v analizi tehnične čistosti. Napačna izbira metode ali neustrezni parametri lahko vodijo do nereprezentativnih rezultatov.

Standard VDA 19.1 definira več metod ekstrakcije, ki se izberejo glede na geometrijo komponente, vrsto materiala, naravo kontaminacije in namen analize.

Med tekočinskimi metodami so najpogosteje uporabljene:

- izpiranje pod tlakom, ki je primerno za kompleksne geometrije in notranje kanale,
- ultrazvočna ekstrakcija, ki omogoča odstranjevanje trdno vezanih delcev,
- mehansko stresanje ali vrtinčenje, ki je primerno za enostavnejše komponente,
- nizkotlačno izpiranje, ki je novost in omogoča nežno ekstrakcijo na občutljivih površinah.

Ključni parametri teh metod vključujejo tlak, čas ekstrakcije, temperaturo, vrsto tekočine in energijo ultrazvoka. V novi izdaji standarda je poudarek na validaciji teh parametrov in dokazovanju učinkovitosti ekstrakcije.

Pomembna novost standarda so tudi suhe metode ekstrakcije, ki vključujejo žigosni test (tape lift) in krtačno sesanje. Te metode so posebej uporabne za velike površine, občutljive materiale ali primere, kjer uporaba tekočin ni primerna. Uporabljajo se tudi za hitro preverjanje stanja v proizvodnem okolju.

### **3 FILTRACIJA IN GRAVIMETRIČNA ANALIZA**

Po ekstrakciji sledi filtracija, pri kateri se delci zadržijo na membranskem filtru. Tipično se uporabljajo filtri premera 47 mm z določeno velikostjo por, na primer 5  $\mu\text{m}$  ali manj, odvisno od zahtev analize.

Gravimetrična analiza omogoča določitev skupne mase delcev na filtru. Ta metoda je še vedno pomembna, saj omogoča hitro oceno stopnje kontaminacije in primerjavo z določenimi mejnimi vrednostmi. Vendar pa sama po sebi ne omogoča podrobne analize strukture ali izvora delcev, zato se dopolnjuje z mikroskopskimi metodami.

### **4 SVETLOBNA MIKROSKOPIJA – STANDARD ZA ANALIZO DELCEV**

Svetlobna mikroskopija ostaja osnovna metoda za analizo tehnične čistosti. Sodobni sistemi, kot jih ponuja ZEISS, omogočajo visoko stopnjo avtomatizacije.

Avtomatski sistemi omogočajo:

- skeniranje celotnega filtra,
- združevanje slik (stitching),
- avtomatsko detekcijo delcev,
- klasifikacijo glede na optične lastnosti.

Analiza vključuje določanje velikosti, oblike in vrste delcev. Delci se običajno razvrščajo na kovinske, nekovinske in vlakna, kar omogoča osnovno oceno izvora kontaminacije.

Napredni sistemi omogočajo analizo delcev velikosti do 1  $\mu\text{m}$ , kar je ključno za sodobne aplikacije z visokimi zahtevami.

### **5 ELEKTRONSKA MIKROSKOPIJA (SEM/EDX) – NAPREDNA IDENTIFIKACIJA**

Za poglobljeno analizo se uporablja skenirna elektronska mikroskopija v kombinaciji z EDX spektroskopijo. Ta metoda omogoča določitev kemijske sestave delcev, kar je ključno za identifikacijo njihovega izvora.

SEM/EDX analiza omogoča razlikovanje med različnimi vrstami kovin, oksidov, polimerov in drugih materialov. To je še posebej pomembno pri analizi obrabe, korozije ali kontaminacije iz proizvodnih procesov.

V novi izdaji standarda VDA 19.1 je SEM/EDX analiza prvič vključena kot standardiziran del postopka, kar poudarja njen pomen.

### **6 ZEISS PROGRAMSKA OPREMA – DIGITALNA TRANSFORMACIJA**

ZEISS s programsko opremo ZEN Core uvaja popolnoma nov pristop k analizi tehnične čistosti. Programska oprema omogoča integracijo različnih mikroskopskih metod in avtomatizacijo celotnega procesa.

ZEN Core omogoča:

- avtomatsko zajemanje slik,
- segmentacijo delcev,
- klasifikacijo,
- upravljanje podatkov in sledljivost,
- generiranje standardiziranih poročil.

Prednost takega sistema je v tem, da omogoča enotno okolje za izvajanje analiz, kar zmanjšuje možnost napak in povečuje učinkovitost.

## **7 UMETNA INTELIGENCA – PRIHODNOST ANALIZE TEHNIČNE ČISTOSTI**

Največji tehnološki napredek na tem področju predstavlja uporaba umetne inteligence. Klasične metode analize temeljijo na preprostih algoritmih, ki uporabljajo pragove sivinskih vrednosti in osnovne kriterije za klasifikacijo.

Umetna inteligenca omogoča bistveno bolj napredno analizo. Z uporabo strojnega učenja je mogoče razviti modele, ki prepoznavajo kompleksne vzorce, razlikujejo med različnimi materiali in se prilagajajo specifičnim zahtevam proizvodnje.

AI omogoča:

- natančnejšo klasifikacijo delcev,
- boljšo segmentacijo prekrivajočih se struktur,
- zmanjšanje vpliva operaterja,
- večjo ponovljivost rezultatov.

Sistemi se lahko trenirajo na realnih podatkih in se skozi čas izboljšujejo, kar pomeni, da postajajo vedno bolj natančni in zanesljivi.

## **8 INTEGRACIJA CELOTNEGA PROCESA**

Sodobni pristopi omogočajo popolno integracijo vseh korakov analize tehnične čistosti, od ekstrakcije do končnega poročila.

Celoten proces vključuje:

- ekstrakcijo delcev,
- filtracijo,
- mikroskopsko analizo,
- AI klasifikacijo,
- SEM/EDX analizo,
- generiranje poročila.

Tak pristop omogoča visoko stopnjo avtomatizacije, sledljivosti in ponovljivosti, kar je ključnega pomena za sodobno industrijo.

## **9 ZAKLJUČEK**

Analiza tehnične čistosti se razvija v smeri večje standardizacije, digitalizacije in avtomatizacije. Standard VDA 19.1 (2025) predstavlja pomemben korak naprej, saj uvaja nove metode, izboljšuje primerljivost rezultatov in poudarja metrologijo.

V kombinaciji z naprednimi rešitvami podjetja ZEISS in uporabo umetne inteligence analiza tehnične čistosti postaja zmogljivo orodje za zagotavljanje kakovosti in konkurenčnosti podjetij.

V prihodnosti bo prav integracija umetne inteligence, naprednih mikroskopskih metod in digitalnih platform ključna za obvladovanje vedno bolj kompleksnih zahtev industrije.



## PRIMER MOBILNE APLIKACIJE NA OSNOVI IOT ZA INTELIGENTNO VZDRŽEVANJE

Miroslav GOJIC, Vojislav HOC, Darko RADEKA  
Evoks l.t.d.

### POVZETEK

*Prispevek predstavlja mobilno usmerjeno programsko rešitev za inteligentno industrijsko vzdrževanje, ki v enoten operativni okvir združuje tehnologije interneta stvari (IoT) ter RFID/NFC identifikacije. Čeprav okolja Industrije 4.0 ustvarjajo velike količine podatkov, ostaja pomemben izziv zagotavljanje uporabnih in kontekstualno relevantnih informacij neposredno terenskim vzdrževalnim tehnikom.*

*Predlagani sistem rešuje ta problem s povezovanjem podatkov senzorjev v realnem času (npr. vibracije, temperatura) in takojšnje identifikacije sredstev preko RFID tehnologije, kar omogoča hiter dostop do podatkov o opremi preko mobilne aplikacije. Platforma digitalizira procese vzdrževanja, vključno z upravljanjem delovnih nalogov, prikazom telemetrije in poročanjem na osnovi dokaznega gradiva.*

*Rezultati pilotne implementacije kažejo pomembne izboljšave operativne učinkovitosti, vključno z zmanjšanjem povprečnega časa popravila (MTTR), hitrejšo identifikacijo opreme ter izboljšano natančnostjo vzdrževalnih zapisov. Ugotovitve potrjujejo, da lahko mobilno usmerjen in podatkovno podprt pristop učinkovito preoblikuje tradicionalno reaktivno vzdrževanje v strukturiran in prediktiven proces, s čimer se izboljšata razpoložljivost opreme in zmanjšajo obratovalni stroški.*

### 1 UVOD

V sodobnih industrijskih okoljih, oblikovanih po načelih Industrije 4.0, je učinkovito upravljanje tehničnih sistemov postalo ključni dejavnik operativne konkurenčnosti. Konvencionalne strategije vzdrževanja - predvsem reaktivno vzdrževanje (odpravljanje okvar po nastanku napake) in preventivno vzdrževanje (servisiranje v vnaprej določenih časovnih intervalih) - vse težje izpolnjujejo zahteve po visoki razpoložljivosti sistemov, optimizaciji stroškov in operativni transparentnosti.

Pojavil se je pomemben prehod k inteligentnemu vzdrževanju, ki temelji na integraciji zajema podatkov v realnem času, napredne analitike in digitalne povezljivosti. V središču te transformacije je internet stvari (IoT), ki omogoča neprekinjeno spremljanje opreme preko porazdeljenih senzorskih omrežij ter digitalnih identifikacijskih tehnologij, kot sta RFID in NFC.

Sama razpoložljivost podatkov pa še ne ustvarja dodane vrednosti. Njihova učinkovitost je odvisna od dostopnosti, kontekstualizacije in

uporabnosti - zlasti za terensko osebje, odgovorno za izvajanje vzdrževalnih aktivnosti. V tem kontekstu imajo mobilne aplikacije ključno vlogo kot povezovalni vmesnik med fizičnimi sredstvi in digitalnimi sistemi.

Prispevek predstavlja arhitekturo in funkcionalni model mobilne aplikacije, zasnovane za premostitev te vrzeli. Sistem združuje tri temeljne stebre industrijske digitalizacije:

1. identifikacijo sredstev z uporabo RFID/NFC tehnologij,
2. spremljanje stanja v realnem času preko IoT senzorjev,
3. digitalno upravljanje vzdrževalnih procesov.

Glavni cilj sistema je odprava papirnih procesov, zmanjšanje napak zaradi človeškega dejavnika ter bistveno skrajšanje časa diagnostike in intervencij, kar neposredno zmanjšuje nenačrtovane izpade in podaljšuje življenjsko dobo opreme.



Slika 1: Testna oznaka - EVOKS d.o.o.

## 2 TEORETIČNI OKVIR IN TEHNOLOGIJE

Predlagana aplikacija Maintenance Management Tag Application temelji na združitvi treh ključnih tehnoloških področij, ki opredeljujejo sodobne industrijske ekosisteme: IoT-senzorski sistemi, RFID/NFC identifikacija ter strategije vzdrževanja na osnovi stanja opreme. Njihova integracija omogoča prehod iz fragmentiranih in ročnih procesov v povezano ter podatkovno vodeno infrastrukturo vzdrževanja.

### 2.1 IoT ekosistem v proizvodnji

Internet stvari (IoT) predstavlja porazdeljeno omrežje medsebojno povezanih fizičnih naprav, opremljenih s senzorji, komunikacijskimi moduli in zmogljivostmi obdelave podatkov. V industrijskih okoljih IoT sistemi omogočajo neprekinjeno spremljanje obratovalnih parametrov, kot so temperatura, vibracije in obratovalni čas.

Podatki senzorjev se prenašajo preko standardnih komunikacijskih protokolov (npr. MQTT, HTTP/REST) v centralizirane ali robne sisteme za obdelavo podatkov. Ti sistemi agregirajo in shranjujejo podatke v strukturiranih podatkovnih bazah, kar omogoča dostop v realnem času ter zgodovinsko analizo podatkov.

Takšna arhitektura vzpostavlja »enoten vir resnice« (single source of truth), ki zagotavlja konsistentnost in sledljivost vzdrževalnih operacij ter omogoča uporabo napredne analitike in prediktivnega modeliranja.

### 2.2 RFID kot povezovalni element za identifikacijo sredstev

Ročna identifikacija industrijskih sredstev je inherentno podvržena človeškim napakam, zlasti v kompleksnih okoljih z velikim številom podobnih komponent. RFID in NFC tehnologije predstavljajo robusten mehanizem za povezovanje fizičnega in digitalnega okolja.

Vsako sredstvo je povezano z edinstvenim identifikatorjem, zapisanim v oznaki. Ob skeniranju mobilna aplikacija pridobi ustrezen digitalni zapis, kar omogoča natančno identifikacijo opreme in odpravlja možnost napačne interpretacije ali zamenjave sredstev.

Sistem dodatno zahteva obvezno interakcijo z oznako, kar omogoča preverljivo dokazilo prisotnosti ter bistveno izboljšuje odgovornost in sledljivost vzdrževalnih aktivnosti.

### 2.3 Vzdrževanje na osnovi stanja (CBM): podatkovno podprto odločanje

Vzdrževanje na osnovi stanja (Condition-Based Maintenance – CBM) predstavlja podatkovno usmerjen pristop, pri katerem se vzdrževalni posegi izvajajo glede na dejansko stanje opreme in ne zgolj na osnovi vnaprej določenih servisnih intervalov.

Z integracijo podatkov IoT senzorjev, zgodovine vzdrževanja in operativnih parametrov sistem omogoča informirano odločanje, pri čemer se vzdrževanje izvaja samo takrat, ko je to dejansko potrebno. Takšen pristop zmanjšuje nepotrebne posege in hkrati preprečuje nepričakovane okvare.

Povezava CBM koncepta s strukturiranimi digitalnimi delovnimi procesi povečuje zanesljivost sistema, optimizira uporabo virov in izboljšuje splošno varnost obratovanja.

## 3 SISTEMSKA ARHITEKTURA

Sistemska arhitektura je zasnovana kot večplastni okvir, ki zagotavlja nemoteno interakcijo med fizičnimi sredstvi, podatkovno infrastrukturo in končnimi uporabniki. Sestavljena je iz treh osnovnih slojev.

### 3.1 Strojni sloj

Strojni sloj vključuje fizična sredstva, opremljena z RFID/NFC oznakami in IoT senzorji. Te komponente omogočajo:

- enolično identifikacijo sredstev,
- neprekinjeno spremljanje obratovalnih parametrov,
- zajem podatkov neposredno na viru.

Terenske operacije se izvajajo z uporabo robustnih mobilnih naprav, vključno z ATEX-certificiranimi pametnimi telefoni, kadar je to potrebno, kar zagotavlja varno delovanje v eksplozijsko ogroženih okoljih.

### 3.2 Podatkovni in integracijski sloj

Ta sloj je odgovoren za prenos, obdelavo in shranjevanje podatkov. Vključuje:

- komunikacijske vmesnike (MQTT, HTTPS REST API),
- centralizirane ali oblačne podatkovne baze,
- shranjevanje večpredstavnostnega dokaznega gradiva,
- aplikacijske strežnike z implementirano poslovno logiko.

Podatki se prenašajo varno in obdelujejo v realnem času, kar omogoča dinamično posodabljanje vzdrževalnih zapisov in statusov sistema.

### 3.3 Aplikacijski sloj

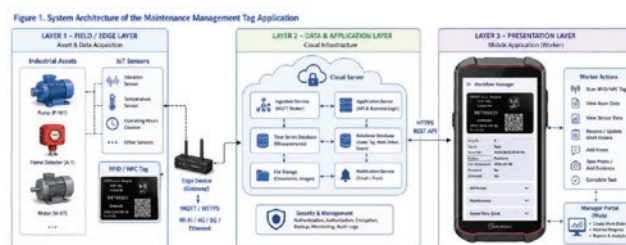
Aplikacijski sloj omogoča interakcijo uporabnikov preko mobilnih in spletnih vmesnikov. Sistem podpira dostop na osnovi uporabniških vlog za:

- vodje oziroma upravljavce (ustvarjanje nalogov, spremljanje, analitika),
- terenske tehnike (izvajanje nalog, vnos podatkov, zajem dokaznega gradiva).

Uporabniški vmesnik je optimiziran za uporabo v industrijskih okoljih, s poudarkom na preglednosti, odzivnosti in minimalni kompleksnosti interakcije.

## 4 MOBILNA APLIKACIJA: FUNKCIONALNI MODEL

Aplikacija Maintenance Management Tag Application predstavlja mobilno industrijsko platformo za vzdrževanje, namenjeno podpori upravljanja sredstev, koordinaciji delovne sile in izvajanju terenskih vzdrževalnih aktivnosti v digitalno povezanih industrijskih okoljih. Aplikacija vzdrževalnemu osebju omogoča strukturiran dostop do operativnih podatkov, funkcionalnosti upravljanja nalogov in informacijskega sistema v realnem času preko centraliziranega mobilnega vmesnika.



Slika 2: Sistemska arhitektura

### 4.1 Avtentikacija uporabnikov in upravljanje vlog

Aplikacija uporablja model avtentikacije na osnovi uporabniških vlog, ki zagotavlja varen nadzor dostopa in jasno razdelitev operativnih odgovornosti. Sistem razlikuje med vodstvenimi in terenskimi uporabniškimi funkcijami ter omogoča nadzorovan dostop do relevantnih operativnih funkcionalnosti in vzdrževalnih podatkov.

Uporabniki z vodstvenimi privilegiji so odgovorni za načrtovanje, organizacijo in nadzor vzdrževalnih aktivnosti. Njihov uporabniški vmesnik omogoča upravljanje osebja, razporejanje sredstev, načrtovanje vzdrževanja in spremljanje delovnih nalogov.

Terenski tehniki uporabljajo namenski uporabniški vmesnik, optimiziran za izvajanje vzdrževanja na lokaciji. Njihove naloge vključujejo identifikacijo opreme, izvajanje delovnih nalogov, poročanje o vzdrževanju in oddajo operativnega dokaznega gradiva neposredno iz terenskega okolja.

## 4.2 Identifikacija sredstev na osnovi RFID/NFC

Modul za identifikacijo sredstev predstavlja osrednjo funkcionalno komponento platforme. Vsako industrijsko sredstvo ali vzdrževalna točka je povezana z edinstveno RFID/NFC oznako ali QR-kodo, povezano z ustreznim digitalnim zapisom v centralizirani podatkovni bazi.

Po avtentikaciji oznake aplikacija pridobi podatke o opremi, vključno z identifikacijskimi oznakami sredstva, serijskimi številkami, lokacijo namestitve, zgodovino obratovanja in vzdrževalnimi zapisi. Takšen mehanizem vzpostavlja neposredno povezavo med fizično industrijsko infrastrukturo in njeno digitalno predstavitevijo ter omogoča natančno in zanesljivo identifikacijo med vzdrževalnimi postopki.

Uporaba avtomatiziranih identifikacijskih tehnologij zmanjšuje možnost servisiranja napačne opreme ter izboljšuje operativno sledljivost v kompleksnih industrijskih obratih.

## 4.3 Spremljanje vzdrževanja in operativna nadzorna plošča

Aplikacija vključuje centraliziran nadzorni vmesnik, ki omogoča pregled nad vzdrževalnimi aktivnostmi in statusom opreme v realnem času.

Nadzorna plošča prikazuje čakajoče in aktivne vzdrževalne naloge z uporabo dinamičnih statusnih indikatorjev in prioritetenih obvestil. Vzdrževalno osebje lahko identificira sredstva, ki zahtevajo takojšnjo intervencijo, preko vizualnih opozoril in indikatorjev načrtovanih servisnih aktivnosti.

Sistem dodatno omogoča neprekinjeno spremljanje napredka vzdrževanja, statusa zaključka nalog in načrtovanih aktivnosti preko strukturiranih ter barvno označenih operativnih pogledov, kar izboljšuje situacijsko zavedanje in koordinacijo med terenskim osebjem ter vodstvom.

## 4.4 Digitalno upravljanje vzdrževalnih procesov

Platforma podpira popolno digitalizacijo vzdrževalnih procesov — od ustvarjanja delovnih nalogov do končne potrditve izvedenih aktivnosti.

Vzdrževalne aktivnosti se ustvarjajo in dodeljujejo elektronsko, kar omogoča centralizirano koordinacijo in večjo operativno transparentnost.

Sistem omogoča vzdrževalnim nadzornikom definiranje delovnih navodil, prioritet in tehničnih opomb za posamezne naloge. Med izvajanjem lahko terensko osebje dokumentira izvedene aktivnosti, oddaja operativna opažanja ter posodablja status nalog neposredno preko mobilnega vmesnika.

Vse vzdrževalne aktivnosti se sinhronizirajo s centralizirano strežniško infrastrukturo, kar zagotavlja pregled nad operativnim napredkom v realnem času in vzpostavlja strukturiran zgodovinski zapis vzdrževanja.

## 4.5 Večpredstavnostna dokumentacija in terenska podpora

Za izboljšanje zanesljivosti vzdrževanja in natančnosti poročanja aplikacija vključuje večpredstavnostne in digitalne dokumentacijske funkcionalnosti. Terensko osebje lahko neposredno z lokacije intervencije nalaga fotografije in podporno dokazno gradivo, kar omogoča vizualno preverjanje izvedenih aktivnosti in stanja opreme.

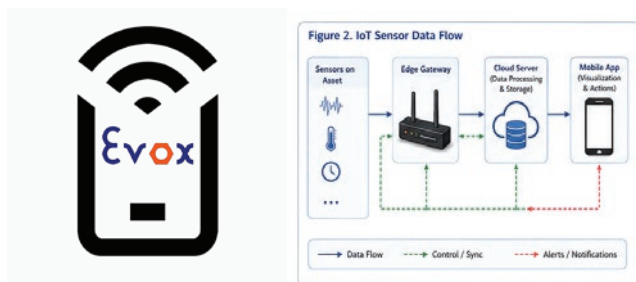
Platforma dodatno omogoča neposreden dostop do tehničnih priročnikov, delovnih navodil, vzdrževalnih postopkov in dokumentacije opreme, shranjene v centraliziranem strežniškem okolju. Ta funkcionalnost zmanjšuje odvisnost od tiskane dokumentacije in izboljšuje dostopnost ključnih tehničnih informacij med terenskimi intervencijami.

Vse funkcionalnosti aplikacije so optimizirane za uporabo na robustnih industrijskih mobilnih napravah, vključno z uporabo v zahtevnih industrijskih in eksplozijsko ogroženih okoljih, kjer so trajnost, zanesljivost in operativna varnost ključnega pomena.

## 5 PRAKTIČNA IMPLEMENTACIJA IN PRIMER UPORABE

Aplikacija Maintenance Management Tag Application je bila javno predstavljena na sejmu Hannover Messe 2026 kot del začetne pilotne

implementacije, namenjene validaciji operativnega koncepta in oceni uporabnosti sistema v industrijskem vzdrževalnem okolju. Predstavitev je omogočila oceno funkcionalnosti sistema v simuliranih industrijskih pogojih ter zbiranje povratnih informacij strokovnjakov s področja inženiringa, vzdrževanja in industrijskih tehnologij.



Slika 3: Tok podatkov senzorna

### 5.1 Pilotno okolje in validacija sistema

Pilotno okolje je bilo konfigurirano za simulacijo operativnih scenarijev, značilnih za industrijske proizvodne obrate. V okviru demonstracijskega sistema so bile posamezne RFID/NFC oznake dodeljene reprezentativnim industrijskim sredstvom, vključno s črpalnimi sistemi, detektorji plamena in drugo opremo, kritično za vzdrževanje.

Vsako označeno sredstvo je bilo povezano s centraliziranim digitalnim zapisom, ki je vseboval tehnično dokumentacijo, zgodovino obratovanja, podatke o vzdrževanju in povezano večpredstavnostno vsebino. Demonstracija je potrdila interakcijo v realnem času med mobilno aplikacijo in strežniško infrastrukturo ter sposobnost terenskega osebja za pridobivanje in posodabljanje podatkov neposredno iz operativnega okolja.

Za čim bolj realistično simulacijo industrijskih pogojev je bil sistem uporabljen na robustnih mobilnih napravah, vključno z ATEX-certificirano strojno opremo, namenjeno uporabi v eksplozijsko ogroženih območjih. Takšna konfiguracija je omogočila oceno funkcionalnosti programske opreme in primernosti strojne opreme za uporabo v zahtevnih operativnih okoljih.

### 5.2 Uporabniška izkušnja in prilagoditev za terensko delo

Posebna pozornost je bila namenjena prilagoditvi uporabniškega vmesnika zahtevam vzdrževalnega osebja, ki deluje v industrijskih okoljih z omejeno dostopnostjo, varnostnimi omejitvami in časovno kritičnimi intervencijami.

Uporabniški vmesnik aplikacije je bil optimiziran za uporabo na robustnih industrijskih pametnih telefonih ter omogoča zanesljivo delovanje v terenskih pogojih ob hkratnem ohranjanju poenostavljenega modela interakcije, primerne za hitre vzdrževalne postopke. Z uporabo RFID/NFC ali QR-identifikacije so tehniki lahko takoj dostopali do vzdrževalnih zapisov in tehnične dokumentacije, kar zmanjšuje odvisnost od tiskane dokumentacije ter zmanjšuje proceduralne zamude.

Operativna nadzorna plošča omogoča strukturiran pregled nad aktivnimi in čakajočimi intervencijami preko vizualnih prioriternih indikatorjev in statusnih obvestil. Takšen pristop izboljšuje situacijsko zavedanje in omogoča učinkovitejše določanje prioritet vzdrževalnih aktivnosti.

Poleg tega aplikacija omogoča neposredno oddajo večpredstavnostnega dokaznega gradiva, kar terenskemu osebju omogoča nalaganje fotografij in potrditev vzdrževanja v realnem času. Ta funkcionalnost izboljšuje komunikacijo med terenskimi delavci in nadzornim osebjem ter krepi sledljivost in natančnost vzdrževalnih poročil.

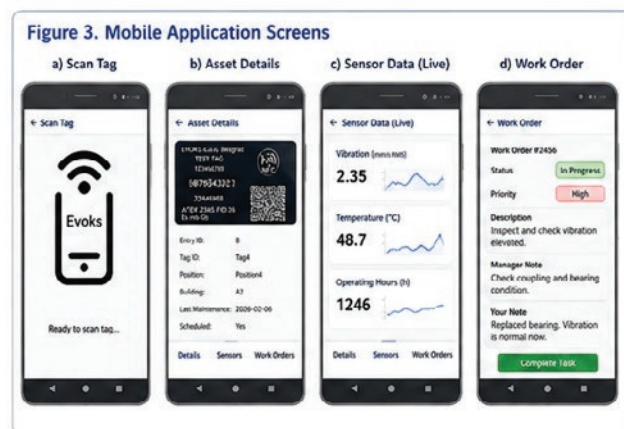
### 5.3 Primerjava s konvencionalnimi vzdrževalnimi sistemi

Prehod iz konvencionalnih papirnih vzdrževalnih postopkov na digitalno platformo EVOKS predstavlja pomembno izboljšanje organizacije dela, dostopnosti tehničnih informacij in transparentnosti delovnih procesov.

Tabela 1: Primerjava z obstoječimi sistemi

Funkcionalnost	Konvencionalni vzdrževalni sistemi	EVOKS digitalna platforma
Identifikacija sredstev	Ročno preverjanje in iskanje dokumentacije	Takojsnja RFID/NFC ali QR-identifikacija
Dostop do podatkov	Fizični arhivi in papirna dokumentacija	Dostop do centraliziranih digitalnih zapisov v realnem času
Koordinacija nalog	Ustna komunikacija ali papirni delovni nalogi	Digitalno dodeljevanje nalog s sprotnim spremljanjem statusa
Sledljivo vzdrževanje	Omejena možnost preverjanja terenskih aktivnosti	Obvezna interakcija z oznakami in digitalno dokazno gradivo
Upravljanje dokumentacije	Tiskani priročniki in ročno vodeni zapisi	Centralizirana digitalna dokumentacija in zgodovina
Komunikacijski tok	Zakasnjena izmenjava informacij med terenom in vodstvom	Takojsnja sinhronizacija med uporabniki

Pilotna implementacija je pokazala, da digitalizacija vzdrževalnih procesov izboljšuje transparentnost procesov, operativno koordinacijo in zanesljivost vzdrževalnih zapisov. Integracija mobilnih tehnologij in centraliziranega upravljanja podatkov dodatno vzpostavlja skalabilno osnovo za nadaljnji razvoj proti prediktivnim in podatkovno podprtim strategijam vzdrževanja.



Slika 4: Zasloni mobilne aplikacije

## 6 ANALIZA KORISTI IN REZULTATOV

Implementacija aplikacije Maintenance Management Tag Application uvaja merljive izboljšave učinkovitosti vzdrževanja preko digitalizacije in optimizacije terenskih operacij. Z integracijo RFID/NFC identifikacije, centraliziranega upravljanja podatkov in mobilno podprte izvedbe delovnih procesov sistem vzpostavlja bolj zanesljivo, transparentno in odzivno vzdrževalno okolje. Na osnovi rezultatov pilotne implementacije in strokovnih povratnih informacij, pridobljenih na Hannover Messe 2026, je bilo identificiranih več operativnih in ekonomskih koristi.

### 6.1 Zmanjšanje povprečnega časa popravila (MTTR)

Predlagani sistem bistveno izboljšuje učinkovitost odziva pri vzdrževanju z omogočanjem hitrega dostopa do operativnih podatkov in vzdrževalne dokumentacije neposredno na terenu. Z uporabo RFID ali QR-identifikacije lahko vzdrževalno osebje takoj pridobi podatke o oprepi, vključno s tehničnimi parametri, zgodovino vzdrževanja in delovnimi navodili, s čimer se odpravijo zamude, povezane z ročnim iskanjem dokumentacije.

Integracija upravljanja nalog v realnem času dodatno omogoča dinamično dodeljevanje in prioritizirano razvrščanje intervencij, kar zagotavlja hitrejšo komunikacijo med vodstvom in terenskim osebjem. Dostop do zgodovinskih servisnih zapisov in centralizirane tehnične

dokumentacije dodatno pospešuje diagnostične postopke in lokalizacijo napak, kar rezultira v merljivem zmanjšanju povprečnega časa popravila (MTTR).

## 6.2 Natančnost vzdrževalnih zapisov

Pomembna prednost digitalne vzdrževalne platforme je zmanjšanje napak zaradi človeškega dejavnika, ki so običajno povezane s papirnimi postopki in ročnim vnosom podatkov. Obvezna RFID/NFC-verifikacija zagotavlja, da se vzdrževalne aktivnosti izvajajo na pravilni opremi ter omogoča preverljivo potrditev prisotnosti delavca na lokaciji intervencije.

Aplikacija dodatno podpira zbiranje večpredstavnostnega dokaznega gradiva, saj lahko vzdrževalno osebje neposredno v centralizirano podatkovno bazo nalaga fotografije in terenske opombe. Ta funkcionalnost izboljšuje sledljivost, krepi integriteto vzdrževalne dokumentacije in zagotavlja strukturiran zgodovinski zapis vseh izvedenih aktivnosti.

S konsolidacijo vseh vzdrževalnih informacij znotraj centralizirane strežniške infrastrukture sistem zagotavlja konsistentnost podatkov, dolgoročno dostopnost in večjo zaščito pred izgubo dokumentacije ali nepopolnim poročanjem.

## 6.3 Ekonomski vpliv: ROI in zmanjšanje izpadov

Prehod iz konvencionalnih vzdrževalnih postopkov v digitalno upravljan delovni proces ustvarja pomembne operativne in ekonomske koristi. Izboljšana koordinacija med vzdrževalnim osebjem in vodstvom zmanjšuje zamude pri intervencijah ter minimizira trajanje nenačrtovanih izpadov opreme.

Avtomatizacija administrativnih procesov zmanjšuje čas, porabljen za neproduktivne aktivnosti, kot so ročno poročanje in upravljanje dokumentacije, ter omogoča vzdrževalnemu osebju večjo osredotočenost na tehnične naloge in korektivne posege.

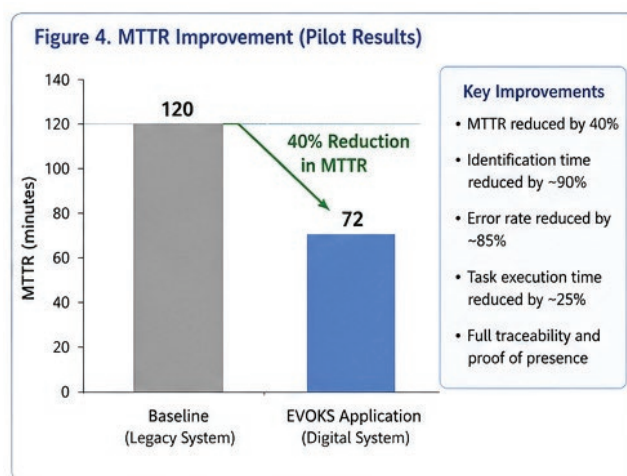
Izboljšana sledljivost vzdrževanja in večja skladnost s servisnimi postopki prispevata k zanesljivejšemu delovanju opreme in

optimiziranemu upravljanju življenjskega cikla sredstev.

Skupno te izboljšave povečujejo razpoložljivost opreme, produktivnost delovne sile in zmanjšujejo skupne stroške lastništva (TCO), kar predstavlja jasno osnovo za dolgoročno donosnost investicije (ROI).

## 7 NADALJNI RAZVOJ

Uspešna predstavitev aplikacije Maintenance Management Tag Application na sejmu Hannover Messe 2026 je postavila temelje za nadaljnjo širitev digitalnega vzdrževalnega ekosistema EVOKS. V skladu s sodobnimi trendi Industrije 4.0 in povratnimi informacijami industrijskih deležnikov bodo prihodnje razvojne aktivnosti usmerjene v izboljšanje prediktivnih zmogljivosti, širitev systemske povezljivosti ter izboljšanje interakcije med terenskim osebjem in digitalno infrastrukturo.



Slika 5: Izboljšanje MTTR

## 7.1 Umetna inteligenca in prediktivna analitika

Naslednja faza razvoja sistema bo poudarjala prehod od zbiranja podatkov k inteligentni podpori odločanju in prediktivnim strategijam vzdrževanja. Z integracijo metod umetne inteligence (AI) in strojnega učenja (ML) bo platforma sposobna analizirati zgodovinske vzdrževalne zapise skupaj s podatki v realnem času ter prepoznavati nenormalno obnašanje

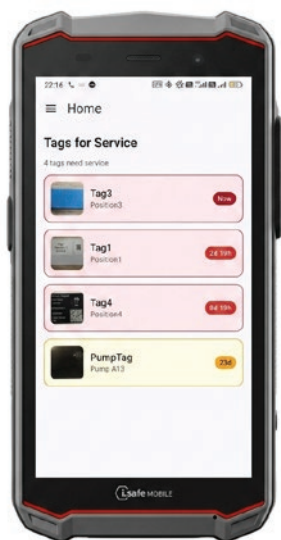
opreme in napovedovati potencialne okvare še pred nastankom kritičnih stanj.

Napredni analitični modeli bodo omogočali dinamično prioritarno razvrščanje vzdrževalnih aktivnosti glede na operativno tveganje, stanje opreme in ocenjen vpliv izpadov. Takšen pristop bo izboljšal razporejanje virov in omogočil načrtovanje vzdrževanja glede na dejansko stanje opreme in ne več zgolj na osnovi vnaprej določenih servisnih intervalov.

Integracija tehnologij obdelave naravnega jezika (NLP) bo dodatno izboljšala dostop do tehnične dokumentacije in vzdrževalnih postopkov. Terensko osebje bo lahko pridobivalo relevantne informacije preko glasovnih ukazov ali kontekstualnega iskanja po ključnih besedah, kar bo zmanjšalo čas, potreben za tehnično diagnostiko in navigacijo po dokumentaciji.

## 7.2 Razširitev IoT infrastrukture

Prihodnji razvoj bo vključeval tudi širitev IoT in senzorskega ekosistema z namenom ustvarjanja celovitejše digitalne predstavitve industrijskih sredstev in procesov. Dodatne senzorske tehnologije bodo omogočale spremljanje širšega spektra operativnih parametrov, vključno z akustičnimi anomalijami, kakovostjo električne energije, okoljskimi pogoji in koncentracijami plinov v eksplozijsko ogroženih območjih.



Slika 6: Izgled aplikacije

Za izboljšanje odzivnosti sistema in zmanjšanje komunikacijske latence bodo uvedene zmogljivosti robnega računalništva na nivoju prehodov in mobilnih naprav. Lokalna obdelava kritičnih senzorskih informacij bo omogočala skoraj takojšnje generiranje alarmov in dogodkov, zlasti v scenarijih s hitro spreminjajočimi se obratovalnimi pogoji.

Poleg tega bo uvedba visokohitrostnih komunikacijskih tehnologij, kot je 5G, izboljšala zanesljivost prenosa podatkov in razpoložljivost pasovne širine v velikih industrijskih objektih. Izboljšana povezljivost bo podpirala hitro sinhronizacijo vzdrževalnih zapisov, večpredstavnostnega dokaznega gradiva in naprednih inženirskih vsebin, vključno s 3D tehnično dokumentacijo.

## 7.3 Obogatena resničnost in napredni terenski vmesniki

Za nadaljnje izboljšanje operativne učinkovitosti in uporabnosti na terenu bo platforma vključevala tehnologije obogatene resničnosti (AR) in napredna vizualna orodja za podporo uporabnikom. S kombinacijo RFID-identifikacije in AR-prikaza bodo vzdrževalni tehniki lahko dostopali do kontekstualnih digitalnih informacij neposredno preko mobilnega vmesnika med interakcijo s fizično opremo.

Prihodnje AR-funkcionalnosti lahko vključujejo vizualizacijo vzdrževalnih postopkov, prikaz tehničnih shem in vodenih servisnih navodil neposredno na opazovanem sredstvu. Takšne funkcionalnosti imajo potencial za zmanjšanje proceduralnih napak, izboljšanje konsistentnosti vzdrževanja in skrajšanje časa intervencij.

Integracija algoritmov računalniškega vida bo dodatno omogočala avtomatizirano prepoznavanje vidnih poškodb, obrabe komponent in nenormalnih obratovalnih pogojev preko analize slik. Funkcionalnosti oddaljenega sodelovanja bodo omogočale komunikacijo v realnem času med terenskimi tehniki in oddaljenimi strokovnjaki, vključno s prenosom videa v živo in interaktivnimi anotacijami med kompleksnimi vzdrževalnimi posegi.

Skupno so te razvojne smeri namenjene pozicioniranju aplikacije Maintenance Management Tag Application kot napredne digitalne platforme za vzdrževanje, sposobne podpirati industrijske operacije naslednje generacije preko izboljšane avtomatizacije, povezljivosti in operativne inteligence.

## 8 ZAKLJUČEK

Študija dokazuje, da digitalizacija vzdrževalnih operacij z integracijo IoT in RFID tehnologij predstavlja ključni korak k sodobnemu industrijskemu upravljanju. Z zamenjavo fragmentiranih papirnih delovnih procesov z enotno mobilno platformo predlagani sistem omogoča natančno identifikacijo sredstev, dostop do podatkov v realnem času in strukturirano izvajanje vzdrževalnih nalog.

Rezultati kažejo, da takšen pristop bistveno izboljšuje operativno učinkovitost, zmanjšuje trajanje izpadov ter povečuje zanesljivost podatkov. Poleg tega uporaba robustnih in ATEX-skladnih naprav zagotavlja uporabnost sistema tudi v zahtevnih industrijskih okoljih.

Prihodnji razvoj, zlasti integracija umetne inteligence in prediktivne analitike, bo dodatno razširil zmogljivosti sistema ter omogočil prehod iz reaktivnega in preventivnega vzdrževanja proti popolnoma prediktivnim in avtonomnim strategijam vzdrževanja.

Viri:

- [1] Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*.
- [2] Klaus, S., & Müller, J. (2022). *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. Springer.
- [3] Levitt, J. (2019). *The Handbook of Maintenance Management*. Industrial Press.
- [4] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). "A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems." *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- [5] Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). "The Internet of Things: A Survey." *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805.
- [6] Yin, S., Ding, S. X., Xie, X., & Luo, H. (2014). "A Review on Basic Data-Driven Approaches for Industrial Process Monitoring." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 6418–6428.
- [7] Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- [8] Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). "A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
- [9] ISO 17359:2018. *Condition Monitoring and Diagnostics of Machines – General Guidelines*.
- [10] ISO/IEC 20248:2022. *Information Technology — Automatic Identification and Data Capture Techniques — Digital Signature Data Structure for RFID and Bar Codes*.
- [11] Want, R. (2006). "An Introduction to RFID Technology." *IEEE Pervasive Computing*, 5(1), 25–33.
- [12] RFID Journal (2023). "RFID and NFC in Industrial Maintenance: Eliminating Human Error in Field Operations." Available: <https://www.rfidjournal.com>
- [13] Vermesan, O., & Friess, P. (Eds.). (2014). *Internet of Things: From Research and Innovation to Market Deployment*. River Publishers.
- [14] Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2014). "How Smart, Connected Products Are Transforming Competition." *Harvard Business Review*, 92(11), 64–88.
- [15] Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. Apress.



## ASISTENT ZA PODPORO PROIZVODNIM PROCESOM

**Rok STRUNA, Vinko LONGAR**

Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto

### IZVLEČEK

*V sodobnih proizvodnih okoljih alarmna sporočila praviloma povedo, da je prišlo do odstopanja, ne pa tudi, kako ga varno in učinkovito odpraviti. Operaterji zato pogosto iščejo odgovore v interni dokumentaciji, na spletnih forumih ali pri bolj izkušenih sodelavcih, kar podaljšuje zastoje in povečuje odvisnost od težko dostopnega neformalnega znanja. V prispevku predstavljamo razvoj AI asistenta za podporo odpravljanju napak v proizvodnih procesih. Prva razvojna faza je temeljila na domensko prilagojenem jezikovnem modelu, povezanem z interno dokumentacijo in spletnimi viri. Tak pristop se je izkazal kot uporaben pri enostavnejših, dobro dokumentiranih napakah. V drugi razvojni fazi smo sistem nadgradili v kontekstno zavedno platformo, ki poleg besedilnih virov upošteva tudi alarmni dogodek, signalni kontekst celice, vizualni kontekst ter vlogo operaterja pri potrjevanju podanih korakov. Namen prispevka je predstavitev praktičnega problema, razvojne logike ter uporabne vrednosti takšnega sistema za industrijsko okolje.*

### 1 UVOD

Ob pojavu napake na proizvodni liniji, se praviloma ne ustavi samo stroj, velikokrat se ustavi tudi celotna linija. Operater vidi alarmno kodo, opozorilo ali zaustavitev procesa, pogosto pa nima neposrednega odgovora, kaj je vzrok težave, kateri podatek je v danem trenutku pomemben in kateri nadaljnji korak je varen. V praksi to pomeni pregled internih navodil, servisnih zapisov, spletnih forumov ali čakanje na bolj izkušenega sodelavca. Tak način dela je v industriji še vedno pogost, vendar je pri kompleksnejših proizvodnih sistemih vse težje doseči dovolj hiter, ponovljiv in sledljiv proces odprave napake.

Razvoj velikih jezikovnih modelov je v zadnjih letih pokazal, da lahko takšni modeli pomembno izboljšajo dostop do znanja in razlago tehničnih vsebin, tudi v proizvodnem okolju. Hkrati pa raziskave kažejo [1], da je njihova uporabnost največja takrat, ko so povezani z specifičnim znanjem in z zunanjimi viri podatkov. Posebej v proizvodnji je potrebno razlikovati med sistemom, ki zna na vprašanje odgovoriti, in sistemom, ki zna odgovor umestiti v dejanski kontekst procesa.

Namen prispevka je predstaviti razvojni prehod od prve različice AI podpore, ki temelji na dokumentaciji in spletu, do druge različice, ki pri

obravnavi napake upošteva širši kontekst robotske oziroma proizvodne celice (Slika 1)



Slika 1: Laboratorij LabTOP

### 2 RAZVOJ REŠITVE

Razvoj rešitve je izhajal iz potreb laboratorijskega okolja LabTOP. V začetni fazi smo naslovili predvsem problem razpršenosti informacij, s katerim se operaterji redno srečujejo pri odpravljanju napak. Potrebni podatki so praviloma porazdeljeni med interno dokumentacijo, servisne zapise, spletne vire in izkušnje posameznih sodelavcev, zato je pot do uporabnega odgovora pogosto počasna in odvisna od razpoložljivosti ljudi z ustreznim znanjem. Prvi cilj razvoja je bil zato vzpostaviti enotnejši in hitrejši dostop do relevantnih informacij ter s tem skrajšati začetno fazo reševanja napake.

Pri testiranju uporabe rešitve pa se je izkazalo, da sama dostopnost besedilnih razlag ne zadostuje vedno za učinkovito podporo odločanju v proizvodnem procesu. Pri številnih primerih namreč vzrok napake ni vezan samo na alarm ali dokumentirano okvaro posamezne naprave, ampak na širši kontekst delovanja celice, zaporedje procesnih dogodkov ter dejansko stanje okolice. To pomeni, da je za pravilno reševanje napake pogosto potrebno upoštevati tudi signalne informacije, procesno stanje in druge okoliščine, ki iz dokumentacije niso razvidne. Na podlagi te ugotovitve je bil razvoj usmerjen v prehod od dokumentno podprtega jezikovnega pomočnika k širši, kontekstno podprti rešitvi odločanja, namenjeni uporabi v industrijskem okolju.

## 2.1 Prva različica sistema

Prva različica rešitve je bila zasnovana kot AI asistent, ki je operaterju pomagal pri razlagi alarmov na podlagi interne dokumentacije in izbranih spletnih virov. Operater je vnesel alarmno kodo ali opis težave, sistem pa je iz razpoložljivih dokumentov pripravil povzetek problema in predlagal možne naslednje korake. Takšen pristop je blizu arhitekturi retrieval-augmented generation, pri kateri model poleg svojega znanja uporablja tudi zunanje vire za sestavo odgovora (*Slika 2*).

V praksi se je takšna rešitev izkazala kot zelo uporabna pri enostavnejših in dobro dokumentiranih primerih. Če je napaka jasno opisana v navodilih ali tehnični dokumentaciji, lahko sistem operaterju bistveno skrajša začetno fazo iskanja informacij. Prednost takšnega pristopa je tudi razmeroma preprosta uvedba: podjetje lahko začne z dokumenti in primeri, ki jih že ima, ter že s tem izboljša dostop do znanja.

## 2.2 Omejitve besedilnega pristopa

Pri testiranju pa se je pokazala pomembna omejitev. Velik delež napak na proizvodni liniji ni odvisen samo od naprave, ki je sprožila alarm, ampak od širšega stanja procesa. Vzrok težave je lahko v položaju izdelka, v stanju transporta, v aktivaciji senzorjev, v neusklajenem zaporedju operacij ali v fizičnem stanju delovne celice. Jezikovni model, ki pozna le alarm in dokumente,

takšnega konteksta ne vidi. Zato je lahko njegov odgovor jezikovno pravilen, vendar operativno še vedno ne zadostuje za varno in pravilno odpravo napake.

Ugotovitev je bila korak za prehod v drugo razvojno fazo. V proizvodnem okolju velikokrat ni dovolj vprašanje »kaj pomeni ta alarm«, ampak predvsem »kaj je glede na dejansko stanje procesa v tem trenutku smiselno storiti«. To je tudi glavna razlika med sistemom za pomoč pri iskanju znanja in sistemom za podporo odločanju.



Slika 2: Prikaz delovanje prve različice sistema

## 2.3 Druga različica sistema

V drugi različici smo zasnovali platformo, ki poleg dokumentnega znanja upošteva tudi kontekst proizvodne celice. Osnovna ideja ni, da bi umetna inteligenca zamenjala operaterja, ampak da mu v nekaj sekundah zbere relevantne informacije, pojasni verjeten vzrok težave, predlaga naslednji varen korak in po potrebi pripravi osnovo za nadaljnje ukrepanje. Konceptualno je pristop blizu agentnim sistemom [2], kjer model uporablja več virov podatkov, preverja stanje in pripravlja bolj strukturiran odziv.

V našem primeru to pomeni, da sistem poleg alarmnega dogodka upošteva tudi signalni kontekst, pridobljen iz industrijskega okolja (npr. prek OPC UA, REST API, PROFINET), razpoložljivo dokumentacijo, vizualni vpogled ter povratne informacije operaterja. Namesto splošnega odgovora, sistem omogoča vzpostavitev komunikacije, ki je za operaterja jasnejša in bolj strukturirana. Pomembna nadgradnja druge različice je tudi možnost izvajanja vnaprej definiranih funkcij. Sistem lahko na podlagi celotnega konteksta predlaga ustrezno zaporedje korakov za odpravo napake, pri čemer so ti koraki omejeni na vnaprej določene in varno definirane operacije. V primeru potrditve s strani operaterja lahko sistem te funkcije tudi samodejno izvede. S tem se

omogoča postopno nadgrajevanje sistema od svetovanja k podpori pri izvedbi, pri čemer se še vedno ohranja nadzor operaterja nad odločitvami. Če sistem na podlagi razpoložljivih informacij ne more zanesljivo določiti ustrezne rešitve, operaterju poda strukturiran predlog možnih nadaljnjih korakov ali pa zastavi dodatna vprašanja, s katerimi odgovori usmerijo sistem v pravilno smer. Na ta način sistem ostaja uporaben tudi v negotovih situacijah, brez tveganja neustreznih avtomatskih posegov.

Takšna zasnova je za industrijsko okolje primernejša, saj zmanjšuje odvisnost od izkušenih operaterjev, izboljšuje ponovljivost postopkov in omogoča bolj sledljivo obravnavo napak. Poudarek pri tem sistemu je, da ohranja operaterja v odločitveni zanki, kar je pomembno tako z vidika varnosti kot tudi zaupanja v uporabo umetne inteligence v proizvodnji.

### 3 UPORABA V PRAKSI

Vrednost takšne rešitve se pokaže šele v dejanskem proizvodnem okolju. Pri industrijski uvedbi ni dovolj, da sistem poda strokoven odgovor na ravni besedila, temveč mora biti sposoben delovati v povezavi z obstoječimi informacijskimi in operativnimi tokovi [3]. Izziv ni le interpretacija napake, ampak tudi pravočasna in uporabna podpora pri odločanju v realnih pogojih delovanja.

Pri tem je smiselno, da sistem omogoča postopno nadgrajevanje. V začetni fazi lahko deluje kot pomoč pri razlagi napak, v nadaljevanju kot podpora pri odločanju, v bolj definiranih scenarijih pa tudi kot pomoč pri izvedbi vnaprej definiranih funkcij za izvedbo postopkov za odpravo napake.

#### 3.1 Povezava z okoljem

Uporabnost takšne rešitve je odvisna od njene sposobnosti povezovanja z dejanskim industrijskim okoljem. V obravnavanem primeru laboratorijsko okolje LabTOP uporablja signalne podatke pridobljene prek standardnih industrijskih vmesnikov, kot je OPC UA, kar omogoča vpogled v dejansko stanje procesa. Na ta način sistem ne spremlja samo statičnih informacij, ampak tudi upošteva trenutne

vrednosti signalov in stanje posameznih komponent. Protokol tudi poleg branja trenutnih vrednosti spremenljivk omogoča zapisovanje vrednosti signalov, kar je pomemben del pri komuniciranju agentnega sistema s krmilnikom.

Vidik implementacije pa je tudi način kako operater dostopa do informacij. V praksi se je pokazalo, da operaterji niso vedno pripravljeni uporabljati novih specializiranih orodij, zato smo se usmerili v izdelavo rešitve, ki omogoča enostavno dostopnost komunikacije s sistemom. Sistem podpira komunikacijo prek različnih kanalov, MES sistemov, HMI ekranov, med drugim pa tudi prek mobilnih komunikacijskih platform, kot je WhatsApp, kar omogoča hitrejšo uporabo brez potrebe po dodatnem usposabljanju ali kompleksni integraciji.

Zastavljen pristop omogoča lažjo uvedbo sistema v obstoječa okolja, saj ni nujno takojšnje povezovanje z vsemi informacijskimi sistemi (npr. MES), kar bi lahko predstavljalo dodatno tehnično in organizacijsko zahtevnost. Rešitev se tako lahko uvaja postopno in prilagojeno potrebam posameznega okolja.

#### 3.2 Prednosti in omejitve

Glavna praktična vrednost opisanega pristopa (*Slika 3*) je v skrajšanju časa od zaznave napake do prve smiselne odločitve ter v zmanjšanju odvisnosti od individualnega znanja operaterjev v podjetju. Sistem omogoča strukturiran in ponovljiv proces odpravljanja napak, pri čemer se z obdelavo več primerov sproti uči ter izboljšuje na podlagi prepoznanih vzorcev. Poleg tega zagotavlja boljšo sledljivost odločitev in izvedenih postopkov, kar je pomembno z vidika analize ter nadaljnjega optimiziranja procesov.

Pomembna prednost je tudi podpora uporabe lokalnih modelov, kar nam omogoča izvajanje sistema znotraj informacijskega okolja brez potrebe po pošiljanju podatkov v zunanje sisteme. To je z vidika varnosti in zaščite podatkov pomembno v industrijskih okoljih, kjer so informacije občutljive.

Poleg prednosti pa ima takšen pristop tudi omejitve. Učinkovitost sistema je odvisna od kakovosti vhodnih podatkov, razpoložljivosti signalnega konteksta ter ustrezne definicije postopkov za odpravo napak.

V nadaljnjem razvoju je predvidena nadgradnja vizualnega dela sistema, predvsem z vidika boljšega konteksta na podlagi slike. Z uporabo dodatnega prilagajanja vizualnih modelov bo mogoče izboljšati razumevanje fizičnega stanja celice in s tem povečati zanesljivost delovanja samega sistema.



Slika 3: Shema delovanja agentnega sistema

#### 4 ZAKLJUČEK

V prispevku smo predstavili razvoj AI asistenta za podporo odpravljanju napak v proizvodnih procesih. Izhodiščni problem je značilen za številna industrijska okolja: alarmi so hitri, kontekst je razpršen, pot do pravilnega naslednjega koraka pa pogosto predolga. Prva razvojna faza, ki je temeljila na jezikovnem modelu nad dokumentacijo in spletnimi viri, je pokazala, da lahko umetna inteligenca učinkovito pomaga pri interpretaciji enostavnejših in dobro dokumentiranih napak. Nadaljnji razvoj pa je pokazal, da je za realno proizvodno rabo potreben širši kontekst.

Zato smo pristop nadgradili v kontekstno zavedno platformo, ki združuje alarmni dogodek, procesne informacije, dokumentno znanje, vizualni vpogled in vlogo operaterja. Ključna vrednost takšnega pristopa ni v popolni avtonomiji, temveč v hitrejši, bolj strukturirani in bolj sledljivi poti od alarma do odločitve. Prav v tem vidimo pomemben potencial za prihodnje industrijske aplikacije, kjer bo umetna inteligenca največjo vrednost ustvarjala takrat, ko bo povezana z realnim procesom in vpeta v dejansko operativno okolje.

#### ZAHVALA

Raziskovalno delo avtorjev je bilo sofinancirano s strani Republike Slovenije, Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in inovacije, Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije ter Evropske unije – NextGenerationEU, preko projekta DIGITOP. Raziskavo je sofinancirala Agencija RS za raziskovalno in inovacijsko dejavnost (ARIS) preko letnega programa dela Rudolfovo.

Viri:

- [1] P. Lewis *idr.*, „Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks“, 12. april 2021, *arXiv*: arXiv:2005.11401. doi: 10.48550/arXiv.2005.11401.
- [2] A. Singh, A. Ehtesham, S. Kumar, T. T. Khoei, in A. V. Vasilakos, „Agentic Retrieval-Augmented Generation: A Survey on Agentic RAG“, 1. april 2026, *arXiv*: arXiv:2501.09136. doi: 10.48550/arXiv.2501.09136.
- [3] G. Liang in Q. Tong, „LLM-Powered AI Agent Systems and Their Applications in Industry“, 22. maj 2025, *arXiv*: arXiv:2505.16120. doi: 10.48550/arXiv.2505.16120.

## OD AVTOMATIZACIJE DO ANALITIKE: TRENDI RAZVOJA IN DIGITALIZACIJA PROIZVODNJE

**Gašper MUHIČ**  
FANUC ADRIA d.o.o.

### IZVLEČEK

Digitalizacija proizvodnje je v sodobni industriji postala osrednji razvojni dejavnik, ki presega klasično avtomatizacijo in posega na področja vodenja, vzdrževanja ter trajnostnega upravljanja virov. Proizvodna podjetja se soočajo z naraščajočo kompleksnostjo procesov, pomanjkanjem usposobljene delovne sile ter rastočimi stroški energije, kar zahteva boljše preglednost in podatkovno podprto odločanje. Ključni gradniki te preobrazbe so sodobna industrijska krmilja, digitalno integrirani servo sistemi ter odprte IIoT platforme.

Prispevek obravnava digitalizacijo proizvodnje kot celosten proces, ki se začne na ravni industrijskih krmilij in pogonov ter se nadaljuje z uporabo FANUC FIELD system Basic Package (FsBP) kot osrednje infrastrukture za zbiranje, standardizacijo in analizo podatkov. Poseben poudarek je namenjen drugi polovici digitalne verige – povezovanju strojev, pametnemu vzdrževanju, operativni analitiki in integraciji z MES/ERP sistemi. Energetska učinkovitost je obravnavana kot neposreden rezultat boljše digitalne preglednosti, stabilnosti procesov in optimizacije obratovanja.

### 1 UVOD

Industrijska proizvodnja se v zadnjih letih hitro spreminja. Trgi zahtevajo večjo prilagodljivost, krajše dobavne roke in večjo raznolikost izdelkov, hkrati pa se podjetja soočajo z omejeno razpoložljivostjo kadrov in rastjo stroškov energije. V takšnem okolju ni več dovolj, da so proizvodni sistemi zgolj avtomatizirani – postati morajo tudi pregledni, povezani in podatkovno vodeni.

Digitalizacija proizvodnje pomeni spremembo paradigme: od lokalnega upravljanja strojev k sistemskemu razumevanju procesov. Njeno bistvo ni v količini podatkov, temveč v njihovi dostopnosti, primerljivosti in uporabnosti za odločanje. Prav zato se digitalizacija začne na najnižji tehnološki ravni – pri industrijskih krmiljih in pogonskih sistemih – ter se nadaljuje proti višjim informacijskim nivojem.

### 2 DIGITALIZACIJA SE ZAČNE NA RAVNI KRMILIJ

Pogosto se digitalizacija povezuje z MES ali ERP sistemi, vendar se njeni temelji postavljajo že na najnižji ravni – pri industrijskih krmiljih. Sodobna CNC in robotska krmilja niso več zgolj

sistemi za nadzor gibanja, temveč inteligentni podatkovni viri.

Razvojna usmeritev krmilj danes vključuje:

- odprte komunikacijske vmesnike,
- standardiziran dostop do podatkov,
- večjo računsko zmogljivost,
- vgrajeno kibernetično varnost.

Takšna arhitektura omogoča, da krmilja postanejo aktivni del digitalnega ekosistema proizvodnje in ne več izolirani avtomatizacijski otoki.

#### 2.1 Robotsko krmilje FANUC R-50iA

Robotsko krmilje FANUC R-50iA predstavlja novo generacijo robotskih krmilnikov, zasnovanih za delovanje v digitalno povezanih okoljih. Poleg izboljšane natančnosti, stabilnosti in razširjenih varnostnih funkcij (Dual Check Safety, več varnostnih con in hitrosti) je poudarek na programski prilagodljivosti.

Pomembna lastnost krmilja je njegova programska odprtost. Podpora za Python in integracija z razvojnimi okolji omogočata razvoj lastnih aplikacij, ki lahko spremljajo delovanje robota, analizirajo cikle ali optimizirajo uporabo virov. Podpora ogrodjem ROS1 in ROS2 dodatno

odpira vrata naprednim digitalnim aplikacijam, kot so samodejno prilagajanje procesov in sodelovanje več robotskih sistemov.

Krmilje je zasnovano za integracijo v povezane proizvodne sisteme, pri čemer je kibernetska varnost obravnavana kot osnovna lastnost in ne dodatek.



Slika 1

## 2.2 FANUC CNC krmilje SERIES 500iA in digitalni dvojček

CNC krmilje FANUC Series 500iA predstavlja pomemben korak v smeri digitalne proizvodnje. Nova arhitektura krmilja je zasnovana za zahtevne večosne aplikacije, hkrati pa omogoča tesno povezavo med realno in digitalno proizvodnjo.

Ključni element digitalizacije je koncept digitalnega dvojčka. FANUC Smart Digital Twin omogoča simulacijo obdelovalnih procesov, preverjanje programov, analizo gibov in optimizacijo ciklov še pred dejansko obdelavo. S tem se zmanjšuje število napak, skrajšujejo zagoni in povečuje stabilnost procesa.

Krmilje omogoča tudi zajem podrobnih podatkov o obremenitvah osi in pogonov, kar predstavlja ključno osnovo za nadaljnjo analitiko in pametno vzdrževanje.



Slika 2

## 2.3 Pomen servo sistemov v digitalizaciji

Servo sistemi predstavljajo neposredno zvezo med digitalnimi algoritmi krmiljenja in mehanskim delovanjem strojev. Njihova integracija v digitalni tok podatkov je ključna za prenos optimizacij iz programske ravni v realno izboljšanje procesov.

Sodobni servo sistemi FANUC serije ai-D so zasnovani za visoko dinamiko, natančnost in zmanjšane energijske izgube. Poleg strojne učinkovitosti je pomembna njihova podatkovna integracija: informacije o tokovih, temperaturah in obremenitvah so na voljo krmiljem in nadrejenim sistemom, kar omogoča spremljanje stanja in napovedovanje vzdrževalnih posegov.



Slika 3

### 3 PREHOD OD AVTOMATIZACIJE K DIGITALIZACIJI

Avtomatizacija in digitalizacija nista sinonima. Avtomatizacija rešuje posamezne naloge, digitalizacija pa povezuje celoten sistem. Ključni izziv sodobnih proizvodnih okolij ni pomanjkanje podatkov, temveč njihova razpršenost in neenotnost.

Da bi podatki iz krmilij in servo sistemov postali uporabni, je potrebna skupna platforma, ki omogoča njihovo zbiranje, standardizacijo in vizualizacijo. To vlogo prevzema FANUC FIELD System Basic Package.

### 4 FANUC FIELD SYSTEM BASIC PACKAGE KOT HRBTENICA DIGITALIZACIJE

FANUC FIELD System Basic Package (FSBP) je IIoT platforma, zasnovana za povezovanje proizvodne opreme in ustvarjanje enotnega pregleda nad proizvodnimi procesi. V nasprotju z mnogimi IT-rešitvami deluje lokalno v tovarniškem omrežju, kar zagotavlja nizke zakasnitve, visoko razpoložljivost in večjo varnost.

Sistem omogoča:

- zbiranje podatkov iz CNC strojev, robotov in opreme drugih proizvajalcev,
- standardizacijo podatkov preko odprtih protokolov (OPC UA, MTConnect, Modbus, Euromap),
- enotno vizualizacijo stanja proizvodnje.

FSBP s tem odpravlja eno ključnih ovir digitalizacije – kompleksno in drago integracijo.



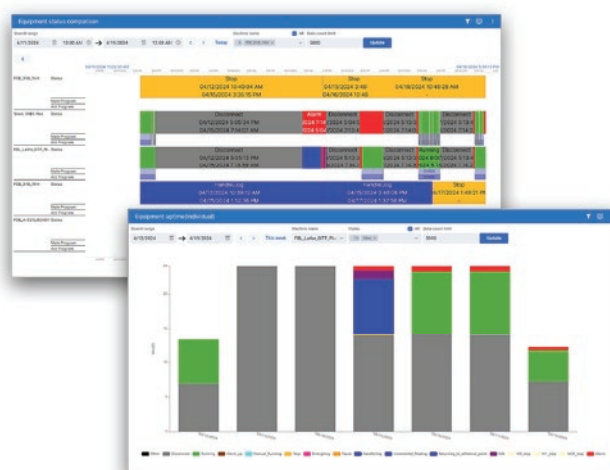
Slika 4

### 4.1 Standardizacija podatkov in operativna preglednost

Standardizacija podatkov je temelj uspešne digitalizacije. FIELD System omogoča, da so podatki ne glede na proizvajalca stroja predstavljeni na enoten način. Operaterji, vzdrževalci in vodstvo imajo tako dostop do istega vira resnice.

Pregledni prikazi stanja strojev, zgodovine zastojev in trendov delovanja omogočajo:

- hitrejše odkrivanje ozkih grl,
- primerjavo delovanja strojev,
- objektivno ocenjevanje učinkovitosti.



Slika 5

### 4.2 Digitalizacija, analitika in energetska učinkovitost

Ko so podatki na voljo v standardizirani obliki, jih je mogoče analizirati tudi z vidika porabe energije. FIELD system Basic Package omogoča povezovanje energetskih podatkov s procesnimi stanji strojev.

Energetska učinkovitost se v digitalizirani proizvodnji ne dosega z enkratnimi ukrepi, temveč z nenehno optimizacijo:

- krajšimi cikli,
- manjšim številom zastojev,
- stabilnejšim delovanjem pogonov.

### 4.3 Povezovanje z MES, ERP in BI sistemi

Eden ključnih ciljev digitalizacije proizvodnje je povezovanje operativne ravni strojev z nadrejenimi informacijskimi sistemi, kot so MES, ERP in BI. FANUC FIELD System Basic Package pri tem deluje kot vmesni, podatkovno orientiran sloj, ki standardizirane proizvodne podatke iz industrijskih krmilij in servo sistemov posreduje naprej v informacijski ekosistem podjetja. Prek vmesnikov OPC UA, REST API in okolja Node-RED je omogočeno zanesljivo in postopno povezovanje z MES sistemi za spremljanje proizvodnje v realnem času ter z ERP sistemi za planiranje, obračunavanje in analizo stroškov. Takšna arhitektura omogoča, da se podatki o stanju strojev, razpoložljivosti, zastoju, porabi energije in produktivnosti ne uporabljajo le operativno, temveč tudi za planiranje kapacitet, optimizacijo zalog, izračun stroškov na kos ter podporo strateškemu odločanju. Pomembna prednost tega pristopa je postopna uvedba digitalizacije brez posegov v obstoječe ERP ali MES rešitve, pri čemer FIELD System prevzame vlogo standardiziranega podatkovnega vira proizvodnje. S tem se izboljša preglednost, zmanjšajo informacijske vrzeli med proizvodnjo in poslovnim vodenjem ter ustvari osnova za dolgoročno podatkovno vodeno, učinkovito in trajnostno upravljanje proizvodnih procesov.

### 5 PREVENTIVNO VZDRŽEVANJE IN TRAJNOST PROIZVODNJE

Poleg spremljanja in analiz v proizvodnji, digitalizacija pomembno prispeva k prehodu od reaktivnega k preventivnemu in pogojnemu vzdrževanju, kar ima neposreden vpliv na trajnost industrijskih sistemov. Z uporabo podatkov, ki jih zagotavljajo industrijska krmilja, servo sistemi in platforme, kot je FANUC FIELD System Basic Package, je mogoče neprekinjeno spremljati stanje ključnih komponent ter pravočasno zaznati znake obrabe ali odstopanj. Tak pristop omogoča načrtovane vzdrževalne posege, zmanjšuje nenačrtovane zastoje in podaljšuje življenjsko dobo opreme. Hkrati se z zmanjšanjem izpadov, ponovnih zagonov in neučinkovitih delovnih režimov znižuje tudi poraba energije ter materialnih virov, kar pozitivno vpliva na skupne

obratovne stroške in okoljski odtis proizvodnje. Preventivno vzdrževanje, podprto z digitalnimi podatki, tako postaja eden ključnih gradnikov trajnostne, stabilne in dolgoročno konkurenčne industrijske proizvodnje.

## 6 SKLEP

Digitalizacija proizvodnje je uspešna le, če je obravnavana celostno. Industrijska krmilja in servo sistemi ustvarjajo podatke, FANUC FIELD System Basic Package jih povezuje in standardizira, analitika pa omogoča izboljšave procesov, vzdrževanja in energetske učinkovitosti.

V drugi polovici digitalne verige – pri povezovanju, analitiki in uporabi podatkov – se skriva največja dodana vrednost digitalizacije. Prav tu FsBP omogoča praktičen, razširljiv in industrijsko primeren pristop k digitalni preobrazbi proizvodnje.

Viri:

- [1] FANUC Europe Corporation: \*FIELD System Basic Package – Industrial IoT Platform\*, tehnična dokumentacija, 2026.
- [2] FANUC Europe Corporation: \*R-50iA Robot Controller – Product Overview and Technical Documentation\*, 2025.
- [3] FANUC Europe Corporation: \*CNC Series 500i-A – Next Platform for Machine Tools\*, tehnični katalog, 2025.
- [4] FANUC Corporation: \*Servo System  $\alpha$ -D Series – High Speed, High Precision and Energy Efficiency\*, Servo  $\alpha$ -D(E)-01, 2023.
- [5] FANUC Europe Corporation: \*FANUC Plans for CNC Systems – Predictable TCO and Preventive Maintenance\*

## VLOGA UMETNE INTELIGENCE PRI OPTIMIZACIJI PROCESA CNC OBDELAVE

**Sandi KEGU**  
Acam Pro d.o.o.

### IZVLEČEK

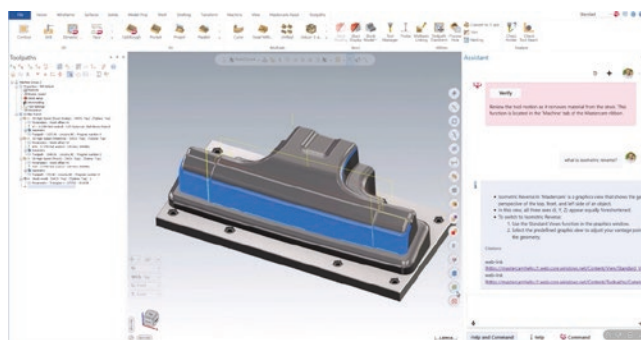
*V sodobni industrijski proizvodnji se podjetja soočajo z vedno večjimi pritiski po večji produktivnosti, krajših dobavnih rokih in višji kakovosti izdelkov. Hkrati se pojavljata pomanjkanje usposobljenega kadra ter potreba po hitrem odzivanju na zahteve trga. V tem kontekstu umetna inteligenca (AI) predstavlja enega ključnih dejavnikov za optimizacijo procesov CNC obdelave.*

### 1 UVOD

Dandanes razvoj orodij umetne inteligence poteka v več smereh:

- Prva smer obsega razvoj sistemov, ki so sposobni samodejno prepoznati obliko izdelka in na podlagi tega generirati obdelovalne poti.
- Druga smer se osredotoča na uporabo velikih jezikovnih modelov (LLM) kot pomoč pri uporabi programske opreme.
- Poleg teh dveh obstaja še več podvariant orodij umetne inteligence, kot so na primer inteligentni sistemi za napovedovanje časov obdelave, avtomatsko razpoznavanje tolerančnih zahtev in podobno.

V programu Mastercam so danes že na voljo vse zgoraj naštetе različice orodij umetne inteligence. Mastercam Copilot predstavlja implementacijo napredne umetne inteligence za izboljšano uporabniško podporo. Njegova uporaba je izjemno enostavna, saj lahko uporabnik programu zastavlja vprašanja, ta pa mu nanje odgovori v njegovem jeziku. V prihodnosti bo razvoj tega orodja omogočil, da bo uporabnik programu neposredno naročil želeno opravilo – na primer, da z določenim orodjem obdelava vse izvrtine na zgornji ravnini.



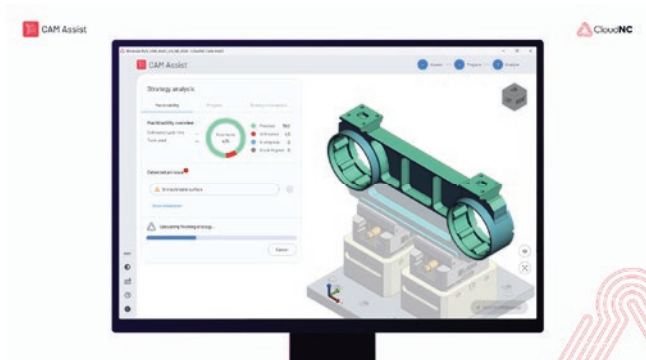
Slika 1: Mastercam Copilot

### 2 NAPREDNI AI PRISTOPI V CAM PROGRAMIRANJU

Eden glavnih izzivov v CNC proizvodnji je hitra priprava optimiziranega CAM programa. Tradicionalno to zahteva izkušenega programerja, ki mora izbrati ustrezne strategije obdelave, orodja, rezalne parametre ter optimalen način vpenjanja. Umetna inteligenca ta proces bistveno poenostavi in avtomatizira. Na podlagi vhodnih podatkov, kot so CAD model, material obdelovanca, zmogljivost stroja in urejena knjižnica orodij, AI samodejno analizira geometrijo izdelka ter predlaga optimalen tehnološki proces obdelave.

V Mastercamu je za ta namen na voljo modul CAM Assist. Proces dela s tem modulom običajno vključuje več korakov. V Mastercamu je za ta namen na voljo modul CAM Assist. Proces dela s tem modulom običajno vključuje več korakov. Program najprej analizira CAD model. Nato določi strategije obdelave in izbere ustrezna

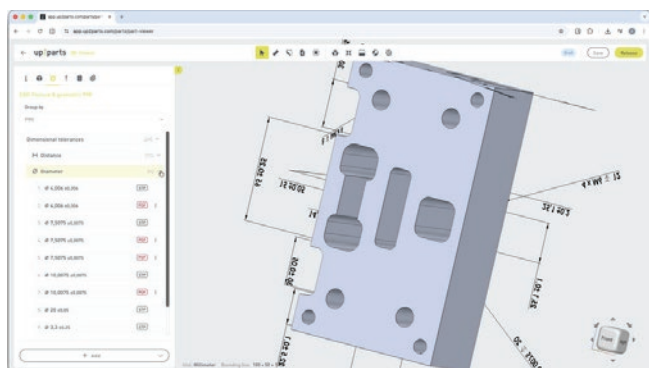
orodja in parametre iz predpripravljene knjižnice orodij. Na podlagi podatkov o izbranem materialu in stroju nastavi optimalne parametre ter pripravi predogled izbranih obdelav.



Slika 2: CAM Assist

Končni rezultat so standardne CAM operacije, ki jih lahko tehnolog naknadno tudi ročno pregleda, optimizira in prilagodi specifičnim zahtevam posameznega obdelovanca. S tem je zagotovljena kombinacija avtomatizacije in končnega strokovnega pregleda programerja. Trenutno je avtomatsko programiranje možno na zahtevnih 2,5D oblikah ter tudi na 5-osnih strojih s 3+2 obdelavami. Možna je tudi avtomatska prepoznavna in obdelava preprostejših 3D modelov.

Podoben pristop k avtomatski izdelavi CNC programov ima tudi modul Up2Parts, ki samo programiranje izvaja na zelo podoben način kot CAM Assist, s tem da zna poleg 3D modela brati tudi PDF risbo obdelovanca z vsemi tolerančnimi merami. Te mere potem tudi upošteva pri avtomatski izdelavi obdelovalnih operacij.



Slika 3: Modul Up2Parts avtomatsko prepoznava tolerančne mere iz priložene PDF risbe

Za CNC programerja je takšen postopek uporabe umetne inteligence enostaven, saj mu ponuja popolno transparentnost in možnost urejanja generiranih operacij. Vsak rezultat izračuna orodnih poti je v celoti viden in ga uporabnik lahko pregleda ter po potrebi tudi spremeni.

Sistemi, kot sta napredna uporabniška podpora (npr. Mastercam Copilot) in rešitve za avtomatizirano programiranje (npr. CAM Assist in Up2Parts), omogočajo uporabnikom bistveno hitrejši začetek in potek dela. Tudi manj izkušeni programerji lahko v zelo kratkem času pripravijo zadovoljive obdelave, saj umetna inteligenca prevzame ključne odločitve. Uporabniški vmesniki postajajo enostavnejši, komunikacija pa vse bolj intuitivna, kar zmanjšuje potrebo po dolgotrajnem učenju.

Pomembna prednost uporabe umetne inteligence je tudi analiza in napovedovanje obdelovalnega časa. AI lahko analizira celotno mapo CAD modelov in samodejno izračuna predvidene čase obdelave za posamezne kose. To omogoča hitro in dokaj natančno poizvedbo obdelovalnega časa in posledično hitro pripravo ponudb, kar je v konkurenčnem okolju ključnega pomena.

Dodatna vrednost umetne inteligence se kaže tudi pri zmanjševanju napak, ki se lahko zgodijo vsakemu programerju. S končno simulacijo in analizo potencialnih kolizij UI pomaga preprečiti nezaželjene poškodbe orodij, strojev ali samega obdelovanca.

V prihodnosti se pričakuje še večja integracija umetne inteligence v CNC (proizvodnjo) okolje. Med ključnimi smernicami razvoja so poudarki na avtomatizaciji tehnološkega dela projektov, kot so direktna povezava s skladiščem materiala, prepoznavanje podobnih modelov za hitrejšo avtomatizacijo celotnega procesa (vključeno z našimi popravki iz prejšnjih projektov), strojno učenje in uporaba preteklih izkušenj v vsakem naslednjem projektu, avtomatsko prepoznavanje toleranc iz tehnične dokumentacije ali direktno iz 3D modela ter razširitev podpore na kompleksnejše obdelave, kot so simultano 5-osno rezkanje in kompleksnejše obdelovance. UI bo tako postopoma postala nepogrešljiv del digitalne proizvodnje.

### 3 ZAKLJUČEK

Za podjetja, ki želijo ostati konkurenčna, vlaganje v umetno inteligenco ni več izbira, temveč nuja. Z umetno inteligenco lahko bolje izkoristimo znanje obstoječih ekip in hitreje uvedemo nove sodelavce v delo. V obdobju, ko primanjkuje strokovnjakov, to podjetju prinaša ključno konkurenčno prednost. Umetna inteligenca tako ne nadomešča človeka, temveč ga dopolnjuje. S prenosom rutinskih in kompleksnih analitičnih nalog na AI se tehnologom in programerjem omogoča, da se osredotočijo na optimizacijo, inovacije in razvoj – kar je ključ do uspešne in trajnostne proizvodnje v prihodnosti.



## NADGRADNJA 3-OSNEGA VERTIKALNEGA CNC STROJA S 4./5. OSJO pL LEHMANN: MANJ NASTAVITEV, NIŽJI STROŠKI, HITREJŠI ROI

**Nikolaj KONOV**  
KROKK d. o. o.

### IZVLEČEK

V proizvodnji se pogosto pojavi dilema, ali investirati v nov 5-osni obdelovalni center ali bolje izkoristiti 3-osni vertikalni CNC stroj z nadgradnjo 4. oziroma 5. osi. Prispevek obravnava logiko koncepta 3+1 oziroma 3+2, pri katerem dodana rotacijska os ali dvoosna rotacijska miza omogoči večstransko obdelavo v enem vpetju, zmanjša število nastavitvev ter skrajša prehodne čase. Poudarek je na finančnih učinkih: nižjem začetnem vložku, boljšem izkoristku stroja in hitrejši povrnitvi investicije [1][2].

### 1 UVOD

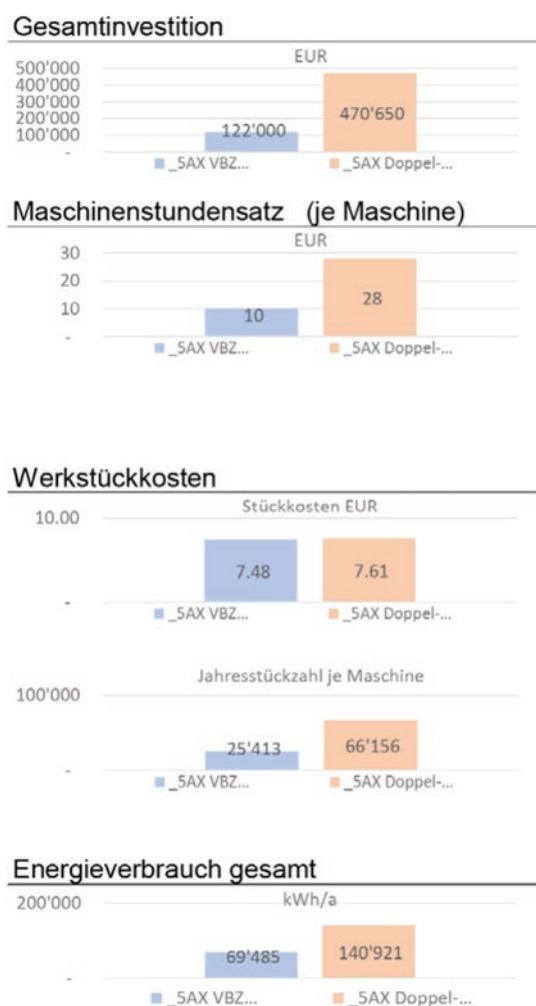
V številnih delavnicah so 3-osni vertikalni obdelovalni centri še vedno hrbtenica proizvodnje. So znani operaterjem, praviloma dobro amortizirani in pogosto dovolj zmogljivi za velik del vsakodnevnih nalog. Težava nastane, ko izdelek zahteva obdelavo z več strani, manj ponovnih vpetij ali višjo ponovljivost. Takrat se hitro pojavi ideja o nakupu novega 5-osnega stroja, vendar to ni vedno ekonomsko najbolj upravičena rešitev.

Koncept nadgradnje 3-osnega stroja z eno ali dvema dodatnima osema pomeni, da 3-osnemu obdelovalnemu centru dodamo rotacijsko mizo ali rotacijsko-nagibno mizo. Tako nastane rešitev 3+1 ali 3+2, pri kateri se kos v enem vpetju indeksira v več položajev, obdelava pa ostane tehnološko pregledna in investicijsko bistveno manj zahtevna. Za veliko podjetij je prav to najpomembnejše: iz obstoječe opreme dobiti več izdelanih kosov, manj izgub pri nastavitvah in hitrejši denarni učinek investicije.

### 2 KJE NASTANEJO FINANČNE PREDNOSTI

Pri primerjavi med novim 5-osnim strojem in nadgradnjo 3-osnega obdelovalnega centra ni dovolj gledati le nabavne cene. Odločitev je treba presojati skozi celoten strošek lastništva: začetni vložek, urno postavko stroja, porabo energije, čas

nastavitve, izmet zaradi ponovnega vpenjanja in izgubljeno kapaciteto med menjavo serij.



Slika 1: Primerjava naložb in stroškov

Nadgradnja 3-osnega stroja z dodatno osjo pogosto vsaj približno tretjino ugodnejša od nakupa novega 5-osnega centra [1]. V določenih aplikacijah pa je lahko razlika še precej večja. Primerjalni podatki proizvajalca za obdelavo scroll komponente kažejo investicijo približno 120.000 do 130.000 EUR za 3-osni vertikalni stroj z dodano pL LEHMANN mizo, medtem ko je bil primerjani 4- ali 5-osni dvo-vretenski center ocenjen na približno 550.000 EUR [1]. Takšne številke so odvisne od razreda stroja, opreme in avtomatizacije, vendar dobro pokažejo smer razmišljanja: z istim proračunom je pogosto mogoče postaviti več delovnih mest ali pa investicijo razdeliti v več stopenj.

Pomembna je tudi urna postavka. Dražji in kompleksnejši stroj zahteva višjo zasedenost, da se investicija povrne. Pri rešitvi 3+1 ali 3+2 je tveganje manjše, ker podjetje uporablja znan stroj, na katerega doda modul, ki poveča funkcionalnost, ne da bi popolnoma spremenil organizacijo proizvodnje. Primerjalni podatki pri isti aplikaciji kažejo tudi nižjo porabo energije in nižje stroške kosa pri rešitvi s standardnim 3-osnim strojem in precizno rotacijsko mizo [1][4].

V nadaljevanju je povzetek ekonomskih učinkov, ki jih v praksi najpogosteje prinese nadgradnja 3-osnega stroja z dodatno osjo. Tabela 1 ne nadomešča podrobnega izračuna za konkretno aplikacijo, jasno pa pokaže, zakaj je pri številnih »retrofit« projektih ali nakupu 3 osnega obdelovalnega centra z dodatno rotacijsko mizo prav ROI najmočnejši argument za odločitev.

Tabela 1: Ključni ekonomski učinki nadgradnje 3-osnega stroja s konceptom 3+1 / 3+2

Kazalnik	Vpliv na ROI	Pomen za proizvodnjo
Začetni vložek	Nižji vhodni strošek pomeni manjšo obremenitev denarnega toka in krajšo pot do pozitivnega denarnega učinka.	Nadgradnja ali 3-osni stroj + rotacijska miza je lahko občutno cenejša od novega 5-osnega centra
Ponovna vpetja	Manj nastavitev znižuje neproizvodni čas in zmanjšuje možnost napak.	Prihranki se pogosto merijo v minutah na kos
Indeksiran je	Hitrejši zasuki neposredno krajšajo strojni cikel pri kosih z več položaji obdelave.	Pri nekaterih izvedbah je 90-stopinjski zasuk okoli 0,4 s
Kakovost procesa	Boljša orientacija obdelovanca omogoča krajša orodja, manj vibracij in manj dodelav.	Nižji stroški izmeta in bolj stabilna kakovost
Skalabilnost	Kapaciteto je mogoče širiti postopno, brez takojšnjega nakupa zelo dragega namenskega stroja.	Manj investicijskega tveganja in lažje planiranje rasti

### 3 ROI V PRAKSI: MANJ NASTAVITEV, VEČ REZANJA

Najhitrejši donos investicije praviloma ne nastane zaradi ene same velike tehnične prednosti, temveč zaradi seštevka več manjših prihrankov. Prvi je odprava ponovnega vpenjanja. Vsako novo vpetje pomeni čas operaterja, možnost napake in tveganje za izgubo reference. Kadar dodatna os omogoči obdelavo z več strani enim vpetju, se prihrani minute na kos. Pri manjših in srednjih serijah je to pogosto odločilno.

Drugi vir prihranka je hitrejše indeksiranje. Pri kosih z veliko premiki med položaji, na primer med 0 in 90 stopinjami, hitra rotacija neposredno skrajša cikel. Pri nekaterih kompaktnih rešitvah pL LEHMANN je cikel 90-stopinjskega zasuka okoli 0,4 sekunde [3].

Tretji vir koristi je boljša dostopnost orodja. Ker je obdelovanec pravilno orientiran, je pogosto možno uporabiti krajše orodje, zmanjšati vibracije in izboljšati kakovost površine. To pomeni manj dodelav in stabilnejši proces.

Pomembna je tudi fleksibilnost. Dodatna os ni nujno trajno rezervirana samo za en izdelek. Pri modularno zasnovanih sistemih jo je mogoče odstraniti, zamenjati konfiguracijo vpenjanja ali nadgraditi na drugo različico. Nadgradnja zato ne prinese samo tehnološke možnosti, ampak tudi boljše izrabo osnovnega sredstva skozi daljše časovno obdobje [2].

### 4 PRIMER IZ PRAKSE: OBDELAVA SCROLL KOMPONENT

Dober primer povezave med natančnostjo in ekonomiko je obdelava scroll komponent za kompresorje in toplotne črpalke (slika 2). Pri teh izdelkih so zahteve glede oblike in pravokotnosti spirale zelo stroge, tolerance pa lahko padejo pod 20 mikrometrov, pri čemer je zahtevana tudi kakovost površine pod Rz 10 mikrometrov [2]. Klasičen pristop uporablja 4- ali 5-osne obdelovalne centre, kjer se spirala generira s krožno interpolacijo linearnih osi. Slabost takega postopka je prehod skozi obratne točke, kjer se spremeni smer gibanja osi in lahko nastanejo geometrijska odstopanja.

pL LEHMANN je za takšne primere razvil postopek »rotomilling«, pri katerem na standardnem 3-osnem vertikalnem stroju interpolirata linearna X-os in rotacijska os precizne mize. S tem se izognejo prehodu kvadranta, proces je boljše vodljiv, oblika spirale pa stabilnejša po celotni višini [1]. V primerjalnih meritvah je bil pri klasično interpoliranem kosu zaznan približno 8 mikrometrski stopničast prehod, pri »rotomilling« postopku pa je komponenta ostala brez takšnega prehoda. To je dober primer, da nižja investicija ne pomeni nujno kompromisa pri kakovosti.



Slika 2: Obdelava scroll-komponent

Za investicijsko presojo je pomembno, da se časi fine obdelave v primerjavi niso bistveno razlikovali, razlika pa je bila izrazita pri vložku in prilagodljivosti [1]. Če podjetje z enakim proračunom namesto enega zelo dragega centra postavi več standardnih strojev z dodanimi rotacijskimi mizami, lahko pridobi večjo skupno kapaciteto, lažje planiranje in manjše tveganje ob zastoju posameznega stroja.

## 5 ZAKAJ PRAV pL LEHMANN PRI NADGRADNJI

Pri nadgradnji ni dovolj, da je rotacijska miza samo hitra. Biti mora tudi dovolj natančna, toga in zanesljiva, da se ekonomski izračun potrdi v proizvodnji. pL LEHMANN gradi svojo prednost na kompaktni zasnovi, visoki stopnji standardizacije in modularnosti. Na voljo so zobniške izvedbe in izvedbe s direktnim pogonom, številne možnosti vpenjanja ter združljivost z velikim številom vpenjalnih sistemov popularnih blagovnih znamk.



Slika 3: Nagibno-rotacijska miza pL LEHMANN

Za stabilno kakovost so pomembni tudi konstrukcijski detajli: prednapet pogon PGD brez zračnosti, zasnova ležajev za visoko togost, notranja hidravlična zavora in zaščita po standardu IP67 [3]. Z ekonomskega vidika to pomeni manj ne planiranih zastojev, bolj konstantno natančnost skozi dolgo obdobje in višjo predvidljivost procesa. Rotacijske mize so pripravljene tudi na avtomatizacijo in digitalni nadzor, kar olajša vzdrževanje in postopno rast proizvodnje [3].

Pomembni so tudi kratki časi menjave konfiguracije. Proizvajalec navaja, da so spremembe med posameznimi izvedbami lahko izvedljive v približno 10 do 15 minutah, kar v praksi pomeni, da dodatna os ne zmanjšuje prilagodljivosti stroja, temveč jo povečuje. To potrjujejo tudi primeri uporabe v industriji.

## 6 SKLEP

Ko podjetje išče pot do večje produktivnosti, ni najpomembnejše vprašanje, ali je 5-osna obdelava tehnološko privlačna, temveč ali bo investicija res ustvarila dovolj hitro in zanesljivo finančno korist. V mnogih primerih je nadgradnja 3-osnega vertikalnega CNC stroja s 4. ali 5. osjo racionalnejša odločitev. Prinese manj nastavitev, več obdelave v enem vpetju, nižji začetni vložek, boljšo prilagodljivost in hitrejši ROI.

Zato je smiselno nadgradnjo obravnavati ne kot kompromis, temveč kot strateško investicijo: kot način, kako iz obstoječe opreme ali cenejše nove opreme dobiti več, z manj tveganja in z boljšim nadzorom nad denarnim tokom. Kadar je projekt tehnično pravilno zasnovan in podprt z ustrezno vpenjalno ter integracijsko rešitvijo, je povrnitev investicije lahko realno dosegljiva tudi v manj kot devetih mesecih [4].

Viri:

- [1] Peter Lehmann AG: Efficient machining alternative improves efficiency of scroll compressors, Swiss Rotary Table Technology Newsletter, december 2024.
- [2] Peter Lehmann AG: From the first inquiry to the perfect solution: Pilatus Aircraft trusts pL LEHMANN, 10. 3. 2026, Novost na spletni strani.
- [3] Peter Lehmann AG: CNC Rotary Tables – Edition 5. Main catalog, 2026
- [4] Peter Lehmann AG: Invest Guide - 2022-07

## AVTOMATSKA IZDELAVA PONUDBE: KAKO LAHKO SLOVENSKI PONUDNIKI CNC STORITEV V TRENUTNIH RAZMERAH OSTANEJO KONKURENČNI

**Andrej POTREBUJES**  
Spanflug Technologies GmbH

### IZVLEČEK

*Ponudniki CNC storitev se soočajo z naraščajočimi zahtevami trga, kot so pomanjkanje usposobljene delovne sile, višja pričakovanja strank in potreba po hitri pripravi ponudb. Rešitev Spanflug MAKE omogoča avtomatsko izdelavo ponudb z analizo CAD modelov in tehničnih risb ter samodejnim izračunom časov obdelave in stroškov. S tem podjetjem omogoča hitrejšo in bolj zanesljivo pripravo ponudb ter prispeva k večji učinkovitosti in konkurenčnosti.*

### 1 IZZIVI PONUDNIKOV CNC STORITEV

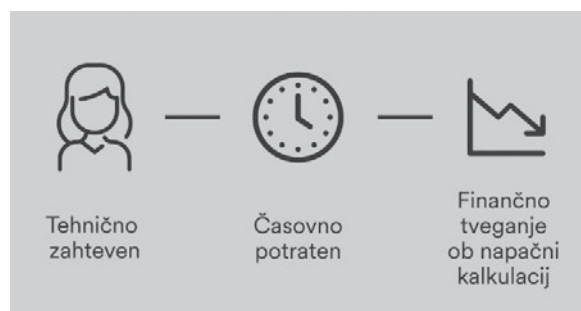
Trenutno se Slovenski ponudniki CNC storitev soočajo s situacijo, katera ne dopušča neučinkovitosti. Usposobljene delovne sile še vedno primanjkuje, pričakovanja strank naraščajo, pritisk, da je treba oddati konkurenčne ponudbe hitreje kot kadarkoli prej, pa ni popustil.

V zadnjem letu so se hitri, avtomatizirani in vse bolj z umetno inteligenco podprti procesi uveljavili skozi celoten postopek industrijske proizvodnje. Izkušnje pa kažejo, da je administrativne procese pogosto lažje avtomatizirati kot tiste neposredno na proizvodnih tleh, pri čemer so lahko prihranki pri učinkovitosti zelo veliki. »Zato vedno več ponudnikov CNC storitev pričinja z avtomatizacijo področji izdelave ponudb in tehnološke priprave dela,« opaža, predstavnik Spanflug Technologies Andrej Potrebujes, ter dodaja. »Učinek je takojšen, napor in začetna investicija pa sta razmeroma nizka.«

### 2 IZDELAVA PONUDB V NEKAJ MINUTAH NAMESTO URAH

Priprava ponudb je ena najbolj časovno potratnih nalog v delavnem procesu še posebej ker zahteva izkušenega strokovnjaka, hkrati pa tudi ena najpomembnejših. To še posebej velja pri povpraševanjih z več obdelovanci in obdelovancih, ki niso del osnovne specializacije podjetja, kjer prenizka cena neposredno znižuje marže, previsoka pa stranke odpelje drugam.

Ročni vnos podatkov, kalkulacije v preglednicah in CAM simulacije lahko za posamezno povpraševanje zlahka vzamejo več ur ali celo dni.



Slika 1<sup>1</sup>: Izzivi za ponudnike CNC storitev, pri kalkulaciji obdelovancev za struženje in rezkanje

Avtomatska izdelava ponudb to zgodbo temeljno spremeni. Z avtomatsko analizo CAD datotek in tehničnih risb, rešitve, kot je Spanflug MAKE, preverijo obdelovalnost, poiščejo ustrezne surovce/materialne, potrebne stroje in orodja ter izračunajo čase obdelave in stroške v minutah namesto urah. Izdelava PDF ponudbe, pripravljene za pošiljanje, je le še nekaj klikov stran. Uporabniki Spanflug MAKE poročajo o prihranku časa do 90 %, kar sprosti kapacitete za obdelavo več povpraševanj brez dodatnega zaposlovanja, hkrati pa izboljša odzivnost in storitve za stranke.

Kot opaža Žiga Mandelj- Lastnik in direktor podjetja M-Arms d.o.o. »V proizvodnji zmaguje hitrost, pri izdelavi ponudb potrošimo precej časa. Če to zmanjšamo, sprostimo kapacitete in ta čas lahko usmerimo v razvoj novih produktov.«

### 3 PODPORA Z UMETNO INTELIGENCO OB POMANJKANJU IZKUŠENIH KALKULANTOV

Mnoge proizvodnje se močno zanašajo na majhno število izkušenih kalkulantov. Ko ti niso na voljo ali so preobremenjeni, se priprava ponudb upočasni in priložnosti se izgubijo. Takšna odvisnost postaja vedno bolj tvegana, saj se pomanjkanje kadrov nadaljuje.

Avtomatska izdelava ponudb uporablja strojno inteligenco, podprto z UI, hkrati pa podjetjem omogoča, da v programsko opremo vgradijo lastno znanje o obdelavi in ga delijo s celotno ekipo. Manj izkušeni sodelavci lahko zanesljivo pripravljajo ponudbe, medtem ko se izkušeni strokovnjaki osredotočajo na zahtevnejše dele, odnose s strankami in strateške odločitve.

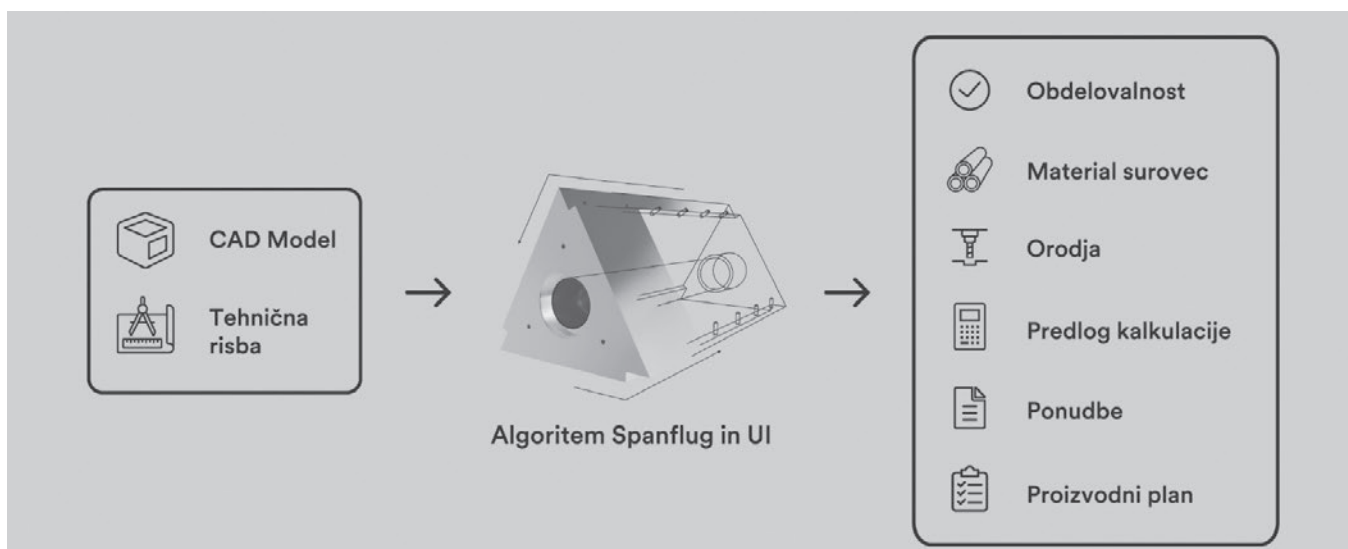
Pomembno je, da avtomatizacija ne odvzame nadzora — vsi rezultati izračunov ostanejo pregledni in nastavljivi, kar pomeni, da strokovno znanje podpira, ne pa nadomešča.

### 4 MANJŠE TVEGANJE PRI DOLOČANJU CEN ZA KOMPLEKSNE IN NOVE DELE

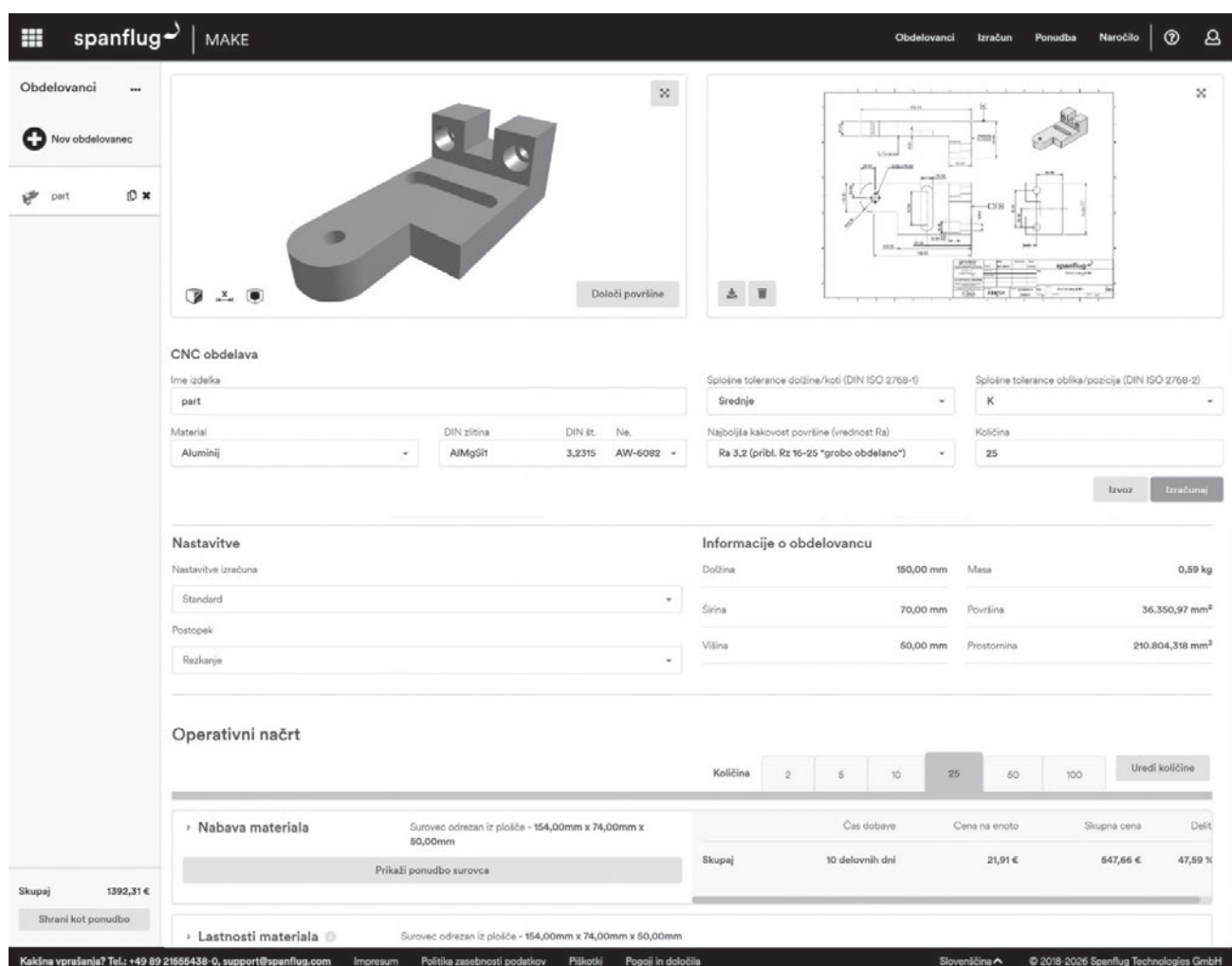
Pri ročni pripravi ponudb se metode izračunov in predpostavke pogosto razlikujejo od osebe do osebe. Takšna nedoslednost lahko vodi v prenizko ovrednotene posle, erozijo marž ali ponudbe, ki preprosto niso dovolj konkurenčne — zlasti pri nepoznanih ali tehnično zahtevnih kosih.

Avtomatska izdelava ponudb uvede dosledno, ponovljivo logiko izračuna. Časi izdelave in stroški se vsakič izračunajo z objektivnim algoritmom, kar zmanjšuje negotovost pri cenah in poslovno tveganje. To je še posebej dragoceno pri kompleksnih delih, večjih povpraševanjih ali pri obdelovancih zunaj jedrnih obdelovalnih sposobnosti podjetja, kjer preglednice in ocene na podlagi izkušenj hitro dosežejo svoje meje.

Spanflug ocenjuje delo, čas in stroške klasične ročne priprave ponudb v primerjavi z avtomatizirano pripravo. Rezultati kažejo: bolj kot je del kompleksen, večji so prihranki časa in večja je učinkovitost.



Slika. 2: Vhodni in izhodni podatki pri softvearu Spanflug



Slika 3<sup>3</sup>: Uporabniški vmesnik Spanflug MAKE je na voljo tako v Slovenščini kot v mnogih drugih jezikih

## 5 HITREJŠI ODZIVNI ČASI IN NIŽJI STROŠEK PRIPRAVE PONUDB

Gledano na trenutne razmere na trgu je hitrost pogosto odločilna. Stranke pričakujejo hitre, jasne odgovore, če ponudba pride prepozno, bodo šle drugam. Z avtomatsko izdelavo ponudb Spanflug MAKE pokrije celoten proces — od analize CAD-a do PDF ponudbe, pripravljene za pošiljanje. To ponudnikom CNC storitev omogoča hitrejšo odzive, boljši izplen ob manjši obremenitvi ter krepitev konkurenčnosti proizvodnje v Sloveniji.

Vendar strošek izdelave ponudb ni izziv le pri velikih ali kompleksnih povpraševanjih. Številni ponudniki CNC storitev se soočajo z velikim volumnom povpraševanj za majhne in srednje serije, pri čemer je razmerje med naročili in povpraševanji pogosto precej pod 30 %. V takšnih primerih avtomatski izračuni in možnost priprave

PDF ponudb na klik bistveno zmanjšajo strošek na ponudbo ter zmanjšujejo izgubo dragocenejšega časa.

## 6 UČINKOVITOST TUDI IZVEN KALKULACIJE: STROJNA INTELIGENCA

Pri Spanflugu, tehnologija v ozadju, prinaša veliko več kot zgolj izračun. Z združevanjem analize obdelovanca, podprte z UI in realnimi podatki o strojih, rezalnih orodjih in zalogi materialov programska oprema Spanflug izračuna celotno zaporedje izdelave.

Programska oprema se razvija tudi v smeri »Strojne inteligence« ter podpira tudi pripravo dela in pomaga delavnicam odkriti nove, bolj ekonomične načine obdelave kosov po meri — v le nekaj klikih.

## **7 PRAKTIČNA PREDNOST ZA PONUDNIKE CNC STORITEV V SLOVENIJI**

Avtomatizacija izdelave ponudb ne bo rešila vseh izzivov, s katerimi se soočajo ponudniki CNC storitev v Sloveniji. Toda v času, ko je dragocena vsaka strokovna ura, ponuja realen, hiter in učinkovit način za povečanje učinkovitosti brez večjih investicij ali motenj.

Kot pravi Andrej Potrebuješ, regionalni direktor prodaje podjetja Spanflug: »V času, ko je vsaka ponudba pomembna, je potrebno biti pozoren na vse, kar zmanjšuje stres, namesto da ga povečuje.«

Viri:

- [1] Izzivi za ponudnike CNC storitev, pri kalkulaciji obdelovancev za struženje in rezkanje. Vir: Spanflug.
- [2] Glede na 3D model in tehnično risbo softvare določi optimalno strategijo obdelave in poda predlog kalkulacije ki je osnova za izdelavo ponudbe. Vir: Spanflug.
- [2] Ponudnik v trenutku pridobi detajlni predlog kalkulacije proizvodni plan z vključenimi obdelovalnimi stroji, orodji, surovci in naknadnimi obdelavami. Prav tako poda čas za programiranje, vpenjanje in obdelavo. Vir: Spanflug:.

## FUNKCIONALNA IN PROSTORSKA OPTIMIZACIJA POGONOV

Peter SKOPEC  
ControlTech d.o.o.

### IZVLEČEK

V sodobnem industrijskem okolju se pogosto srečujemo z nadgradnjami oz. funkcionalnimi optimizacijami pogonskih sistemov. Prispevek se osredotoča na kompaktne rešitve za upravljanje motorjev. Predstavljene bodo napredne rešitve za t.i. direkten zagon motorja (Direct-On-line) ter rešitve z distribuiranimi enotami za frekvenčno krmiljenje motorjev. Z uporabo predstavljenih rešitev potrebujete bistveno manj komponent in kablov, za integracijo porabite manj časa in prostora, dosežete pomembne energetske prihranke, zagotovite pa daljšo življenjsko dobo opreme in varnejše vzdrževanje.

### 1 UVOD

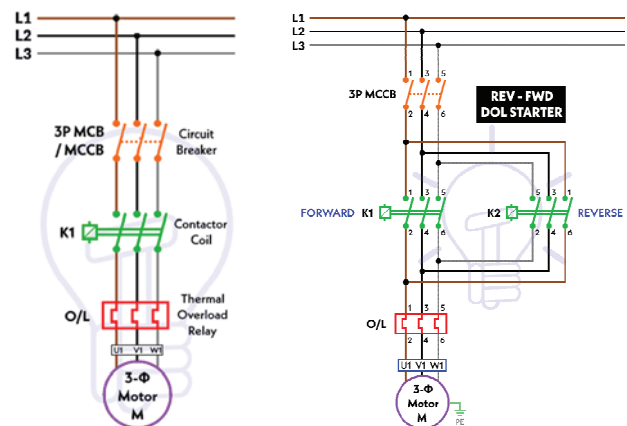
Pri izdelavi ali funkcionalni nadgradnji strojev se proizvajalci pogosto srečujejo z izzivom, kako najbolj učinkovito, s čim manj komponentami in čim bolj kompaktno upravljati čim večje število pogonov. Pri tem s pogoni mislimo običajne, enostavne kontaktorske DOL (Direct-On-Line) zagona ali pa pogone s frekvenčno regulacijo.

Novi in nadgrajeni stroji morajo biti izdelani skladno s standardi. Nova Uredba o strojih EU 2023/1230, ki bo začela veljati 20.1.2027, sicer na področje varnosti strojev ne uvaja bistvenih sprememb, ključne spremembe pa bodo na področju kibernetske varnosti. Kljub temu proizvajalci strojev za upravljanje pogonov vedno pogosteje uporabljajo naprave, ki omogočajo varnostne funkcije, npr. varni odklop motorja Safe Torque-Off (STO). Za doseganje te funkcionalnosti lahko uporabijo različne rešitve.

### 2 KONTAKTORSKI ZAGANJALNIKI

Običajni kontaktorski zaganjalniki so sestavljeni iz različnih komponent: motorsko zaščitno stikalo, kontaktor ali kontaktorska kombinacija Levo-Desno, zaščita pred preobremenitvijo,...V kolikor je zahtevana tudi varnostna funkcija STO, se število komponent še poveča. V nadaljevanju predstavljeni kompaktni zaganjalniki M100 v kompaktnem ohišju združujejo vse naštetje komponente, poleg tega pa (varnostne izvedbe) omogočajo tudi varni odklop

motorja, za aplikacije, ki zahtevajo varnostni nivo vse do PLe.



Slika 1: Shema običajnega kontaktorskega zaganjalnika (ena smer in naprej-nazaj)

### 3 MOTORSKI ZAGANJALNIKI M100

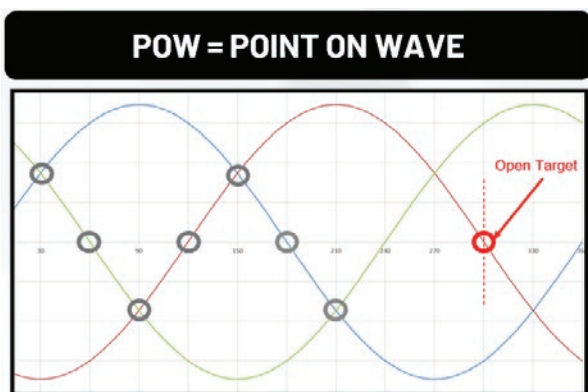
V primerjavi z običajnimi kontaktorskimi zaganjalniki so zaganjalniki M100 bistveno bolj kompaktni in napredni. Osnova je podobna - trije ločeni močnostni kontakti (za vsako fazo), ki jih upravlja napredna elektronika.

Zaganjalniki za motorje od 0.75A do 9A so v ohišju širine 22.5mm so, za motorje od 4.6A do 23A pa v ohišju širine 45mm (širina običajnega kontaktorja).



Slika 2: Dve velikosti zaganjalnikov M100

Kompaktno ohišje je omogočeno zaradi napredne, patentirane tehnologije »Point-on-wave« (v nadaljevanju POW). Ta tehnologija poskrbi, da se vklop in izklop mehanskega kontakta za posamezno fazo zgodi natančno v trenutku, ko je kontakt najmanj obremenjen (sinusni signal prehaja skozi točko »0«).



Slika 3: Patentirana tehnologija »Point-on-wave«

Tehnologija POW poskrbi, da npr. pri izklopu motorja ne prihaja do iskrenja med kontakti, zato je obraba kontaktov bistveno manjša, s tem pa se življenjska doba zagonov močno podaljša (predvidoma 1.000.000 preklpov). Poleg tega POW tehnologija zagotavlja minimalno termično obremenitev, zato lahko zaganjalnike M100 namestite na DIN letev brez vmesnega prostora pri temperaturi okolice vse do 55°C. Izrazita prednost je tudi to, da s preklpom v točki »0« pomembno zmanjšamo nivo EMC motenj.

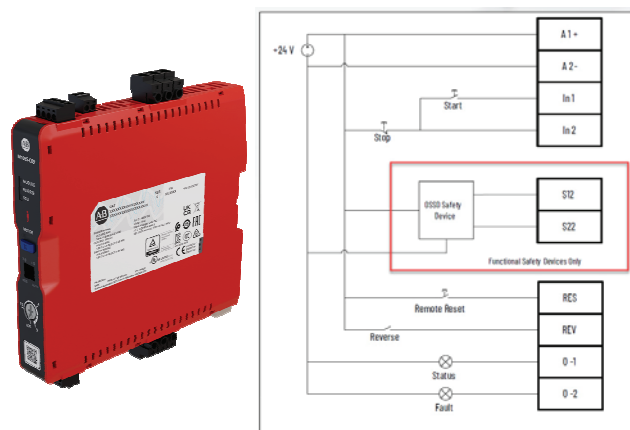
Zaganjalnike M100 poleg kompaktnosti odlikuje tudi več-funkcionalnost, saj poleg DOL zagona omogočajo tudi naslednje napredne funkcije:

- Možnost priključitve 3F in 1F asinhronih motorjev do 23A (kategorija AC-3e)
- Zagon v eno (DOL) ali dve smeri (Reversing) – velja za 3F motorje
- 24VDC krmiljenje
- Varni odklop motorja, vse do PLe
- Dodatna zaščita tiskanega vezja (conformal coating) za kemično obremenjena okolja

Poleg naprednih tehnoloških funkcij imajo zaganjalniki M100 vgrajene tudi dodatne **zaščitne** funkcije:

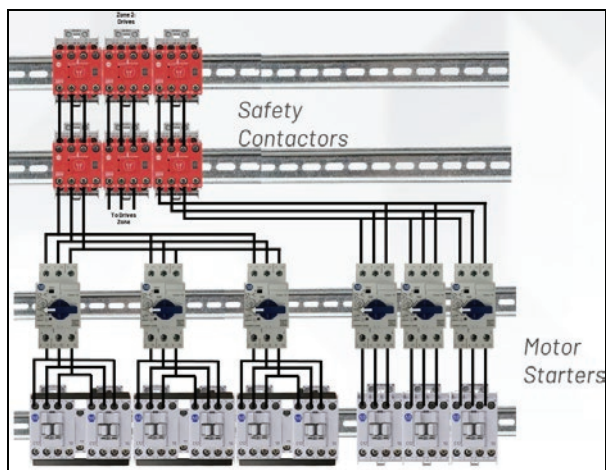
- Izpad napajalne faze
- Neenakost napetosti vhodnih faz
- Integrirana elektronska zaščita pred preobremenitvijo (Class 10)
- Ročni ali avtomatski reset preobremenitve

Funkcionalnost, ki jo želimo izpostaviti, pa je možnost varnega odklopa motorja (STO). Zaganjalniki M100 v rdečem ohišju zagotavljajo varen odklop motorja vse do nivoja PLe (za doseganje **PLd** lahko varnostno gobico večemo direktno na M100, za doseganje **PLe** pa potrebujemo varnostni rele).



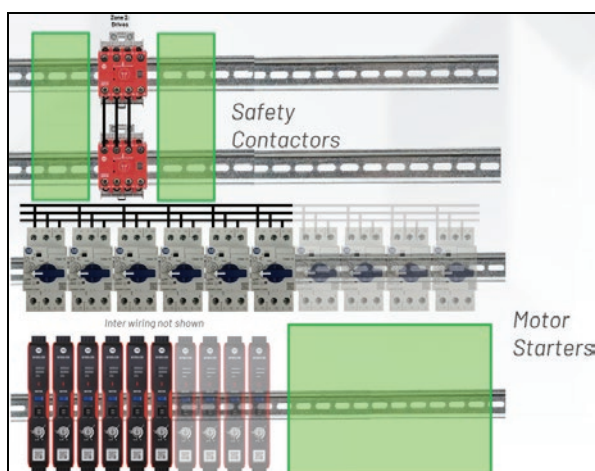
Slika 4: Vezava zaganjalnika M100 za STO

Z uporabo te funkcionalnosti bistveno zmanjšamo število potrebnih komponent za doseganje varnostnih funkcij. Za primerjavo predstavljamo stikalno omaro za upravljanje 6 motorjev (3x levo-desno, 3x ena smer):



Slika 5: Običajna stikalna omara za 6 motorjev

Z zamenjavo običajnih kontaktorjev in kontaktorskih kombinacij levo-desno močno zmanjšamo število potrebnih komponent, s tem pa tudi potreben prostor v stikalni omari:



Slika 6: Stikalna omara za 6 motorjev z uporabo kompaktnih zaganjalnikov M100.

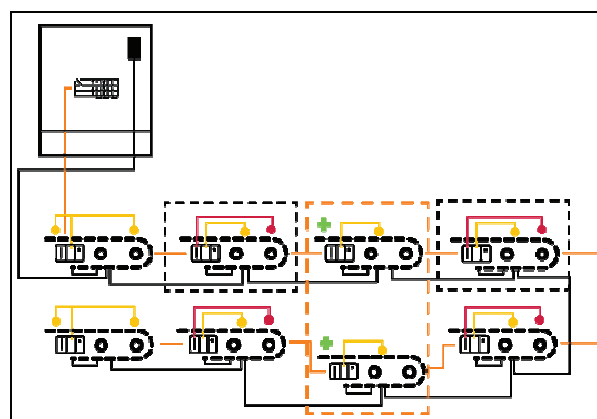
Z uporabo zaganjalnikov M100 namesto običajnih kontaktorjev znižamo stroške, prihranimo prostor v stikalni omari, skrajšamo postopek ožičenja, zagotovimo boljšo diagnostiko, manj segrevanja zraka v omari in s tem manj odvečne toplote.

#### 4 MOTORJI Z INTEGRIRANIMI FREKVENČNIMI PRETVORNIKI

V prvem delu predstavljeni zaganjalniki M100 so idealna izbira za aplikacije s konstantno

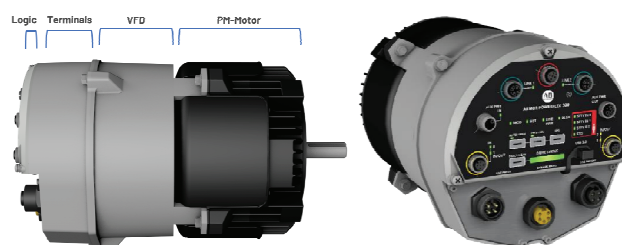
hitrostjo, določene aplikacije pa zahtevajo spreminjanje hitrosti vrtenja motorja in/ali omejitve navora. V tem primeru je potrebno frekvenčno krmiljenje motorjev.

Tako pri nadgradnji strojev kot tudi pri gradnji novih strojev se vedno srečujemo s pomanjkanjem prostora v krmilni omari. Frekvenčni pretvorniki so precej večji od zaganjalnikov M100 in generirajo več toplote, zato je toliko bolj smiselno, če lahko frekvenčni pretvornik namestimo zunaj stikalne omare in tako odvečno toploto odvajamo direktno v prostor. Tovrstnim konceptom pogosto rečemo »decentralizirani«, saj v stikalni omari ostane le krmilni sistem in krmilne komponente, močnostne elemente pa namestimo in razporedimo po stroju.



Slika 7: Decentralizirana arhitektura

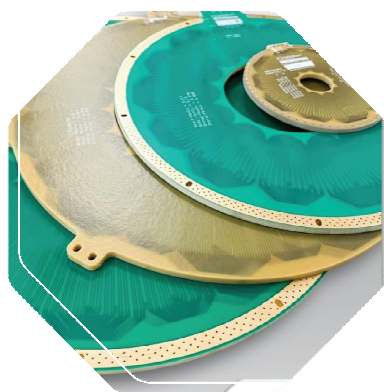
Predstavljamo vam integriran pogonski sklop – visoko-učinkovit asinhronski motor in zmogljiv frekvenčni pretvornik v enem ohišju.



Slika 8: Integriran pogonski sklop – Armor PowerFlex 330

Posebnost tega pogonskega sklopa je kombinacija patentirane izvedbe statorja in naprednega frekvenčnega pretvornika. Stator

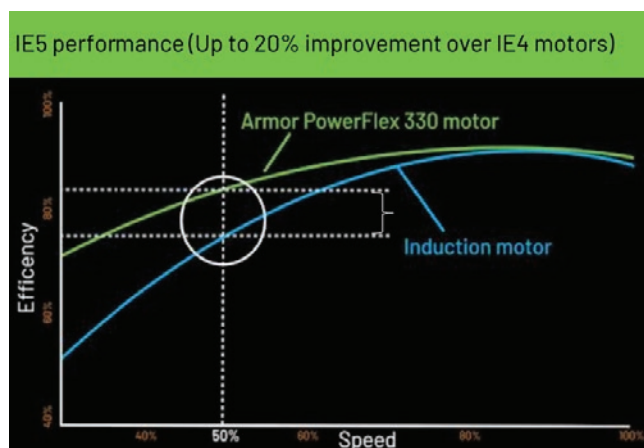
pogonskega sklopa Armor PowerFlex 330 je izdelan iz lamel, posebnih ploščic, ki so 2 do 3x lažje od običajne izvedbe statorja, omogočajo pa 2 do 3x večjo gostoto statorskega toka. Za izdelavo lamelnega statorja se potrebuje do 66% manj bakra, stator pa boljše odvaja odvečno temperaturo in je bolj zanesljiv.



Slika 9: Posebna, patentirana lamelna izvedba statorja

Primerjava tovrstnih pogonskih sklopov z običajnimi 3-faznimi asinhronskimi motorji izpostavi mnoge prednosti. Med najbolj pomembnimi so:

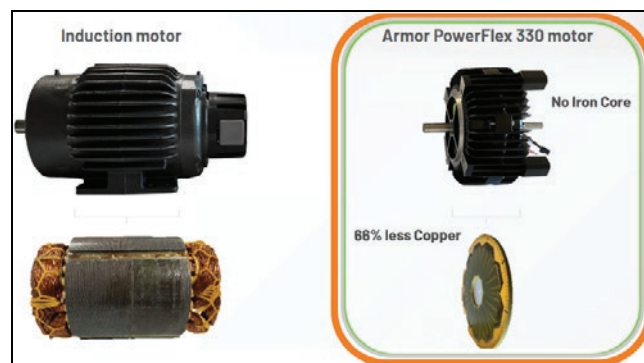
- Manjše dimenzije in manjša teža sklopa
- Boljši izkoristek (**presega** standard IE5 – ultra-premium izkoristek IEC 60034-30-1)



Slika 10: Izkoristek pogonskega sklopa Armor PowerFlex 330 v primerjavi z asinhronskim motorjem IE4

Ključne prednosti so tudi:

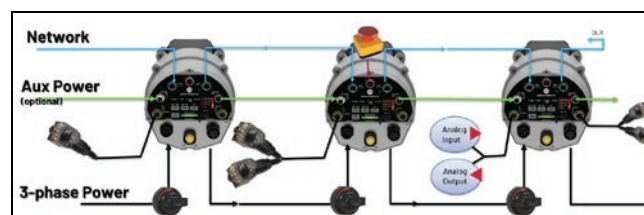
- Vgradnja neposredno na stroj – ne potrebujemo prostora v stikalni omari
- Ohišje z zaščito IP54
- Odvajanje odvečne toplote v okoliški prostor



Slika 11: Primerjava asinhronskega motorja in pogonskega sklopa Armor PowerFlex 330

Izpostaviti želimo napredne funkcije krmilnega dela:

- Zmogljiv frekvenčni pretvornik
- 4 nastavljivi vhodi – digitalni / analogni
- Dvo-kanalni varnostni vhod
- Možnost integracije v krmilni sistem
- Safe Torque-Off do SIL2 PLd, Cat 3 (ožičena ali mrežna izvedba)
- 2x GB Ethernet port s podporo za linearno, zvezdasto in obročno topologijo
- Varnostna komunikacija CIP Safety
- Kodirana komunikacija CIP Security



Slika 12: Možnost integracije pogonskih sklopov Armor PowerFlex 330 v krmilni sistem

### 3 ZAKLJUČEK

V članku smo vam predstavili sodobne in napredne rešitve za izdelavo novih ali funkcionalno nadgradnjo obstoječih strojev. Pri DOL zagonih smo posebej poudarili patentirano tehnologijo Point-On-Wave, ki omogoča vklop/izklop posamezne faze natančno v trenutku, ko sinusni signal prehaja skozi točko »0«. Tako delovanje zagotavlja dolgo življenjsko dobo zaganjalnikov, manj toplotnih izgub, manj EMC motenj, itd.

V drugem delu pa smo vam predstavili pogonski sklop Armor PowerFlex 330, ki je kombinacija zmogljivega frekvenčnega pretvornika in posebnega motorja s patentiranim, lamelnim statorjem. Ta kombinacija omogoča majhne dimenzije in težo, pri tem pa zagotavlja nadpovprečno dober izkoristek in zanesljivo, dolgoročno rešitev.

Viri:

- [1] Spletna stran:  
<https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/motor-control/m100-electronic-motor-starter.html>
- [2] Spletna stran:  
<https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/vfds-variable-frequency-drives/on-machine-vfd.html>
- [3] Interna dokumentacija na spletni strani  
<https://ra.seismic.com/>
- [4] Informacije, zbrane na RockwellAutomation dogodku ROKLive EMEA, Madrid, marec 2026



## PAMETNA PROIZVODNJA Z INTEGRACIJO SENZORJEV V INDUSTRIJSKI PLAZEMSKI REAKTOR

**Žiga GOSAR**  
ELVEZ, d.o.o.

### IZVLEČEK

*Projekt SmartPlasma se osredotoča na nadgradnjo industrijskega plazemskega reaktorja s ciljem avtomatizacije procesnih parametrov v skladu s standardi Industrije 4.0. Obstoječi reaktor s prostornino 5 m<sup>3</sup> omogoča nanos zaščitnih premazov na plastične izdelke, vendar se ključni parametri, kot so vakuum, sestava atmosfere in moč plazme, trenutno nastavljajo ročno. Projekt vključuje integracijo fotonjskih senzorjev za sprotno spremljanje plazemskih parametrov ter uvedbo sistema za avtomatsko prilagajanje procesnih nastavitvev. Senzorji so omogočali oddaljeni nadzor in shranjevanje podatkov za dolgoročno sledljivost. Pričakujemo zmanjšanje izmetnih izdelkov in izboljšanje kakovosti proizvodnje.*

### 1 UVOD

Sodobna industrijska proizvodnja se vse bolj usmerja v digitalizacijo, avtomatizacijo in uvajanje konceptov Industrije 4.0, kjer imajo ključno vlogo pametni sistemi za nadzor in optimizacijo procesov. Na področju plazemskega nanašanja tankih plasti (PECVD) ostaja velik izziv zagotavljanje stabilnih in ponovljivih procesnih pogojev, saj so ključni parametri, kot so tlak, sestava plinske mešanice in moč plazme, pogosto odvisni od ročnih nastavitvev operaterja. Takšen pristop lahko vodi do nehomogenih nanosov, večje porabe materialov ter povečanega deleža izmeta.

Projekt SmartPlasma naslavlja te izzive z nadgradnjo obstoječega industrijskega plazemskega reaktorja prostornine 5 m<sup>3</sup>, ki se uporablja za nanos zaščitnih prevlek na plastične izdelke. Osrednji cilj projekta je integracija naprednih fotonjskih senzorjev za sprotno spremljanje plazemskih parametrov ter uvedba sistema za avtomatsko prilagajanje procesnih nastavitvev. S tem želimo zagotoviti boljšo stabilnost procesa, večjo homogenost nanosov ter zmanjšanje vpliva človeškega faktorja.

Poleg tega sistem omogoča oddaljeni nadzor nad procesom ter shranjevanje podatkov, kar prispeva k sledljivosti in analizi proizvodnje na dolgi rok. Tak pristop odpira možnosti za nadaljnjo optimizacijo procesov in uvajanje

naprednih algoritmov za podporo odločanju. Pričakovani rezultati vključujejo zmanjšanje deleža izmeta, izboljšanje kakovosti izdelkov ter učinkovitejšo rabo energije in materialov, kar pomembno prispeva k trajnostni in pametni proizvodnji.

### 2 OPIS PRIPRAVE IN POSTOPKA DELA

Sistem združuje strojno in programsko opremo za doseganje stabilnega, ponovljivega in avtomatiziranega procesa plazemskega nanašanja tankih plasti. Integracija naprednih senzorjev in digitalnih orodij omogoča sprotno spremljanje ključnih parametrov ter njihovo prilagajanje v realnem času, kar predstavlja pomemben korak k pametni proizvodnji [1].

#### 2.1 Strojna oprema

Osnova sistema je industrijski plazemski reaktor prostornine 5 m<sup>3</sup>, ki deluje na principu nizkotlačne plazme in se uporablja za nanos zaščitnih prevlek na plastične izdelke. Plazma se generira z izmeničnim generatorjem moči do 8 kW, pri čemer se kot prekursor uporablja HMDSO. Sistem vključuje vakuumski sklop z večstopenjskim črpanjem, ki omogoča doseganje delovnih tlakov v območju nekaj Pa.

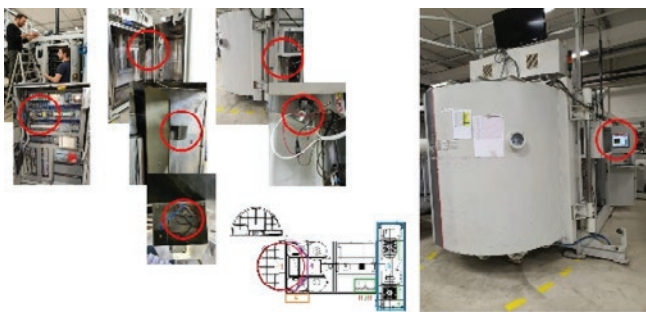


Slika 1: Stroj za visoko vakuumsko metalizacijo, uporabljen za poskus

Za spremljanje procesa so v reaktor integrirani fotonski senzori. Optična emisijska spektroskopija (OES) omogoča analizo plazemskih vrst in spremljanje intenzitete značilnih spektralnih linij, kot je vodikova H $\alpha$  linija pri 656 nm, ki je povezana z gostoto vzbujenih delcev [2]. Optični sistem je nameščen neposredno v reaktorju, kar omogoča krajše integracijske čase in boljšo občutljivost meritev.



Slika 2: Sonda za merjenje radikalov in optična sonda za merjenje intenzivnosti fotonov



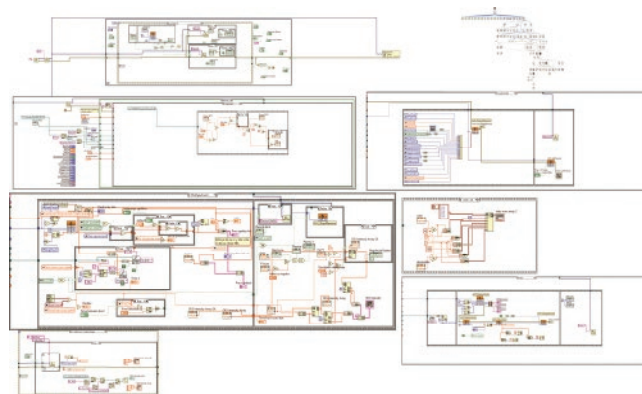
Slika 3: Predelava stroja za avtomatizacijo procesa plazemske polimerizacije

Dodatno je v sistem vgrajen optični vlakenski senzor za merjenje debeline nanosa, ki deluje na principu Fabry–Perot interferometra. Ta omogoča visoko ločljivost meritev (pod 1 nm) ter izračun hitrosti nanašanja v realnem času. Kombinacija obeh merilnih metod omogoča celovit vpogled v dinamiko plazemskega procesa in potrjuje ugotovitve o nehomogenosti nanosov v industrijskih reaktorjih [1].

## 2.2 Programska oprema

Programsko okolje je razvito v programskem paketu LabVIEW in omogoča centralizirano upravljanje vseh merilnih in krmilnih komponent. Sistem vključuje module za zajem spektralnih podatkov, obdelavo signalov, izračun hitrosti nanašanja ter prikaz rezultatov v realnem času.

Ključna funkcionalnost programske opreme je implementacija zaprtolančnega (closed-loop) nadzora procesa. Na podlagi izmerjene intenzitete izbrane spektralne linije programska oprema samodejno prilagaja moč generatorja, s čimer ohranja stabilne procesne pogoje. Tak pristop zmanjšuje odvisnost od operaterja ter izboljšuje ponovljivost procesa, kar potrjujejo tudi sodobne raziskave na področju plazemskih procesov [2].



Slika 4: Del programske kode v LabVIEW

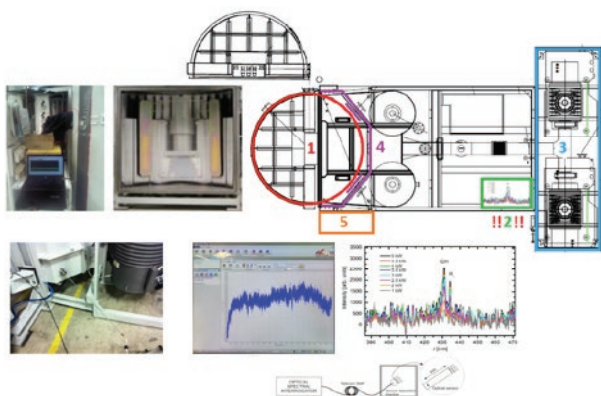
Sistem omogoča tudi shranjevanje podatkov in njihovo analizo, kar zagotavlja sledljivost procesa ter odpira možnosti za nadaljnjo optimizacijo z uporabo naprednih algoritmov.

### 3 METODOLOGIJA

Metodologija raziskave temelji na eksperimentalni validaciji integriranega sistema za sprotno spremljanje in regulacijo plazemskega procesa v industrijskem PECVD reaktorju. Postopek je zasnovan tako, da omogoča hkratno zajemanje optičnih signalov plazme, merjenje hitrosti nanašanja ter prilagajanje procesnih parametrov v zaprti zanki.

Eksperimenti so bili izvedeni v nizkotlačnem plazemskem reaktorju pri delovnem tlaku približno 5 Pa. Kot procesni plin je bil uporabljen kisik, medtem ko je bil kot prekursor za nanos tankih plasti uporabljen HMDSO. Pretoki plinov so bili nadzorovani z masnimi regulatorji pretoka, moč plazme pa je bila nastavljena v območju od 1 do 5 kW. Pred vsakim eksperimentom je bil reaktor evakuiran na osnovni tlak pod 1 Pa, s čimer so bili zagotovljeni ponovljivi začetni pogoji.

Za spremljanje plazemskih parametrov je bila uporabljena optična emisijska spektroskopija, pri kateri so bili zajeti spektri v območju od 200 do 1100 nm. Posebna pozornost je bila namenjena intenziteti izbranih spektralnih linij, predvsem vodikovi H $\alpha$  liniji, ki je bila uporabljena kot indikator aktivnosti plazme. Spektri so bili zajemani z integracijskim časom 5 s, pri čemer je bil pred začetkom meritev vedno zajet temni spekter za odpravo šuma.



Slika 5: Spremljanje procesnih parametrov in postavitve procesa plazemske polimerizacije

Sočasno je bila merjena debelina nanosa z optičnim vlakenskim senzorjem na osnovi

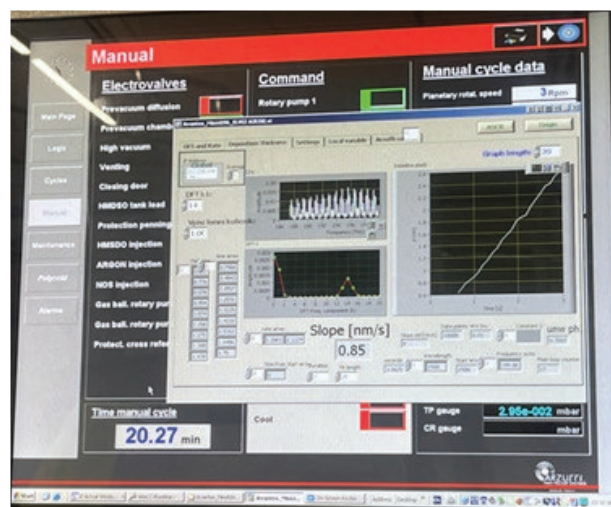
interferenčnega principa. Iz spremembe optične poti je bila določena trenutna debelina nanosa, hitrost nanašanja pa je bila izračunana z linearno regresijo časovne odvisnosti debeline.

Zajem podatkov je potekal kontinuirano, pri čemer so bili vsi procesni parametri (moč, tlak, intenziteta spektra, hitrost nanašanja) shranjeni za nadaljnjo analizo. Na osnovi teh podatkov je bil implementiran regulacijski algoritem, ki je v realnem času prilagajal moč generatorja glede na odstopanje izmerjene intenzitete od referenčne vrednosti.

Za obdelavo rezultatov so bile uporabljene statistične metode in analiza časovnih signalov. Poseben poudarek je bil na oceni stabilnosti procesa, homogenosti nanosov ter vplivu posameznih parametrov na končno kakovost prevleke.

### 3 REZULTATI

Rezultati raziskave potrjujejo, da integracija fotonih senzorjev in avtomatiziranega nadzornega sistema bistveno izboljša stabilnost in učinkovitost plazemskega procesa. Meritve optične emisijske spektroskopije so pokazale jasno odvisnost intenzitete spektralnih linij od procesnih parametrov, predvsem moči generatorja in pretoka HMDSO. Intenziteta vodikove H $\alpha$  linije pri 656 nm se je z naraščajočo močjo plazme povečevala, kar kaže na višjo stopnjo disociacije prekursorja in večjo gostoto vzbujenih delcev.



Slika 6: Spremljanje rasti zaščitne plasti

Pri nizkih pretokih prekursorja (do približno 50 sccm) je bilo opaženo zmanjšanje intenzitete emisijskih signalov, kar nakazuje na nepopolno vzpostavitev stabilnega plazemskega režima. Nad to mejo se je intenziteta postopno povečevala, kar sovпада z izboljšano kinetiko reakcij in večjo učinkovitostjo procesa nanašanja.

Sočasne meritve debeline nanosa so pokazale linearno odvisnost debeline od časa, kar omogoča zanesljiv izračun hitrosti nanašanja. Pri stabiliziranem procesu je bila dosežena konstantna hitrost nanašanja z odstopanjem manj kot 5 %, kar predstavlja pomembno izboljšavo v primerjavi z ročno vodenim procesom.

Z uvedbo zaprtoznančnega nadzora se je variabilnost procesa zmanjšala za več kot 30 %, kar se kaže v bolj enakomerni debelini nanosov. Sistem je uspešno zaznal tudi nestabilne režime, kot je pojav prašne plazme, in samodejno prilagodil moč generatorja, s čimer je preprečil nastanek napak na izdelkih.



Slika 7: Primerjava procesnih parametrov in prilagoditev glede na izmerjene vrednosti s prilagoditvijo moči plazme navzgor/zmanjša

Rezultati tako potrjujejo, da uporaba senzorjev in avtomatiziranega nadzora omogoča višjo kakovost, boljše ponovljivost ter zmanjšanje izmeta v industrijskem procesu.

## 4 ZAKLJUČEK

V prispevku je predstavljen sistem za pametno spremljanje in regulacijo plazemskega procesa, ki temelji na integraciji fotonih senzorjev in avtomatiziranega nadzora. Rezultati so pokazali, da je mogoče z uporabo optične emisijske spektroskopije in sprotnega merjenja debeline nanosa bistveno izboljšati stabilnost procesa, zmanjšati variabilnost ter zagotoviti bolj homogeno kakovost prevlek. Sistem omogoča učinkovito zaznavanje odstopanj in samodejno prilagajanje procesnih parametrov, kar vodi do zmanjšanja izmeta in boljše izrabe virov.

V prihodnje bo razvoj usmerjen v nadgradnjo sistema z naprednimi algoritmi strojnega učenja, ki bodo omogočili napovedovanje procesnih stanj in popolnoma avtonomno optimizacijo parametrov. Nadaljnje delo vključuje tudi razširitev sistema na druge vrste prekursorjev in industrijskih aplikacij ter integracijo v širše digitalne proizvodne platforme.

Viri:

- [1] GOSAR, Žiga, ĐONLAGIĆ, Denis, PEVEC, Simon, GERGIĆ, Bojan, MOZETIĆ, Miran, PRIMC, Gregor, VESEL, Alenka, ZAPLOTNIK, Rok: Distribution of the deposition rates in an industrial-size PECVD reactor using HMDSO precursor, *Coatings*, 2021, 11(10), 1218. Dostopno: <https://doi.org/10.3390/coatings11101218>
- [2] PRIMC, Gregor, ZAPLOTNIK, Rok, ĐONLAGIĆ, Denis, GOSAR, Žiga, MOZETIĆ, Miran: Uniformity of the deposition rates in an industrial plasma reactor for PECVD of PMDSO-like thin films, *APPC15 Conference Proceedings*, 2022. Dostopno: [https://www.appc15.org/online/online\\_oral.html](https://www.appc15.org/online/online_oral.html)

## Zahvala

To delo je bilo sofinancirano s strani Evropske komisije v okviru projekta H2020 AIRISE (GA št. 101092312).

## PREIZKUS ZMOGLJIVOSTI LASERSKEGA SLEDILNIKA Z METODO PRIMERJALNEGA MERJENJA

Luka ČAS, Bojan AČKO, Rok KLOBUČAR

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za tehnološke meritve

### IZVLEČEK

*V sodobnem industrijskem okolju, ki ga zaznamujejo visoke zahteve po dimenzijski natančnosti in kakovosti, postajajo prenosni koordinatni merilni sistemi nepogrešljivi. Med njimi ključno vlogo igrajo laserski sledilniki (ang. laser tracker, v nadaljevanju LS), ki zaradi svoje mobilnosti, velikega merilnega območja in visoke točnosti omogočajo meritve, ki presegajo zmožnosti klasičnih koordinatnih merilnih naprav. Njihova uporaba je danes ključna ne le pri kontroli velikogabaritnih izdelkov in kompleksnih sestavov, temveč tudi pri preciznem umerjanju obdelovalnih strojev, robotskih celic in postavljanju proizvodnih linij v prostor. Z vse večjo uporabo laserskih sledilnikov v industriji se povečuje tudi potreba po njihovem umerjanju, ki zaradi visokih zahtev predstavlja pomemben meroslovni izziv. V Sloveniji trenutno ni merilnega laboratorija, ki bi ponujal storitve umerjanja LS, zato je ta storitev večinoma še vedno v domeni proizvajalca. V prispevku predstavljamo rezultate eksperimentalnega preizkusa zmogljivosti LS, izvedenega na Fakulteti za strojništvo v Mariboru. Eksperiment smo izvedli z uporabo primerjalne metode merjenja, kjer smo LS primerjali z referenčnim etalonom - laserskim interferometrom. Meritve smo opravili na 13-metrski merilni progi, ki jo v laboratoriju primarno uporabljamo za umerjanje tračnih meril. Preizkus smo izvedli v štirih različnih postavitvah LS glede na merilno progo, s čimer smo dosegli različne kote zasuka merilne glave. Analizirali smo ponovljivost sistema, vpliv razdalje merjenja in vpliv rotacije merilne glave na merilni pogrešek ter njegovo skladnost z največjim dovoljenim odstopanjem (MPE), podanim s strani proizvajalca. Rezultati predstavljajo praktičen pristop k preizkušanju merilne zmogljivosti LS v laboratorijskem okolju ter osnovo za nadaljnji razvoj sledljivih postopkov preverjanja njihove točnosti.*

### 1 PODROČJE DELA IN PREDSTAVITEV PROBLEMA

Vse od izuma laserskega sledilnika v ameriškem inštitutu NIST v osemdesetih letih prejšnjega stoletja [1, 2] je do danes mogoče opaziti znaten porast njegove uporabe v različnih industrijskih in raziskovalnih okoljih. Zaradi visoke točnosti, velikega merilnega območja ter enostavne prenosljivosti je LS postal ključno orodje za merjenje velikih objektov in kompleksnih sestavov, kjer klasične metode merjenja niso zadostne [3].

V osnovi je LS sestavljen iz vrtljive merilne glave, ki s pomočjo laserskega žarka in dveh rotacijskih osi omogoča sledenje tarči oz. prenosljivemu retroreflektorju. Ko se laserski žarek odbije od retroreflektorja nazaj na merilno glavo, sistem na podlagi položaja kotnih enkoderjev na dveh rotacijskih oseh izračuna prostorski položaj merjene točke.

Laserski sledilniki so še posebej uporabni za natančno merjenje objektov, ki niso prenosljivi ali

pa so preprosto preveliki za koordinatne merilne naprave. Tipične aplikacije vključujejo merjenje sestavov v različnih tipih industrij, kot so letalska, gradbena in avtomobilska.

Z vse večjo uporabo laserskih sledilnikov v industriji se povečuje tudi potreba po njihovem umerjanju, ki pa zaradi visokih zahtev glede točnosti in sledljivosti predstavlja velik izziv. Eden glavnih izzivov pri kalibraciji LS je zagotovitev ustreznega referenčnega etalona, ki bi imel boljšo merilno negotovost kot sam LS, kar je na velikih razdaljah (LS so zmožni izvajati meritve tudi do 80 m) težko dosegljivo.

V Sloveniji trenutno ni merilnega laboratorija, ki bi ponujal storitve umerjanja LS, zato je ta storitev večinoma še vedno v domeni proizvajalca naprave. V primeru potrebe po umerjanju, ki je ključnega pomena za zagotavljanje kakovosti merilnih rezultatov, je tako potrebno napravo pošiljati proizvajalcu, kar je časovno zelo potratno, prav tako pa v tem času naprava ni na voljo za uporabo.

Zaradi slednjega se večina meroslovnih laboratorijev odloča za raziskave, v katerih želijo razviti lastne postopke za kalibracijo LS. Razvoj tovrstnih postopkov se trenutno usmerja v dve smeri:

- Primerjalna meritev z referenčnim instrumentom, kjer raziskovalci merilne točke najprej izmerijo z instrumentom, ki je predmet kalibracije (LS) ter nato rezultate primerjajo z referenčnim instrumentom.
- Mrežna meritev več točk v prostoru [4, 5]. Gre za postopek, pri katerem se z različnih pozicij postavitve LS izmeri skupina točk v prostoru, katerih nominalne pozicije niso poznane. Glavni cilj takšnega postopka je preveriti, kako dobro sistem ohranja skladnost meritev med različnimi pozicijami. S takšnim postopkom je možno validirati merilni sistem, potrebno pa je poudariti, da pri tem ne gre za umerjanje.

Kot nosilci državnega etalona za dolžino smo v Laboratoriju za tehnološke meritve Univerze v Mariboru (v nadaljevanju LTM) dolžni zagotavljati sledljivost dolžinskih meritev na najvišji ravni v državi. S tem smo zavezani k nenehnemu razvoju novih metod in postopkov umerjanja merilnikov dolžin. Tako smo ob nedavni pridobitvi novega, lastnega laserskega sledilnika začeli s sistematičnim preverjanjem njegovih zmogljivosti, kar predstavlja začetno fazo razvoja ter osnovo za prihodnjo akreditacijo lastne procedure. V prispevku se osredotočamo na primerjalno metodo merjenja, kjer smo zmogljivost novega sledilnika preverili z laserskim interferometrom na namensko zasnovani 13-metrski merilni progi. Rezultati podajajo ključen vpogled v točnost sistema na daljših razdaljah in služijo kot strokovna osnova za vzpostavitev sledljivega postopka periodičnega preverjanja v slovenskem prostoru.

## 2 UPORABLJENA OPREMA

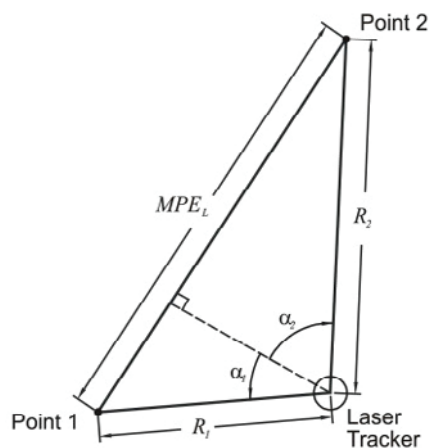
Poglavje 2 zajema predstavitev uporabljenega laserskega sledilnika proizvajalca Faro, referenčnega senzorja in uporabljeno merilno progo za generiranje pomika.

### 2.1 Faro Vantage E6 Max

FARO Laser Tracker Vantage E6 Max je prenosna naprava za tridimenzionalno merjenje koordinat in sledenje premikom. Sistem vključuje vrtljivo merilno glavo, ki z uporabo laserskega žarka sledi prenosljivemu retroreflektorju (SMR). Ko se laserski žarek odbije od retroreflektorja nazaj na merilno glavo, sistem na podlagi položaja kotnih enkoderjev na dveh rotacijskih oseh (azimutni in zenitni) izračuna prostorski položaj merjene točke. Model Vantage E6 Max omogoča merjenje razdalje do dolžine 35 m. Končna razdalja je odvisna od tipa merilnih tipal oz. vrste tarče, ki jo uporabljamo. Največjo natančnost meritev nam omogoča merjenje z uporabo sferično nameščenega retroreflektorja (SMR).

Poleg SMR-jev lahko sistem uporablja tudi 6DoF tipalo, kar v našem primeru predstavlja FARO 6Probe. Slednje je posebej uporabno pri kompleksnih geometrijah in težko dostopnih mestih, kjer SMR zaradi linijskih omejitev ne bi bil učinkovit. 6DoF omogoča merjenje z merilnim dosegom od (2,5 – 15) m, medtem ko lahko z uporabo SMR-ja dosežemo celotno merilno območje LS (0 – 35) m.

Točnost meritve LS je podana kot največji dopustni pogrešek  $MPE$  (maximum permissible error), ki ga dovoljuje »Performance verification test« standarda ISO 10360-10:2016. Slika 1 prikazuje shemo postavitve LS, s katerim merimo razdaljo med točkama 1 in 2.



Slika 1: Geometrija merjenja razdalje z LS

Največji dopustni pogrešek ( $MPE$ ) razdalje med točkama 1 in 2 je odvisen od razdalje med LS in točkama ter kotom med njima. Določi se po naslednji enačbi (1):

$$MPE = \sqrt{\frac{(e_{R1}^2 \sin \alpha_1^2 + e_{R2}^2 \sin \alpha_2^2 + e_{R0}^2 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)^2 + e_{T1}^2 \cos \alpha_1^2 + e_{T2}^2 \cos \alpha_2^2)}{2}} \quad (1)$$

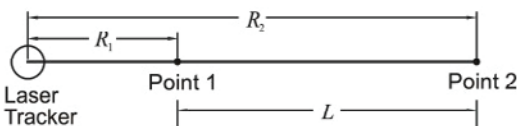
Pri čemer se  $e_{R1}$ ,  $e_{R1}$ ,  $e_{R1}$ ,  $e_{R1}$  in  $e_{R1}$  izračunajo po enačbah (2) – (4), prikazanih v tabeli 2.1.

Tabela: 2.1: Prikaz izračuna  $MPE$

Podsystem LS	Simbol	$MPE$
Absolute Distance Meter	$e_{ADM}$	$16 \mu\text{m} + R \cdot 0,8 \mu\text{m}/\text{m}$ (2)
R0 parameter	$e_{R0}$	$16 \mu\text{m}$ (3)
Zasuk glave LS	$e_T$	$20 \mu\text{m} + R \cdot 5,0 \mu\text{m}$ (4)

V posebnem primeru, kjer se točki merjene razdalje nahajata v isti liniji kot LS (*slika 2*), torej v primeru, ko med merjenjem ne prihaja do rotacijskih zasukov merilne glave, se enačba za izračun  $MPE$  poenostavi v:

$$MPE = 16 \mu\text{m} + R \cdot 0,8 \mu\text{m}/\text{m} \quad (5)$$



Slika 2: Poseben primer merjenja z LS

Enačbi veljata v primeru merjenja z uporabo SMR-ja. Pri merjenju z uporabo tipala 6DoF je  $MPE$  zaradi dodatnih mehanskih in elektronskih vmesnikov nekoliko večji in znaša  $50 \mu\text{m} + L \cdot 5 \mu\text{m}/\text{m}$  v primeru uporabe 40 mm dolgega stebala tipalaga. S slednjo formulo proizvajalec za tipalo 6DoF navaja največji dopustni pogrešek za prostorsko točko. Ker smo z 6DoF merili razdaljo med točkama, smo s priporočili GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) izračunali dopustni pogrešek razdalje kot kombinirano negotovost obeh končnih točk:

$$MPE = \sqrt{MPE_{T1}^2 + MPE_{T2}^2} \quad (6)$$

## 2.2 Referenčni etalon

Kot referenčni etalon smo uporabili laserski sistem HP 5528A, ki v LTM predstavlja osrednjo vez za zagotavljanje sledljivosti pri najzahtevnejših postopkih umerjanja. Gre za He-Ne laserski interferometer, v nadaljevanju LI, ki ga sestavljata laserska glava, namenjena generiranju žarka in interferometerska optika.

## 2.3 Merilna proga

Primerjalne meritve z LS smo izvedli na namensko zgrajenem merilniku dolžin 13M, ki ga v LTM primarno uporabljamo za umerjanje tračnih meril. Merilnik dolžin je zaradi svoje dolžine (13 m) še posebej primeren za validacijo LS, saj omogoča meritve na daljših razdaljah, ki so ključne pri preverjanju zmogljivosti LS. Sestavljen je iz preciznih vodil in premikajočega se vozička s katerim generiramo pomik.

## 2.4 Merilni pogoji

Meritve so bile izvedene v nadzorovanem laboratorijskem okolju. Merilnik dolžin 13M se nahaja v laboratoriju z nadzorovanimi pogoji okolice. Po celotni dolžini merilnika se temperatura giblje znotraj območja  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , s čimer se zmanjšajo vplivi toplotnih raztezkov.

## 3 POSTOPEK MERITVE IN REZULTATI

V poglavju 3 je predstavljen postopek in rezultati primerjalnih meritev.

Delo je temeljilo na primerjalni metodi, kjer smo pomike izmerjene z LS neposredno primerjali z referenčnim LI HP 5528A. Meritve so potekale na 13 metrski progi, opremljeni s preciznimi vodili in premičnim vozičkom. Na slednjega smo vpeli premični del optike LI, SMR laserskega sledilnika pa postavili direktno nad odbojno optiko LI, kot prikazuje *slika 3*.



Slika 3: Vpetje optike po Abbejevem načelu

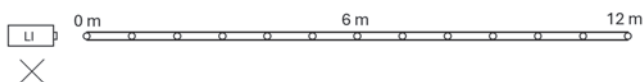
S slednjo postavitvijo smo zagotovili vzporednost osi merjenja LS in LI z osjo pomika vozička, prav tako pa tudi minimalni Abbejev pogrešek, do katerega pride zaradi kotnih odstopanj vozička med pomikom.

Okoljska sensorja obeh sistemov smo postavili v neposredno bližino z namenom zagotavljanja enakih okoljskih pogojev. Pri obeh merilnih sistemih je bila izvedena sprotna kompenzacija vpliva temperature, tlaka in vlage na izmerjene vrednosti.

Glavni cilj eksperimenta je bil ovrednotiti zmogljivost LS pri različnih kotih in razdaljah merjenja. Ker 13 metrska merilna proga razpolaga le z linearnim pomik v eni dimenziji, smo zahtevane zasuke azimuta in zenita dosegli z različnimi fizičnimi postavitvami LS glede na os proge. Meritve smo izvedli z uporabi SMR-ja in tipala 6DoF. Prikaz različnih postavitvev in dobljeni rezultati so prikazani v nadaljevanju.

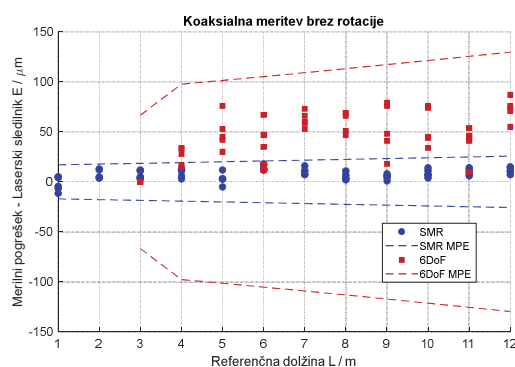
### 1. Koaksialna meritev brez rotacije glave

Kot prikazuje *slika 4* smo LS postavili, kolikor nam je prostor dopuščal, v podaljšek osi merilne proge. S takšno konfiguracijo smo eliminirali vpliv rotacije merilne glave na merilni pogrešek. Izvedli smo pet ponovitev primerjalnih meritev v trinajstih točkah po celotni dolžini merilne proge.



Slika 4: Prikaz postavitve LS v osi z merilno progo

Pri merjenju s SMR rezultati kažejo visoko stopnjo ujemanja z LI. Povprečna odstopanja na 11 m niso presegla 11  $\mu\text{m}$ . Pri uporabi 6DoF tipala so odstopanja pričakovano višja, vendar še vedno znatno znotraj *MPE*. Na razdalji 9 m je povprečno odstopanje znašalo 72  $\mu\text{m}$ . Raztros rezultatov odstopanj koaksialne primerjalne meritve je prikazan na *sliki 5*. Modra barva prikazuje odstopanja pridobljena z uporabo SMR-ja, rdeča pa odstopanja izmerjena s tipalom 6DoF. Črtkane črte prikazujejo *MPE* za SMR in 6DoF, ki smo ga izračunali na podlagi formul predstavljenih v poglavju 2.

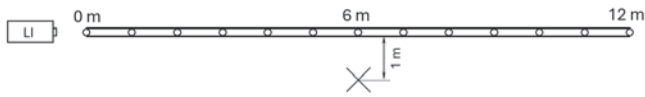


Slika 5: Koaksialna meritev – primerjava odstopanj SMR in 6DoF

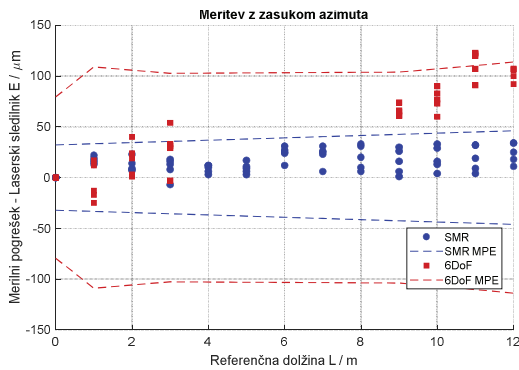
### 2. Meritev z zasukom azimuta

S spremembo postavitve LS pravokotno na os proge, kot prikazuje shema na *sliki 6*, smo dosegli maksimalen razpon horizontalnega zasuka glave. S tem smo ovrednotili vpliv razdalje in azimutnega

kotnega enkoderja na pogrešek meritve. Rezultati pridobljenih odstopanj so prikazani na *sliki 7*.



Slika 6: Postavitve LS pravokotno glede na progo



Slika 7: Odstopanja meritev z zasukom azimuta

Pri postavitvi LS pravokotno na progo je odstopanje pri merjenju s SMR na razdalji 11 m znašalo 24  $\mu\text{m}$ . Slednje kaže na vpliv kotnega enkoderja na merilni pogrešek, ki narašča linearno z razdaljo. Čeprav so vsa pridobljena odstopanja izmerjena s SMR-jem znotraj dovoljenega *MPE* to ne velja za 6DoF. Kot je razvidno iz *slike 7* so nekatere meritve na razdalji 11 m presegle dovoljen *MPE*.

### 3. Meritev z zasukom zenita

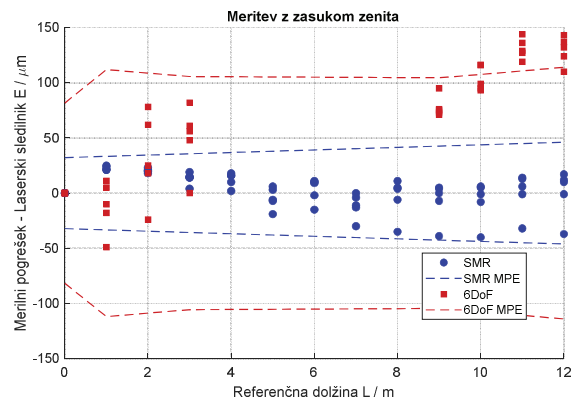
Pri tretji postavitvi je LS ostal na enaki poziciji kot prikazuje shema na *sliki 6*, spremenili smo samo njegovo rotacijo - postavili smo ga pod kotom glede na merilno progo (glej *sliko 8*).



Slika 8: postavitve LS pod kotom glede na merilno progo).

S slednjim smo dosegli velik zasuk zenitnega dela merilne glave, kar je omogočilo analizo pogreška zenitnega enkoderja. S takšno postavitvijo sicer nismo popolnoma izolirali zenitno rotacijo, saj se je nekoliko vrtel tudi azimutni enkoder.

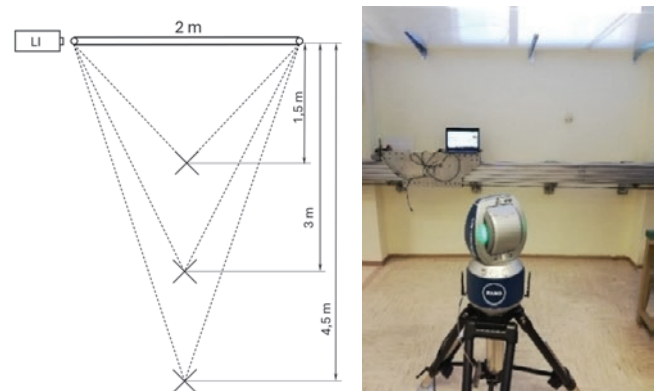
Iz rezultatov na *sliki 9* je razvidno, da so odstopanja pri merjenju s SMR v povprečju 20  $\mu\text{m}$  na dolžini 12 m. Spet se nekoliko večje odstopanje pojavi pri merjenju s 6DoF tipalom, ki na največji dolžini preseže maksimalno dovoljeno napako.



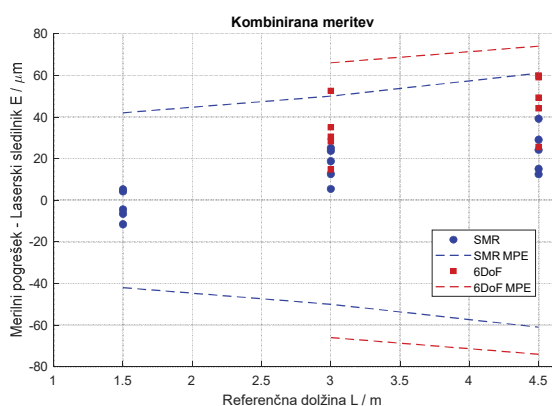
Slika 9: Rezultati odstopanj s povečanim zasukom zenitnega enkoderja

### 4. Kombinirana meritev

Z zadnjo postavitvijo smo želeli ovrednotiti vpliv razdalje merjenja na pogrešek meritve. Kot prikazuje shema na *sliki 10*, smo izvedli pet ponovitev meritev dolžine 2 m z različnih razdalj LS glede na progo. Odstopanja na *sliki 11* z razdaljo linearno naraščajo in so znotraj izračunane napake tako pri SMR-ju kot pri 6DoF tipalu.



Slika 10: Prikaz meritve z večanjem razdalje



Slika 11: Odstopanja - kombinirana meritev

Vsi pridobljeni rezultati kažejo tudi na dobro ponovljivost LS, ki smo jo ovrednotili kot standardno deviacijo petih ponovitev meritev v vsaki točki. V tabeli 3.1 so prikazane maksimalne vrednosti standardne deviacije ( $s$ ) za vse štiri eksperimentalne postavitve, kar služi kot merilo ponovljivosti sistema. Rezultati potrjujejo, da SMR ohranja visoko stabilnost, saj ponovljivost v večini primerov ostaja pod  $15 \mu\text{m}$ , z izjemo zasuka zenita -  $19 \mu\text{m}$ . Pri uporabi tipala 6DoF je raztros pričakovano višji, z najvišjo vrednostjo standardne deviacije  $40 \mu\text{m}$  pri zenitnem zasuku. Povečan šum pri 6DoF-meritvah pripisujemo zahtevnosti optičnega določanja orientacije tipala na večjih razdaljah in ročnemu držanju tarče.

Tabela 3.1: Maksimalne vrednosti standardne deviacije pri različnih postavitvah

Postavitev	St. dev SMR	St. dev 6DoF
1 Koaksialno	$4 \mu\text{m}$	$26 \mu\text{m}$
2 Zasuk azimuta	$13 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}$
3 Zasuk zenita	$19 \mu\text{m}$	$40 \mu\text{m}$
4 Kombinirano	$11 \mu\text{m}$	$14 \mu\text{m}$

#### 4 SKLEP

Raziskava potrjuje da LS v kombinaciji s SMR tarčo v vseh konfiguracijah zanesljivo izpolnjuje predpisan MPE. V kombinaciji s tipalom 6DoF so odstopanja nekoliko večja in celo presežejo dovoljen MPE. To pripisujemo zahtevnosti optičnega sledenja orientaciji 6DoF na veliki razdalji. Analiza ponovljivosti je pokazala visoko

stabilnost sistema, pri čemer standardna deviacija pri SMR tarči večinoma ne presega  $15 \mu\text{m}$ , medtem ko pri uporabi 6DoF tipala naraste do  $40 \mu\text{m}$ . Prav tako zaključujemo, da zenitni in azimutni enkoder k pogrešku prispevata približno enak delež, ki narašča linearno s kotnim zasukom, obenem pa se skupni merilni pogrešek povečuje sorazmerno z naraščanjem razdalje do merjene točke. Rezultati predstavljajo praktičen pristop k ugotavljanju merilne zmožljivosti LS v laboratorijskem okolju ter osnovo za nadaljnji razvoj sledljivih postopkov preverjanja njihovečnosti.

#### Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo za finančno podporo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost RS (št. financiranja raziskav P2-0190, številke nepovratnih sredstev 1000-20-0552, 6316-3/2018-255, 603-1/2018-16) ter Uradu za meroslovje Republike Slovenije (financiranje nacionalnega etalona dolžine; št. pogodbe C3212-10-000072). Poleg tega se želimo avtorji zahvaliti za uporabo raziskovalne opreme za obdelavo in spremljanje procesov obdelave in oblikovanja: laserskih merilnih sistemov za obdelovalne stroje in koordinatnih merilnih strojev, nabavljenih v okviru projekta "Nadgradnja nacionalne raziskovalne infrastrukture - RIUM", ki ga je sofinanciralo Ministrstvo za izobraževanje Republike Slovenije. Ta specifična raziskava je bila tudi del nacionalnega projekta št. V2-24074 v okviru Ciljnega raziskovalnega programa "CRP 2024" in evropskega projekta 23IND08-Di-Vision v okviru Evropskega partnerstva za meroslovje. Zato se želimo zahvaliti za podporo tudi Javni agenciji za raziskovalno dejavnost RS, Ministrstvu za gospodarstvo, turizem in šport ter Evropski komisiji.

#### Viri:

- [1] Lau K., Hocken R., Haynes L.: Robot performance measurement using automatic laser tracking techniques, *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, vol 2, no. 3, pp. 227-236, 1985
- [2] Zik J., Lau K.: Automatic laser tracking interferometer system for robot/autonomous guidance and large-dimensional metrology, *Precis. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 581-584, 1988
- [3] Muralikrishnan B., Phillips S., Sawyer D.: Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review, *Precis. Eng.*, vol. 44, pp. 13-28, 2016
- [4] Conte J., Majarena A. C., Aguado S., Acero R., Santolaria J.: Calibration strategies of laser trackers based on network measurements, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 5-8, pp. 1161-1170, 2016
- [5] Hughes B., Forbes A., Lewis A., Sun W., Veal D., Nasr K.: Laser tracker error determination using a network measurement, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 4, 2011

## POMEN ROBNIH POGOJEV PRI ANALIZAH KOMPLEKSNIH KONSTRUKCIJ

**Domen ŠERUGA<sup>1,\*</sup>, Peter ZOBEC<sup>1</sup>, Jaka KRIŽ<sup>2</sup>, Gašper MRAK<sup>2</sup>, Jernej KLEMENC<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

<sup>2</sup>Iskra PIO d.o.o.

\*Korespondenčni avtor: [domen.seruga@fs.uni-lj.si](mailto:domen.seruga@fs.uni-lj.si)

### IZVLEČEK

*Pri obratovanju se v mehanskih konstrukcijah pojavijo napetosti in specifične deformacije kot posledica delovanja mehanskih obremenitev. Porazdelitev napetosti in specifičnih deformacij je odvisna od velikosti in oblike konstrukcij ter gradiv in proizvodnih procesov, ki jih uporabimo za izdelavo. Mesta, kjer se pojavijo največje koncentracije napetosti in specifičnih deformacij, so običajno tudi tista mesta, kjer se lahko pojavijo težave zaradi utrujanja gradiva po dolgotrajnem obratovanju konstrukcij. Zato da bi takšne dogodke predvideli in preprečili s primernim oblikovanjem, že v zgodnjih fazah razvoja izdelkov izvajamo trdnostne simulacije obnašanja mehanskih konstrukcij, ki pokažejo potencialne izvore težav. V tem prispevku smo pod drobnogled vzeli porazdelitev napetosti v dvostebnem mešalniku kontejnerjev za homogenizacijo praškaste zmesi, pri katerem smo izvedli primerjavo porazdelitve napetosti v kletki konstrukcije pri obremenitvi zaradi lastne teže konstrukcije. Ta je bila v simulaciji enkrat upoštevana preko koncentrirane sile teže v težišču konstrukcije, kar je predstavljalo poenostavljeno obravnavo obremenitve, drugič pa kot dejansko porazdeljena masa, na katero deluje gravitacijsko polje, kar je predstavljalo realno stanje obremenitve. Izkazuje se, da lahko s poenostavitvijo dobimo nekoliko drugačne rezultate kot pri upoštevanju dejanske porazdelitve mase, kar lahko pri nadaljnjih analizah konstrukcije vpliva na odločitve o morebitnih konstrukcijskih spremembah.*

### 1 UVOD

Surovina v obliki prahov je tipično uporabljena v kemijski, farmacevtski, in prehrabni industriji, vse bolj pa tudi pri proizvodnji baterij [1,2]. Pomembno je, da se v proizvodnem procesu izdelata homogena praškasta zmes, saj je le tako mogoče zagotoviti ustrezne in predvsem ponovljive lastnosti končnih izdelkov [3,4,5]. Stroški, ki nastanejo, če zmes ne dosega zahtevanih karakteristik, so lahko zelo visoki [6]. Poleg homogenosti zmesi je ključnega pomena tudi optimalen mešalni čas [5]. Oboje dosežemo z mešanjem, ki je eden najbolj tipičnih postopkov v procesnem inženirstvu. Z uporabo industrijskih mešalnikov, ki jim je mogoče prilagoditi mešalne pogoje, lahko mešanje optimiramo za poljubno kombinacijo praškastih surovin in mešalni čas. Obstajajo različne vrste mešalnikov, ki se razlikujejo glede na način mešanja in glede na merjene količine med mešanjem [7,8].

Mešalniki kontejnerjev so namenjeni homogenizaciji praškaste zmesi, ki se jo pred mešanjem nasuje v kontejner. Osrednji del

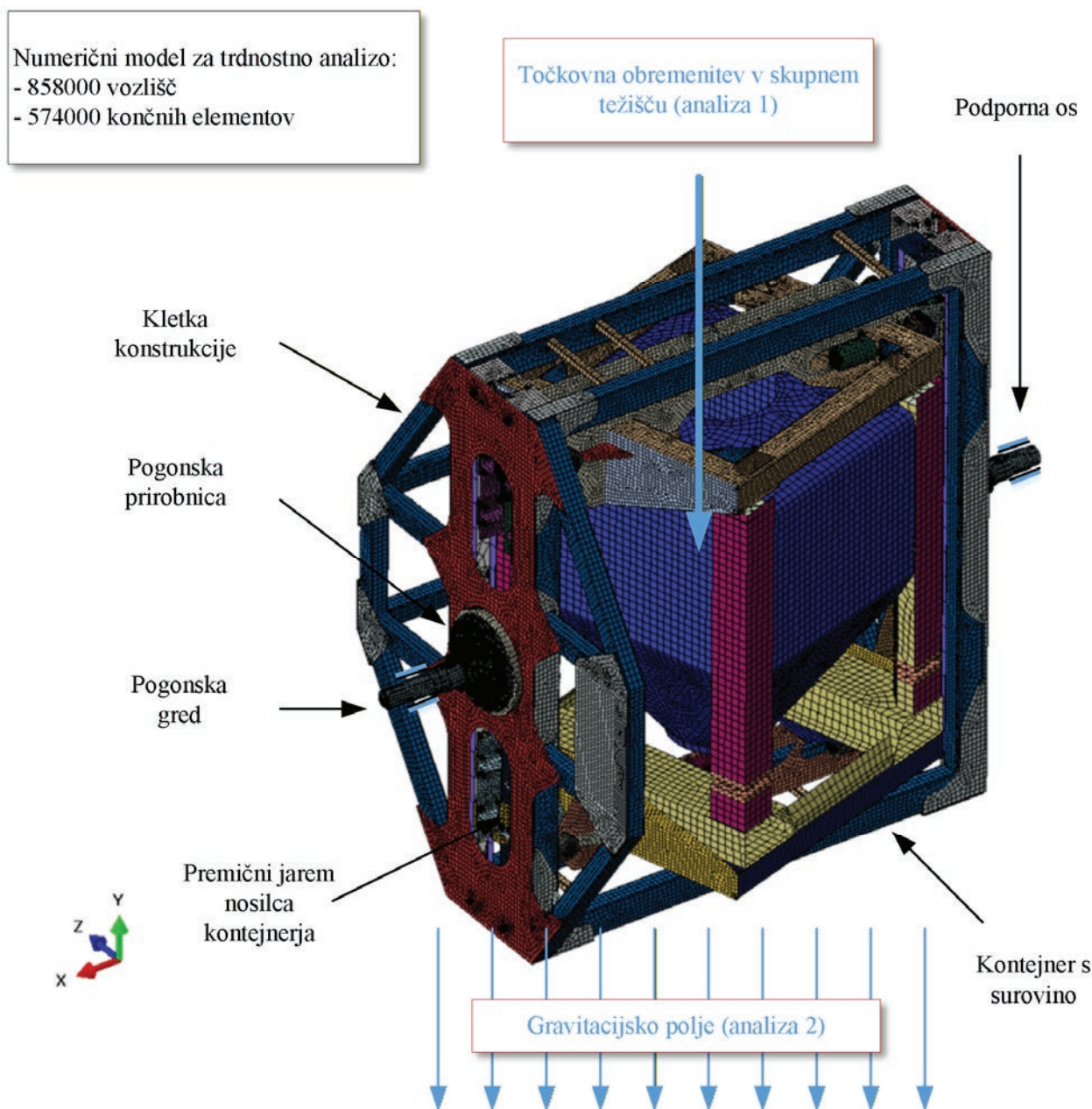
predstavlja kletka konstrukcije, v katero se pred mešanjem vpne kontejner s surovino. Kletka konstrukcije je povezana s pogonskim motorjem, tipično postavljenim na nosilni steber, preko katerega dovajamo moč za mešanje z nastavljenimi mešalnimi parametri. Kletka konstrukcije je pri enostebni izvedbi konzolno vpeta na nosilni steber, pri dvostebni izvedbi pa je poleg vpetja na nosilni steber s pogonskim motorjem uležajena še na podporni steber. Ker so lahko kontejnerji s surovino različnih dimenzij, imajo mešalniki možnost nastavljanja vpenjalne višine v kletko konstrukcije preko premičnih jarmov nosilcev kontejnerja.

Mešalniki kontejnerjev morajo obratovati predvideno število vrtljajev brez poškodb, zato jih je pri razvoju potrebno primerno dimenzionirati. Natančna določitev napetostno-deformacijskega odziva v nosilnih delih konstrukcije je osnova za izračun pričakovane življenjske dobe [9,10]. Kompleksne oblike mehanskih konstrukcij v praksi trdnostno preverjamo z metodo končnih elementov, kjer pa je odločilno, katere robne pogoje predpišemo pred izvedbo simulacij.

V tem prispevku smo analizirali porazdelitev napetosti v dvostebnem mešalniku kontejnerjev za homogenizacijo praškaste zmesi, pri katerem smo izvedli primerjavo porazdelitve napetosti v kletki konstrukcije pri obremenitvi zaradi lastne teže konstrukcije.

## 2 METODA

Geometrijski model mešalnika smo pretvorili v numerični model v programskem okolju Abaqus 2024, zgrajen pa je bil iz lupinskih in prostorskih končnih elementov tipov S3, S4 in C3D8 (slika 1).



Slika 1: Uporabljen numerični model pri trdnostni analizi konstrukcije dvostebnega mešalnika kontejnerjev za homogenizacijo praškaste zmesi

Varjena konstrukcija kletke je bila upoštevana kot samostojna mehanska komponenta, ki je bila z ostalimi komponentami v sestavu (premični jarmi nosilcev kontejnerja, pogonska gred, pogonska prirobnica) povezana preko kontaktov. Kontakti so omogočali ločeno določitev normalnih in tangencialnih razmer, kar je pomembno za prenos obremenitev med sestavnimi deli. Uporabili smo materialne lastnosti nerjavnega jekla AISI304, podane v Tabeli 1.

Tabela 1: Materialne lastnosti nerjavnega jekla AISI304, upoštewane v trdnostni analizi konstrukcije kletke dvostebnega mešalnika

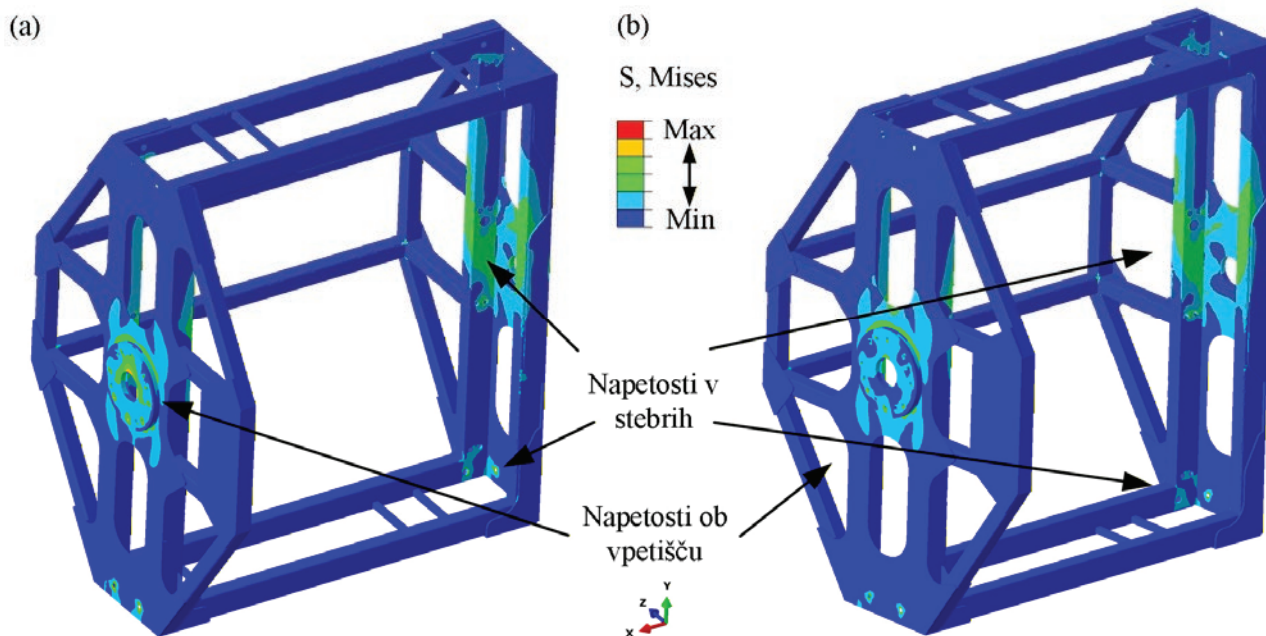
Gradivo	Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]	Youngov modul [GPa]	Poissonovo število [-]
Jeklo AISI304	7930	193	0.3

Mehansko obremenitev je predstavljalo vpetje kontejnerja in lastna teža mehanskih komponent,

ki pa je bila upoštevana na dva načina: kot točkovna obremenitev v skupnem težišču (analiza 1) in kot zvezno porazdeljena obremenitev, podana z gostoto gradiva in delovanjem gravitacijskega polja (analiza 2). Konstrukcija mešalnika je bila v obeh analizah podprta na ležajnih mestih pogonske gredi in podporne osi (slika 1).

### 3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Rezultata simulacij za analizi 1 in 2 sta prikazana na sliki 2. Vidimo, da se ne glede na upoštevanje obremenitve najnižje napetosti pojavijo na horizontalnih povezavah kletke konstrukcije, medtem ko se najvišje napetosti pojavijo v vertikalnih povezavah kletke konstrukcije (stebrih) in v okolici vpetišč na pogonsko gred oz. podporno os.



Slika 2: Rezultata simulacij trdnostnih analiz konstrukcije dvostebnega mešalnika kontejnerjev za homogenizacijo praškaste zmesi z upoštevanjem robnih pogojev v (a) analizi 1 in (b) analizi 2

Ker sta merili napetosti na sliki 2 za obe analizi enaki, opazimo, da so absolutne vrednosti napetosti najvišje pri analizi 1. Na zgornji strani pogonske prirobnice se pojavi konica napetosti kot odziv na točkovno obremenitev, ki deluje v težišču konstrukcije. Pri analizi 2 se na pogonski prirobnici sicer pojavijo povišane vrednosti napetosti, vendar brez opazne konice. Stebri kletke konstrukcije prevzamejo večino zvezno porazdeljene obremenitve, ki sledi iz oblike mešalnika in koristne obtežbe (kontejnerja s surovino). Predpostavka o delovanju lastne teže v težišču konstrukcije glede na realno stanje rezultira v višjih dobljenih vrednostih napetosti, kar bi pri nadaljnjem vrednotenju obravnavane kletke konstrukcije mešalnika pomenilo konzervativno oceno življenjske dobe, ne moremo pa tega rezultata posplošiti za poljubno mehansko konstrukcijo. Če je le mogoče, je torej smotno čim bolj realno upoštevati robne pogoje analize.

#### 4 SKLEP

Pod drobnogled smo vzeli dvostebni mešalnik za homogenizacijo praškaste vzmeti. Trdnostno analizo kletke konstrukcije mešalnika smo izvedli pri različnih robnih pogojih, enkrat s točkovnim vnosom sile teže, drugič pa z zvezno porazdelitvijo glede na podano gostoto in delovanje gravitacijskega polja. Izkazalo se je, da so ocenjene napetosti pri poenostavitvi s točkovnim vnosom obremenitve višje, kar bi pri konstruiranju na ciljno življenjsko dobo pomenilo predimenzioniranje konstrukcije glede na realno porazdelitev obremenitve.

#### ZAHVALA

Zahvala gre Javni agenciji za znanstvenoraziskovalno in inovativno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo raziskovalnega programa št. P2-0182 *Razvojna vrednotenja*.

Viri:

- [1] Sahu, S, Muthachikavil, AV, Masampally, VS, Goswami, N, Buddhiraju, VS, Runkana, V.: Granulation of fine powders in a ploughshare mixer: experimental studies and population balance modeling, *Advanced Powder Technology* (2026), 37(3), str. 105182.
- [2] Helmers, L, Froböse, L, Friedrich, K, Steffens, M, Kern, D, Michalowski, P., Kwade, A.: Sustainable Solvent-Free Production and Resulting Performance of Polymer Electrolyte-Based All-Solid-State Battery Electrodes, *Energy Technology* (2021), 9, str. 2000923.
- [3] Ranjan, OP, Kumbhar, AP.: *10 - Dry and wet granulation v Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Polymers for Oral Drug Delivery Technologies* (2025), ur. Parambath, U, Elsevier Science Ltd, str. 463-494.
- [4] Paul, S, Sun, CC.: Gaining insight into tablet capping tendency from compaction simulation, *International Journal of Pharmaceutics* (2017), 524(1-2), str. 111-120.
- [5] Zhou, Y, Li, F, Sanders, C, Samain, S, Salman, A.: Online monitoring of dry powder mixing in a bin mixer, *Powder Technology* (2023), 415, str. 118081.
- [6] Asachi, M, Nourafkan, E, Hassanpour, A.: A review of current techniques for the evaluation of powder mixing, *Advanced Powder Technology* (2018), 29(7), str. 1525-1549.
- [7] Bowler, AL, Bakalis, S, Watson, NJ.: A review of in-line and on-line measurement techniques to monitor industrial mixing processes, *Chemical Engineering Research and Design* (2020), 153, str. 463-495.
- [8] Bridgwater, J.: Mixing of powders and granular materials by mechanical means—A perspective, *Particuology* (2012), 10(4), str. 397-427.
- [9] Mikelj, M, Nagode, M, Klemenc, J, Šeruga, D.: Influence of Operating Conditions on a Cast-Iron Manhole Cover, *Technologies* (2022), 10, str. 127.
- [10] Šeruga, D, Hansenne, E, Haesen, V, Nagode, M.: Durability prediction of EN 1.4512 exhaust mufflers under thermomechanical loading, *International Journal of Mechanical Sciences* (2014), 84, str. 199-207.

## PLAZEMSKO ELEKTROLITSKO POLIRANJE ZA IZBOLJŠANJE INTEGRITETE POVRŠIN KOMPLEKSNO OBLIKOVANIH IZDELKOV

**Joško VALENTINČIČ, Jithinraj EDAKLAVAN KOROTH**  
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

### IZVLEČEK

*Plazemsko elektrolitsko poliranje (PeP) je napreden postopek končne obdelave površin za izboljšanje integritete površine kovinskih izdelkov kompleksnih oblik. Prispevek predstavlja osnovna načela postopka PeP, vključno z njegovim mehanizmom delovanja, ključnimi procesnimi parametri in značilnostmi odvzema materiala. Na reprezentativnih vzorcih je prikazana dosegljiva kakovost površine ter praktična izvedba postopka poliranja. Obravnavana je uporabnost postopka PeP za geometrijsko zahtevne komponente, s posebnim poudarkom na njegovih prednostih pri obdelavi zunanjih površin kompleksnih delov. Prispevek obravnava tudi glavne omejitve postopka, zlasti glede združljivosti materialov in omejene učinkovitosti pri poliranju notranjih elementov, kot so luknje in ozke votline. Prispevek podaja inženirski pregled zmožljivosti in omejitev postopka PeP.*

### 1 UVOD

Potreba po gladkih in funkcionalno zanesljivih površinah v medicinskih, letalskih, kemičnih aplikacijah nenehno narašča. To je še posebej izrazito pri izdelkih s prostorskimi geometrijami, mrežastimi strukturami, ukrivljenimi kanali in površinami, izdelanimi z aditivnimi postopki, kjer so velika začetna hrapavost in delno nedostopna območja pogosti problemi. Klasične metode končne obdelave, kot so brušenje, abrazivno poliranje in tudi običajno elektropoliranje, pogosto težko združijo visoko kakovost površine, geometrijsko prilagodljivost, hitrost procesa in sprejemljive okoljske pogoje.

Plazemsko elektrolitsko poliranje (PeP) se je v takih primerih uveljavilo kot obetavna alternativa. Pri procesu PeP obdelovanec deluje kot anoda v segretem vodnem elektrolitu, medtem ko visoka napetost povzroči nastanek parno-plinskega ovoja (VGE) okoli površine. V ustreznem procesnem območju medsebojno delovanje elektrokemijskega raztapljanja, hidrodinamičnih pojavov in s plazmo povezanih učinkov vodi do hitrega glajenja površinskih vrhov ter nastanka svetle in gladke površine [1], [2]. V primerjavi z mehanskim poliranjem za PEP ne potrebujemo orodja, postopek poteka brez fizičnega kontakta; v primerjavi z elektropoliranjem pa pogosto uporablja milejše elektrolite in je lahko

primernejši za kompleksne zunanje površine [1], [6].

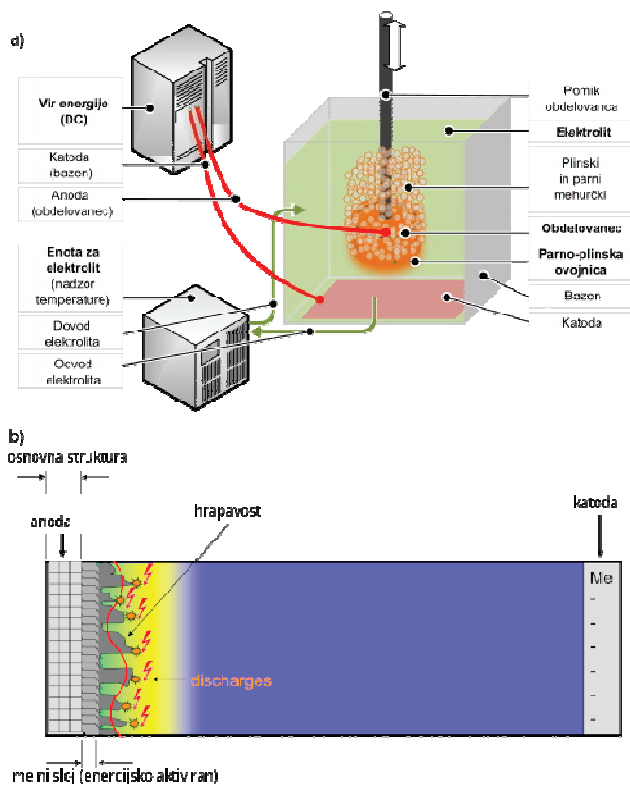
V prispevku podajamo strnjen inženirski pregled procesa PeP. Obravnava se osredotoča na princip procesa, ključne parametre vodenja, obnašanje pri odvzemu materiala, koristi za integriteto površine ter praktične omejitve, zlasti pri notranjih elementih in ozkih geometrijah.

### 2 NAČELO PROCESA IN OBNAŠANJE PRI ODVZEMU MATERIALA

Kovinski obdelovanec je priključen kot anoda in potopljen v segret elektrolit na vodni osnovi. Ko se napetost poveča iz območja elektrolize v stabilno območje PeP, se okoli površine obdelovanca oblikuje parno-plinski ovoj (Slika 1). Največji padec napetosti nastopi prav preko tega ovoja, zato je obnašanje procesa močno odvisno od njegove debeline, neprekinjenosti in stabilnosti [2–5].

Tokovno-napetostno obnašanje procesa PeP je običajno opisano z več režimi: klasična elektroliza pri nizki napetosti, prehodno območje, v katerem se VGE oblikuje občasno, ter stabilno območje poliranja pri nekaj sto voltih, pogosto približno med 200 in 400 V za nerjavna jekla v elektrolitih z vsebnostjo amonijevega sulfata [2], [3], [5]. Danilov in sod. so pokazali, da se zmanjšanje hrapavosti lahko aproksimira z

eksponentnim upadom glede na čas, kar je z inženirskega vidika pomembno, ker pomeni hitro začetno glajenje, ki mu sledijo vse manjši učinki, ko se dosega minimalna dosegljiva hrapavost [3].



Slika 1: a) Shematski prikaz plazemskega elektrolitskega poliranja (PeP) in b) mehanizmom glajenja površinskih vrhov.

Natančen mehanizem odvzema materiala je predmet razprav že dlje časa. Starejši opisi so pogosto poudarjali taljenje zaradi plazme ali mikroeksplozivno odstranjevanje najvišjih vrhov. Novejše raziskave kažejo bolj niansirano sliko. Parfenov in sod. so ugotovili, da je odvzem materiala pri anodnem PeP pretežno elektrokemijske narave, medtem ko VGE prispeva k spreminjanju porazdelitve toka, podpira odstranjevanje oksidov in stabilizira obdelavo pri kompleksnih zunanjih oblikah [4]. Njihovi rezultati so pokazali odvzem približno 20 do 40  $\mu\text{m}$  po 15 minutah ter zmanjšanje hrapavosti z Ra 0,3-0,5  $\mu\text{m}$  na približno 0,06-0,08  $\mu\text{m}$  pri nerjavnem jeklu [4]. Zhou in sod. so dodatno pokazali, da je nihanje VGE osrednjega pomena: med prehodnim stikom med elektrolitom in obdelovancem poteka elektrokemijsko raztapljanje, medtem ko

plazemska razelektritev med ločitvijo pomaga odstraniti produkte s površine in ponovno aktivirati površino za nadaljnje glajenje [5].

Z vidika procesnega inženirstva so glavni krmilni parametri napetost, sestava elektrolita, temperatura elektrolita, čas obdelave, gostota toka, pogoji potapljanja in geometrija obdelovanca [1]–[5]. Čas obdelave izboljšuje kakovost površine le do določene meje; po tem se produktivnost zmanjša, lahko pa pride tudi do prekomernega odvzema materiala ali nastanka sekundarnega reliefa [2], [3].

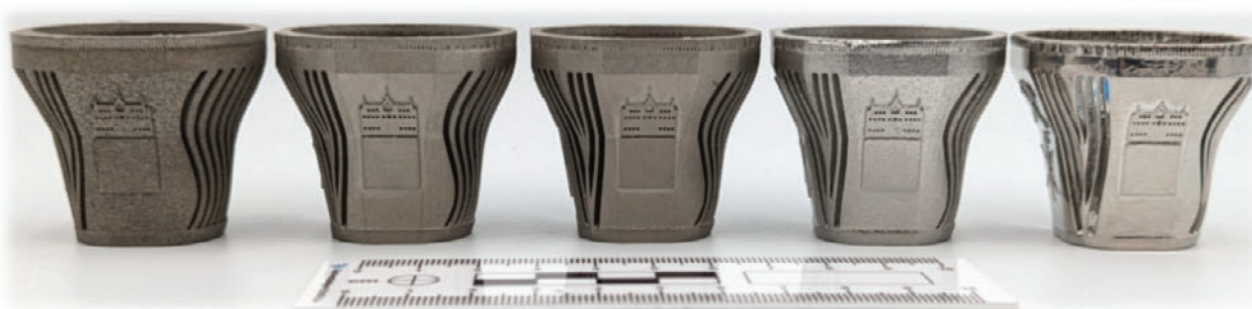
### 3 POMEN ZA INTEGRITETO POVRŠINE KOMPLEKSNO OBLIKOVANIH DELOV

Pri kompleksno oblikovanih izdelkih je prednost procesa PeP ne le zmanjšanje hrapavosti, temveč tudi način izboljšanja integritete površine brez neposrednega mehanskega stika. Ker ni kontakta med abrazivnim orodjem in obdelovancem, se proces izogne številnim geometrijsko pogojenim težavam, ki so značilne za klasično končno obdelavo, kot so lokalne preobremenitve, vdolbava abrazivnih delcev ali slab dostop do ukrivljenih zunanjih površin. Zaradi tega je PeP primerno za prostorske oblike, biomedicinske komponente in dele, izdelane z aditivnimi postopki [1], [6], [10].

Literatura kaže, da je PeP posebej učinkovit pri odprtih in zunanje dostopnih geometrijah. Zeidler in Böttger-Hiller sta poudarila njegovo vrednost kot tehnologijo naknadne obdelave za aditivno izdelane komponente, kjer prostorske oblike in integrirane geometrije otežujejo uporabo klasičnih metod poliranja [6]. Edaklavan Koroth in sod. so pokazali, da je mogoče PeP vključiti tudi v kombinirane poteke naknadne obdelave; pri aditivno izdelanem nerjavnem jeklu je peskanje z delci, ki mu je sledilo kratko poliranje PeP, omogočilo izrazito izboljšanje hrapavosti ob omejenem skupnem času obdelave [10]. Takšne kombinacije so pomembne, ker je PeP učinkovito pri glajenju srednje velikih neravnin, medtem ko je pri grobih napakah iz prašnih procesov ali delno sintranih delcev pogosto potrebna predhodna agresivnejša obdelava. Tudi reprezentativne aplikativne študije potrjujejo ta trend. Sabotin in sod. so poročali o znatnem zmanjšanju hrapavosti na selektivno lasersko

taljeni mikrofluidni platformi ter o delni odstranitvi geometrijskih napak, značilnih za postopek tiskanja [7]. Podobno so raziskave na nerjavnih jeklih pokazale, da lahko PeP izboljša korozijsko obnašanje, kar je ključna komponenta integritete površine v biomedicinskih in kemično

agresivnih okoljih [11]. Te koristi so pomembne, ker integriteta površine ne pomeni zgolj nizke hrapavosti, temveč vključuje tudi korozijsko odpornost, gostoto napak, čistost in funkcionalno zanesljivost med uporabo.



<b>Brez naknadne obdelave (No post processing)</b>	<b>Peskano (Sandblasted) 20 min</b>	<b>Peskano (Sandblasted) 30 min</b>	<b>Peskano (Sandblasted) 10 min + PeP 5 min</b>	<b>Samo (Only) PeP 70 min</b>
<b>Sa = 19.8 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Sa = 6.4 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Sa = 5.7 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Sa = 5.8 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Sa = 2.6 <math>\mu\text{m}</math></b>

Slika 2: Primer izboljšanja hrapavosti površine

#### 4 TRENUTNE OMEJITVE PRAKTIČNE OMEJITVE PROCESA

Kljub navedenim prednostim PeP ni univerzalna rešitev za končno obdelavo. Prva večja omejitev je združljivost z materiali. Nerjavna jekla in titanove zlitine so razmeroma dobro raziskano področje uporabe, vendar je prenos PeP na druge kovine še vedno močno odvisen od zasnove elektrolita in prilagoditve procesnih pogojev [1], [2]. Baker in medenina sta na primer še vedno bolj občutljiva na poslabšanje kakovosti površine in na izbiro elektrolita [1], [9]. To pomeni, da se je v inženirski praksi treba izogibati trditvam o univerzalni uporabnosti.

Druga velika omejitev se nanaša na notranje elemente in ozke geometrije. Čeprav se za PeP pogosto navaja, da je primeren za kompleksne dele, to najbolj drži za zunanje dostopne površine. Pri majhnih izvrtinah, globokih votlinah in ozkih kanalih postane stabilno oblikovanje VGE težavno, lokalna koncentracija toka pa

lahko povzroči neenakomeren odvzem materiala. Parfenov in sod. so izrecno pokazali, da je učinek VGE učinkovit predvsem pri elementih, večjih od približno 3 do 5 mm; manjši elementi so lahko neposredno izpostavljeni elektrolitu in se zato hitro raztapljajo [4]. Tudi Sabotin in sod. so opazili zmanjšano učinkovitost pri geometrijskih mikroelementih, manjših od 0,5 mm, na AM mikrofluidni platformi [7]. Dong in sod. so pri ozkih bakrenih strukturah preučevali poslabšanje kakovosti površine in ga povezali s poružitvijo parnega filma zaradi prevelike lokalne gostote toka, kar vodi v nastanek napak namesto kontroliranega poliranja [9].

Poliranje notranjih površin je možno, vendar praviloma zahteva namensko orodje in prilagoditev procesa. Cornelsen in sod. so prikazali PeP notranjih površin cevi s pomočjo posebej razvite polirne glave in ustreznega vodenja parametrov ter dosegli vrednosti Sa približno 0,065-0,090  $\mu\text{m}$  pri visoki napetosti [8]. To je pomembno, ker kaže, da je notranje

poliranje izvedljivo, vendar ne na tako neposreden način kot potopno poliranje zunanjih površin. Z drugimi besedami: PeP lahko obravnava tudi nekatere notranje geometrije, vendar le, če je arhitektura opreme prilagojena prav temu namenu.

## 5 SKLEP

Plazemsko elektrolitsko poliranje je močan kandidat za izboljšanje integritete površine kompleksno oblikovanih kovinskih izdelkov, zlasti kadar so ciljne površine zunanje dostopne in jih je z mehanskimi metodami težko kakovostno obdelati. Proces združuje elektrokemijsko raztapljanje z učinki, ki jih nadzira VGE in so povezani s plazmo, kar omogoča hitro zmanjšanje hrapavosti in v številnih primerih tudi izboljšanje funkcionalne kakovosti površine.

Njegovo najmočnejše področje uporabe je poliranje kompleksnih zunanjih površin, vključno z aditivno izdelanimi deli, biomedicinskimi komponentami in kovinskimi izdelki s prostorskimi oblikami. Kljub temu se PeP še vedno sooča s pomembnimi omejitvami, povezanimi z materialno specifično zasnovo elektrolita, stabilnostjo procesa in zmanjšano učinkovitostjo pri notranjih elementih, ozkih votlinah in mikrogeometrijah. Zato je z inženirskega vidika najbolj realno razumeti PeP ne kot popolno zamenjavo vseh metod končne obdelave, temveč kot zelo uporabno, geometrijsko prilagodljivo metodo obdelave znotraj jasno določenega procesnega okna.

Viri:

- [1] Nestler, K., Böttger-Hiller, F., Adamitzki, W., Glowa, G., Zeidler, H., Schubert, A. Plasma Electrolytic Polishing: An Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range. *Procedia CIRP*, 2016, 42, 503-507.
- [2] Huang, Y., Wang, C., Ding, F., Yang, Y., Zhang, T., He, X., Zheng, L., Li, N. Principle, process, and application of metal plasma electrolytic polishing: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021.
- [3] Danilov, I., Hackert-Oschätzchen, M., Zinecker, M., Meichsner, G., Edelmann, J., Schubert, A. Process understanding of plasma electrolytic polishing through multiphysics simulation and inline metrology. *Micromachines*, 2019, 10(3), 214.
- [4] Parfenov, E.V., Farrakhov, R.G., Mukaeva, V.R., Gusarov, A.V., Nevyantseva, R.R., Yerokhin, A. Electric field effect on surface layer removal during electrolytic plasma polishing. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 307, 1329-1340.
- [5] Zhou, C., Su, H., Qian, N., Zhang, Z., Xu, J. Characteristics and function of vapour gaseous envelope fluctuation in plasma electrolytic polishing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119, 7815-7825.
- [6] Zeidler, H., Böttger-Hiller, F. Plasma-Electrolytic Polishing as a Post-Processing Technology for Additively Manufactured Parts. *Chemie Ingenieur Technik*, 2022.
- [7] Sabotin, I., Jerman, M., Lebar, A., Valentinčič, J., Böttger, T., Kühnel, L., Zeidler, H. Effects of plasma electrolytic polishing on SLM printed microfluidic platform. *Advanced Technologies & Materials*, 2022, 47(1), 19-23.
- [8] Cornelsen, M., Deutsch, C., Seitz, H. Electrolytic plasma polishing of pipe inner surfaces. *Metals*, 2018, 8(1), 12.
- [9] Dong, J., Yan, Y., Zhou, P. An Investigation into the Deterioration of Copper Surface Quality in Plasma Electrolytic Polishing. *Journal of The Electrochemical Society*, 2023, 170(6), 063503.
- [10] Edaklavan Koroth, J., Valentinčič, J., Jerman, M., Sabotin, I., Lebar, A., Govekar, E., Jeromen, A., Zeidler, H., Böttger, T., Tischner, F., Zohar-Hauber, K., Osovski, S. Plasma electrolytic polishing of additively manufactured metal parts: Optimizing the post processing workflow. *Open Research Europe*, 2024, 4, 48.
- [11] Zatkalková, V., Podhorský, Š., Štrbák, M., Liptáková, T., Markovičová, L., Kuchariková, L. Plasma Electrolytic Polishing: An Ecological Way for Increased Corrosion Resistance in Austenitic Stainless Steels. *Materials*, 2022, 15(12), 4223.

## RAZVOJ DIGITALNEGA DVOJČKA MEHATRONSKEGA INDUSTRIJSKEGA ŠTANČNEGA ORODJA

Tomaž PEPELNJAK<sup>1</sup>, Uroš ŠTUKLEK<sup>2</sup>, Albin SIRC<sup>3</sup>, Ema STEFANOVSKA<sup>1</sup>, Dejan ROŽIČ<sup>2</sup>,  
Iztok SATLER<sup>2</sup>, Jure PETERNEL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

<sup>2</sup>Dafra kontakt tehnologija d.o.o.

<sup>3</sup>Egasi d.o.o.

### IZVLEČEK

Štančna orodja zaradi visokih obratovalnih hitrosti predstavljajo velik izziv za vzpostavitev zanesljivih mehatronskih odzivnih sistemov. V prispevku predstavljamo razvoj večrezilnega mehatronskega štančnega orodja, integriranega v industrijski proizvodni proces. Orodje omogoča prilagodljivo nastavljanje lege pestičev ter s tem izdelavo različnih geometrijskih variant izdelkov na isti proizvodni liniji, pri čemer sistem temelji na krmiljenem delovanju štirih aktuatorjev. Razvoj orodja je potekal v okviru projekta Pametno mehatronsko progresivno orodje za štančanje tipskih izdelkov. V okviru projekta so Dafra kontakt tehnologije d.o.o., Egasi d.o.o. ter Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani razvili koncept prilagodljivega delovanja orodja glede na zahteve izdelka. Ključni cilji so povečanje fleksibilnosti proizvodnje, zmanjšanje materialnega odpada ter izboljšanje kakovosti procesa z uporabo digitalnega dvojčka. Eksperimentalna validacija na industrijskem orodju potrjuje, da predlagani pristop prispeva k povečanju fleksibilnosti proizvodnje ter omogoča zanesljivo delovanje sistema s štirimi aktuatorji. Razviti namenski aktuatorji omogočajo vzpostavitev zahtevanih nastavitvev lege rezalnih pestičev za izbrane geometrije izdelka, digitalni dvojček pa zagotavlja spremljanje delovanja, analizo procesnih parametrov ter vzpostavitev povratne zanke za nadzor in optimizacijo obratovanja orodja.

### 1 UVOD

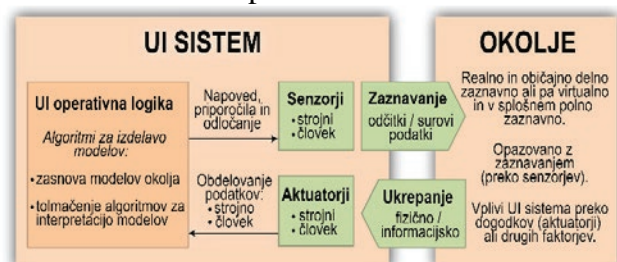
Sodobni štančni procesi zahtevajo visoko fleksibilnost, ki je pri klasičnih, namensko zasnovanih orodjih močno omejena. Mehatronske rešitve in digitalni dvojčki predstavljajo učinkovit pristop za povečanje prilagodljivosti, a so njihove aplikacije v štančnih procesih še vedno redke in omejene.

V okviru RRI projekta *Pametno mehatronsko progresivno orodje za štančanje tipskih izdelkov*, financiranega iz javnega razpisa *Spodbude za raziskovalno-razvojne projekte NOO*, je podjetje Dafra kontakt tehnologije d.o.o. razvilo pristope za optimizacijo delovanja mehatronskega progresivnega štančnega orodja (v nadaljevanju: mehatronsko orodje). Glavni cilj je bil vzpostavitev prilagodljivega delovanja orodja glede na zahteve geometrije izdelka. Fizični sistem vključuje pet aktuatorjev, od katerih digitalni dvojček spremlja štiri za vklapljanje in izklapljanje pestičev.

Digitalni dvojček opredeljujemo kot razširjen CAD model izdelka, ki poleg geometrijskih in materialnih lastnosti vključuje tudi podatke o

senzorjih in aktuatorjih za spremljanje in nadzor delovanja sistema, v našem primeru štirih aktuatorjev. Predstavlja osnovo za simulacijski model izdelka za napovedovanje obnašanja sistema pri različnih obratovalnih pogojih, pri čemer je natančnost simulacij odvisna od kakovosti vhodnih podatkov in kompleksnosti modelov.

Za učinkovito delovanje mora digitalni dvojček omogočati interakcijo z uporabnikom ter vključevati ustrezne logične modele za vodenje sistema – slika 1. Na tej osnovi predstavljamo razvoj digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja z integriranim sistemom štirih aktuatorjev za prilagajanje lege pestičev, ki omogoča izboljšano fleksibilnost in nadzor izdelave v štančnih procesih.



Slika 1: Shema delovanja digitalnega dvojčka in interakcija z okoljem [1].

## 2 DIGITALNI DVOJČEK MEHATRONSKEGA ŠTANČNEGA ORODJA

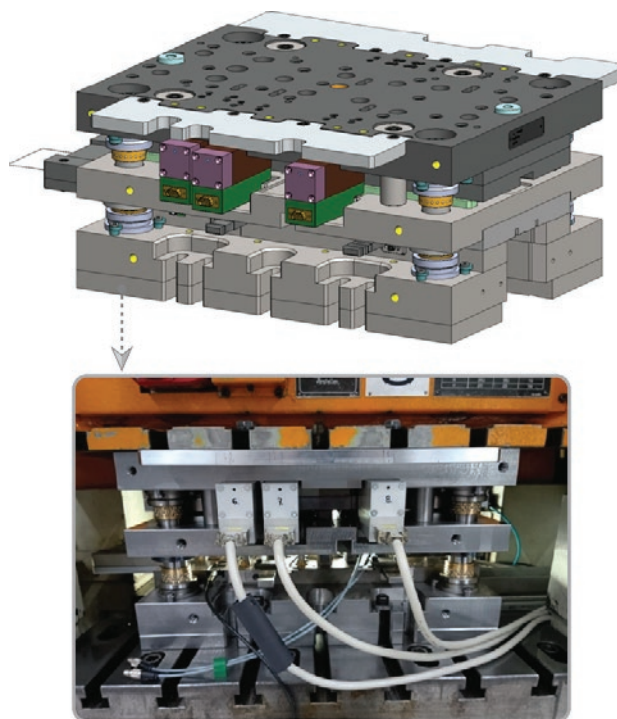
V dosegljivi strokovni in znanstveni literaturi so digitalni dvojčki štančnih procesov izredno redki [2, 3], zato smo morali za razvijano mehatronsko štančno orodje koncept razviti popolnoma na novo. V specifičnem kontekstu preoblikovanja pločevine digitalni dvojček predstavlja virtualno podobo procesa, osredotočeno na preoblikovanje kovinskih surovcev (v našem primeru traku pločevine). Zaradi fleksibilnosti analiziranega industrijskega mehatronskega preoblikovalnega orodja se fokusiramo na delovanje aktivnih delov preoblikovalnega orodja in njihove preklape za izdelavo do osmih različnih oblik izdelkov.

Pri delovanju izbranega tipa mehatronskega orodja imajo ključno vlogo preklopni aktuatorji [4], v obravnavanem primeru štirje aktuatorji, ki zagotavljajo, da lahko z istim orodjem izdelujemo družino oblikovno sorodnih izdelkov, kot so na primer štancane komponente za baterijske sklope. Koncept delovanja takega preklopnega mehatronskega orodja in primernost izbire aktuatorja sta bila prvotno preverjena na testnem orodju z enim aktuatorjem, medtem ko obravnavani industrijski sistem temelji na usklajenem delovanju štirih aktuatorjev. Slednji omogočajo vklapljanje in izklapljanje pestičev za prebijanje izbranih oblik.

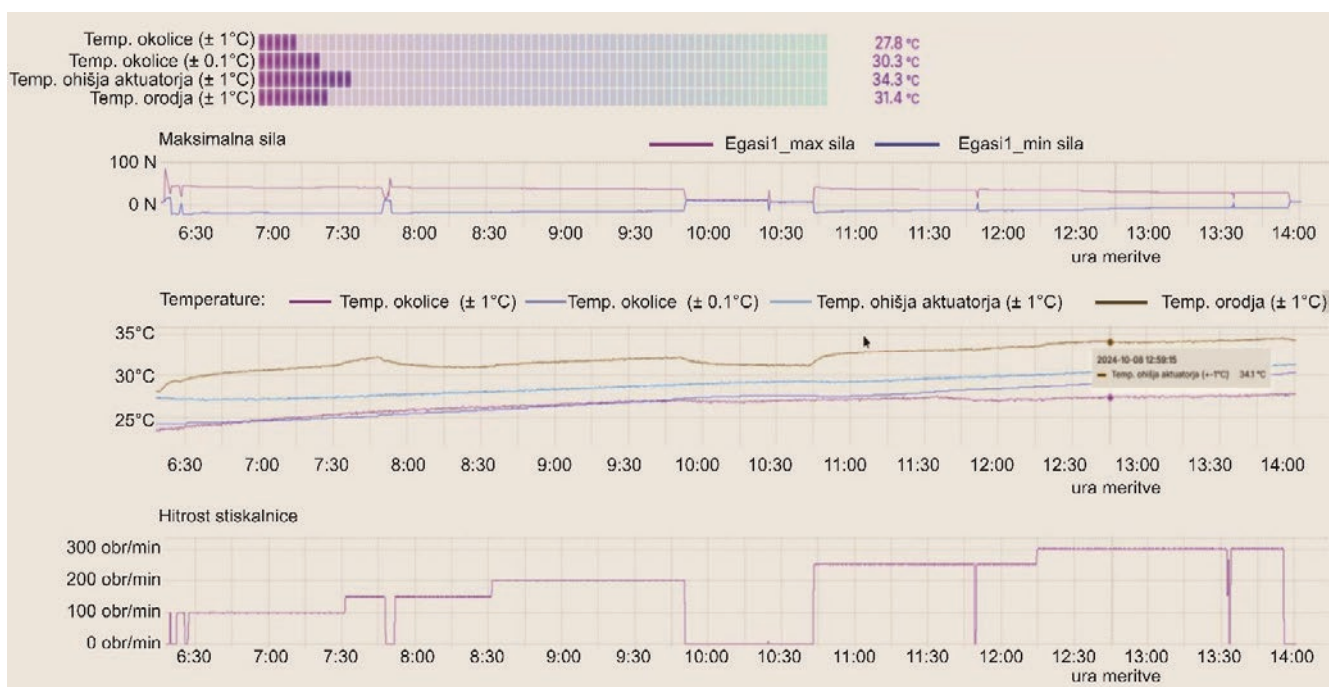
Za premikanje preklopnega mehanizma lahko uporabljamo pnevmatske ali hidravlične pogone ter elektromotorje. Vsi navedeni sistemi morajo v primeru štančnega orodja delovati v okolju z izrazitimi vibracijami, ki so posledica gibanja gornjega dela orodja in obratovanja stroja. Ker so se v preteklosti pnevmatski pogoni izkazali za preveč kompleksne in manj zanesljive pri hitro tekočih preoblikovalnih orodjih, smo se odločili za razvoj cevastega linearnega elektromotorja v okolju s konstantnim virom vibracij. Linearne elektromotorje je za potrebe projekta razvilo podjetje Egasi d.o.o., pri čemer je bil poseben poudarek namenjen ustreznemu uležajenju gibajočih se magnetnih cevok, ki predstavljajo glavne gibljive dele aktuatorjev. Upoštevati je treba, da se celoten sistem petih aktuatorjev giblje skupaj z gornjim delom orodja s takti do 300 gibov na minuto – slika 2. V nadaljnjih razvojnih projektih se namerava mehatronska preobliko-

valna orodja uporabljati na strojih, ki zmorejo do 1000 gibov na minuto. Zaradi navedenih dinamičnih obremenitev gibajočih se delov orodja je optimalno uležajenje vsakega posameznega aktuatorja ključnega pomena.

Sistem digitalnega dvojčka vključuje senzorje v fizičnem orodju za spremljanje procesa, v našem primeru delovanja štirih aktuatorjev za vklapljanje in izklapljanje pestičev. Senzorji prek komunikacijskih vmesnikov posredujejo podatke v digitalno okolje, kjer jih digitalni dvojček analizira z uporabo algoritmičnih modelov in vizualizacij, kar omogoča vpogled v obratovanje sistema. Za dodatno spremljanje so v ohišja aktuatorjev, aktivni del orodja, ohišje orodja in njegovo okolico vgrajeni temperaturni senzorji, ki omogočajo zaznavanje in preprečevanje pregrevanja posameznih segmentov merjenega okolja [5]. Poleg navedenih štirih pestičev je v orodju tudi pestič, ki ga trenutno v digitalnem dvojčku ne spremljamo in z ustreznimi nastavitvami aktuatorja le reže izdelke vsake serije na ustrezno dolžino.

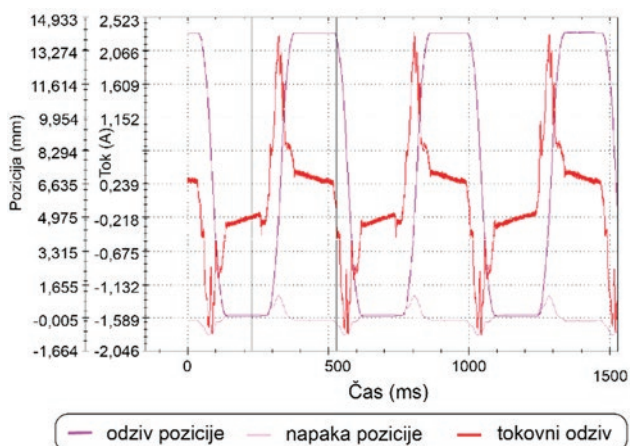


Slika 2: CAD model industrijskega mehatronskega štančnega orodja s petimi aktuatorji (zgoraj) in orodja na stroju (spodaj). Aktuatorji omogočajo prilagodljivo nastavljanje lege pestičev za različne geometrije izdelkov – trije aktuatorji so vidni, dva sta na nasprotni strani orodja.



Slika 3: Merjene temperature na ohišju aktuatorja pri delovanju pri 100, 200, 250 in 300 obratih/min.

Poleg meritev temperatur se je v aktuatorjih meril tok, potreben za premikanje magnetnih cevk, s katerimi se nastavlja lega preklopnega mehanizma za uravnavanje višine pestičev v orodju. Na podlagi signalov položaja aktuatorjev, izmerjenega toka ter temperaturnih meritev se je s pomočjo digitalnega dvojčka spremljalo stanje mehatronskega štančnega orodja [6]. Primer beleženja temperatur prikazuje slika 3, medtem ko so na sliki 4 prikazani merjeni tokovi potrebni za premikanje aktuatorjeve magnetne cevke v odvisnosti od lege aktuatorja.

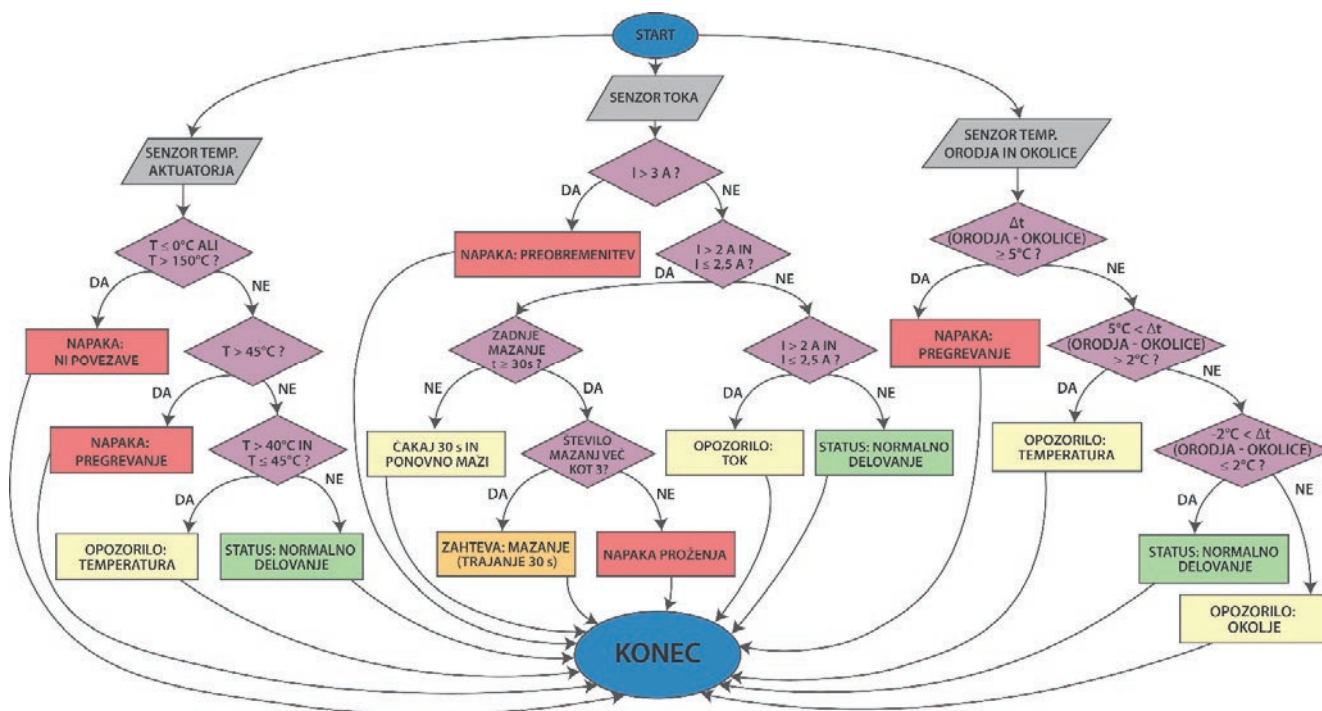


Slika 4: Tokovi na aktuatorju, potrebni za premikanje preklopnega mehanizma.

### 3 LOGIČNE SCHEME DIGITALNEGA DVOJČKA

Za delovanje digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja smo morali opredeliti logične povezave, na podlagi katerih se določajo posamezne akcije fizičnega dela sistema glede na digitalne modele. Pri tem je ključno, da sistem obravnava štiri aktuatorje, katerih delovanje je medsebojno povezano in odvisno od skupnih ter posameznih obratovalnih pogojev.

V ta namen smo vsi trije partnerji projekta definirali mejne pogoje, pri katerih se za vsakega izmed štirih aktuatorjev posebej sproži bodisi akcija varnostnega mazanja orodja bodisi varnostna funkcija za zaščito aktuatorjev pred preobremenitvijo – slika 5. Logika delovanja digitalnega dvojčka temelji na zaporednem vrednotenju merjenih veličin, predvsem toka aktuatorjev ter temperatur aktuatorjev, orodja in okolice. Sistem na podlagi definiranih mejnih vrednosti preverja posamezna stanja ter jih razvršča v normalno delovanje, opozorila ali napake.



Slika 5: Shema delovanja digitalnega dvojčka za spremljanje in vrednotenje toka ter temperature aktuatorjev.

V primeru zaznanih odstopanj digitalni dvojček sproži ustrezne odzive, kot so aktivacija mazanja, generiranje opozoril ali zaustavitev sistema, s čimer se zagotavlja varno in zanesljivo obratovanje mehatronskega orodja.

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, pri čemer prvi sklop omogoča spremljanje in analizo vpliva temperature na delovanje vseh štirih aktuatorjev ter preklopnega sistema za nastavitev lege pestičev. V drugem delu programskega okolja se spremljajo in vrednotijo vplivni parametri preklopnega sistema na velikost sil posameznega preklopnega mehanizma, ki jo slednji povzročata na posamezne aktuatorje.

Rezultati so prikazani v grafični in tabelarni obliki, kar omogoča analizo časovnega poteka toka posameznih aktuatorjev, izračun statističnih vrednosti ter primerjavo med posameznimi merilnimi kanali. Sistem dodatno vključuje

definirana merilna območja ter sprotno določanje obratovalnega stanja, vključno z generiranjem opozoril in zaznavanjem odstopanj.

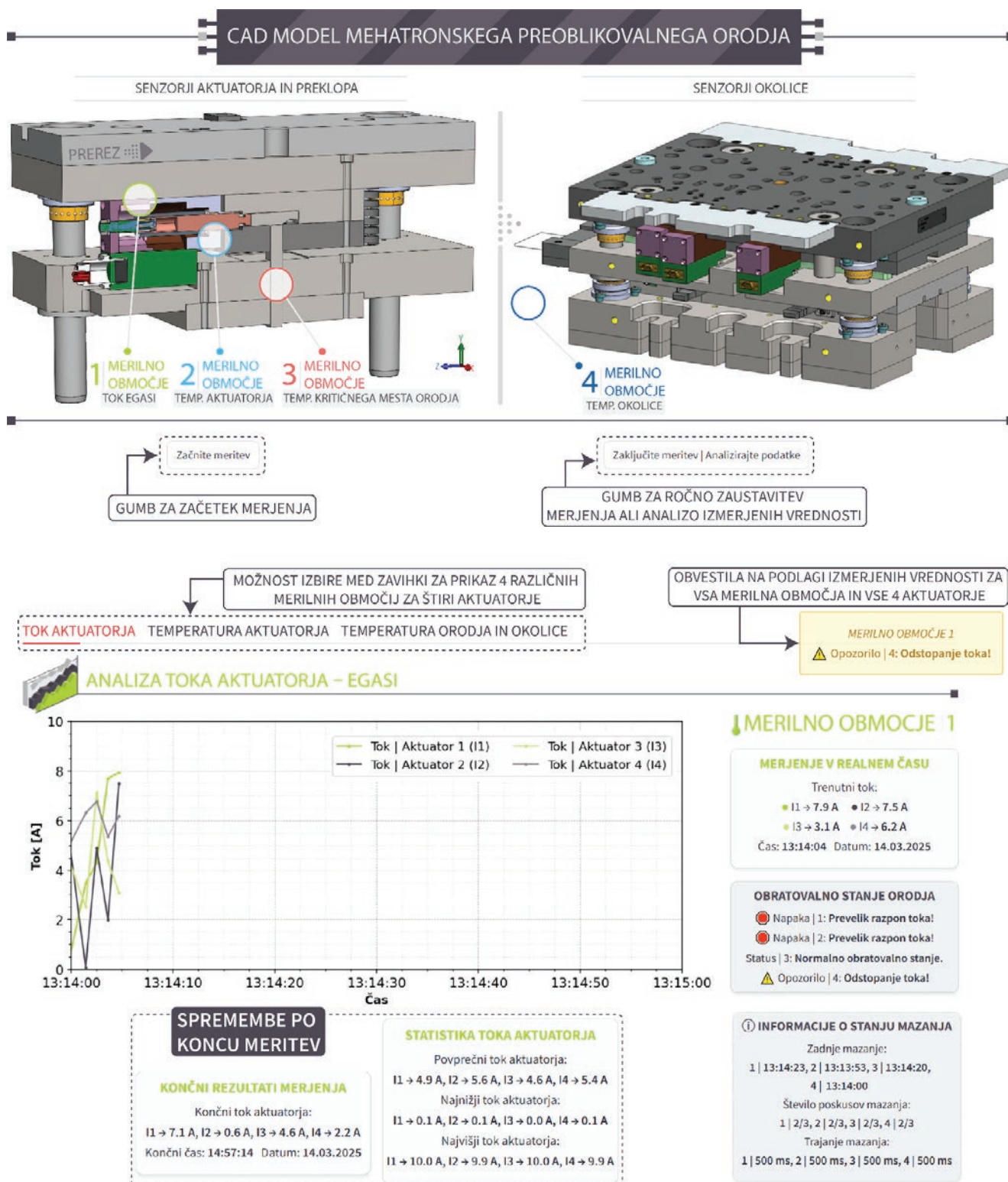
Na ta način se lahko že pred konstrukcijo preklopnega mehanizma ugotovi, kateri parametri najbolj vplivajo na obremenitve posameznega aktuatorja kot tudi porazdelitev obremenitev med vsemi štirimi aktuatorji v mehatronskem orodju ob njegovem delovanju. Slika 6 prikazuje merilna območja na posameznem aktuatorju, pestiču in okolici orodja ter okolje digitalnega dvojčka za spremljanje delovanja sistema, medtem ko slika 7 prikazuje interaktivni pregled in analizo rezultatov po izvedenih meritvah.

#### 4 SKLEP

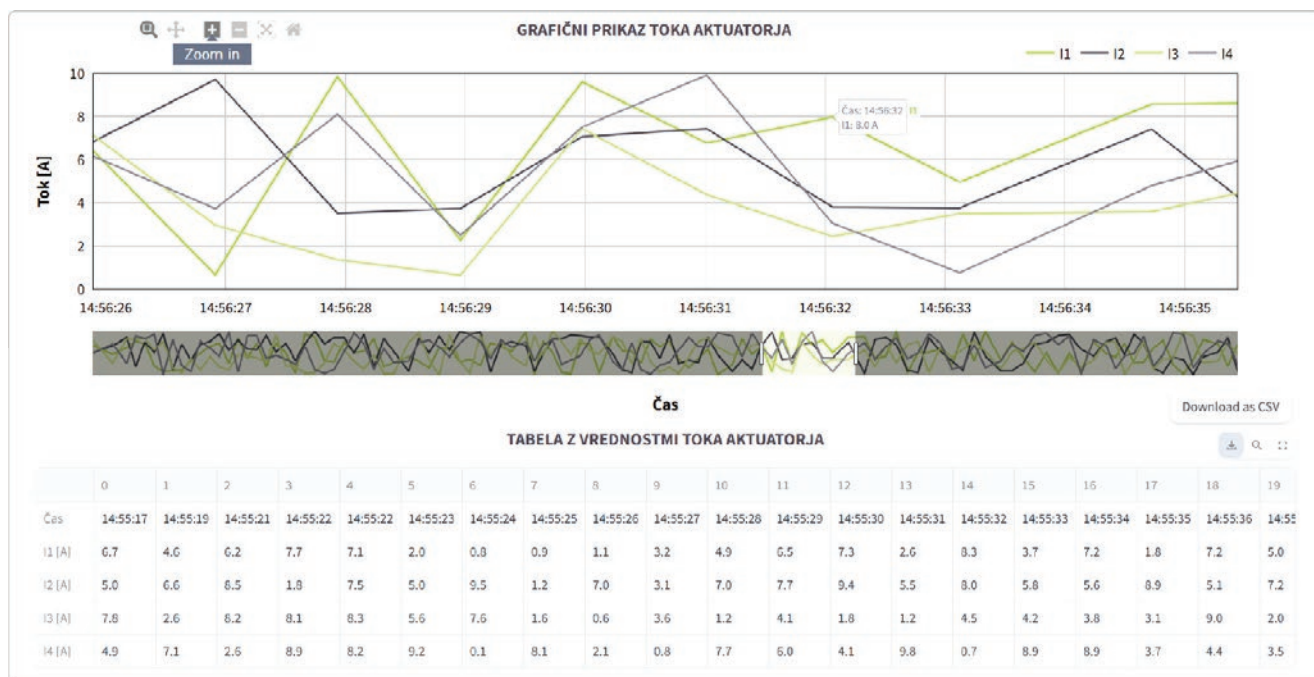
Digitalni dvojček industrijskega mehatronskega štančnega orodja je namenjen podpori proizvodnje s prilagodljivimi štančnimi orodji, pri čemer sistem temelji na usklajenem delovanju štirih aktuatorjev. Takšen pristop omogoča zmanjšanje materialnega odpada ob menjavi proizvo-

dnih serij ter bistveno skrajšanje časa nastavitve pri izdelavi geometrijsko podobnih izdelkov. V okviru sistema digitalni dvojček omogoča celovito spremljanje in nadzor delovanja vseh štirih aktuatorjev, sprožanje varnostnega mazanja ter

zaznavanje in signalizacijo kritičnih obratovalnih stanj za posamezni aktuator in sistem kot celoto. Rezultati izkazujejo izrazit potencial digitalnega dvojčka za bistveno povečanje zanesljivosti in učinkovitosti mehatronskih štančnih sistemov.



Slika 6: Prikaz merilnih območij v orodju ter delovanja digitalnega dvojčka za štiri aktuatorje z vizualizacijo tokov in obratovalnega stanja sistema.



Slika 7: Interaktivni prikaz rezultatov meritev z grafično vizualizacijo in analizo podatkov po izvedenih meritvah.

Vir

- [1] Pepelnjak, T., Štuklek, U., Sirc, A., Rožič, D., Peternel, J., Stefanovska, E. Razvoj digitalnega dvojčka progresivnega mehatronskega štančnega orodja. Ventil, 32(1), str. 36–43, 2026.
- [2] Stefanovska, E., Pepelnjak, T. Development of a flexible tooling system for sheet metal bending. Advances in Production Engineering & Management, 17(3), str. 311–325, 2022.
- [3] Stefanovska, E., Pepelnjak, T. Optimising predictive accuracy in sheet metal stamping with advanced machine learning: A LightGBM and neural network ensemble approach. Advanced Engineering Informatics, 65, 103103, str. 1–17, 2025.
- [4] Pepelnjak, T. Analize aktuatorskega pestičnega sklopa za mehatronsko preoblikovalno orodje. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024.
- [5] Pepelnjak, T., Stefanovska, E., Sevšek, L., Rupnik Poklukar, D. Razvoj digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja – optimizacija sistema. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024.
- [6] Štuklek, U. Poročilo projekta Pametno mehatronsko štančno orodje za štancanje tipskih izdelkov. Žalec: Dafra d.o.o., 2024.

## UPORABA 3D-OPTIČNEGA SKENIRANJA ZA DOLOČANJE K-FAKTORJA PRI UPOGIBANJU Z LASERJEM REZANEGA KONSTRUKCIJSKEGA JEKLA

**Tadej PERŠAK, Kristijan ŠKET, David POTOČNIK, Marko SIMONIČ, Goran MUNDAR, Mirko FICKO, Simon KLANČNIK, Tomaž BRAJLIH**

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

### IZVLEČEK

*K-faktor, definiran kot razmerje med položajem nevtralne osi in debelino pločevine, je ključen parameter pri določanju razvite dolžine, vendar ni materialna konstanta, temveč je odvisen od procesnih pogojev. V raziskavi je bil eksperimentalno določen za 3 mm konstrukcijsko jeklo po 90° upogibanju s pestičem in matrico. Geometrija deformiranega kosa je bila zajeta z optičnim 3D-skenerjem GOM ATOS, položaj nevtralne osi pa določen na osnovi analize meritev. Rezultati kažejo odstopanje od privzetih vrednosti, kar potrjuje vpliv dejavnikov, kot so anizotropija materiala, razmerje med radijem in debelino, geometrija orodja, trenje in elastična izravnava. Izmerjena povprečna vrednost K-faktorja je znašala 0,515 ( $\sigma = 0,017$ ; razpon 0,51–0,55), kar pomembno odstopa od pogosto privzete vrednosti 0,33.*

*Ker K-faktor ni neposredno merljiv, je bil določen posredno z uporabo primerjave med dejansko razvito dolžino in geometrijo upognjenega kosa. Na osnovi izmerjenih veličin (radij, debelina, dolžine in kot upogiba) je bil izračunan parameter, ki najbolje opisuje realno stanje. Predlagani pristop omogoča natančnejšo določitev vhodnih podatkov za CAD-modeliranje ter izboljšuje ujemanje razvitega stanja in ponovljivost proizvodnje.*

### 1 UVOD

Upogibanje pločevine je osnovna proizvodna tehnika, ki se pogosto uporablja pri izdelavi konstrukcijskih in funkcionalnih komponent. Pri upogibanju materiala notranja vlakna doživijo tlačno, zunanja pa natezno deformacijo. Nevtralna os, ki se nahaja med tema območjema, se ob plastični deformaciji pomika proti notranji površini. K-faktor, opredeljen kot razmerje med razdaljo od nevtralne osi do notranje površine in skupno debelino materiala, se pogosto uporablja za prikaz položaja te osi.

V industrijskih aplikacijah se običajno predpostavlja, da je K-faktor konstanten, navadno v razponu od 0,3 do 0,5, odvisno od materiala in pogojev upogibanja. Vendar so prejšnje raziskave pokazale, da je ta predpostavka preveč poenostavljena, saj je K-faktor odvisen od več dejavnikov, vključno z geometrijo upogibanja, lastnostmi materiala in procesnimi spremenljivkami [1–3]. Znatna spremenljivost je bila pripisana razmerju med polmerom upogibanja in debelino pločevine, anizotropiji materiala, ki je posledica postopkov valjanja, ter pogojem stika med orodjem in obdelovancem.

Lasersko rezanje, ki se pogosto uporablja za pripravo polizdelkov, dodatno poveča kompleksnost, saj spreminja mikrostrukturo in stanje zaostalih napetosti v toplotno prizadeti coni. Čeprav se ta učinek včasih šteje za glavni vzrok odstopanj, sam po sebi ne pojasni v celoti spremenljivosti, ki jo opazimo v praksi. Zato je potreben celovit eksperimentalni pristop, da bi zajeli skupni vpliv več dejavnikov.

Cilj te študije je z uporabo visokoločljivega 3D optičnega skeniranja eksperimentalno količinsko opredeliti K-faktor za lasersko rezane pločevine iz konstrukcijskega jekla ter oceniti, v kolikšni meri različne procesne in materialne razmere prispevajo k njegovi spremenljivosti.

### 2 METODE

Za eksperimentalno preiskavo je bilo uporabljeno konstrukcijsko jeklo S235 z nazivno debelino 3 mm. Ker je bil material dobavljen v valjanem stanju, se pričakuje, da bo kazal anizotropne mehanske lastnosti, povezane s smerjo valjanja. Za rezanje preskusnih vzorcev velikosti 30 X 80 mm v tipičnih industrijskih pogojih je bil uporabljen sistem z vlakenskim

laserjem **BODOR i7** moči 3 kW. Vsak vzorec je imel en 90° upogib, ki je sledil ravnemu odseku.

Za oceno vpliva usmerjenosti materiala so bili izdelani vzorci z upogibnimi linijami, vzporednimi in pravokotnimi na smer valjanja. Vsak vzorec je bil podvržen kontroliranemu upogibanju na CNC-upogibnem stroju **TRUMPF TruBend 3066**. Pri procesu upogibanja je bil uporabljen pestič z nominalnim polmerom 3 mm in prizma z odprtino 16 mm (kot 30°). Za vse vzorce je bil kot upogiba nastavljen na 90°.

Po upogibanju je bil za optični zajem geometrije vsakega vzorca uporabljen optični sistem s strukturirano svetlobo **ATOS Core 200**. Za zagotovitev popolne pokritosti površine je merilni postopek vključeval pripravo površine, nanos referenčnih označb in ponavljajoče se skeniranje. Podatki o oblaku točk so bili pretvorjeni v triangulirano mrežo za geometrijsko analizo.

Podatki so bili uporabljeni za izračun osnovnega parametra, ki opisuje obnašanje materiala med upogibanjem – K-faktorja, ki določa lego nevtralne osi v prerezu pločevine.

Bend Allowance (BA) – dodatek za krivino predstavlja dolžino loka nevtralne osi v območju upogiba. Pri praktičnih meritvah ga lahko določimo neposredno iz dejanskega kosa z uporabo naslednje enačbe:

$$BA = L_{flat} - (L_1 + L_2) \quad (1)$$

kjer je:

- $L_1$  – dolžina daljšega kraka do začetka notranjega radija,
- $L_2$  – dolžina krajšega kraka do začetka notranjega radija,
- $L_{flat}$  – razvita dolžina pred upogibom.

Ta pristop je posebej uporaben v proizvodnji, saj ne zahteva poznavanja teoretičnih parametrov materiala, temveč temelji na realnih meritvah.

K-faktor opisuje relativno lego nevtralne osi glede na debelino pločevine. Definiran je kot razmerje med razdaljo nevtralne osi od notranje površine in celotno debelino materiala.

Na podlagi izračunanega dodatka za krivino lahko K-faktor določimo z enačbo:

$$K = \left( \left( \frac{BA \times 180}{\pi \times A} \right) - R \right) / t \quad (2)$$

kjer je:

- $t$  – debelina pločevine,
- $A$  – kot upogiba ( $v^\circ$ ),
- $R$  – notranji radij,
- $BA$  – dodatek za krivino.

### 3 EKSPERIMENTALNI POSTOPEK

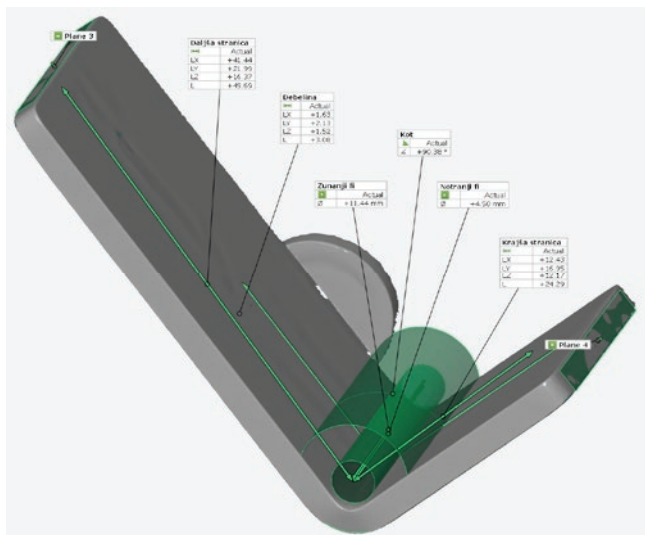
Za merjenje vpliva posameznih parametrov procesa na efektivni K-faktor je bil uporabljen strukturiran pristop načrtovanja poskusov (DOE). Ker je bila odprtina spodnjega orodja v vseh poskusih konstantna, sta bila v eksperimentalni načrt vključena le dva spreminjajoča se dejavnika. Uporabljen je bil polni faktorski načrt z dvema faktorjema na dveh ravneh ( $2^2$ ), kar je dalo štiri različne eksperimentalne situacije. Vsak pogoj je bil ponovljen enkrat, da bi povečali statistično zanesljivost in omogočili oceno spremenljivosti procesa, kar je skupaj dalo osem vzorcev.

Preučevana dejavnika sta bila določena takole: usmerjenost linije upogibanja glede na smer valjanja pločevine (0° in 90°) je predstavljala dejavnik A, kot pestiča (30° in 86°) pa dejavnik B. Da bi zagotovili, da so vse kombinacije povezane s praktičnimi proizvodnimi nastavitvami, so bile vrednosti za vsak dejavnik izbrane glede na pomen v industriji in razpoložljivost orodja.

Kot upogiba (90°), debelina materiala (3 mm), tehnika upogibanja (prosto upogibanje) in parametri laserskega rezanja so bili enaki za vse poskuse. Pred izdelavo je bil vrstni red poskusov naključno določen, da bi zmanjšali sistematično pristranskost. Da bi zmanjšali vpliv lokalne spremenljivosti materiala, so bili vzorci razporejeni po celotni pločevini.

Za vsak vzorec so bile uporabljene enake tehnike naknadne obdelave in merjenja. Za zajem deformirane geometrije je bil uporabljen optični sistem GOM ATOS (slika 1), pridobljeni podatki, ki smo jih merili so prikazani na sliki 2. Podatki o oblaku točk pa so bili pretvorjeni v trikotniško mrežo. Iz te geometrije so bili izračunani položaj

nevtalne osi ter notranji in zunanji polmer. Z uporabo istega računskega postopka je bil za vsak vzorec zanesljivo določen K-faktor.



Slika 1: Merjenje v GOM Inspect 2018

- debelina pločevine  $t$ , ki se giblje okoli 3 mm in kaže majhna odstopanja zaradi toleranc materiala,
- dolžini ravnih krakov  $L1$  in  $L2$ , merjeni do začetka notranjega radija,
- notranji radij upogiba  $R$ , določen na podlagi analize izmerjene geometrije.

Tabela 1: Merilni podatki vzorcev po upogibanju

Ime vzorca	A [°]	t [mm]	L2 [mm]	L1 [mm]	R [mm]
111V	89,98	3,1	24,28	49,41	2,385
112V	90,2	3,09	24,22	49,66	2,315
113H	90,4	3,11	24,24	49,44	2,325
114H	90,14	3,09	24,11	49,42	2,405
121V	90,23	3,11	24,29	49,41	2,31
122V	90,38	3,08	24,29	49,69	2,25
123H	90,23	3,09	24,23	49,41	2,475
124H	90,33	3,1	24,12	49,46	2,505

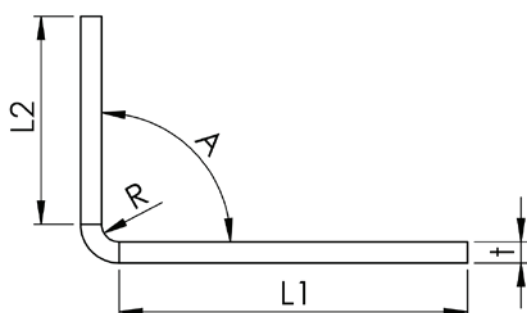
## 4 REZULTATI

Rezultati izračunov so predstavljeni v tabeli 2, kjer so za posamezne vzorce podane vrednosti dodatka za krivino (BA) in pripadajočega K-faktorja. Iz podatkov je razvidno, da se vrednosti BA gibljejo v razmeroma ozkem območju med 6,02 mm in 6,47 mm, kar potrjuje dobro ponovljivost procesa upogibanja in stabilnost izbranih procesnih parametrov.

Tabela 2: Izračunani parametri upogibanja pločevine

Ime vzorca	BA [mm]	K-faktor
111V	6,31	0,53
112V	6,12	0,51
113H	6,32	0,54
114H	6,47	0,55
121V	6,3	0,54
122V	6,02	0,51
123H	6,36	0,51
124H	6,42	0,51

Podobno velja za K-faktor, katerega vrednosti se nahajajo med 0,51 in 0,55, s povprečno vrednostjo 0,515 in majhnim standardnim odklonom 0,017. Majhna razpršenost rezultatov



Slika 2: Merjene dimenzije

Na podlagi izvedenih meritev smo pridobili eksperimentalne podatke, ki so zbrani in sistematično predstavljeni v tabeli 1. Meritve so bile izvedene na vzorcih, ki so se razlikovali glede na usmerjenost glede na smer valjanja (V – pravokotno, H – vzporedno), pri čemer so bili ostali procesni parametri nadzorovani in čim bolj konstantni.

V tabeli so za vsak posamezen vzorec prikazani osnovni geometrijski in procesni parametri, ki vplivajo na obnašanje pločevine med upogibanjem. Med njimi so:

- kot upogiba  $A$ , ki je v vseh primerih blizu  $90^\circ$ , kar omogoča primerljivost rezultatov,

potrjuje zanesljivost meritev in uporabljenega računskega postopka.

Opaziti je mogoče tudi rahle razlike med vzorci z oznako H (vzporedno s smerjo valjanja) in V (pravokotno na smer valjanja), vendar te razlike niso izrazite, kar nakazuje, da vpliv smeri valjanja pri obravnavanih pogojih ni dominanten dejavnik.

Dobljeni rezultati dodatno potrjujejo, da je mogoče K-faktor za obravnavani material in izbrane procesne parametre obravnavati kot relativno konstanten. To omogoča njegovo uporabo kot zanesljivega vhodnega parametra pri modeliranju pločevinskih izdelkov v CAD/CAM okoljih.

## 5 DISKUSIJA

Rezultati kažejo, da je K-faktor za obravnavani material in izbrane procesne pogoje relativno stabilen, saj se giblje med 0,51 in 0,55. Majhen standardni odklon potrjuje dobro ponovljivost procesa in zanesljivost meritev.

Dobljene vrednosti so blizu privzeti vrednosti  $K = 0,5$ , ki se uporablja v CAD/CAM sistemih, vendar rahlo odstopajo proti višjim vrednostim. To pomeni, da lahko eksperimentalno določanje K-faktorja izboljša natančnost izračuna razvite dolžine.

Vpliv smeri valjanja se je izkazal kot majhen, medtem ko stabilnost dodatka za krivino (BA) dodatno potrjuje dobro nadzorovan proces.

Na podlagi rezultatov lahko zaključimo, da je privzeti K-faktor primeren kot izhodišče, vendar njegova eksperimentalna določitev omogoča večjo natančnost in zanesljivost proizvodnje.

## 6 OMEJITVE

Študija je omejena na en kot upogiba ( $90^\circ$ ), konstantno debelino pločevine (3 mm) ter en tip materiala (S235). Vplivi okolijskih dejavnikov niso bili posebej analizirani, prav tako je bil uporabljen le en nabor parametrov orodja. Čeprav optična merilna metoda omogoča visoko natančnost zajema geometrije, se pri obdelavi podatkov in generiranju trikotniške mreže pojavljajo določene merilne negotovosti.

## 7 ZAKLJUČEK

Ta študija dokazuje, da K-faktorja pri upogibanju pločevine ni mogoče obravnavati kot konstanto. Gre za od procesa odvisno lastnost, na katero vpliva več medsebojno povezanih dejavnikov, med drugim zaostale napetosti, geometrijska razmerja, pogoji obdelave in anizotropija materiala. Eksperimentalna določitev s 3D optičnim skeniranjem ponuja zanesljivo metodo za natančno merjenje K-faktorja in izboljšanje natančnosti izračunov razvijanja pločevine.

Rezultati kažejo, da lahko uporaba eksperimentalno določenih vrednosti bistveno zmanjša odstopanja med načrtovano in dejansko geometrijo izdelkov, kar neposredno vpliva na kakovost in ponovljivost proizvodnje. Za povečanje natančnosti se zato priporoča, da sistemi CAD/CAM namesto konstantnih vrednosti uporabljajo spremenljive, eksperimentalno kalibrirane modele K-faktorja.

V nadaljnjih raziskavah bi bilo smiselno razširiti analizo na različne debeline pločevine, materiale in geometrije orodij ter vključiti vpliv drugih kotov upogiba. Tak pristop bi omogočil vzpostavitev celovitih podatkovnih baz za napredne modele upogibanja in še dodatno izboljšal napovedno natančnost v industrijskih aplikacijah.

Viri:

- [1] Bodzás, S. Manufacturing design and analysis of bending processes. *Materials* 9, 272 (2025). <https://doi.org/10.3390/ma9080272>
- [2] Arola, A.M. et al. Mechanical behavior and bendability of sheet metals. *Materials Today Communications* 26, 101948 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101948>
- [3] Zong, K. Effects of K factor on sheet metal length. *Applied Mechanics and Materials* 727–728, 181–184 (2015). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.727-728.181>

## NAPOVEDOVANJE OBRABE ORODJA ZA REZKANJE Z UPORABO STROJNEGA UČENJA

Vid GANTAR<sup>1</sup>, Gašper GANTAR<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani

<sup>2</sup>Visoka šola za proizvodno inženirstvo

<sup>3</sup>Fakulteta za varstvo okolja

### IZVLEČEK

*V prispevku je opisan primer napovedovanja obrabe orodja za rezkanje z uporabo dveh v industrijskih aplikacijah uveljavljenih metod strojnega učenja: naključni gozdovi in nevronske mreže. Rezultati validacije so potrdili, da sta oba implementirana modela sposobna natančno napovedovati obrabo rezalnega orodja. Uporaba predstavljenega sistema omogoča zmanjšanje števila zaustavitev in znižanje proizvodnih stroškov.*

### 1 UVOD

Rezkanje je postopek odrezovanja, pri katerem material odstranjuje okoli svoje osi vrteče se orodje (rezkar) z več rezili oz. rezalnimi robovi. Orodje je lahko iz enega dela (na primer stebelni rezkar) ali pa se uporabi rezkalno glavo, na katero so nameščene rezalne ploščice, ki se po obrabi zamenjajo z novimi.

Z usklajenim vrtenjem rezkarja in podajanjem obdelovanca oziroma orodja se odstranjuje material. Postopek se uporablja za izdelavo ravnih in oblikovanih površin, utorov, žepov, zobnikov, navojev ter najzahtevnejših tridimenzionalnih oblik. Poznamo več načinov rezkanja, ki omogoča natančno, učinkovito in prilagodljivo obdelavo različnih materialov.

Parametri rezanja, ki imajo ključno vlogo pri določanju kakovosti rezanega izdelka, učinkovitosti procesa in življenjske dobe orodja so: rezalna hitrost ( $v_c$ ), podajalna hitrost ( $f$ ) in globina rezanja ( $a$ ) ter število rezil rezkarja in širina odrezovanja, ki je navzgor omejena s premerom orodja. Optimalne rezalne parametre določimo glede na vrste obdelovanca, lastnosti orodja in zahtevane lastnosti obdelanega izdelka.

Obraba orodja je postopno poslabševanje orodja zaradi mehanskih, toplotnih in kemičnih obremenitev med mehansko obdelavo materiala. Nastane zaradi trenja med orodjem, obdelovancem in odrezkom, visokih temperatur v območju

odrezovanja ter obremenitev, ki delujejo na rezalni rob. Obraba orodja vpliva na kakovost obdelane površine in proizvodne stroške (povečajo se rezalne sile in posledično poraba energije, večja je možnost poškodb orodja ali obdelovanca, proizvodnjo je potrebno ustavljati, da se obrabljen orodja zamenjajo).

Poznamo različne oblike obrabe orodja: obraba proste ploskve, kotanjasta obraba na cepilni ploskvi, zareze, plastična deformacija, krhanje konice, lom konice, nalepek in toplotne razpoke. Kot splošni parameter za ocenjevanje obrabe se najpogosteje uporabi obraba proste ploskve, ki se jo opiše s širino obrabe (VB), ki je definirano kot povprečje obrabljene površine orodja. Meri se na prosti površini rezalnega orodja, kjer pride do stika z obdelovancem [1].

Napredovanje obrabe med odrezovanjem poskušamo napovedovati s številnimi enačbami, na primer s Taylorjevo enačbo. Zanesljivost uporabe tovrstnih enačb je omejena, zato se poskuša uporabiti nematematične pristope [2].

### 2 STROJNO UČENJE

Strojno učenje (angl. Machine Learning) predstavlja področje umetne inteligence, ki se osredotoča na razvoj algoritmov, sposobnih samostojnega učenja in izboljševanja napovedi na podlagi izkušenj oziroma podatkov, ne da bi bili za to izrecno programirani. V industrijskih procesih

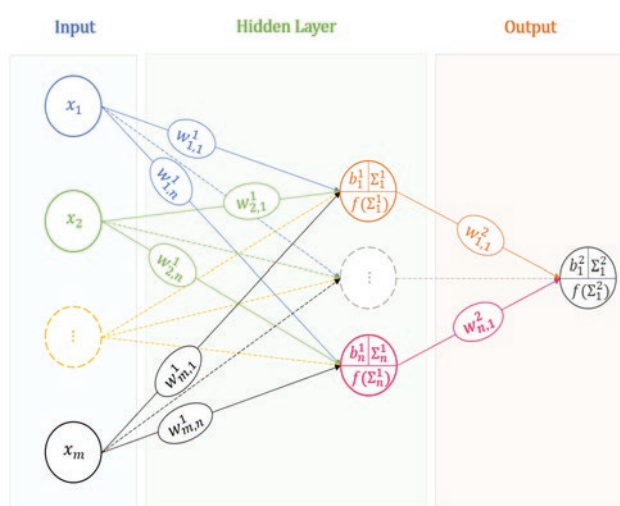
se strojno učenje uveljavlja kot ključna tehnologija za prehod iz determinističnih, na pravilih temelječih sistemov, v adaptivne, podatkovno gnane sisteme [3].

Osrednji princip strojnega učenja v tem kontekstu je prepoznavanje kompleksnih vzorcev v velikih naborih podatkov, ki jih ljudje ali klasični statistični modeli težko zaznajo. Proces gradnje modela se začne z zajemom surovih vhodnih podatkov iz senzorskih sistemov. Te podatke imenujemo vhodni vektorji ( $X$ ). Skupaj z znanimi izhodnimi stanji ( $y$ ), ki so pogosto ročne označbe vhodnih podatkov, tvorijo učne pare, na katerih algoritem išče vzorce. To metodo imenujemo nadzorovano učenje (angl. supervised learning), kjer se model uči na primerih z znanimi rezultati, dokler ne vzpostavi matematične funkcije, ki z minimalno napako preslika vhodne podatke v natančno napoved stanja.

Pri gradnji modela strojnega učenja je ponavadi najdražji in najbolj časovno potraten del zbiranje in priprava vhodnih podatkov. To je hkrati tudi najpomembnejši korak, saj je uspešnost modela neposredno odvisna od dveh dejavnikov. Prvi dejavnik je kakovost podatkov, saj so industrijska okolja polna motenj in procesnega šuma, pri strojnem učenju pa velja, da je model lahko dober samo toliko, kolikor so kakovostni vhodni podatki, na katerih se uči. Gradnja modela zato vključuje fazo čiščenja in inženiringa vhodnih podatkov, kjer se surovi signali transformirajo v smiselne indikatorje. Poleg kakovosti je ključnega pomena tudi zadostna količina podatkov. Algoritmi, kot so nevronske mreže ali naključni gozdovi, potrebujejo zadostno število učnih primerov, da lahko pokrijejo celoten spekter možnih pogojev. Pomanjkanje podatkov o redkih dogodkih, npr. posebnih nastavitvah orodja ali robnih temperaturnih pogojih okolja, pogosto predstavlja izziv pri doseganju visoke robustnosti modelov.

Pri izbiri algoritmov za napovedovanje obrabe orodja za rezkanje smo uporabili dve v industrijskih aplikacijah uveljavljeni metodi: naključne gozdove in nevronske mreže. Naključni gozdovi (angl. Random Forest) temeljijo na kombinaciji večjega števila odločitvenih dreves, kar modelu zagotavlja izjemno robustnost na šum v podatkih in preprečuje pretirano prilaganje (angl. overfitting). Zaradi svoje strukture so posebej učinkoviti pri zajemanju nelinearnih odvisnosti

med parametri rezkanja. Po drugi strani nevronske mreže (prikazane na sliki 1), natančneje večnivojski perceptroni, s svojo arhitekturo plasti nevronov in uteženih povezav med njimi omogočajo modeliranje izjemno zapletenih vzorcev znotraj senzorskih signalov.



Slika 1: Shema nevronske mreže [3]

Uporaba teh metod nam omogoča razvoj industrijskih sistemov, ki izkoriščajo ogromno količino podatkov in definirajo povezave med vhodnimi podatki in izhodnimi stanji, ne da bi za njihov razvoj potrebovali strokovnjake.

### 3 UPORABLJENI VHODNI PODATKI

Za razvoj in testiranje modelov so bili uporabljeni javno dostopni podatki o procesu rezkanja [2]. Preizkus je bil izveden na rezkalnem stroju Matsuura MC-510V. Obdelovala sta se dva materiala: nerjavno jeklo in jeklena litina. Velikost obdelovalcev je v obeh primerih znašala 483 mm x 178 mm x 51 mm. Kot rezalno orodje je bila uporabljena rezkalna glava s 6 rezalnimi ploščicami iz karbidne trdine, ki so namenjene za grobo obdelavo in prevlečene s kombinacijo treh PVD prevlek (TiC/TiC-N/TiN).

Obdelovalni parametri so bili izbrani na podlagi izkušenj. Rezalna hitrost je bila v vseh primerih enaka  $v_c=200\text{m/min}$ . Uporabljene sta bili dve različni globini reza  $a=0,75\text{ mm}$  in  $1,5\text{ mm}$  in dve različni podajanji  $f=206,5$  in  $413\text{ mm/min}$ . Skupaj je bilo torej preizkušenih 8 različnih kombinacij, vsaka dvakrat z novim setom rezalnih ploščic.

Med odrezovanjem so bili podatki zbrani s 6 senzorji:

- dvema akustičnima senzorjema, ki zaznavata zvočne valove, nastale pri lomu materiala, od katerih je bil prvi nameščen na vreteno stroja, drugi pa na obdelovalno mizo,
- dvema senzorjema vibracij, ki odražata dinamiko procesa, od katerih je bil prvi nameščen na vreteno stroja, drugi pa na obdelovalno mizo,
- merilnikom električnega toka za pogon glavnega vretena stroja, ki je neposredno povezan s silo rezanja.

Signali iz akustičnih senzorjev so bili pred vnosom v računalnik ojačani in filtrirani in zbrani s frekvenco vzorčenja 100 Hz. Za obdelavo podatkov je bil uporabljen program LabVIEW.

Med izvedbo preizkusov je bila kot izhodno stanje (y) s pomočjo mikroskopa večkrat izmerjena obraba proste ploskve VB. Vsak preizkus se je ponavljalo toliko časa, da je bila dosežena kritična točka VB, po kateri začne obraba zelo hitro naraščati in je zato proces rezkanja potrebno prekiniti ter zamenjati orodje.

#### 4 PREDOBDELAVA VHODNIH PODATKOV IN EKSTRAKCIJA ZNAČILK

Pred učenjem modela smo združili vse razpoložljive vhodne podatke v strukturirane pare, ki so povezovali vhodne podatke s senzorjev (električni tok, vibracije in akustične emisije) z izmerjeno širino obrabe proste ploskve VB. Celoten nabor podatkov smo nato razdelili na učno množico, ki je služila za gradnjo in optimizacijo modelov, ter neodvisno testno množico. Testno množico smo uporabili za objektivno vrednotenje natančnosti napovedi in preverjanje sposobnosti generalizacije modela na vhodnih podatkih, ki v fazi učenja niso bili uporabljeni.

#### 5 IMPLEMENTACIJA MODELOV STROJNEGA UČENJA

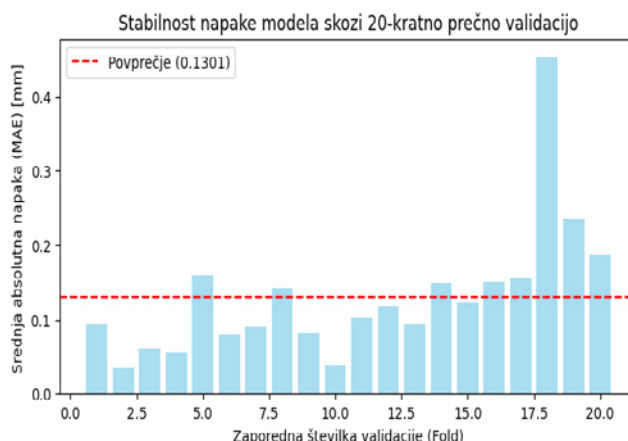
Pri razvoju napovednega modela smo se osredotočili na regresijske modele, saj je obraba orodja zvezen proces, merjen v milimetrih. Implementirana sta bila dva različna algoritma:

- Naključni gozdovi: robusten model, temelječ na ansamblu odločitvenih dreves, primeren za zajemanje nelinearnih odnosov.
- Multi-layer Perceptron (MLP): nevronska mreža, namenjena simulaciji kompleksnih in skritih povezav med parametri.

Celotna rešitev je bila implementirana v programskem jeziku *Python* z uporabo uveljavljene knjižnice za strojno učenje *scikit-learn*, ki omogoča učinkovito gradnjo in testiranje regresijskih modelov. Končno optimizacijo modelov smo izvedli s postopkom *GridSearchCV*, s katerim smo sistematično poiskali najprimernejše metaparametre, kot so maksimalna globina dreves v naključnem gozdu ter število nevronov in skritih plasti v nevronske mreži.

#### 6 KRITERIJI ZA VREDNOTENJE USPEŠNOSTI

Uspešnost modelov smo ovrednotili z dvema ključnima metrikama. Primarna metrika je bila povprečna absolutna napaka (MAE – angl. Mean Absolute Error), ki je za industrijsko uporabo najbolj intuitivna, saj podaja napako neposredno v milimetrih. Sekundarna metrika, koeficient determinacije ( $R^2$ ), pa nam je služila za oceno deleža variacije obrabe, ki jo model uspešno pojasni.



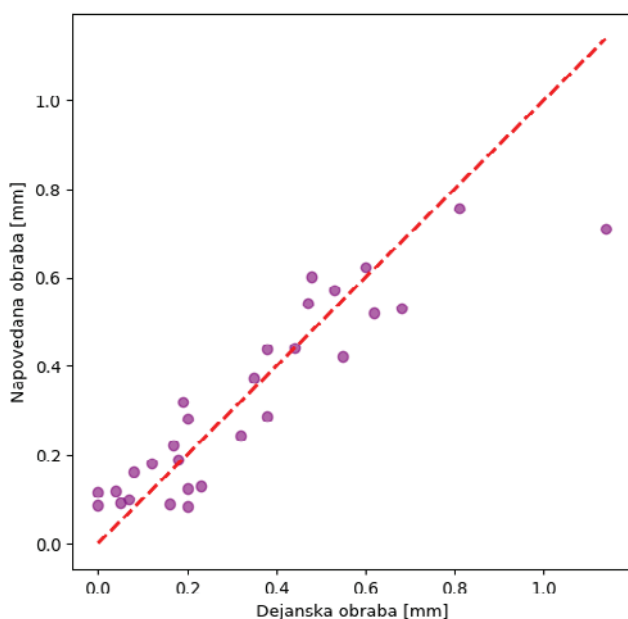
Slika 2: Vrednosti MAE za različne testne množice pri prečnem preverjanju

Da bi izboljšali natančnost ocene modela, smo izvedli 20-kratno prečno validacijo (angl. Cross-Validation). Celoten nabor podatkov smo razdelili

na več podnaborov, kjer smo model večkrat zaporedoma trenirali in testirali na različnih delih baze. S tem smo zmanjšali vpliv naključnega deljenja podatkov na učno in testno množico. Slika 2 prikazuje spremembe vrednosti MAE pri različnih izbirah testnih podatkov, in njihovo povprečno vrednost. Stabilne vrednosti metrik skozi kroge validacije potrjujejo, da je razvita rešitev robustna in sposobna generalizacije na nove, še nevidene pogoje rezkanja.

## 7 REZULTATI IN INTERPRETACIJA

Rezultati validacije so potrdili, da sta oba implementirana modela sposobna natančno napovedovati obrabo rezalnega orodja VB. Kot vidimo na sliki 3, so napovedi obrabe zelo blizu dejanskim vrednostim.



Slika 3: Primerjava napovedi obrabe z dejansko vrednostjo

Pri primerjavi uspešnosti sta modela dosegla praktično enakovredne rezultate. Model naključnih gozdov je dosegel povprečno absolutno napako (MAE) 0,13 mm, medtem ko je model nevronske mreže dosegel MAE 0,14 mm. Čeprav je razlika v natančnosti minimalna, je nekoliko boljši rezultat modela naključnih gozdov verjetno posledica njegove inherentne sposobnosti za preprečevanje pretiranega prilaganja (overfitting). Pri naborih podatkov z manjšim številom točk, kot

je naš primer, se naključni gozdovi pogosto izkažejo za stabilnejše, saj z agregacijo večjega števila odločitvenih dreves bolje generalizirajo vzorce in so manj občutljivi na specifične šume v učni množici kot kompleksnejše arhitekture nevronske mreže.

## 8 SKLEP

V prispevku smo predstavili razvoj in implementacijo modela za napovedovanje obrabe rezalnega orodja, ki temelji na metodah strojnega učenja. Rezultati so potrdili, da lahko z uporabo napovednih modelov, kot sta naključni gozdovi in nevronske mreže, z visoko stopnjo zanesljivosti interpretiramo veliko količino kompleksnih vhodnih podatkov.

Z uporabo predstavljenih modelov operaterju stroja ni več treba zaustavljati procesa in pregledovati stanja orodja ali ga preventivno menjati. Zmanjša se pogostost nenačrtovanih ustavitvev procesa rezkanja zaradi obrabe ali loma rezalnega orodja. Izraba rezalnega orodja je boljša, saj se to lahko uporablja do njegove dejanske kritične točke in ne le do vnaprej določenega fiksnega števila delovnih ur.

Viri:

- [1] K. Kuzman: *Moderno proizvodno inženirstvo*, Grafis trade, Grosuplje, 2010.
- [2] A. Agogino, K. Goebel, *Milling Data Set*, NASA Ames Prognostics Data Repository, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, 2007. [Spletni vir]. Dosegljivo na: <https://data.nasa.gov/dataset/Milling-Wear/3d834870-0ebd-4bfa-a070-a6d2f5952e01> (dostopano: [9.5.2026]).
- [3] J. Wang, et al., "Deep Learning for smart manufacturing: Methods and applications", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, str. 144–156, 2018. Dosegljivo na: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003> (dostopano: [9.5.2026]).
- [4] A. Yoosefdoost, *Multi-Layer Perceptron (MLP) Neural Network*, 2022. Dosegljivo na: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35394.04800> (dostopano: [9.5.2026]).

## IZDELAVA STRATEGIJE ZA KROŽNO GOSPODARSTVO V PROIZVODNEM PODJETJU

Gašper GANTAR<sup>1,2</sup>, Andreja HASENBICHEL<sup>3</sup>, Branko BRAČKO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Visoka šola za proizvodno inženirstvo

<sup>2</sup>Fakulteta za varstvo okolja

<sup>3</sup>Unior d. d.

### IZVLEČEK

V prispevku je na primeru družbe Unior d. d., prikazano, kako morajo proizvodna podjetja izdelati strategijo za krožno gospodarstvo. Prvi korak je popis obstoječega stanja s kazalniki, ki podajo porabo vhodnih materialov, vode in količino odpadkov na kg prodanih proizvodov ter deleži recikliranih in bioloških vhodnih materialov. Nato se definirajo cilji in ukrepi za njihovo doseganje. Rezultati dokazujejo, da je družba Unior d. d., že v preteklosti izvedla mnoge aktivnosti na področju krožnega gospodarstva in da načrtovani ukrepi omogočajo doseganje še višje zastavljenih ciljev.

### 1 UVOD

Krožno gospodarstvo (shematsko predstavljeno na sliki 1) je gospodarski sistem, v katerem se: 1) kolikor je mogoče dolgo ohranja vrednost proizvodov, materialov in drugih virov v gospodarstvu, 2) pri čemer se povečuje njihova učinkovita raba pri proizvodnji in porabi, 3) s čimer se zmanjša vpliv njihove rabe na okolje ter 4) čim bolj zmanjšata količina odpadkov in izpust nevarnih snovi v vseh fazah njihovega življenjskega cikla, med drugim z uporabo hierarhije ravnanja z odpadki. Cilj je čim bolj povečati in ohraniti vrednost tehničnih in bioloških virov, proizvodov in materialov z vzpostavitvijo sistema, ki omogoča trpežnost, optimalno uporabo ali ponovno uporabo, obnovo, ponovno izdelavo, recikliranje in kroženje hranilnih snovi. Krožno gospodarstvo je torej alternativa tradicionalnemu linearnemu gospodarstvu (vzemi, izdelaj, uporabi in zavrzi) [1].

Krožno gospodarstvo proizvodnim podjetjem prinaša številne prednosti, kot so: zmanjšanje količine odpadkov, zmanjšanje porabe surovin, zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, povečanje konkurenčnosti, trajnostni razvoj, nova delovna mesta in povečanje družbene odgovornosti. Za doseganje teh ciljev je potrebno v podjetjih

izdelati strategijo in sprejeti ukrepe v skladu z načeli krožnega gospodarstva.



Slika 1: Kaj je krožno gospodarstvo [2]

V prispevku je na primeru družbe Unior d. d., prikazana metodologija za izdelavo strategije za krožno gospodarstvo v proizvodnih podjetjih. Družba Unior d. d., je namreč trajnostno naravnano podjetje, ki sledi temeljnemu načelu odgovornosti do varovanja okolja, preprečevanju negativnih vplivov na okolje, skladnosti z zahtevami zakonodaje ter nenehnemu izboljševanju na področju varstva okolja. V srednjeročnem načrtu ima opredeljeno tudi strateško usmeritev sledenja trendom krožnega gospodarstva [3].

Najprej so podani podatki o obstoječem stanju na področju krožnega gospodarstva v družbi Unior d. d.. V nadaljevanju je prikazano, kako so bili identificirani cilji na področju krožnega gospodarstva in aktivnosti za doseganje ciljev. Vsaka predlagana aktivnost je tudi ovrednotena. Na koncu so predstavljeni rezultati oz. izboljšave, ki jih je mogoče doseči na področju krožnega gospodarstva.

## 2 POPIS OBSTOJEČEGA STANJA

Družba Unior d. d., ima dva proizvodna programa v kovinskopredelovalni industriji. Program odkovkov je program z daljšo tradicijo. V svojem segmentu izdelkov se uvršča med največje kovačnice v evropskem prostoru. Temeljna dejavnost je utopno kovanje jekla (83 %), ki jo dopolnjujeta še strojna obdelava lastnih odkovkov (12 %) in proizvodnja sintranih izdelkov (5 %). Drugi program je program izdelave ročnega orodja, kamor sodi tudi izdelava ostale opreme za delavnice (omar za orodje, vozičkov za orodje, delovnih pultov ipd.). Proizvodna programa sta obravnavana ločeno, saj je vpliv družbe Unior d. d., na celotno vrednostno verigo v obeh primerih povsem drugačen.

V analizi smo upoštevali samo materiale in izdelke (surovine, pomožne materiale in embalažne materiale), nismo pa upoštevali opredmetenih osnovnih sredstev, ki se uporabljajo pri lastnih dejavnostih družbe. V družbi Unior d. d., poteka masovna proizvodnja, oprema pa ima dolgo življenjsko dobo, zato je pritok virov zaradi proizvodnje opreme zanemarljiv. Iz istega razloga nismo upoštevali niti opredmetenih osnovnih sredstev, ki se uporabljajo v višjem delu vrednostne verige.

Ključni vhodni materiali so jeklo, aluminiji, jekleni prah za sintranje, plastika, pločevina in plošče poliuretanska pena za SOS vložke. Poleg omenjenega se uporabljajo še številni pomožni materiali (različna maziva, kemikalije, sredstvo za peskanje itd.), tehnološka in pitna voda ter embalažni materiali. Pri zbiranju vhodnih podatkov za izračun kazalnikov na področju krožnega gospodarstva so se pojavili določeni izzivi, saj vsi dobavitelji zaenkrat še niso zmožni priskrbeti podatka o deležu recikliranega materiala. Na podlagi podatkov o uporabljenih

vhodnih materialih, količinah proizvedenih izdelkov in predporabniških odpadkov so bili izračunani kazalniki, ki prikazujejo obstoječe stanje na področju krožnega gospodarstva (tabela 1).

Tabela 1: Obstoječe stanje na področju krožnega gospodarstva

Kazalnik	Program	
	Odkovki	Ročno orodje
Poraba vhodnega materiala na kg izdelkov (kg/kg)	1,86	1,03
Poraba vode na kg izdelkov (kg/kg)	16,9	133,1
Delež recikliranih vhodnih materialov (%)	90,7	77,4
Delež bioloških vhodnih materialov (%)	0,34	7,69
Količina odpadkov na kg izdelkov (kg/kg)	0,74	0,13
Količina nevarnih odpadkov na kg izdelkov (kg/kg)	0,0006	0,04
Količina odpadkov, preusmerjeni stran od odstranjevanja na kg izdelkov (kg/kg)	0,72	0,07
Količina odpadkov za odstranjevanje na kg izdelkov (kg/kg)	0,01	0,06
Količina odpadne vode na kg izdelkov (kg/kg)	11,3	11,6

Družba Unior d. d. je že v preteklosti v obeh programih izvedla mnoge aktivnosti s področja krožnega gospodarstva. Izvedeni so bili številni projekti za optimizacijo in zmanjševanje porabe vhodnih materialov, energentov in vode v proizvodnji. Zmanjšala se je tudi poraba embalažnih materialov v programu ročnega orodja (na primer kartona za 30 %, celotne embalaža pa kar za 60 %). Izvedli so investicijo v peskalni stroj s sitom, ki omogoča manjšo porabo sredstva za peskanje. Izboljšali so nadzor kontrole v oddelku sintranja, da napake na zelenih kosih odkrijejo pravočasno in jih zmeljejo ter ponovno uporabijo, preden gredo v peč za sintranje. Poiskali so prevzemnika za določene vrste odpadkov (na primer škajo), ki jo prevzamejo in predelajo v nove izdelke.

Posledično so kazalniki trenutne uspešnosti (zbrani leta 2024 za leto 2023) na področju krožnega gospodarstva izredno dobri. Poraba vhodnega materiala na kg odkovkov in sintranih

izdelkov je pričakovana, saj je pri postopku vročega kovanja potrebno obrezovati brade, del materiala pa se zaradi vročine tudi pretvori v škajo. Poraba vhodnega materiala na kg izdelanega ročnega orodja je izjemno nizka. Delež v izdelke vgrajenih recikliranih vhodnih materialov je zelo visok. Količina odpadkov za odstranjevanje je zelo nizka, prav tako količina nevarnih odpadkov. Visoka je zgolj poraba vode, saj družba ne uporablja zaprtega hladilnega sistema za tehnološko vodo. Iz istega razloga je visoka tudi količina odpadne vode.

### 3 DEFINICIJA CILJEV IN UKREPOV NA PODROČJU KROŽNEGA GOSPODARSTVA

Pri definiciji ciljev, ki jih mora doseči družba Unior d. d., ali katerokoli drugo proizvodno podjetje, je treba upoštevati:

- Tveganja in priložnosti na področju krožnega gospodarstva, ki so v splošnem: 1) na področju zakonodaje (prepoved uporabe določenih materialov, predpisi o obdelavi odpadkov), 2) tehnološka (uvedba novih tehnologij in uporaba novih materialov), 3) finančna (dostop do sredstev financiranj in spremembe v povpraševanju kupcev) in 4) tveganja in priložnosti v zvezi z zaznavanjem podjetja (ugled pri kupcih).
- Trenutna izražena pričakovanja oz. zahteve ključnih kupcev. Na tem področju vlada precej neznanj in negotovosti. Pričakovane zahteve različnih kupcev niso vedno izražene natančno in se med seboj nekoliko razlikujejo.

Pri zbiranju ukrepov in izdelavi akcijskega načrta je bilo upoštevano, da so na trgu sicer dostopne številne rešitve, ki pa so lahko: 1) predrage ali 2) družba Unior d. d., ne more slediti vsem na trgu dostopnim novostim, saj je njihova uvedba prezapletena za podjetje, ki nekatere izdelke (določene izvedbe ročnega orodja) izdeluje v manjših količinah.

Cilji in ukrepi so bili za oba programa zbrani ločeno, saj je vpliv družbe Unior d. d., na celotno vrednostno verigo v obeh primerih povsem drugačen. Proizvodnja in prodaja odkovkov poteka po načelu B2B, kjer je družba Unior d. d., razvojni dobavitelj z omejeno možnostjo

odločanja in vpliva na uporabo proizvedenih izdelkov. Proizvodnja in prodaja ročnega orodja se vrši po načelu B2C, kjer ima družba Unior d. d., možnost vpliva na celotno vrednostno verigo (samostojno izbira dobavitelje in vgrajene materiale, konstrukcijske rešitve na ročnem orodju, embalažne rešitve, nagovarja in osvešča lahko končne kupce svojih izdelkov itd.).

Za oba programa so bili na podlagi zbranih informacij določeni cilji in ukrepi na področjih: učinkovitejše rabe virov v proizvodnji (vhodnih materialov predvsem z zmanjšanjem tehnološkega in netehnološkega izmeta in zmanjšanje porabe tehnološke vode), povišanja stopnje krožne rabe materialov, uporabe trajnostno pridobljenih virov ter ravnanja z odpadki iz proizvodnje.

Za ročno orodje so bili definirani cilji in ukrepi tudi v zasnovi (ročnega orodja in embalaže), ki bodo omogočali enako funkcionalnost z manjšo količino vgrajenih materialov. Za odkovke ni bilo postavljenih tovrstnih ciljev in ukrepov iz naslednjih razlogov:

- Material in obliko odkovkov ter sintranih izdelkov določijo kupci, ki jih kasneje tudi vgradijo v svoje končne proizvode;
- Izdelani odkovki in sintrani izdelki, ki so vgrajeni v končne izdelke (večinoma vozila), so tako trpežni, da zdržijo celotno življenjsko dobo (med delovanjem vozila, v katerega so vgrajeni, jih ni potrebno popravljati ali menjati, razen v izjemnih primerih, kot so avtomobilske nesreče, kjer pa so poškodbe sestavnih delov vozil neizbežne);
- Odkovkov in sintranih izdelkov v splošnem sploh ni mogoče razstavljati, v primeru poškodbe pa jih ni možno ali smiselno popravljati (varnost, stroški).

Prav tako ni predvidena ponovna raba odkovkov in sintranih izdelkov. V praksi ni pričakovati, da bo odslužene odkovke (večinoma vgrajene v odslužena vozila) mogoče ponovno uporabiti v novih modelih vozilih.

### 4 REZULTATI

V tabeli 2 je predstavljeno predvideno izboljšanje stanje na področju krožnega

gospodarstva, če bodo uresničeni zbrani ukrepi, predstavljeni v prejšnjem poglavju.

Tabela 2: Predvideno izboljšanje stanje na področju krožnega gospodarstva (v %)

Kazalnik	Program	
	Odkovki	Ročno orodje
Poraba vhodnega materiala na kg izdelkov (kg/kg)	-2,0	-2,2
Poraba vode na kg izdelkov (kg/kg)	-86,0	-92,0
Delež recikliranih vhodnih materialov (%)	3,2	2,9
Delež bioloških vhodnih materialov (%)	-1,0	4,9
Količina odpadkov na kg izdelkov (kg/kg)	-2,0	-2,2
Količina nevarnih odpadkov na kg izdelkov (kg/kg)	-2,0	-2,0
Količina odpadkov, preusmerjeni stran od odstranjevanja na kg izdelkov (kg/kg)	-1,0	-1,4
Količina odpadkov za odstranjevanje na kg izdelkov (kg/kg)	-2,9	-2,4
Količina odpadne vode na kg izdelkov (kg/kg)	-81,6	-67,4

Med zbranimi ukrepi velja izpostaviti uporabo vhodnih materialov z nekoliko višjim deležem vgrajenih recikliranih materialov. Na trgu so seveda dostopna tudi jekla in aluminij z še bistveno višjim deležem vgrajenih recikliranih vhodnih materialov, ki pa so dražji. Zato je predvidena njihova zmerna povečana uporaba, ki bo že tako visok delež recikliranih vhodnih materialov dvignila za približno 3 %. Predvideni so številni ukrepi, ki bodo zmanjšali porabo osnovnih in pomožnih vhodnih materialov ter embalažnih materialov. Pri izračunu je bilo upoštevano tudi, da bo ročno orodje po načrtovani optimizaciji oblike nekoliko lažje. To je seveda zaželena lastnost, ki zmanjša porabo vhodnih materialov, ne prikazuje pa pozitivnega trenda v kazalnikih relativne porabe vhodnih materialov na kg izdelkov. Predvidena je investicija v zaprt hladilni sistem, ki bo porabo tehnološke vode zmanjšal za 95 % ter posledično zmanjšal celotno porabo vode za 86 – 92 %. Iz istega razloga se bo občutno znižala tudi količina odpadne vode za 67-81 %.

## 5 SKLEP

Izdelava strategija krožnega gospodarstva omogoča, da bralec:

- Razume, kako družba Unior d. d., trenutno vpliva na rabo virov, vključno z učinkovito rabo virov, pri čemer se izogiba izčrpanju virov ter trajnostno pridobiva in uporablja obnovljive vire;
- Razbere cilje in možne ukrepe za preprečevanje ali blažitev negativnih vplivov, ki izhajajo iz rabe virov, vključno z ukrepi za ločevanje gospodarske rasti od rabe materialov ter za obravnavanje tveganj in priložnosti, ter rezultate takih ukrepov;
- Razume možnosti družbe Unior d. d. za prilagoditev svoje strategije in poslovnega modela v skladu z načeli krožnega gospodarstva, kar med drugim vključuje čim večje zmanjšanje količine odpadkov, ohranjanje najvišje vrednosti proizvodov, materialov in drugih virov ter povečanje njihove učinkovite rabe pri proizvodnji in porabi.

Rezultati, predstavljeni v tabeli 2, so bili izračunani s številnimi predpostavkami. V prihodnje se priporoča:

- Pridobivanje natančnejših vhodnih podatkov od dobaviteljev glede količin embalažnih materialov, točnega deleža vgrajenih recikliranih materialov itd.
- Dodatno preverjanje podatkov o materialnih tokovih v podjetju.
- Natančnejše sledenje zahtevam in pričakovanja trga na področju krožnega gospodarstva ter prilagajanje ciljev v zvezi z rabo virov in krožnim gospodarstvom.

Viri:

- [1] <https://www.europarl.europa.eu/>
- [2] <https://www.europarl.europa.eu/topics/sl/article/20151201STO05603/krožno-gospodarstvo-definicija-pomen-in-prednosti>
- [3] Srednjeročni poslovni načrt skupine UNIOR 2022-2026, Uprava UNIOR d.d. Zreče, januar 2022

INDUSTRIJSKI  
FORUM  
**IRT**  
2026

Sodelujoči na  
Industrijskem forumu IRT





GLAVNA POKROVITELJA



POKROVITELJI



RAZVOJNA PARTNERJA



VSEBINSKI PARTNER



RAZSTAVLJAVCI



Celjski sejem



ORGANIZATOR DOGODKA

**PROFIDTP**

**PROFIDTP, d.o.o.**  
Gradišče nad Pijavo Gorico 204  
1291 Škofljica  
www.profidtp.si

ORGANIZACIJSKI ODBOR

ŠVETAK Darko – vodja organizacijskega odbora, Profi dtp, d.o.o.  
ROT Matjaž, Revija IRT3000  
ŠENKINC Denis, PRO IKT, Denis Šenkinc, s.p.

PARTNERSKE ZBORNICE, ZDRUŽENJA IN GROZDI



PROGRAMSKI ODBOR

Dr. ČEKADA Miha, *Institut Jožef Stefan*  
DREV Vinko, *LTH Castings d.o.o.*  
Dr. FLORJANIČ Blaž, *BSH Hišni aparati, d. o. o., iMold, d. o. o.*  
Dr. GANTAR Gašper, *Fakulteta za varstvo okolja*  
Dr. GODEC Damir, *UNIZG, Fakultet strojarstva i brodogradnje*  
Dr. HOMAR David, *SolidWorld d.o.o.*  
Dr. KARNER Timi, *UM, Fakulteta za strojništvo*  
KLINC Marko, *AICHELIN ACE d.o.o., BOSIO d.o.o.*  
Dr. KLOBČAR Damjan, *UL, Fakulteta za strojništvo*  
Dr. KOSEC Borut, *UL, Naravoslovnotehniška fakulteta*  
Dr. KOSEC Gorazd, *Acroni, d. o. o.*  
Dr. KOVAČ Igor, *Institut Jožef Stefan*  
KOVAČ Jernej, *UL, Fakulteta za strojništvo*  
Dr. KRAMAR Davorin, *UL, Fakulteta za strojništvo*  
Dr. MAJDIČ Franc, *UL, Fakulteta za strojništvo*  
MIRNIK Marko, *TURNA, d. o. o.*  
Dr. MUHIČ Simon, *SIMUTEH s.p. in Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto*

Dr. NARDIN Blaž, *Fakulteta za tehnologijo polimerov, Slovenj Gradec*  
OBOLNAR Matija, *Hella Saturnus Slovenija d.o.o.*  
Dr. PALČIČ Iztok, *UM, Fakulteta za strojništvo*  
Dr. PEPELNJAK Tomaž, *UL, Fakulteta za strojništvo*  
Dr. PERME Tomaž, *DRP Perme Tomaž s.p.*  
POJE Janez, *QUGUARD d.o.o.*  
ROT Matjaž, *Strokovna revija IRT3000*  
Dr. SAVŠEK Tomaž, *TIGUS d.o.o., Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto*  
ŠENKINC Denis, *Strokovna revija IRT3000*  
dr. ŠERUGA Domen, *UL, Fakulteta za strojništvo*  
ŠKRLEC Janez, *Razvojno raziskovalna dejavnost Janez Škrlec s.p.*  
ŠVETAK Darko, *Strokovna revija IRT3000*  
ZIBELNIK Miha, *Lek d.d.*  
Dr. ŽLAJPAH Leon, *Institut Jožef Stefan*  
Dr. ŽNIDARŠIČ Matjaž, *CBS inštitut, celovite gradbene rešitve, d. o. o.*

MEDIJSKI PARTNERJI



PARTNER REGISTRACIJE



KLEMEN SOLUTIONS

PARTNERJI ZNANJA IN TEHNOLOŠKI PARKI

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo



**FS**  
Fakulteta za  
strojništvo



Univerza v Mariboru  
Fakulteta za strojništvo

**IJS**



VISOKA ŠOLA  
ZA PROIZVODNO  
INŽENIRSTVO

●●● FTPO

Fakulteta za  
tehnologijo polimerov



PARTNERJI IZ INDUSTRIJE

**ACRONI**

**S SIBO** Clusers  
group | Plastics  
Tools

**FORVIA**  
**HELLA**

**AKRAPOVIČ**



**Horta**

**B/S/H/**

**TRI  
MO**

**IM**

IskraMehanizmi

ENGINEERING  
TOMORROW

**Danfoss**

**Turana**

Nadaljujemo tradicijo. Ustvarjamo prihodnost.

**KOLEKTOR**

**DOMEL®**

**UNIOR®**

INDUSTRIJSKI  
FORUM

**IRT**

2026

Komercialni oglasi  
podjetij







## PoWa™ - družina hitrih sodelujočih robotov za industrijsko zmogljivost

Ime, ki simbolizira zmogljivo delovanje, **PoWa™** prinaša industrijsko raven zmogljivosti v sodelujočo avtomatizacijo, brez kompromisov pri varnosti ali enostavnosti uporabe. S hitrostmi, ki presegajo **5 m/s pri nazivni nosilnosti**, **PoWa™** postavlja nov mejnik na področju hitrih sodelujočih robotov.

**PoWa™** združuje kompaktno in lahko zasnovo sodelujočega robota z izjemno hitrostjo, kar proizvajalcem omogoča avtomatizacijo zahtevnih, produktivnostno usmerjenih industrijskih aplikacij, kot so strega strojev, manipulacija materiala, paletizacija, varjenje in vijačenje.

Zasnovan za hitro uvedbo, **PoWa™** lahko obratuje že v **60 minutah\***, ob podpori programiranja brez kode ter namestitve »plug-and-play«. Delovanje brez varnostnih ograj in napredne sodelujoče varnostne funkcije omogočajo učinkovito sodelovanje z operaterji tudi v prostorsko omejenih ali obstoječih proizvodnih okoljih. Portfelj **PoWa™** zajema nosilnosti **od 7 kg do 30 kg** in ponuja prilagodljivo rešitev za širok nabor industrijskih aplikacij - vse znotraj ene zmogljive družine sodelujočih robotov.

\*testirano na modelih PoWa™ 10 in PoWa™ 13 – aplikacija pick & place

# Tovarne prihodnosti

Od digitalnih dvojčkov  
do pametnih  
tovarn



# Trajnostna energija

Tehnologije  
za zanesljivo  
in trajnostno  
energijo



# Zelena in varna mobilnost

Mobilnost z manj  
emisijami in  
več učinkovitosti



# Zdravje

Napredne  
tehnologije  
za zdravje ljudi



# Vesolje in varnost

Inženirstvo  
za ekstremne  
razmere in  
nove izzive



[www.fs.uni-lj.si](http://www.fs.uni-lj.si)

[rr@fs.uni-lj.si](mailto:rr@fs.uni-lj.si)

Sledite nam na



UNIVERZA  
V LJUBLJANI

**FS**

Fakulteta  
za strojništvo

FANUC

# DO YOU FANUC?



Začnite  
svojo pot  
avtomatizacije  
tukaj:



DOYOUFANUC.COM

**Automation** has a name.

**Govorite o avtomatizaciji. Govorite o partnerstvu. Govorite o delovanju.**

Dovolite da vam FANUC zagotovi prihodnost vašega celotnega potovanja na področju avtomatizacije.



# Managerski kongres 2026

Osrednji managerski  
dogodek leta.



1. in 2. oktober  
2026



Portorož, Slovenija





INŽENIRING - POVRATNI INŽENIRING - IZDELAVA PROTOTIPOV - KONTROLA KAKOVOSTI

## ARTEC LEO - brezžični 3D skener za profesionalno uporabo

- Brežžično delovanje brez potrebe po računalniku.
- Hitrost skeniranja: do 35 FPS.
- Natančnost do 0,1 mm.
- Veliko vidno polje za velike predmete in kompleksne površine.

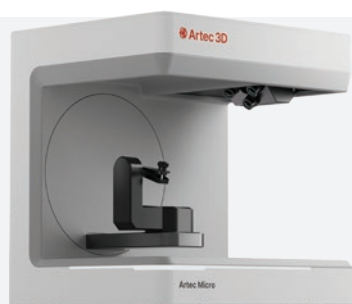


## ARTEC Spider II - natančnost v vsaki podrobnosti

- Visoka natančnost: do 0,05 mm.
- Primeren za skeniranje ostrih robov in majhnih podrobnosti.
- Hitra in enostavna integracija v delovni proces.
- Barvno skeniranje z realistično teksturo.

## ARTEC Point - prenosljiv skener za terensko delo

- Laserski skener meroslovnega razreda
- Prenosljiv in lahek za enostavno uporabo na terenu.
- Hitro skeniranje z visoko natančnostjo 0,02 mm.
- Robustna zasnova za različne pogoje.



## ARTEC Micro II - namizni 3D skener za visoko preciznost

- Izjemno visoka natančnost: do 5 mikronov.
- Avtomatizirano skeniranje z enostavnim nastavljanjem.
- Hitro in zanesljivo skeniranje brez kompromisov.
- Kompaktna in elegantna zasnova.



- ✓ Izjemna natančnost in zanesljivost za industrijsko rabo
- ✓ Prihranek časa – do 85 % hitrejši procesi v primerjavi s klasičnimi metodami
- ✓ Vsestranska uporaba v razvoju, proizvodnji in kontroli kakovosti
- ✓ Artec Studio 20 - programska oprema za enostaven zajem, obdelavo in izvoz podatkov.

DOGOVORITE SE ZA DEMONSTRACIJO



040 522 443



USTVARJAMO  
POVEZAVE,  
RAZVIJAMO  
ZVEZDE.

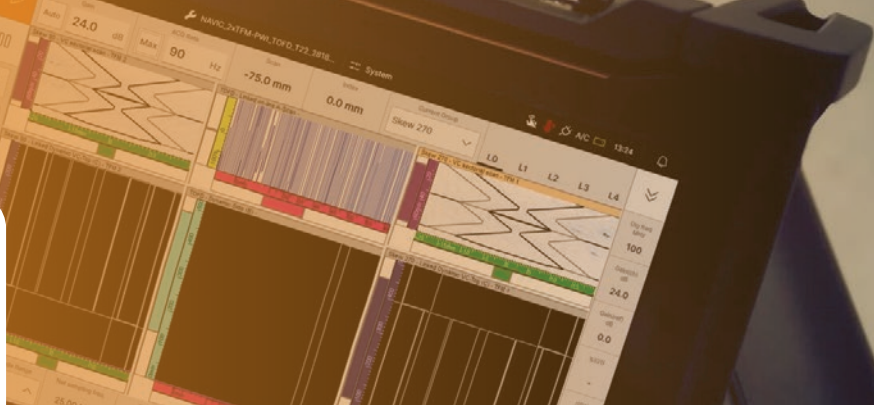
Mednarodna tekma zahteva  
prodoren marketing.

**NAŠI PARTNERJI SO  
NA TRGIH ZVEZDE.**

**MARKETING. KOMUNIKACIJE. RAZVOJ.**

Preverite, s kom sodelujemo na [www.mediade.si](http://www.mediade.si).





## CYPHER odkrij ... vse

### Novi standard na področju prenosljive opreme za PAUT (Phased Array Ultrasound) preiskave

Izvajalci kontrole so pri delu s sistemom Cypher vedno prepričani v svoje rezultate – ne glede na predhodne izkušnje. Sistem povezuje napredno ultrazvočno zmogljivost z robustno zasnovo za terensko delo in izjemoma preprosto uporabo.



#### Glavne značilnosti:

- **Najhitrejša kontrola TFM na trgu**
  - za hitrejše odločanje v kritičnih situacijah
- **Intuitivna priprava prek zaslona na dotik**
  - velik 12,1" (307 mm) zaslon je prilagojen za delo z rokavicami in dobro berljiv tudi na soncu
- **Samodejno prepoznavanje sond in skenerjev**
  - manj napak pri nastavitvah in daljše delo brez zastojev
- **Podpora različnim tehnikam**
  - PAUT, time-of-flight-diffraction (TOFD), phase coherence imaging in plane wave imaging za široko paleto aplikacij
- **Odpornost na zahtevne delovne pogoje**
  - zaščita IP65 in odpornost proti padcem po MIL-STD 810G zagotavljata zanesljivo delovanje tudi v najzahtevnejših okoljih
- **Sinhronizacija podatkov z oblakom**
  - za poročanje v realnem času, sodelovanje in napredne analize.

Poleg prodaje opreme vam ponujamo tudi servisne storitve in verifikacijo opreme.

"Cypher predstavlja prihodnost za Eddyfi Technologies in za našo industrijo," je izjavil Giguère.

"Gre za dobavo orodij, ki spodbujajo pravočasno ukrepanje in zagotavljajo jasne informacije kot podlago za odločanje. Naši kupci so v tem partnerstvu deležni dodane vrednosti še dolgo po prvem skeniranju."

Od rafinerij do proizvajalcev v letalski industriji – Cypher odgovarja na rastoče zahteve po hitrosti, natančnosti in zanesljivosti ultrazvočnih preiskav. Poenostavlja kompleksne procese in izboljšuje rezultate: zmanjšuje napake, izboljšuje produktivnost in pomaga ekipam zaščititi najpomembnejšo lastnino.



# B2B KONFERENCA

## KONFERENCA ZA AMBICIOZNE

**DMS**

DRUŠTVO ZA MARKETING  
SLOVENIJE

Ekskluzivni poslovni dogodek, namenjen strokovnjakom, ki delujejo na B2B oz. medorganizacijskih trgih.

### Kaj vas čaka na B2B konferenci?

- >> 8 ur **vrhunskega programa**.
- >> **Primeri iz prakse**, ki poganjajo uspehe B2B marketinga.
- >> **Ideje**, ki jih lahko že naslednji dan uporabite pri svojem delu.
- >> Interaktivno reševanje **vaših marketinških izzivov**.
- >> Vpogled v **ambiciozne zgodbe** podjetij.
- >> **150+** udeležencev, ki razmišljajo podobno kot vi.

PRIDRUŽITE SE SKUPNOSTI, KI GRADI  
PRIHODNOST B2B MARKETINGA.

**Četrtek, 8. oktober 2026**

Klub Cankarjevega doma

**PROMO KODA: IRT2026**



Več na  
[www.b2bkonferenca.si](http://www.b2bkonferenca.si)



## KO 'NA OKO' ENOSTAVNO NI DOVOLJ.

Barva ni stvar debate,  
ampak podatkov!

**SENSING**

Profesionalni sistemi za merjenje barv in svetlobe, ki zagotavljajo popolno vizualno skladnost vaših izdelkov.

- **Konec ugibanja:** Objektivne meritve namesto subjektivnih ocen "na oko".
- **Popolna serija:** Zagotovite identične odtenke na različnih materialih in lokacijah.
- **Manj izmeta:** Takojšnje zaznavanje barvnih odstopanj že v zgodnji fazi.
- **Globalni standardi:** Skladnost z mednarodnimi barvnimi metriki.

Ker pri svetlobi »približno«  
ni dovolj dobro!

**INSTRUMENT SYSTEMS**

Vrhunska nemška optična tehnologija za laboratorijsko natančne meritve LED svetil in zaslonov.

- **Absolutna natančnost:** Merjenje svetilnosti in barvnega spektra z najvišjo ločljivostjo.
- **Avtomobilska kakovost:** Standard za testiranje sodobnih armaturnih plošč in žarometov.
- **Vsestranskost:** Od analize posameznih pikslov do celotnih svetlobnih sklopov.
- **Zanesljivost:** Dolgoročna stabilnost sistemov brez potrebe po stalnih recalibracijah.

Vid, ki se nikoli ne utruji!

**EINES**

Napredni sistemi strojnega vida za avtomatiziran pregled površin v najzahtevnejših proizvodnjah.

- **100 % pokritost:** Avtomatiziran pregled vsakega kosa, brez utrujenosti človeškega očesa.
- **Lovilec napak:** Takojšnja detekcija prask, vdolbin in nepravilnosti v laku.
- **Optimizacija stroškov:** Zmanjšanje dragih reklamacij in naknadnih popravil.
- **Pametna analiza:** Shranjevanje podatkov o napakah za dolgoročno optimizacijo linije.

Vidimo tisto, kar kemija skriva!

**SPECIM**

Hiperspektralne kamere, ki analizirajo kemično sestavo materialov v realnem času, onkraj vidnega spektra.

- **Kemični rentgen:** Prepoznavanje materialov na podlagi njihovega spektralnega podpisa.
- **Pametno recikliranje:** Natančno ločevanje različnih vrst plastike in polimerov.
- **Nedestruktivna analiza:** Preverjanje kakovosti brez poškodovanja vzorcev.
- **Digitalni laboratorij:** Prinaša laboratorijsko analizo neposredno na vaš tekoči trak.

**ENERGOLUBRIC**  
New generation hydraulic oils

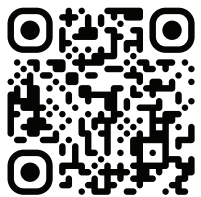
# Discover the Future of Hydraulic Oils



Naziv izdelka	Protiobrabni aditivi	Vsebuje cink	Odlična oksidacijska stabilnost	Visok indeks viskoznosti	Detergentni aditivi
ENERGOLUBRIC 40XY	•		•	•	
ENERGOLUBRIC 30XY ZF	•		•	•	
ENERGOLUBRIC 30XY	•	•	•	•	
ENERGOLUBRIC 20XY ZFS	•		•	•	
ENERGOLUBRIC 20XY ZF	•		•		
ENERGOLUBRIC 20XY S	•	•	•	•	
ENERGOLUBRIC 20XY	•	•	•		
HYDROLUBRIC HEES	•			•	
HYDROLUBRIC VG BR	•				
HYDROLUBRIC HVLPD	•			•	•
HYDROLUBRIC VGS PLUS	•	•		•	
HYDROLUBRIC VGS	•	•		•	
HYDROLUBRIC HVLP	•	•		•	
HYDROLUBRIC VG D	•				•
HYDROLUBRIC VG	•	•			
HYDROLUBRIC HD	•	•			
HYDROLUBRIC HLP	•	•			

# ZAŠČITITE INDUSTRIJSKA OKOLJA PRED KIBERNETSKIMI NAPADI

Spoznajte, kako učinkovito poskrbeti za kibernetško varnost in zagotoviti neprekinjeno delovanje proizvodnje.



**Več informacij**

 <https://bit.ly/varnost-ICS>

 [info@smart-com.si](mailto:info@smart-com.si)

 01 561 16 06

**SMART  
COM**

## UDEJANJAMO VAŠE VIZIJE

Smart Com več kot 36 let deluje na področju IKT in je eden izmed vodilnih sistemskih integratorjev v Sloveniji. Naši strokovnjaki so specialisti na področju kibernetške varnosti v poslovnih in procesnih - industrijskih okoljih ter okoljih kritične infrastrukture.

 [www.smart-com.si](http://www.smart-com.si)

**ZA PONUDNIKE CNC STORITEV**

**spanflug** | **MAKE**

## Priprava ponudb na enostaven način

- Natančen izračun stroškov zahvaljujoč avtomatizirani analizi obdelovanca in proizvodnega procesa
- Hitrejši odgovori na povpraševanja strank in pridobivanje večjega števila naročil

**90 %**  
manj dela  
z izdelavo  
z izdelavo  
ponube

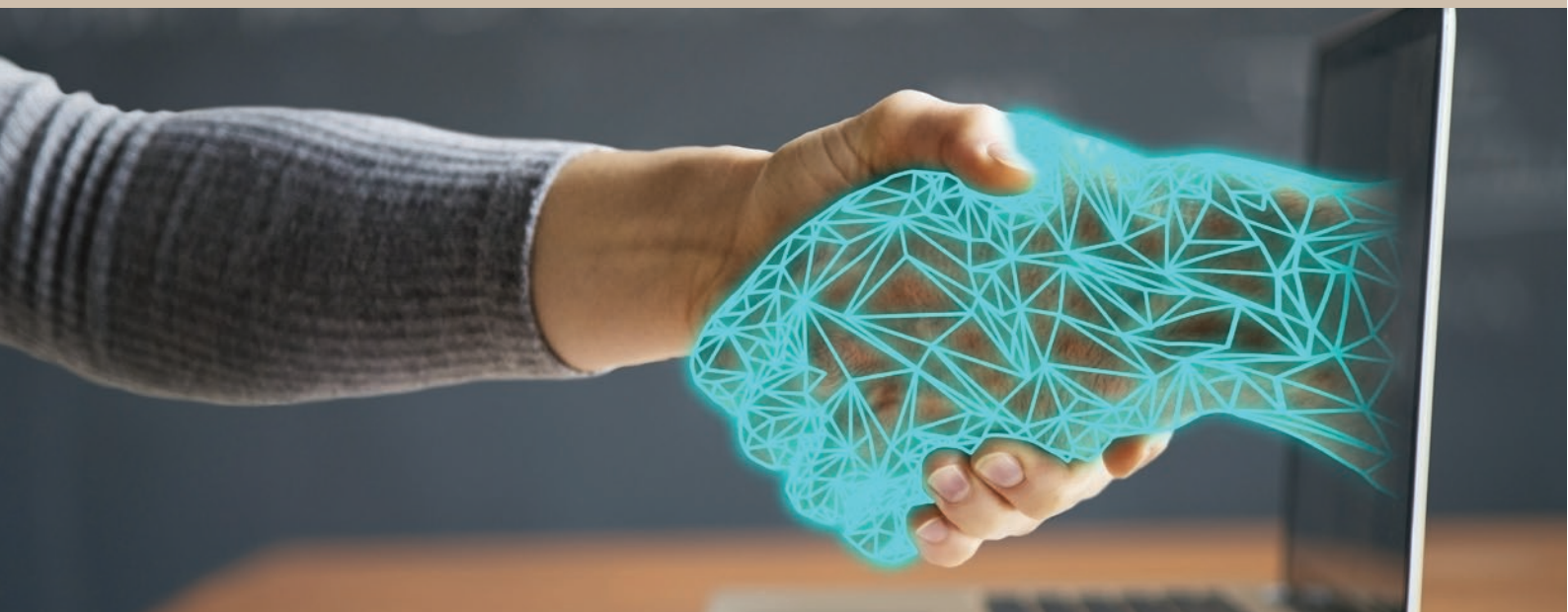


**spanflug.com**

# DIGITEH

DIGITALIZACIJA PROIZVODNIH PROCESOV

ZANESLJIV PARTNER NA VAŠI POTI V DIGITALIZIRANO  
PRIHODNOST



## DIGITEH: PIONIRJI DIGITALNIH DVOJČKOV

V DIGITEH-u smo postavili temelje za digitalno prihodnost proizvodnje. Z več kot desetletjem inovacij in razvoja digitalnih dvojčkov, v sodelovanju z laboratorijem LASIM Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, izboljšujemo proizvodne in logistične procese. Razvijamo lastne programske rešitve, napredne optimizacijske algoritme in AI modele ter jih povezujemo z ERP in drugimi informacijskimi sistemi za učinkovitejše odločanje.



## NAŠE ZNANJE, VAŠ NAPREDEK:

**Digitalni dvojčki procesov** za simulacijo, analizo in optimizacijo proizvodnih ter logističnih sistemov.

**Optimizacijski algoritmi** za večjo pretočnost, manj ozkih grl ter učinkovito razporejanje in planiranje virov.

**Lastni AI modeli** za napovedovanje prihodnjih trendov, zaznavanje odstopanj, prepoznavanje vzorcev in podporo boljšemu odločanju na podlagi podatkov.

**Celovita digitalizacija in optimizacija proizvodnje** od analize do implementacije rešitev v realnem okolju.

DIGITEH D.O.O.  
TRŽAŠKA CESTA 315, SI-1000 LJUBLJANA



+386 (0)8 2055 621  
INFO@DIGITEH.EU  
WWW.DIGITEH.EU





Kupite ScanBox  
in **pohitrite svoje**  
**meritve za 50–80%**  
v primerjavi s  
tradicionalnimi  
metodami.

TOPOMATIKA d.o.o.  
Industrijska ulica 3, Novaki,  
HR-10431 Sveta Nedelja  
[www.topomatika.si](http://www.topomatika.si)

Za ponudbo in brezplačen demo projekt  
se nam javite na [info@topomatika.si](mailto:info@topomatika.si)



Certified  
Metrology Partner

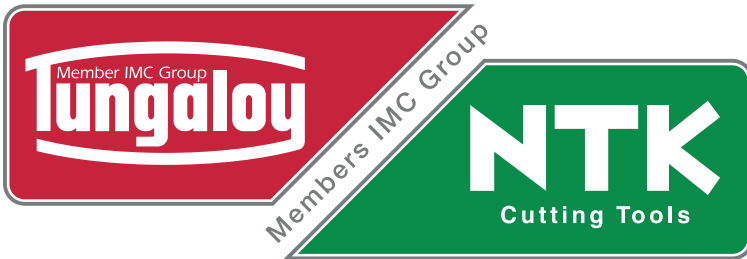
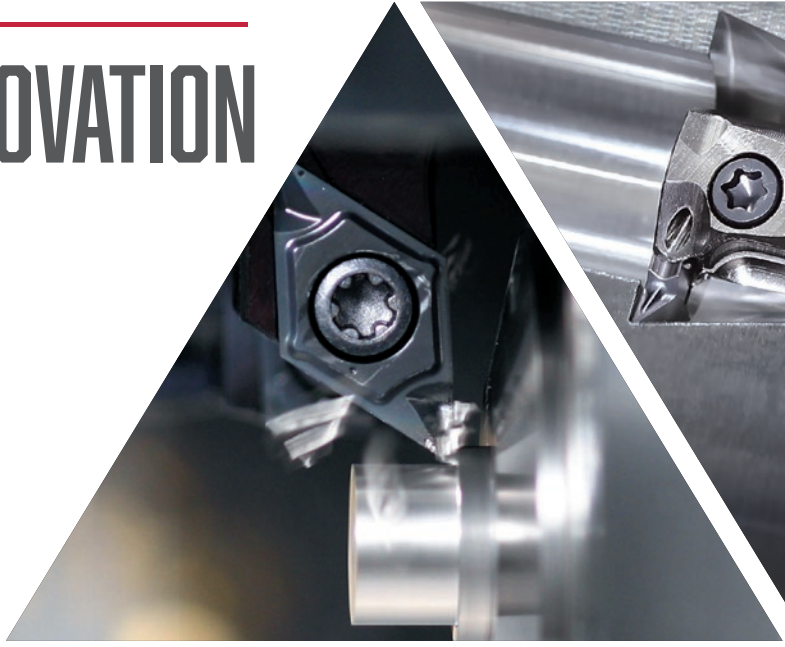
**MOTOMAN NEXT**

# 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.





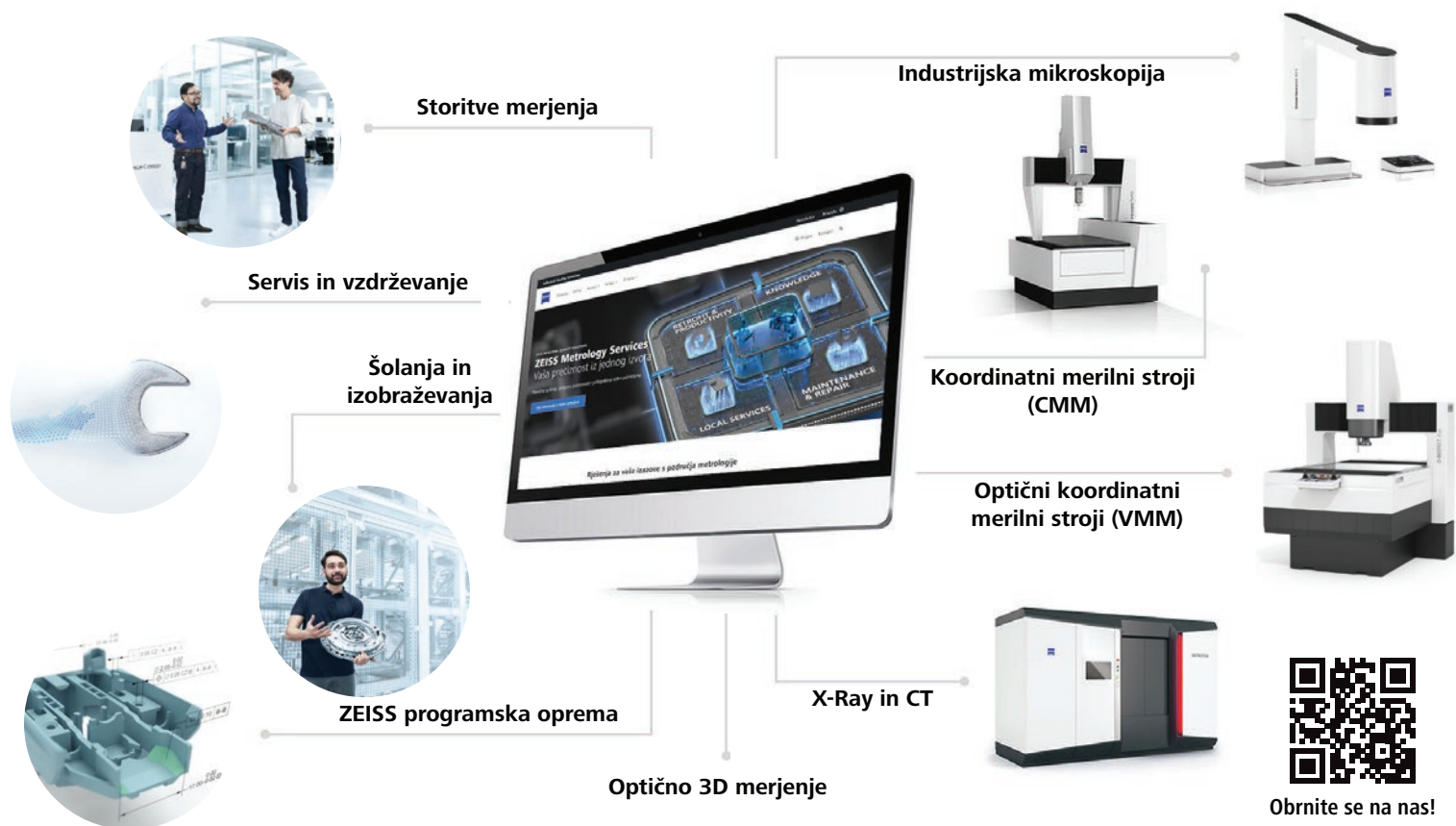
**LEADING IN INNOVATION**

TUNGALOY REZNI ALATI D.O.O.  
[www.tungaloy.com](http://www.tungaloy.com)  
[www.ntkcuttingtools.com](http://www.ntkcuttingtools.com)

# ZEISS Industrial Quality Solutions



Carl Zeiss d.o.o., Leskoškova cesta 6, 1000 Ljubljana | your.metrology.si@zeiss.com



Vaša natančnost iz enega vira - ZEISS Industrial Quality Solutions



Nov videz. Nova izkušnja.

Uspešni procesi se začnejo tam, kjer se izzivi srečajo s prilagojenimi rešitvami - in nastane popolno ujemanje.

Na sejmu AMB 2026 vam bomo pokazali, kako blizu so lahko dobre rešitve: skozi celotno procesno verigo in z neposredno interakcijo na sejmu.



Rezervirajte datum: 15.-19. september 2026

AMB 2026 | Hala 3 | Stojnica 3E50

# INDUSTRIJSKI FORUM IRTADRIA26



## Strokovni dogodek za industrijo

Industrijski forum IRT ADRIA je dvodnevni strokovni dogodek, ki ustvarja prostor za izmenjavo informacij, znanj, idej in pogledov na dosežke industrijske panoge. Industrijski forum ima v Sloveniji več kot 15 letno tradicijo, medtem ko se je dogodek na Hrvaškem uveljavil z letom 2025 in pokriva širše področje zahodnega Balkana.

Industrijski forum IRT ADRIA povezuje soustvarjalce industrijske panoge: industrijska podjetja z najrazličnejših področij, razvojno-raziskovalne organizacije in predstavnike akademske sfere.

Dogodek bogati razstava visokotehnoloških podjetij, ki obiskovalcem foruma predstavljajo svoje najnovejše dosežke, napredne tehnologije, razvojne rešitve in inovacije.

### Program

Prvi dan dogodka je namenjen poslovnim vsebinam. Udeležence kot promotorka inženirskega poklica nagovori aktualna inženirka leta.

Drugi forumski dan potekajo strokovna predavanja v več tematskih sklopih, ki so tesno povezani z vsebinami, o katerih piše revija IRT3000 ADRIA. Osrednja pozornost je namenjena primerom uspešno rešenih konkretnih izzivov iz prakse.

### KAJ?

- strokovni dogodek – 2 dni!
- predavanja, mreženje in izmenjava izkušenj
- več kot 20 strokovnih predavanj

### ZA KOGA?

- strokovnjake iz proizvodnih podjetij
- predstavnike razvojnih in raziskovalnih institucij
- akademike
- odločevalce iz industrije
- predstavnike branžnih združenj
- vodje proizvodnje
- raziskovalce in razvojnike
- študente in dijake
- vse, ki hočete biti v stiku z napredkom v svoji branži



RAZSTAVA



POSLOVNI DEL



STROKOVNA  
PREDAVANJA



RAZISKOVALCI

14. in 15. 9. 2026

Zadar • Hotel KOLOVARE

Glavna pokrovitelja



Pokrovitelja



Medijski partner



Partnerji



Industrijski forum IRT ADRIA | Ulica Ivica Sudnika 7, 10430 Samobor, Hrvaška  
tel.: +385 98 409 690 | info@forum-irtadria.com

Prihodnost je tukaj.









INDUSTRIJSKI  
FORUM  
**IRT**  
2026  
forum-irt.si

ISBN 978-961-95800-6-6



9 789619 580066 >