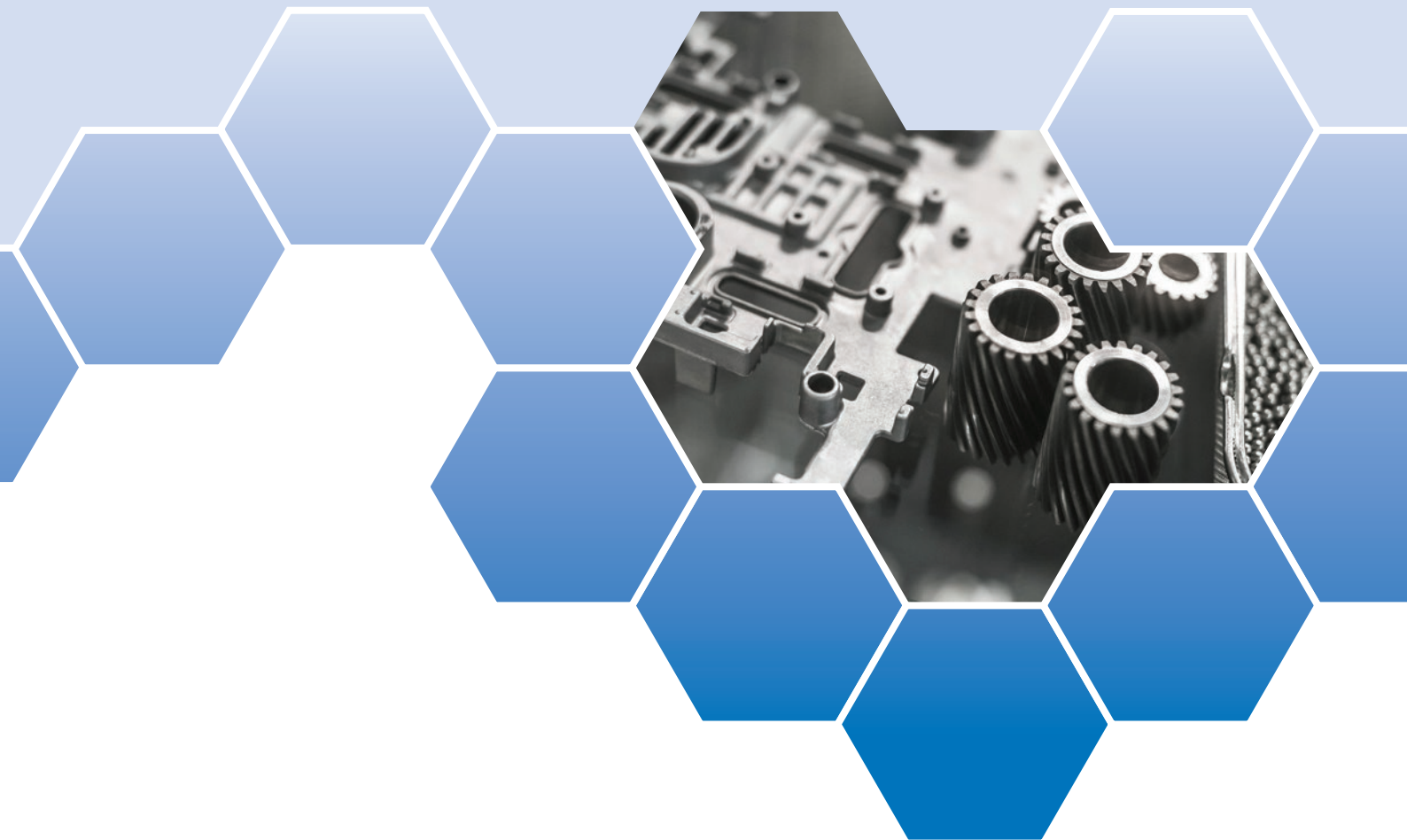


INDUSTRIJSKI FORUM **IRT** 2025



VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ ZA STROKO

Portorož, 9. in 10. junij 2025

16. INDUSTRIJSKI FORUM **IRT**

VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ
ZA STROKO

Zbornik foruma

Urednik
Darko Švetak

Portorož, 9. in 10. junij 2025

Naslov: **16. 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: Solid World d. o. o.
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 (16 ; 2025 ; Portorož)
Vir znanja in izkušenj za stroko : 16. industrijski forum IRT :
zbornik foruma : Portorož, 9. in 10. junij 2025 / urednik Darko Švetak ;
[organizator Profidtp]. - Škofljica : Profidtp, 2025

ISBN 978-961-95800-5-9
COBISS.SI-ID 234156035

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

Kamenček v mozaiku

V preteklih petnajstih letih je Industrijski forum IRT postal osrednje stičišče za izmenjavo znanj, predstavitev tehnoloških dosežkov ter krepitev sodelovanja med industrijo in raziskovalnimi institucijami.

V zborniku, ki je pred vami, so zbrani prispevki, ki odražajo najnovejše trende in dosežke na področjih, kot so orodjarstvo, strojogradnja, vzdrževanje, tehnična diagnostika, nekovine, proizvodnja, logistika ter napredne tehnologije. Ti prispevki ne le dokumentirajo napredek, temveč tudi spodbujajo razpravo in navdihujejo nadaljnji razvoj v industriji.

Industrijski forum IRT je za slovensko industrijo dragocen tudi onkraj konkretnih tematik in študij primerov, saj krepi mreženje in sodelovanje med domačimi akterji v industriji. Gre za dogodek, ki združi vodilne strokovnjake, mlade raziskovalce in predstavnike malih ter velikih podjetij. Ti skupaj gradijo partnerstva, ki pozneje vodijo v skupne projekte, razvoj novih tehnologij ali širitev na tuje trge. Skratka stvari in projekte, o katerih boste lahko brali v prihodnjih letih (in zbornikih).

Ponosni smo na prenos znanja in vzpostavljanje standardov, ki se odvijata na Industrijskem forumu IRT. Skozi poglobljene strokovne predstavitve in delavnice se prenašajo najnovejši trendi — od digitalizacije proizvodnje do trajnostnih tehnologij in naprednih materialov. Takšna izmenjava izkušenj pomaga preseči operativne rutine posameznih podjetij in vpeljati dobre prakse na široko. Hkrati forum pomaga postavljati strokovne standarde, ki jih nato sledijo tehnološki ponudniki in izvajalci pri nas.

Zbornik je nekakšna knjiga dosežkov slovenske industrije. A sam dogodek je več kot to. Industrijski forum IRT ni samo retrospektiva dosežkov, temveč tudi laboratorij za prihodnost. Predstavitve tehnoloških novosti, primeri digitalnih dvojčkov, robotizacije ali naprednih diagnostik spodbujajo podjetja, da razmišljajo drznejše, vlagajo v raziskave in razvoj ter ostanejo tekmovalna v globalnih verigah vrednosti. Prav taka okolja v praksi pogosto porodijo ideje za zagonska podjetja in prebojne ideje ter projekte z visokim tržnim potencialom.

Le drzniti oziroma upati si moramo. V državah žepne velikosti hrbtenico gospodarstva predstavljajo mala in srednje velika podjetja, ki jim pogosto primanjkuje virov za lastne raziskave ali mednarodne konference. Industrijski forum IRT jim omogoča, da za relativno nizke stroške (v primerjavi s tujino) dostopajo do vrhunskih strokovnjakov, najnovejših

raziskav in neposredne podpore industrijskih zbornic ter ministrstev. To pa krepi njihovo tehnološko dovršenost in odpira priložnosti za internacionalizacijo.

In prav mogoče jim kje na njihovi poti prisluhne ali pomaga javni sektor. V ekipi IRT smo ponosni tudi na vlogo pri krepitvi javno-zasebnega dialoga. Digitalna preobrazba, energetska prehod, izobraževanje in regulativa so področja, kjer se interes javnih institucij in industrije prepleta. Industrijski forum IRT omogoča dialog med ministrstvi, agencijami, združenji in gospodarstvom, kar pospešuje pripravljenost Slovenije na strateške izzive – od uvajanja pametnih tovarn do zelene mobilnosti.

Industrijski forum IRT je več kot le konferenca: je stičišče idej, priložnost za partnerstva in odskočna deska za inovacije. S krepitvijo mreženja, prenosom znanja, spodbujanjem podjetništva in javno-zasebnimi dialogi prispeva k temu, da slovenska industrija ostaja konkurenčna, inovativna in odporna na prihodnje izzive. In vsakoletni zbornik je učbenik domače industrije. Kaj ste se torej naučili letos?

Portorož, junij 2025

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

KO VRHUNSKO ZNANJE NI VEČ DOVOLJ: KLJUČNA VLOGA VODENJA V INDUSTRIJSKI ODLIČNOSTI

Blaž Florjanič¹

¹BSH Hišni aparati d.o.o.

..... 3

OPTIMIZACIJA SODELOVANJA ČLOVEK-ROBOT: VPLIV ZASEDENOSTI DELAVCA NA DELOVNO OBREMENITEV, STRES IN UČINKOVITOST

Aljaž JAVERNIK, Borut BUCHMEISTER, Iztok PALČIČ, Klemen KOVIČ, Robert OJSTERŠEK
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

..... 7

OD PROIZVODNJE DO POVEZOVANJA: POT MALIH PODJETIJ SKOZI INDUSTRIJO 5.0, DIGITALIZACIJO IN TUJE TRGE

Tanja KAVČIČ¹, Jakob ROBIČ², Karsten KRANZ³

¹Precisium d.o.o.

²Jakob Robič s.p.

³Karsten Kranz s.p.& Insourcify GmbH

..... 11

RAZVOJ METODOLOGIJE ZA IZRAČUN OGLJIČNEGA ODTISA ALUMINIJEVIH POLIZDELKOV, PROIZVEDENIH V DRUŽBAH SKUPINE IMPOL

Gašper GANTAR^{1,2}, Barbara H. PIGAC³, Sonja TOMAZINI³, Matej STEINACHER³

¹Visoka šola za proizvodno inženirstvo

²Fakulteta za varstvo okolja

³Impol d.o.o.

..... 15

TRAJNOSTNI PROIZVODNI SISTEMI

Matevž RESMAN, Marko ŠIMIC, Mihael DEBEVEC, Niko HERAKOVIČ

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

..... 19

DAN 2 - DVORANA 1

DOSEGANJE IZJEMNE NATANČNOSTI POTI 0,03MM IN ENERGETSKE UČINKOVITOSTI Z ABB OMNICORE ROBOTSKIMI KRMILNIKI

Tomaž LASIČ

ABB d.o.o.

..... 23

ROBOTIZACIJA V DENTALNI INDUSTRIJI

Andrej ZIDAR¹, Max MALAJNER²

¹FANUC Adria d.o.o.

²Robotehnika d.o.o.

..... 27

ROBOTSKA VARILNA CELICA Z ROBOTIZIRANIM POSLUŽEVANJEM VARILNIH PRIPRAV

Hubert KOSLER^{1,2}, Igor PUGELJ², Matej MERKAČ¹

¹YASKAWA Slovenija d.o.o.

²YASKAWA Ristro d.o.o.

..... 31

AVTOMATIZIRANO OSKRBOVANJE ROBOTSKIH CELIC Z IZDELKI Z UPORABO AVTONOMNO VODENEGA VOZILA

Maria YAKIMOVSKA, Vinko DREV

LTH Castings d.o.o.

..... 33

RAZVOJ ROBOTSKEGA SISTEM ZA POBIRANJE RAZSUTIH OBJEKTOV IZ ZABOJA Z UPORABO GLOBOKIH NEVRONSKIH MREŽ IN ROBOTSKEGA OPERACIJSKEGA SISTEMA (ROS2)

Rok PAHIČ, Iurii VANDIAK, Urban KOLMAN

Moderne tehnologije d.o.o.

..... 39

INTELLIMAN: UMETNA INTELIGENCA ZA AVTOMATIZACIJO SESTAVLJANJA KABELSKIH SNOPOV	
Žiga GOSAR ¹ , Luca PETAN ¹ , Gianluca PALLI ² , Salvatore PIROZZI ³	
¹ ELVEZ, d.o.o.	
² Alma Mater Studiorum - Università di Bologna	
³ Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"	45
OD VARNOSTI STROJEV DO KIBERNETSKE VARNOSTI	
Primož BESTIJANIČ	
ControlTech d.o.o.	51
Z DIGITALNIM DVOJČKOM DO OPTIMALNEGA TLRISA IN LOGISTIKE PROIZVODNJE PRI ZDRUŽEVANJU PROIZVODNIH AKTIVNOSTI V PODJETJU UNIOR	
Hugo ZUPAN ¹ , Boštjan JEGRIŠNIK ² , Uroš MATAVŽ ² , Niko HERAKOVIČ ³	
¹ DIGITEH d.o.o.	
² UNIOR d.d.	
³ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij LASIM	55
IIoT INDUSTRIJSKI INTERNET STVARI KOT JEDRO ZELENIH PAMETNIH TOVARN	
Gorazd RAKOVEC	
Kompetenčni center za sodobne tehnologije vodenja, VSŠ, Kibernova	59
DAN 2 - DVORANA 2	
POLICA AVTODOMA – INOVATIVNA IZRABA TERMIČNO RECIKLIRANIH STEKLENIH VLAKEN ODPADNIH DUROPLASTOV	
Sebastjan ZAVERLA ¹ , Blaž NARDIN ¹ , Silvester BOLKA ¹ , Marko VERČKOVNIK ¹ , Rajko BOBOVNIK ¹ , Gregor VEDENIK ² , Lara LETONJE ² , Saša VEDENIK ²	
¹ Fakulteta za tehnologijo polimerov	
² VEPLAS d.d.	65
ZAGOTAVLJANJE KVALITETE IZDELKOV S POMOČJO MERJENJA TLAKA V ORODJU	
Rok GLINŠEK, Boštjan ŠKRLJ, Matija OBOLNAR	
Hella Saturnus Slovenija d.o.o.	73
HITRA IZDELAVA BRIZGANIH IZDELKOV S POMOČJO 3D-TISKANIH ORODIJ	
Andrej GLOJEK	
TECOS	77
ANALIZA VPLIVA MENJAVE MATERIALA OHIŠJA POGONSKE ENOTE KUHINJSKEGA ROBOTA NA RAVEN HRUPA IN PSIHOAKUSTIKO	
Tadej NOVAKOVIČ, David ENCI, Boštjan ZAFOŠNIK,	
BSH Hišni aparati d.o.o. Nazarje	81
NOVI TRENDI V AVTOMOBILSKI INDUSTRIJI - PRILOŽNOSTI IN IZZIVI ZA PLASTIČARJE	
Aleš ADAMLJE	
Hella Saturnus Slovenija, d.o.o.	85
LSR – BRIZGANJE TEKOČEGA SILIKONA	
Miha PUŠNIK	
FANUC Adria d.o.o.	89
KROŽNO GOSPODARSTVO NI VEČ IZPIRA – TEMVEČ NUJA. KAKO EU SPREMINJA PRAVIL IGRE	
Anja POPOVIČ ANDOLJŠEK, Kristina OBU VAZNER, Urška BUTOLEN, Aleš MIHELICH	
Gorenje, d.o.o.	91
LONČEK ZA VZGOJO RASTLIN S HIDROPONIKO IZ ODPADNEGA POLIPROPILENA V KOMBINACIJI Z ODPADNIMI KOKOSOVIMI VLAKNI	
Marko VERČKOVNIK ¹ , Natalija ŠTUMPFL ² , Silvester BOLKA ¹ , Blaž NARDIN ¹ , Primož Mlačnik ² , Sebastjan ZAVERLA ¹ , Rajko BOBOVNIK ¹	
¹ Fakulteta za tehnologijo polimerov	
² KO-SI d.o.o.	95
RAZVOJ IN IMPLEMENTACIJA PDCA CIKLA	
Andrej ZADRAVEC, Nik ŠKORJA	
Plastika Skaza d.o.o	101

DAN 2 - DVORANA 3

PRIMERJAVA NAPREDNIH 3D TEHNOLOGIJ ZA SKENIRANJE PRI NADZORU KVALITETE INDUSTRIJSKIH IZDELKOV

Jakob FABJAN, Adela PIŠMO, Vesna PUNGERČAR, Slavko ARH
Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto 111

EVALUATION OF BATTERY CELLS AND MODULES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY USING CT TECHNOLOGY

Ena PERIČIČ¹, Andrea PERKOVIČ¹, Luka KURTALJ², Josip KOS², Nenad DRVAR²,
Tomislav HERCIGONJA²
¹Rimac Technology d.o.o.
²Topomatika d.o.o 117

AVTOMATIZACIJA PREDNASTAVITVENIH IN MEDPROCESNIH MERITEV

Gregor TRESKA¹, Tim HERBERTSON²
¹Trecon d.o.o.
²EROWA AG 125

OpenEOL: ODPRTA PLATFORMA ZA KONČNO KONTROLO PROIZVODNIH PROCESOV

Janko SLAVIČ¹, Robert BOLČINA², Janez LUZGAR³, Domen GORJUP¹, Klemen ZALETELJ¹,
Tibor BARŠI PALMIČ¹, Andrej BIČEK³, Gregor VIDMAR³, Luka JELOVČAN³, Matej ANKO³,
Mark GLADEK³, Matej LEBAN², Sebastijan ZADEL², Matjaž LUKEŽIČ², Rok BENEDETIČ²,
Matjaž VOVK², Borut PELJHAN², Martin FURLAN², Boštjan GREGORIČ², Niki UŠAJ²
¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, LADISK
²MAHLE Electric Drives Slovenija d.o.o.
³Domel d. o. o. 129

AGILNO UVAJANJE ZAPOSLENIH V KOMPLEKSNIH PROIZVODNIH SISTEMIH S POMOČJO DIGITALNEGA USPOSABLJANJA

Žiga GOSAR¹, Marina PANOSKA¹, Klemen BABUDER², Matija ZUPANČIČ²
¹ELVEZ, d.o.o.
²Art Rebel 9, d. o. o. 133

AN EXAMPLE OF RFID TECHNOLOGY APPLICATION IN INDUSTRY

Miroslav GOJIC
EVOKS 137

INOVACIJE V RAZVOJU HMI/SCADA SISTEMOV: SODOBNI PRISTOPI S PLATFORMO FACTORYTALK OPTIX

Peter SKOPEC
ControlTech d.o.o. 143

ŠTUDIJA PRIMERA NAPREDNEGA TERMINIRANJA V KOMPLEKSNI MALOSERIJSKI PROIZVODNJI

Peter KORENČAN, Boštjan MALAVAŠIČ, Andraž ŽERTEK, Dušan BOŽIČ
Inden, informacijske rešitve, d.o.o.. 147

RAZVOJ MERILNEGA SISTEMA ZA UMERJANJE PRECIZNIH SENZORJEV POMIKA

Luka ČAS, Bojan AČKO, Rok KLOBUČAR
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za tehnološke meritve 151

DAN 2 - DVORANA 4

VPLIV ORIENTACIJE OBDELOVANCA NA PROCES PLAZEMSKEGA ELEKTROLITSKEGA POLIRANJA

Jithinraj EDAKLAVAN KOROTH, Joško VALENTINČIČ
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo 157

MBJ TEHNOLOGIJA V INDUSTRIJI: LAŽJI IN NAPREDNEJŠI PROPORCIONALNI POTNI VENTIL

David HOMAR¹, Jan BARTOLJ², Domen STRENČAN¹, Franc MAJDIČ², Jernej LOKOVŠEK¹
¹Solid World d. o. o.
²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo 163

DIGITALNE STORITVE NA PODROČJU OBDELAVE KOVIN Zoran SVENŠEK SECO TOOLS SI d.o.o.	.....	167
RAZVOJ IN IZDELAVA VISOKOTEMPERATURNE NAPRAVE Z ZAŠČITENO VROČO PLOŠČO Rok MARKEŽIČ, Tomaž KASTELIC, Gašper CAFUTA CAFUTA, inženiring, simulacije in svetovanje. d.o.o.	.....	173
DIGITALNI DVOJČEK LABORATORIJSKEGA MEHATRONSKEGA ŠTANČNEGA ORODJA Uroš ŠTUKLEK ¹ , Ema STEFANOVSKA ² , Albin SIRC ³ , Dejan ROŽIČ ¹ , Jure PETERNEL ³ , Tomaž PEPELNJAK ² ¹ Dafra kontakt tehnologija d.o.o. ² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo ³ Egasi d.o.o.	.....	179
IZBOLJŠANJE PRODUKTIVNOSTI PRI REZANJU Z OPTIČNIM LASERJEM: METODA VERIŽNIH POVEZAV IZDELKOV Marko SIMONIČ, Kristijan ŠKET, David POTOČNIK, Jernej HERNAVS, Tadej PERŠAK, Simon KLANČNIK, Mirko FICKO Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo	.....	183
PODALJŠANJE UPORABNE DOBE HIDRAVLICNEGA OLJA IN VPLIV NA ENERGETSKO UČINKOVITOST Aleš HROBAT, Jošt MOHORKO, Vito TIČ, Milan KAMBIČ Olma d.o.o.	.....	189
UPOŠTEVANJE RAZPOLOŽLJIVOSTI SOLARNE ENERGIJE PRI NAPOVEDOVANJU OBRATOVALNE ZMOGLJIVOSTI AVTOMATIZIRANEGA OBDELOVANJA KMETIJSKIH POVRŠIN Domen ŠERUGA, Primož POREDOŠ, Dominik KOZJEK, Aleš GOSAR, Marko NAGODE, Jernej KLEMENC Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo	.....	193
ŠTUDIJA DISPERZIJE NANODELCEV ZLATA ZA UPORABO V TISKANIH VEZJIH Lan KRESNIK ¹ , Peter MAJERIČ ^{1,2} , Darja FEIZPOUR ³ , Rebeka RUDOLF ^{1,2,4} ¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo ² Zlatarna Celje d.o.o. ³ Inštitut za kovinske materiale in tehnologije (IMT), ⁴ Pomursko znanstveno-inovacijsko središče	.....	197
POSTER SEKCIJA		
SPAJANJE NEZDRUŽLJIVIH POLIMEROV PREKO DINAMIČNIH KOVALENTNIH MREŽ NA PRIMERU PREBRIZGAVANJA IN VARJENJA ABS IN PP Rebeka LORBER, Janez SLAPNIK, Irena PULKO Fakulteta za tehnologijo polimerov	.....	203
OJAČITVENI KOMPOZITNI DEL »FLEXPROTEC« - INOVATIVNEGA ZAŠČITNEGA ŠPORTNEGA ŠČITNIKA – IZ RECIKLIRANIH MATERIALOV Silvester BOLKA ¹ , Alen ŠAPEK ² , Marko VERČKOVNIK ¹ , Danijel GRACEJ ² , Sebastjan ZAVERLA ¹ , Edina LJAMI ² , Rajko BOBOVNIK ¹ , Blaž NARDIN ¹ ; ¹ Fakulteta za tehnologijo polimerov ² Additio d.o.o.	.....	207
Komercialni oglasi podjetji	.....	213

16. INDUSTRIJSKI FORUM **IRT**

STROKOVNI PRISPEVKI

Portorož, 9. in 10. junij 2025



KO VRHUNSKO ZNANJE NI VEČ DOVOLJ: KLJUČNA VLOGA VODENJA V INDUSTRIJSKI ODLIČNOSTI

Blaž FLORJANIČ
BSH Hišni aparati d.o.o.

IZVLEČEK

V času, ko industrijsko okolje postaja vse bolj kompleksno, samo tehnično znanje ni več zagotovilo za uspeh. V ospredje prihajajo mehke veščine, sposobnost vodenja in učinkovito timsko sodelovanje. Prispevek prikazuje, kako celovit razvoj kadrov, s poudarkom na razvoju vodij in uvedbi coachinga kot ene od pomembnih metod, signifikantno prispeva k uresničevanju poslovnih ciljev, razvoju talentov in večji organizacijski agilnosti. Vodja je tisti, ki s svojim zavedanjem o pomembnosti razvoja ljudi postavlja temelje za dolgoročni uspeh podjetja v tehnološki tekmi.

1 UVOD: Potreba po celostnem razvoju kadrov, ne samo kopičenju znanja

Industrijsko odličnost pogosto povežemo s tehničnim znanjem, standardizacijo procesov in izboljšavami na osnovi uvedbe digitalizacije. Vendar pa najnovejše raziskave kažejo, da podjetja, ki vlagajo tudi v razvoj vodstvenih kompetenc in sistematičen razvoj kadrov, dosegajo bistveno višjo stopnjo inovativnosti, zadovoljstva zaposlenih in tržno konkurenčnost [1].

Razvoj kadrov je sestavni del sodobnega pristopa k organizacijskemu razvoju [2]. Gre za strateški proces, ki vključuje:

- izobraževanje,
- mentorstvo,
- coaching,
- učenje skozi delo,
- sistematično vpeljevanje povratnih informacij,
- vključevanje zaposlenih v razvojne pobude,
- oblikovanje razvojnih načrtov.

V tej dinamiki je vodja prvi, ki mora prevzeti vlogo razvijalca talentov in ambasadorja kulture učenja. Če tega ne prepozna, obstaja tveganje, da organizacija stagnira, ne glede na kakovost tehnologije ali izdelkov.

2 POTENCIAL VODENJA: Krmarjenje skozi spremembe v industriji

Industrija se spreminja hitreje kot kadarkoli prej. Digitalizacija, avtomatizacija, zeleni prehod in pomanjkanje kadrov vodje postavljajo pred nove izzive. Razvoj vodij, ki znajo odgovarjati na kompleksne spremembe, ni več dodatna vrednost, temveč nujnost.

Metode za podporo vodjem pri soočanju s spremembami vključujejo:

- sistemsko izobraževanje o transformacijskih veščinah,
- interno mentorstvo,
- coaching za individualni razvoj.

Coaching služi kot podpora za razvijanje prilagodljivosti, sistemskega razmišljanja in učinkovitega komuniciranja:

- omogoča vodjem, da bolje upravljajo kompleksnost sodobnega poslovnega sveta [3],
- povečuje sposobnost za spoprijemanje z negotovostjo [4],
- spodbuja inovacije skozi reflektivno prakso [5],
- krepi občutek lastništva vloge vodje.

3 OD STROKOVNJAKA DO VPLIVNEGA VODJE: Kako se izboljša notranja promocija inženirjev v vodstvene vloge

Izboljšanje notranje promocije inženirjev v vodstvene vloge zahteva celovit pristop, ki vključuje razvoj kompetenc, jasno definirane karierne poti ter sistematično spremljanje in ocenjevanje potenciala zaposlenih. Ključni ukrepi so:

Stalno strokovno izobraževanje in usposabljanje: Redno nadgrajevanje znanja in veščin prek izobraževalnih programov, delavnic in seminarjev povečuje pripravljenost inženirjev na prevzem vodstvenih nalog [6].

Vzpostavitev razvojnih programov: Uvedba internih razvojnih programov, ki vključujejo coaching, mentorstvo in individualizirano povratno informacijo, dokazano pospešuje rast inženirjev v vodstvene vloge.

Jasni kriteriji in transparentni postopki napredovanja: Določitev jasnih pogojev in postopkov za napredovanje omogoča pravično in motivacijsko okolje.

Spremljanje referenčnih projektov in izkušenj: Vodenje evidence o referenčnih projektih in izkušnjah omogoča prepoznavanje kandidatov z največjim potencialom za vodstvene funkcije [6].

Podpora in spodbuda s strani vodstva: Aktivno vključevanje vodstva v prepoznavanje in razvoj talentov je ključno za uspešno notranjo promocijo.

Poleg tega je pomembno, da organizacije zagotavljajo stalno povratno informacijo in omogočajo dostop do vodstvenih izzivov, kjer lahko inženirji razvijajo vodstvene kompetence v praksi. Le tako bodo dolgoročno zagotavljale ustrezno zasedbo vodstvenih položajev znotraj lastnega kadra

4. COACHING V PRAKSI: ZGODBE, KI PREPRIČAJO

Leadership coaching v podjetjih in organizacijah prinaša merljive rezultate na področju razvoja vodstvenih veščin, izboljšanja timske dinamike in osebne rasti vodij. Praktične izkušnje in zgodbe iz gospodarstva potrjujejo, da coaching ni le teoretična metoda, temveč orodje, ki vodi do konkretnih sprememb in napredka.

V obsežni študiji, ki je zajela podjetja iz Evrope, Bližnjega vzhoda in Afrike, je kar 78,5 % sodelujočih izrazilo prepoznano učinkovitost coachinga. Največje koristi so bile opažene na področjih izboljšanja poslovnih procesov, razvoja veščin, večje učinkovitosti, zadržanja talentov in izboljšanja organizacijske kulture [7].

Skupni učinki leadership coachinga v evropskem gospodarstvu:

- Bistveno izboljšanje komunikacije, sodelovanja in odločanja v vodstvenih ekipah.
- Povečanje odgovornosti, samostojnosti in inovativnosti zaposlenih.
- Merljivi finančni učinki: visoka povrnitev naložbe (ROI), optimizacija stroškov, večja produktivnost in zadržanje ključnih kadrov.
- Razvoj trajnostne in agilne vodstvene kulture, ki omogoča boljše prilagajanje spremembam.

Leadership coaching se v evropskem gospodarstvu izkazuje kot ena najbolj učinkovitih strategij za razvoj vodij in doseganje dolgoročnih poslovnih ciljev [8] [9].

5 UČINKOVIT SISTEM RAZVOJA KADROV V INDUSTRIJI: Kaj deluje?

Na podlagi primerov iz mednarodnih podjetij in analiz sodobnih trendov lahko povzamemo naslednje ključne dejavnike uspešnega razvoja kadrov v industrijskem okolju:

Vlaganje v znanje in stalno izobraževanje

Uspešna podjetja sistematično vlagajo v razvoj znanja zaposlenih, saj je to ključno za konkurenčnost in prilagodljivost na hitro spreminjajočem se trgu. Izobraževanje in razvoj kompetenc sta pomembna ne glede na velikost podjetja, vendar imajo velika podjetja pogosto bolj razvejane sisteme razvoja, medtem ko se mala in srednja podjetja hitro približujejo tem standardom [10].

Digitalizacija in avtomatizacija

Uvedba digitalnih orodij in avtomatiziranih procesov ne zmanjšuje števila zaposlenih, temveč jih razbremenjuje rutinskih nalog in omogoča večji poudarek na kreativnih in vrednostnih nalogah. Ključni izziv je usposabljanje zaposlenih za uporabo novih tehnologij in spodbujanje multidisciplinarnosti, kar omogoča boljšo prilagodljivost in inovativnost.

Načrtovanje kariere in sistematično upravljanje talentov

Učinkovit sistem razvoja kadrov vključuje jasno načrtovanje kariernih poti, analizo potreb po znanjih in spretnostih ter strateško upravljanje talentov. Pomembno je, da podjetja prepoznajo potenciale svojih zaposlenih in jim omogočajo napredovanje ter prevzemanje večjih odgovornosti [10].

Vključevanje zaposlenih in motivacija

Aktivno sodelovanje zaposlenih v procesih razvoja, njihova motivacija, ustvarjalnost in pripravljenost na spremembe so bistveni za uspeh. Podjetja, ki vlagajo v razvoj in zadovoljstvo zaposlenih, dosegajo boljše rezultate, večjo učinkovitost in inovativnost [11].

Povezovanje z izobraževalnimi in raziskovalnimi institucijami

Sodelovanje z zunanjimi partnerji, kot so univerze in raziskovalni centri, omogoča dostop do novih znanj, izmenjavo izkušenj in hitrejši prenos inovacij v prakso.

Prilagodljivost sistemov glede na velikost podjetja

Velikost podjetja vpliva na kompleksnost in razvejanost razvojnih sistemov, vendar je ključno, da tudi manjša podjetja sledijo trendom in uvajajo učinkovite prakse razvoja kadrov, da ostanejo konkurenčna [10].

Učinkovit sistem razvoja kadrov v industriji temelji na stalnem izobraževanju, digitalizaciji, strateškem načrtovanju kariere, motivaciji zaposlenih, povezovanju z zunanjimi partnerji ter prilagodljivosti sistemov glede na velikost podjetja. Podjetja, ki celovito naslavlajo te dejavnike, dosegajo večjo konkurenčnost, inovativnost in odpornost na spremembe.

6. ZAKLJUČEK: Industrijska odličnost potrebuje človeški vidik

Tehnologija brez človeka nima učinka. Razvoj kadrov omogoča, da visoko usposobljeni strokovnjaki razvijejo tudi sposobnost vodenja, sodelovanja in strateškega vpliva. Vodja je tisti, ki mora prvi verjeti v pomen učenja in razvoja, če želi, da organizacija ohrani in poveča svojo konkurenčnost.

S tem podjetja ne le izboljšajo učinkovitost, temveč gradijo kulturo, ki je sposobna učenja, prilagajanja in dolgoročne rasti.

Viri:

- [1] McKinsey & Co.: *The State of Organizations 2023*, McKinsey & Company, New York, 2023.
- [2] Ulrich, D. et al.: *Global HR Competencies: Mastering Competitive Value from the Outside In*, McGraw-Hill, New York, 2012.
- [3] Whitmore, J.: *Coaching for Performance*, Nicholas Brealey Publishing, London, 2017.
- [4] ICF: *Global Coaching Study*, International Coaching Federation, Lexington, 2021.
- [5] Rock, D., Donde, R.: *Driving Organizational Change with Internal Coaching Programs*, NeuroLeadership Journal, 2008.
- [6] *IZS.NOVO*, GLASILO INŽENIRSKÉ ZBORNICE SLOVENIJE, Letnik 21, št. 85, 86, avgust 2018
- [7] ICF: *Global Coaching Study*, International Coaching Federation, Lexington, 2009.
- [8] *Coaching in corporations*, EUROPEANCEO, <https://www.europeanceo.com/lifestyle/coaching-in-corporations-2/>
- [9] *TOP 10 Executive Coaching Companies in Europe 2023*, Business Management Review, <https://executive-coaching-europe.businessmanagementreview.com/vendors/top-executive-coaching-companies-in-europe.html>
- [10] Planišič, P.: *Možnost razvoja kadrov glede na velikost podjetja. Študije primerov*, Diplomsko delo, Ljubljana, 2009
- [11] Zakšek, D.: *Razvoj kadrov in kadrovske službe v podjetju Eventus*, Diplomsko delo, Kranj 2007

OPTIMIZACIJA SODELOVANJA ČLOVEK-ROBOT: VPLIV ZASEDENOSTI DELAVCA NA DELOVNO OBRE MENITEV, STRES IN UČINKOVITOST

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

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Vse pogostejša integracija robotov v proizvodne sisteme po vsem svetu kaže na pomembnost avtomatizacije, ki je pogosto ključnega pomena za ohranjanje globalne konkurenčnosti. Čeprav popolna avtomatizacija prinaša številne prednosti, dinamičnost sodobnih naročil zahteva visoko prilagodljivost. Uvedba sodelovalnih delovnih mest, ki vključujejo sodelovanje človeka in robota, lahko poveča učinkovitost in prilagodljivost proizvodnje. Kljub temu pa varnost in počutje delavca še vedno predstavljata skrb. Študija prikazuje vpliv zasedenosti delavca pri sodelovanju s sodelovalnim robotom na njegovo delovno obremenitev, stres in učinkovitost. Eksperiment vsebuje dva scenarija sodelovanja: nizka in visoka zasedenost delavca, pri čemer so v vsakem scenariju uporabljeni različni gibalni parametri sodelovalnega robota, prilagojeni zmožnostim posameznega delavca. Delovna obremenitev delavcev je bilo ocenjena z vprašalnikom NASA-TLX, medtem ko je bil stres izmerjen z elektrokardiogramom (EKG) in analiziran s programsko opremo Kubios HRV. Rezultati kažejo, da višja zasedenost delavca vodi do višje učinkovitosti, vendar tudi do višje delovne obremenitve in stresa. Nasprotno pa nižja zasedenost doprinese k nižji delovni obremenitvi, a tudi k nižji učinkovitosti. Ugotovitve poudarjajo potrebo po prilagojenih smernicah, ki uravnotežijo dobro počutje delavcev in proizvodno učinkovitost.

1 UVOD

V sodobnem industrijskem okolju postajajo dinamične proizvodne zahteve ključna gonila sprememb. Tradicionalna avtomatizacija, ki temelji na popolnem izključevanju človeškega faktorja, postopoma prepušča prostor sodelovalnim delovnim mestom, kjer človek in sodelovalni robot (SR) opravljata delovne naloge znotraj skupnega prostora [1]. Ta prehod ne pomeni le tehnološkega napredka, temveč tudi spremembo paradigme – od avtomatizacije k Industriji 5.0, kjer je v središču človek. V teh sistemih roboti ne nadomeščajo ljudi, ampak jim služijo kot njihova podpora [2], hkrati pa omogočajo boljše prilagajanje nestabilnim proizvodnim pogojem. Ob tem se odpirajo pomembna vprašanja o delovni obremenitvi, stresu in učinkovitosti zaposlenih. Za zagotovitev dolgoročne trajnosti je potrebno prepoznati in preučiti vplivne dejavnike, ki oblikujejo izkušnjo delavca v sodelovalnem okolju [3]. Študije kažejo, da lahko elementi, kot razporeditev delovnih nalog med delavcem in SR, tip giba SR ter gibalni parametri SR, pomembno vplivajo na psihološki in fiziološki odziv delavcev [4]. Ti

vplivi pa se ne odražajo le v počutju posameznika, temveč tudi na njegovi produktivnosti. Razumevanje vplivnih dejavnikov je ključno tako s stališča delavca kot podjetja, saj dolgotrajna neustrezna obremenitev delavca brez ustrezne kompenzacije vodi v upad učinkovitosti, povečanje napak, nižje zadovoljstvo na delovnem mestu in posledično slabšo uspešnost poslovanja podjetja [5]. Kljub temu pa zasnova smernic, ki bi pripomogle k temu ni enostavna, saj se ljudje med sabo razlikujemo v svojih sposobnostih, fizičnih lastnosti, izkušnjah, itd. Zato se pojavlja potreba po individualiziranih pristopih, ki omogočajo prilaganje sistemov sodelovanja vsakemu posamezniku posebej. En od ključnih konceptov v tej smeri je zasedenost delavca, ki za razliko od gibalnih parametrov SR omogoča doseg enakega učinka pri vseh udeležencih. Zagotovitev optimalnega nivoja zasedenosti delavca je bistvena za doseganje dolgoročne vzdržnosti sodelovalnega sistema [6]. Kljub naraščajočemu številu študij pa v literaturi še vedno obstajajo vrzeli, predvsem na področju psihološkega in fiziološkega odziva delavcev v kontekstu sodelovalnih delovnih mest. Na tej osnovi smo zasnovali eksperimentalno študijo, kjer je stopnja

zasedenosti delavca pri sodelovanju s SR osrednji analiziran dejavnik. Cilj študije je prispevati k razumevanju človeku prilagojenih sodelovalnih pristopov, ki bodo v skladu z usmeritvami Industrije 5.0 in bodo zasnovani na ravnovesju med učinkovitostjo in počutjem delavca.

2 METODOLOGIJA

2.1 Raziskovalni cilji

Cilj raziskave je predstavljala študija vpliva zasedenosti delavca pri sodelovanju s sodelovalnim robotom (SR) na njegovo delovno obremenitev, stres in učinkovitost. Za opredelitev delovne obremenitve udeležencev je bil uporabljen vprašalnik NASA-TLX (subjektivna metoda), ki meri šest dimenzij obremenitve (PO – psihična obremenitev, FO – fizična obremenitev, ČO – časovna obremenitev, U – uspeh, T – trud, F – frustracija). Udeleženci vpliv posamezne dimenzije ocenijo na podlagi lestvice od 0 do 100, pri čemer višja vrednost pomeni večji vpliv. Za ocenitev stresa je bil udeležencem pred izvedbo eksperimenta nameščen senzor Bittium 180 (EKG metoda). Senzor je med trajanjem eksperimenta udeležencem meril električne impulze srčne mišice, natančneje intervale med dvema uspešnim R valoma. Rezultati EKG meritve so bili po koncu eksperimenta preneseni v programsko okolje za analizo srčne variabilnosti (Kubios HRV), kjer je bil izračunan indeks stresa posameznika v vsakem scenariju sodelovanja človeka in robota (SČR). Tekom sodelovanja so bili merjeni tudi časi sestavljanja vseh udeležencev, na podlagi katerih je bila opredeljena njihova učinkovitost.

2.2 Zasnova eksperimenta

Eksperiment je potekal v laboratorijskem okolju in je vseboval preprosto sodelovalno operacijo sestave med delavcem in SR (tipa UR3e). Eksperiment je trajal okrog 45 min in je bil razdeljen v pet faz (Tabela 1). V uvodu so bili udeleženci eksperimenta seznanjeni z merilnimi metodami (NASA-TLX vprašalnik, EKG metoda), sekvenco eksperimenta in sodelovalno operacijo. Sledil je prvi scenarij (S1) SČR, kjer so udeleženci 10 minut sodelovali s SR, pri tem pa

bili nizko zasedeni, okrog 60 % njihove lastne kapacitete. Po S1 je sledil 5-minutni odmor, ki je bil namenjen izpolnitvi NASA-TLX vprašalnika. Sledil je drugi scenarij (S2) SČR, kjer pa so bili udeleženci visoko zasedeni (100 %) tekom sodelovalne operacije. Zasedenost udeležencev je bila pogojena z gibalnimi parametri SR in, če bi udeleženci želeli slediti tempu SR v S2, bi morali delovati na 120 % njihovih kapacitet. Po končanem S2 so udeleženci ponovno izpolnili vprašalnik NASA-TLX in končali eksperiment.

Tabela 1: Načrt eksperimenta

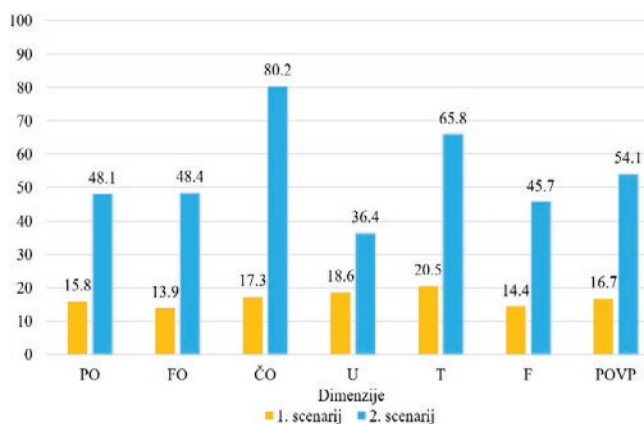
Faza	Opis	Trajanje [min]
1.	Uvod	5–10
2.	SČR – 1. scenarij (S1)	10
3.	Odmor	5
4.	SČR – 2. scenarij (S2)	10
5.	Odmor in konec	5

3 REZULTATI

Sekcija Rezultati je razdeljena v tri podpoglavja. Podpoglavje 3.1 predstavlja rezultate delovne obremenitve udeležencev pri sodelovanju s SR. Delovna obremenitev je bila določena na podlagi NASA-TLX vprašalnika, ki temelji na subjektivnih odgovorih udeležencev. Za boljše razumevanje in verodostojnejše rezultate s stališča človekovega blagostanja je bila dodatno uporabljena EKG metoda, katere rezultati so predstavljeni v podpoglavju 3.2. Sledi še podpoglavje 3.3, kjer so prikazani rezultati učinkovitosti udeležencev na podlagi izmerjenih časov sestavljanja. Eksperimentalni vzorec (N) je predstavljalo 43 udeležencev (32 moških, 11 žensk) s povprečno starostjo 25.5 let (standardni odklon $SD = 2.92$). Zaradi uporabe EKG metode je bila v eksperiment vključena zgolj mlajša delovno aktivna populacija, ki ima v primerjavi s starejšo populacijo nižjo verjetnost obstoja srčnih napak, ki bi posledično vplivale na rezultate.

3.1 Delovna obremenitev udeležencev

Udeleženci eksperimenta so po obeh scenarijih SČR (S1, S2) izpolnili vprašalnik NASA-TLX. Povprečne vrednosti dimenzij so predstavljene s pomočjo histograma (Slika 1).



Slika 1: Rezultati NASA-TLX vprašalnika

Povprečna delovna obremenitev (POVP) je bila izračunana na podlagi povprečja vseh šestih dimenzij in prikazuje višjo delovno obremenitev udeležencev v S2 (54.1 %) kot v S1 (16.7 %). Primerjava rezultatov dimenzij med S1 in S2 jasno nakazuje vpliv stopnje zasedenosti delavca pri sodelovanju s SR na njegovo delovno obremenitev, saj so se vrednosti vseh dimenzij v S2 zvišale v primerjavi z vrednostmi v S1. Največja razlika (62.9 %) je opazna pri dimenziji ČO, kjer so udeleženci izpostavili močan časovni pritisk v S2 zaradi previsoke hitrosti SR. Tudi na podlagi ocene truda (T) lahko sklepamo o višji delovni obremenitvi v S2, saj je povprečje v S2 višje za kar 45.8 % od povprečja v S1. Dimenziji PO in FO se bolj dotikata blagostanja delavca, primerjava rezultatov med njima pa prikazuje pomembnost upoštevanja obeh stališč, tako psihičnega oz. duševnega kot fizičnega.

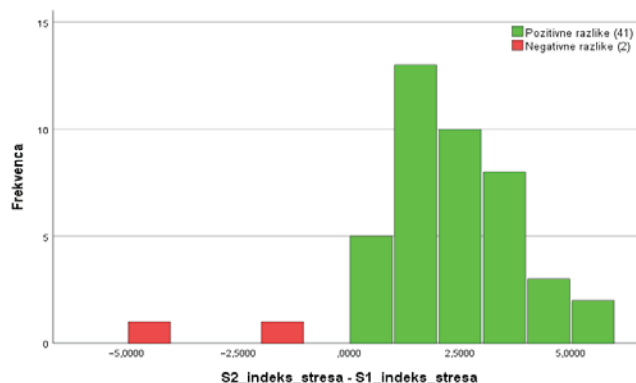
3.2 Stres udeležencev

EKG meritve so bile po koncu eksperimenta prenesene v programsko okolje Kubios HRV. Na podlagi meritev spremenljivk srčne variabilnosti je bil izračunan indeks stresa [7]. V S1 je znašal povprečni (M) indeks stresa udeležencev 10.69 ($SD = 3.73$, $Md = 10.14$), v S2 pa se je le ta zvišal na 12.88 ($SD = 3.67$, $Md = 12.52$) (Tabela 2).

Tabela 2: Rezultati indeksa stresa

Scenarij	N	M [s]	SD [s]	Md [s]
1.	43	10.69	3.73	10.14
2.	43	12.88	3.67	12.52

Kljub temu da povprečje indeksa stresa nakazuje povišan stres v S2, pa iz rezultatov deskriptivne statistike oz. izračuna povprečja ni mogoče trditi, ali obstaja statistično značilna razlika v stresu med scenarijema. V ta namen je bil uporabljen Wilcoxonov test, kjer je bila najprej izračunana razlika indeksa stresa posameznika med S2 in S1, nato pa s pomočjo testa opredeljena značilnost rezultata oz. razlike. Kazalniki testa ($W = 895.00$, $Z = 5.096$, $p < 0.001$) so pokazali statistično značilen višji indeks stresa v S2 v primerjavi s S1. Za lažjo razlago rezultatov so razlike v indeksu stresa med S2 in S1 prikazane s pomočjo histograma (Slika 2). Od 43 udeležencev eksperimenta je kar 41 udeležencev imelo višji indeks stresa v S2 v primerjavi s S1 in zgolj 2 udeležencev nižji. Rezultati potrjujejo, da višja zasedenost delavca pri sodelovanju s SR vpliva na njihov stres.



Slika 2: Porazdelitev razlik indeksa stresa med S2 in S1 (Wilcoxonov test)

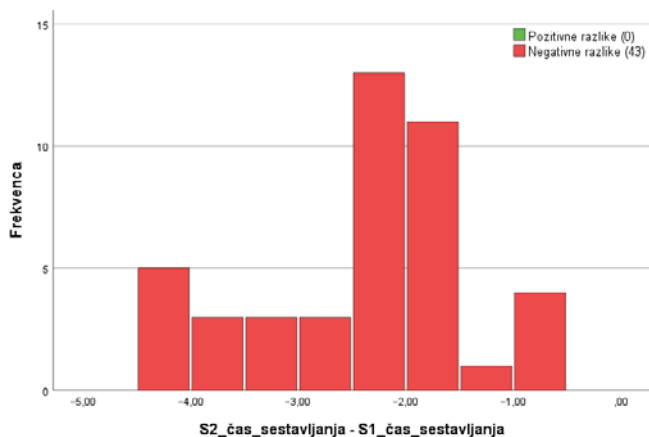
3.3 Časi sestavljanja po udeležencih

Udeleženci so v S1 za eno sestavo v povprečju (M) potrebovali 10.88 s ($SD = 1.57$ s, $Md = 11.76$ s), medtem ko v S2 9.44 s ($SD = 1.10$ s, $Md = 9.37$ s) (Tabela 3). Povprečje časa sestavljanja se je v S2 v primerjavi s S1 znižalo za 13 %. Za opredelitev statistično značilne razlike med rezultatoma je bil ponovno uporabljen Wilcoxonov test.

Tabela 3: Rezultati časa sestavljanja

Scenarij	N	M [s]	SD [s]	Md [s]
S1	43	10.88	1.57	11.76
S2	43	9.44	1.10	9.37

Kazalniki testa ($W = 0.000$, $Z = -5.712$, $p < 0.001$) so pokazali statistično značilno znižanje časa sestavljanja v S2 v primerjavi s S1, kar je razvidno tudi iz porazdelitve razlik (Slika 3), kjer so prav vsi udeleženci eksperimenta v S2 dosegli krajši čas sestavljanja kot v S1.



Slika 3: Porazdelitev razlik časa sestavljanja med S2 in S1 (Wilcoxonov test)

4 ZAKLJUČEK

V okviru raziskave smo preučevali vpliv zasedenosti delavca pri sodelovanju s sodelovalnim robotom (SR) na delovno obremenitev, stres in učinkovitost. Zasnova eksperimenta je temeljila na dveh scenarijih sodelovanja človeka in SR, scenarij nizke zasedenosti (S1) in scenarij visoke zasedenosti (S2). Stopnja zasedenosti delavca je bila pogojena z gibalnimi parametri SR, ki so bili individualno prilagojeni sposobnostim udeležencev za zagotovitev enake stopnje zasedenosti med njimi. Za oceno delovne obremenitve delavca je bila uporabljena subjektivna metoda z NASA-TLX vprašalnikom. Povprečna delovna obremenitev udeležencev je bila v S2 v primerjavi s S1 višja za 37.4 %. Za boljše razumevanje vpliva zasedenosti na počutje delavca, je bila poleg subjektivne metode uporabljena še objektivna metoda EKG. Z uporabo programske opreme Kubios HRV je bil na podlagi spremenljivk srčne variabilnosti izračun indeks stresa vsakega posameznika v obeh scenarijih. Izmed 43 udeležencev eksperimenta je kar 41 udeležencev v S2 občutilo višji stres kot v S1. Statistično značilna razlika je bila potrjena z Wilcoxonovim

testom (S2: $M = 12.88$, S1: $M = 10.69$; $p < 0.001$). S stališča učinkovitosti so udeleženci v scenariju S2 dosegli za 13 % krajši čas sestavljanja kot v S1 (S2: $M = 9.44$ s, S1: $M = 10.88$ s), kar je prav tako bilo statistično značilno ($p < 0.001$). Vsi udeleženci so v pogojih višje zasedenosti dosegli krajši čas sestavljanja, kar potrjuje vpliv intenzivnosti dela oz. zasedenosti delavca na povečano učinkovitost. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da višja zasedenost delavcev pri sodelovanju s SR prispeva k višji produktivnosti, vendar hkrati vodi k večji delovni obremenitvi in višjemu stresu. Ugotovitve izpostavljajo potrebo po preišljeni in individualizirani zasnovi sodelovalnih sistemov, ki ob doseganju proizvodnih ciljev ne zanemarjajo blagostanja zaposlenih. Le tako bo mogoče oblikovati trajnostne, človeku prijazne proizvodne sisteme, skladne z vrednotami Industrije 5.0.

Viri:

- [1] Panagou, S., Neumann, W. P., Fruggiero, F.: A scoping review of human robot interaction research towards Industry 5.0 human-centric workplaces, *International Journal of Production Research* 62(2024)3, str. 974–990.
- [2] Simões, A. C., Pinto, A., Santos, J., Pinheiro, S., Romero, D.: Designing human-robot collaboration (HRC) workspaces in industrial settings: A systematic literature review, *Journal of Manufacturing Systems* 62(2022), str. 28–43.
- [3] Hopko, S., Wang, J., Mehta, R.: Human factors considerations and metrics in shared space human-robot collaboration: a systematic review, *Frontiers in Robotics and AI* 9(2022)799552.
- [4] Coronado, E., Kiyokawa, T., Ricardez, G. A. G., Ramirez-Alpizar, I. G., Venture, G., Yamanobe, N.: Evaluating quality in human-robot interaction: A systematic search and classification of performance and human-centered factors, measures and metrics towards an industry 5.0, *Journal of Manufacturing Systems* 63(2022), str. 392–410.
- [5] Halkos, G., Bousinakis, D.: The effect of stress and satisfaction on productivity, *International Journal of Productivity and Performance Management* 59(2010)5, str. 415–431.
- [6] Ojstersek, R., Javernik, A., Buchmeister, B.: Integrating simulation modelling for sustainable, human-centred Industry 5.0: ESG-based evaluation in collaborative workplaces, *Advances in Production Engineering & Management* 19(2024)4, str. 527–538.
- [7] Baevisky, R. M., Berseneva, A. P.: Use KARDIVAR system for determination of the stress level and estimation of the body adaptability, *Standards of measurements and physiological interpretation* (2008).

OD PROIZVODNJE DO POVEZOVANJA: POT MALIH PODJETIJ SKOZI INDUSTRIJO 5.0, DIGITALIZACIJO IN TUJE TRGE

Tanja KAVČIČ¹, Jakob ROBIČ², Karsten KRANZ³

¹Precisium d.o.o.

²Jakob Robič s.p.

³Karsten Kranz s.p.& Insource GmbH

IZVLEČEK

Industrija 5.0 spodbuja sodelovanje med človekom in tehnologijo, kar malim podjetjem odpira nove priložnosti, a tudi izzive – predvsem zaradi omejenih virov in pritiska konkurenčnih trgov. V podjetju Precisium d.o.o. smo zato razvili premišljen, postopni pristop k digitalizaciji, avtomatizaciji in internacionalizaciji.

V prvem delu prispevka Tanja Kavčič predstavi, kako v podjetju uvajamo dostopne tehnologije, avtomatiziramo rutinske naloge in gradimo odpornost ekipe, pri čemer sledimo načelu: tehnologija naj razbremeni človeka, ne ga nadomesti. Jakob Robič nato opiše konkretne korake digitalne preobrazbe – od prenove spletne strani in povezave z ERP sistemom do uvedbe avtomatiziranih ponudb in ciljnega marketinga. V zadnjem delu Karsten Kranz poudari pomen osebnega pristopa na tujih trgih, kjer s kulturno prilagojeno komunikacijo in neposrednim stikom gradi dolgoročne odnose s partnerji.

Prispevek dokazuje, da lahko tudi majhna podjetja z omejenimi sredstvi uspešno vstopajo v Industrijo 5.0 – če delujejo povezano, preudarno in z jasnim razumevanjem svojih kupcev.

1 UVOD

Industrija 5.0 v ospredje postavlja človeka – njegovo znanje, ustvarjalnost in zmožnost sodelovanja s tehnologijo. A za številna mala podjetja, ki se dnevno soočajo z vse večjimi pritiski – nizkimi cenami, naraščajočimi stroški energije ter pomanjkanjem kadrov – ta prehod ni enostaven. V podjetju Precisium d.o.o., kjer imamo skoraj šestdesetletno tradicijo v kovinsko-predelovalni industriji, to občutimo vsak dan. Zato se nam zastavlja ključno vprašanje: kako lahko kot manjše podjetje učinkovito stopimo na pot Industrije 5.0 – brez velikih sredstev, a z jasno vizijo?

2 PRISTOP K DIGITALIZACIJI

Precisium d.o.o. je specializirano podjetje za izdelavo **kontrolnih priprav in merilnih orodij** po standardih in po meri kupcev. Naše glavne kompetence obsegajo izdelavo **kontrolnih trnov, čeljusti, kladic in kompleksnejših kontrolnikov**, s katerimi stranke preverjajo ustreznost svojih izdelkov v proizvodnih procesih. Poleg tega se ukvarjamo tudi z **obdelavo zahtevnih mehanskih komponent** znotraj ozkih tolerančnih polj, kar

zahteva visoko stopnjo natančnosti, znanja in izkušenj. Naš cilj je strankam zagotavljati stabilno kakovost in podporo pri preverjanju geometrijske točnosti njihovih izdelkov.



Slika 1: Predstavitev kontrolnikov

Ravno zaradi zahtevnosti in specifičnosti naše dejavnosti smo zgodaj prepoznali, da zgolj ročno delo, izkušnje in dobra volja ne zadoščajo več. Trg zahteva hitro odzivnost, ažurne informacije, sledljivost ponudb in večjo fleksibilnost – kar lahko dosežemo le z uporabo pametne tehnologije. Naš pristop temelji na treh stebrih: **preudarnosti, sodelovanju in dostopni tehnologiji**. S preišljenim uvajanjem digitalnih orodij postopoma razbremenjujemo zaposlene, izboljšujemo pretok informacij ter gradimo dolgoročno odpornost podjetja.

Ne sledimo zgolj modnim smernicam – vsaka rešitev mora imeti jasen namen, merljiv učinek in dolgoročno vzdržnost. Digitalizacijo razumemo kot orodje, ne kot cilj sam po sebi. V tem članku predstavljamo našo pot skozi **digitalizacijo prodajnega procesa** in pomen **osebne pristopa pri vstopanju na tuje trge** – z izkušnjami sodelavcev, ki vsak na svoj način gradijo most med tehnologijo in človekom.

3 IZHODIŠČE: MAJHNO PODJETJE, VELIKI IZZIVI

Kot majhno podjetje smo se morali že večkrat prilagoditi spremembam na trgu. Naša pretekla usmerjenost v avtomobilsko industrijo nas je ob stečajih ključnih kupcev in novih tehničnih zahtevah prisilila v hitro prestrukturiranje. Iskali smo nove trge in nove načine dela. Klasična prodaja je postajala predraga, ročni postopki pa prepočasni. Vedeli smo, da bo treba nekaj spremeniti – a nismo želeli uvajati digitalizacije »na silo«. Najprej smo si zato zastavili vprašanje: katere vsakodnevne naloge so ponavljajoče, zamudne in ne prinašajo dodane vrednosti?

Odgovor se je hitro pokazal. Največ časa smo izgubljali pri komunikaciji z obstoječimi strankami, pošiljanju ponudb, preverjanju zalog in pripravi dokumentacije. Hkrati pa je spletna stran delovala kot pasivna vizitka, brez informacij, ki bi bile uporabne za B2B kupce. Odločili smo se, da bomo postopoma digitalizirali tisto, kar nas najbolj bremeni – in to na način, ki bo razumljiv, dostopen in vpet v vsakodnevno delo.

4 DIGITALIZACIJA PRODAJE: MAJHNI KORAKI, VELIKI UČINKI

Jakob Robič, svetovalec za digitalizacijo

Ko me je Tanja povabila k sodelovanju, sem se vprašal: kako lahko pomagamo podjetju, ki nima IT oddelka, a ima jasno vizijo? Prav v takih okoljih se pogosto skriva največji potencial – ker ni birokracije in dolgega odločevanja, temveč neposredno razumevanje, kaj podjetje potrebuje. V Precisiumu smo se zato odločili za pragmatičen pristop, temelječ na majhnih, a ciljno usmerjenih izboljšavah.

4.1 Začetek pri osnovah: informacije, ki jih stranke potrebujejo

Ena od prvih ovir, ki smo jo zaznali, je bila razdrobljenost informacij. Interni katalogi v obliki PDF-jev, brez cen in podatkov o zalogah, so ustvarjali nepotrebne korake v komunikaciji. Povpraševanje je terjalo več krogov e-pošte, ročno vnašanje v ERP sistem pa je pomenilo dodatno delo in večjo možnost napak. Rešitev je bila na dlani: izdelke smo prenesli na splet, jih povezali z ERP-jem in dodali dinamične prikaze zalog ter cen.

S tem smo ne le skrajšali prodajni cikel, ampak strankam ponudili uporabniško izkušnjo, ki je primerljiva z velikimi igralci – le z veliko manj sredstvi.

4.2 Platforma, prilagojena malim podjetjem

Za spletno rešitev smo izbrali platformo Shopamine, slovensko rešitev, zasnovano posebej za kompleksne B2B modele. Zakaj ravno ta? Ker omogoča personalizacijo cenikov, povezavo z ERP sistemom, dinamičen prikaz zalog in obsežne možnosti filtriranja izdelkov – vse znotraj ene, pregledne strukture.

Stranka lahko zdaj sama dostopa do personaliziranega cenika, odda naročilo ali poišče tehnične podatke – brez posredovanja prodajne ekipe. Ta pa se lahko osredotoča na zahtevnejše naloge in strateško podporo.

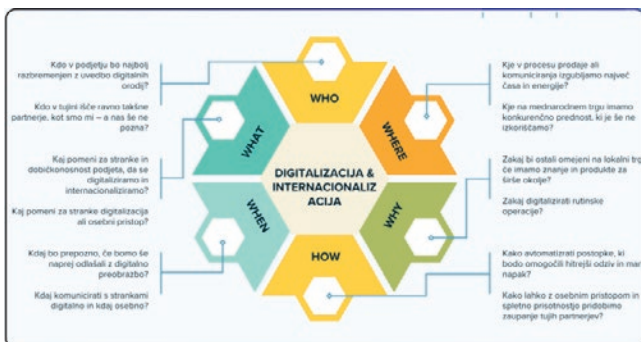
4.3 E-poštni marketing in avtomatizacija ponudb

Naslednji korak je bil uvedba orodja za avtomatizacijo email marketinga (Klaviyo), ki nam omogoča redno in ciljno komunikacijo s partnerji. Avtomatizirane sekvence, kot so potrditve naročil, opomniki ali produktne novosti, krepijo odnos s strankami in gradijo občutek odzivnosti – brez dodatnega dela ekipe.

Posebej pomembna je bila tudi digitalna podpora pri generiranju ponudb. Prej je priprava vključevala kopico korakov – zdaj lahko vse poteka avtomatizirano, kar pomeni večjo hitrost, manj napak in več časa za razvoj.

4.4 Človek ostaja v središču

Pomembno je poudariti, da digitalizacija ni nadomestila ljudi – jih je pa razbremenila. Ključno je bilo, da smo avtomatizirali rutinska opravila, medtem ko smo osebni stik s strankami ohranili tam, kjer je ta ključen: pri svetovanju, reševanju težav in pri večjih projektih. Industrija 5.0 nas uči, da mora tehnologija služiti človeku – in v tem projektu je to temeljno vodilo.



Slika 2: Vprašanja za digitalizacijo in internacionalizacijo

4.5 Merljivi rezultati, trajni učinki

Kaj smo s tem dosegli?

- Povprečen odzivni čas se je prepolovil
- Zadovoljstvo strank se je povečalo (merjeno z NPS anketo)
- Ekipa je poročala o bistveno manj rutinskem delu
- Prihranek časa pri oddaji ponudb je več kot 50 %

Toda morda še pomembnejše: zgradili smo zaupanje v procese, ki delujejo. Zdaj podjetje vidi, da se tudi z majhnimi sredstvi lahko uvedejo učinkovite spremembe. In to daje zagon za nadaljnji razvoj.

4.6 Za podjetja, ki želijo začeti

Digitalizacija se na prvi pogled pogosto zdi kot velik zalogaj. In res – lahko je zahtevna, široka in polna neznank. A nekje jo je treba začeti. Moja izkušnja je, da strah največkrat izvira iz pomanjkanja informacij. Ko podjetje enkrat razume, kaj pravzaprav potrebuje, postane pot precej bolj obvladljiva.

Prvi korak? **Začnite razmišljati.** Vprašajte se, kaj vaše stranke dejansko potrebujejo, kako jim lahko bolje služite, in kje vaši obstoječi procesi izgublajo čas ali energijo. Poiščite osnovne informacije – lahko je to podcast, članek, video, pogovor s kolegom ali svetovalcem. In predvsem: postavljajte si vprašanja. Tudi če še ne poznate vseh odgovorov, vas bodo vprašanja vodila v pravo smer.

Digitalizacija ni trend. Je naravni del rasti vsakega sodobnega podjetja. Ne gre za to, da postanete tehnološko podjetje – temveč za to, da posodobite tiste procese, ki vam preprečujejo, da bi rasli, hitreje odgovarjali ali lažje sodelovali s strankami. Pomembno je, da sprejmete to realnost odprto, z malo potrpljenja in zavedanjem, da se vam lahko digitalizacija prilagodi – ne vi njej.

Kot svetovalci pomagamo podjetjem razumeti, kaj digitalizacija v njihovem konkretnem primeru pomeni. Skupaj raziščemo potrebe strank, identificiramo ozka grla, izberemo prava orodja in naredimo korake, ki prinesejo otipljive učinke.

5 OSEBNI PRISTOP NA TUJIH TRGIH: GRADNJA ZAUPANJA V DOBI DIGITALNE PRODAJE

Karsten Kranz, mednarodna prodaja

V tujini še vedno velja, da je najpomembnejše, *kdo* ti nekaj prodaja – ne le *kaj*. Zato sem se kot prodajnik v podjetju Precisium osredotočil na gradnjo osebnih vezi, zaupanja in kulturno prilagojeno komunikacijo. Prav ta pristop se je izkazal kot ključ do uspeha na tujih trgih.

5.1 Kako vzpostavimo prvi stik?

Najboljše priložnosti pogosto izhajajo iz neposrednega stika – na sejnih, B2B srečanjih, LinkedInu ali prek priporočil zadovoljnih strank. Največ koristi nam prinašajo sejmi, kot so **Hannover Messe** in specializirane konference, kjer lahko takoj začnemo osebno komunikacijo. Pomembno pa je, da se stik nadaljuje tudi po dogodku – s personalizirano komunikacijo, ne z generičnimi “thank you” sporočili.

5.2 Gradnja zaupanja je proces

Zaupanje ne zraste z enkratnim e-mailom. Učinkovita strategija temelji na preglednosti, jasnosti in zanesljivosti. Vedno odkrito povem pogoje, roke dobave in tudi omejitve. Če česa ne vemo – to tudi povemo. Bolje kot nejasnosti. Zelo učinkoviti so tudi **video klici in virtualni ogledi proizvodnje**, ki pokažejo ozadje podjetja in ljudi, ki stojijo za izdelki.

Pomembna naloga prodajnika je tudi **prepoznavanje kulturnih razlik**. Nemški kupci cenijo podrobno dokumentacijo, strukturiranost in potrjene specifikacije. Skandinavci pričakujejo neposrednost, a v bolj sproščenem tonu. V Vzhodni Evropi pa odnos pogosto temelji na osebni zvestobi in zaupanju, ki se gradi skozi čas – včasih še preden pride do konkretnega posla.

5.3 Sodelovanje s tehnično ekipo in marketingom

V Precisiumu se ne ločujemo na “marketing” in “prodajo” – delujemo kot enotna ekipa. Sodelujem z Jakobom tako, da mu sproti predajam informacije s trga: kaj zanima kupce, na katere prednosti reagirajo, kaj jih zmede. Tako lahko hitro prilagodi sporočila na spletni strani ali strukturo ponudb. Digitalna podpora je zato učinkovita, ker temelji na dejanskem dialogu z uporabniki – ne na predpostavkah.

5.4 Zakaj je človeški stik nenadomestljiv?

Digitalna orodja prinašajo hitrost, preglednost in avtomatizacijo – a **posel sklene človek**. Pomembni elementi, ki jih digitalnost ne more nadomestiti, vključujejo:

- Branje “med vrsticami” – občutek, če stranki nekaj ni jasno ali je negotova
- Prilagajanje ponudbe v realnem času – kdaj poudariti hitrost, kdaj fleksibilnost
- Občutek bližine – tudi prek Zooma, če ni možnosti obiska
- Humor, jezikovne geste, osebni komentarji – to ustvarja dolgoročne vezi

5.5 Praktičen primer: med Nemčijo in Slovenijo

V enem od projektov sem bil vpet med nemško stranko in slovenskega dobavitelja. Na eni strani formalnost, detajlni dokumenti, zahteva po popolni specifikaciji. Na drugi strani – pragmatičen, sproščen pristop. Uspeh projekta je bil mogoč samo zato, ker sem znal biti prevajalec med kulturama. Vse, kar je bilo zahtevano na eni strani, sem predstavil drugi strani na način, ki ga razume. In obratno.

5.6 Nasvet malim podjetjem

Če začenjate v tujini – **ne delajte vsega naenkrat**. Izberite en trg, zgradite osebno povezavo z lokalnimi partnerji, uporabite preproste digitalne pripomočke in bodite predvsem hitri ter odzivni. Začetne prodaje morda ne bodo velike – a če zgradite zaupanje, bodo te stranke ostale z vami.

6 SKLEP

Zgodba podjetja Precisium ni zgodba o veliki transformaciji, temveč o majhnih, pametnih korakih. Digitalizacija, avtomatizacija in internacionalizacija niso privilegij velikih – temveč možnost za vse, ki znajo razmišljati dolgoročno, sodelovalno in odprto. Industrija 5.0 ni prihodnost – je sedanost. In čeprav se ta pot včasih zdi zahtevna, lahko s pravimi ljudmi in pravim pristopom postane dostopna tudi najmanjšim.



RAZVOJ METODOLOGIJE ZA IZRAČUN OGLJIČNEGA ODTISA ALUMINIJEVIH POLIZDELKOV, PROIZVEDENIH V DRUŽBAH SKUPINE IMPOL

Gašper GANTAR^{1,2}, Barbara H. PIGAC³, Sonja TOMAZINI³, Matej STEINACHER³

¹Visoka šola za proizvodno inženirstvo

²Fakulteta za varstvo okolja

³Impol d.o.o.

IZVLEČEK

V prispevku je na primeru skupine Impol prikazano, kako lahko podjetja razvijejo in validirajo metodologijo za izračun ogljičnega odtisa za: 1) skupine izdelkov, ki se izračunava na osnovi statističnih podatkov porab vhodnih materialov in energije za prejšnje koledarsko leto in 2) določene šarže, kar se izračuna na osnovi dejanskih podatkov o uporabljenih vhodnih materialih ter kupcem izda izjava, ki je pripravljena v skladu s standardom ISO 14026.

1 UVOD

Kupci, še posebej tisti iz avtomobilske industrije, od dobaviteljev vse pogosteje zahtevajo informacijo o ogljičnem odtisu dobavljenih polizdelkov ali izdelkov, včasih celo za vsako dobavljeno šaržo posebej. Izračune ogljičnih odtisov lahko podjetja vedno znova izdelujejo sama ali pa jih naročijo pri zunanjih izvajalcih. Če je treba letno opraviti veliko število teh izračunov, to postane časovno preveč zamudno in posledično predrago.

Cilj predstavljenega projekta je bil razvoj metodologije in sistema za izračun ogljičnega odtisa aluminijevih polizdelkov ter njegova verifikacija po standardu 14067 [1] s strani neodvisne tretje osebe. To bo skupini Impol omogočilo hiter avtomatičen izračun ogljičnega odtisa za katerokoli skupino izdelkov in tudi za izdelke posamezne šarže.

V prispevku so najprej predstavljene skupine izdelkov, za katere je treba razviti metodologijo in delovne poti za njihovo izdelavo. V nadaljevanju je prikazan razvoj metodologije in sistema ter v zaključku njegova uspešna implementacija.

2 OPIS OBRAVNAVANEGA SISTEMA

V skupini Impol izdelujejo različne polizdelke iz aluminija. Primeri ključnih skupin polizdelkov, za katere je bilo treba pripraviti metodologijo za

izračun ogljičnega odtisa, so predstavljeni na sliki 1.



Slika 1: Obravnavane skupine izdelkov

Proizvodnja se izvaja na treh lokacijah, in sicer v Slovenski Bistrici, v Republiki Hrvaški in v Republiki Srbiji. Za njihovo izdelavo se uporabljajo različne delovne poti, ki so

sestavljene iz osnovnih proizvodnih procesov: litja, valjanja, iztiskovanja, razreza, mehanske obdelave ipd.

Za vsak proizvodni proces je treba določiti pretočni koeficient oz. izkoristek materiala, ki predstavlja razmerje med maso na vходу ter maso na izhodu iz proizvodnega procesa. Za uveljavljene proizvodne procese so pretočni koeficienti izračunani na podlagi statističnih povprečij iz preteklega koledarskega leta in zabeleženi v informacijskem sistemu. Posodobijo se torej enkrat letno na podlagi podatkov predhodnega leta.

3 RAZVOJ METODOLOGIJE ZA IZRAČUN OGLJIČNEGA ODTISA

2.1 Namen in cilj

Ogljični odtis posameznih izdelkov ali skupin izdelkov se izračunava iz različnih razlogov, npr. kot podlago za razvoj in izvajanje strategij za razogljichenje podjetij, za potrditev nizkogljichnosti izdelkov, poročanju o povzročeni toplogredni plini (TGP) v skladu z zahtevami kupcev. V pričujočem primeru je bil primarni cilj podajanje izjav kupcem o ogljičnem odtisu dobavljenih aluminijevih polizdelkov.

2.2 Meje sistema

Izračunati je treba izdelčni ogljični odtis »od zibelke do vrat«, torej do izhodnega skladišča skupine Impol. Prevoz aluminijevih polizdelkov do kupca ni vključen. Tabela 1 povzema, kaj je v izračun vključeno in izključeno. To je skladno z [2], saj so to obravnavani polizdelki oz. vmesni proizvodi, za katere ne poznamo točnega namena uporabe. Treba jih je nadalje predelati, da se pridobi končni izdelek. Zato ni mogoče identificirati njegove nadaljnje predelave, končne uporabe in ravnanja z njim po preteku njegove življenjske dobe.

Tabela 1: Meje sistema – vključeno in izključeno

Vključeno	Izključeno
Proizvodnja vhodnih surovin	Proizvodnja in prodaja opreme in infrastrukture

Poraba električne energije	Vzdrževanje opreme in infrastrukture
Poraba ostalih energentov, (zemeljskega plina, utekočinjenega naftnega plina, dizelskega goriva).	Učinki na okolje zaradi nezgod, kot je poškodovanje med transportom.
Proizvodne operacije	Transport zapakiranih aluminijastih izdelkov do kupcev.
Notranji transport materialov	Ubežne emisije.
Režija (ogrevanje in razsvetljava proizvodnih prostorov, pisarniških prostorov in skladišč).	Človeško delo v Skupini Impol in pri njihovih dobaviteljih.
Ravnanje z odpadki iz proizvodnih procesov	Prevoz zaposlenih na delo ter službena potovanja.
Transport vhodnih surovin (primarnih in sekundarnih) ter transporti med obrati skupine Impol.	Faza nadaljnje obdelave in uporabe aluminijastih izdelkov pri kupcu.
Transport odpadkov od proizvodnega obrata Skupine Impol do regionalnih centrov za ravnanje z odpadki.	Ravnanje z odsluženimi aluminijastimi izdelki po preteku njihove življenjske dobe.

2.3 Deklarirana enota

Izračunani izpusti TGP se nanašajo na deklarirano enoto, ki je opredeljena kot 1 kg aluminijastih polizdelkov, ki so zapakirani tako, da omogočajo dostavo kupcu. Skladno s [2] v ta 1 kg teža embalaže ni vključena. Rezultati so podani za aluminijaste polizdelke v skladišču skupine Impol (transport do kupca ni vključen). Kadar se računa ogljični odtis za skupino izdelkov, se računa za t. i. povprečni izdelek iz skupine izdelkov (ne za reprezentativni izdelek ali najslabši izdelek iz skupine izdelkov).

2.4 Vhodni podatki in njihova kakovost

Primarni podatki so zbrani v skupini Impol, sekundarne podatke pa smo vzeli iz literature in

baz podatkov. Dobavitelji ključnih vhodnih surovin so bili zaproseni za primarne podatke. Kjer so dobavitelji poslali informacijo (PCF, LCA, EPD ali kakršnokoli drugo primerno izjavo) o izpustih TGP, ki jih povzročajo njihove surovine, se v izračunu uporablja prejeti podatek. Enako velja za dobavitelje električne energije, ki so bili zaproseni za podatek o ogljičnem odtisu dobavljene električne energije.

Aluminij

Podatke o količinah uporabljenih vhodnih materialov in posledično o materialni sestavi vložka (deležu primarnega aluminija, legirnih elementov, reciklata, ki je industrijski odpad, reciklata, ki je zbran iz odpadkov iz potrošnje in internega povratnega materiala), iz katerega se izdelujejo aluminijasti izdelki, se pridobi iz informacijskega sistema podjetja, kjer so vneseni podatki o tehtanih količinah, ki vstopijo v sistem.

Emisijski koeficient primarnega aluminija, se izračuna tako, da se teža dobavljenega primarnega aluminija posameznih dobaviteljev pomnoži s pripadajočimi emisijskim koeficienti ter se vsoto TGP deli s skupno težo vsega dobavljenega aluminija v predhodnem letu. Iz tega izračuna je izvzet nizkoogljični primarni aluminij. Interni povratni aluminij nastane znotraj procesov skupine Impol in je obremenjen z 0 kg CO₂eq/kg, saj vse emisije TGP pripišemo končnemu izdelku.

Emisijske koeficiente ostalih uporabljenih vhodnih materialov se odčita iz podatkovne baze My Professional Database EN v LCA for Experts, verzija 2022.2 [3].

Voda

Podatek o porabi vode v skupini Impol se odčita iz informacijskega sistema, v nekaterih obratih pa ročno iz internega števca. Emisijski koeficient se odčita iz podatkovne baze My Professional Database EN v LCA for Experts, verzija 2022.2 [3].

Električna energija

Poraba električne energije je odčitana iz informacijskega sistema podjetja, ki zajema

podatke iz števec porabe. Poleg porabe na proizvodni opremi (peči, valjarne linije ...), je vključena tudi poraba električne energije za ogrevanje in razsvetljavo proizvodnih in režijskih prostorov, razen upravnih stavb. Skupina Impol ima na strehah svojih prostorov nameščeno tudi fotovoltaično elektrarno. Električna energija, ki je pridobljena iz te elektrarne, v izračun ni vključena, saj skupina elektriko odda (proda) v omrežje.

Izpuste TGP zaradi porabe električne energije se upošteva po lokacijski metodi. Za podatke o emisijskih koeficientih so bili uporabljeni viri [4-6]. Tržna metoda se uporablja samo pri izračunu ogljičnega odtisa izdelkov iz določene šarže, ki mora biti na zahtevo kupca izdelana z uporabo elektrike iz obnovljivih virov s potrdilom o izvoru.

Zemeljski plin

Podatek o porabi zemeljskega plina se odčita iz energetskega informacijskega sistema, ki zajema podatke iz števec porabe za vsak proces posebej. Vključena je tudi poraba zemeljskega plina za ogrevanje proizvodnih in režijskih prostorov, ni pa vključeno ogrevanje upravnih stavb. Za podatke o emisijskih koeficientih so bili uporabljeni viri [7-9].

Utekočinjen naftni plin

Podatek o porabi utekočinjenega naftnega plina se odčita iz energetskega informacijskega sistema, ki zajema podatke iz števec porabe za vsak proces posebej. Za podatke o emisijskem koeficientu je bil uporabljen vir [7].

Dizelsko gorivo

Podatek o porabi dizelskega goriva v Sloveniji se odčita iz energetskega informacijskega sistema, ki zajema podatke s prejetih računov ali iz finančnega knjigovodstva. Za podatke o emisijskih koeficientih so bili uporabljeni viri [7-9].

Transport vhodnih surovin od proizvajalca do proizvodne lokacije skupine Impol in med lokacijami skupine Impol

Razdalje od proizvajalcev so bile ocenjene s pomočjo spletnih strani [10, 11]. V izračunu niso bili upoštevani emisijski koeficienti iz podatkovnih baz, ki so izraženi v ton-kilometrih. V izračunu smo upoštevali tudi dejanski podatek, koliko različnih aluminijastih polizdelkov je mogoče v praksi naložiti na tovornjak (zaradi oblike polizdelkov v nekaterih primerih tovornjaka ni mogoče naložiti do dopustne nosilnosti). Povprečne količine naloženega blaga so bile zbrane s pomočjo sodelavcev iz oddelka logistika. Pri izračunu se domneva, da se tudi povratne poti vedno prevozijo s polnim tovorom.

Na enak način so upoštevane tudi poti med proizvodnimi obrati skupine Impol. Tudi pri prevozu med proizvodnimi obrati se domneva, da se povratne poti vedno prevozijo s polnim tovorom, saj tovornjaki v splošnem pripeljejo enako količino materiala, kot ga odpeljejo.

2.5 Postopek izračuna ogljičnega odtisa

Skupni ogljični odtis se izračuna tako, da se sešteje ogljični odtis uporabljenega vhodnega materiala, ogljični odtis celotne delovne poti, ogljični odtis transportov in ogljični odtis zaradi porabe vode.

Če je za izdelavo končnega izdelka v delovni poti potrebnih več zaporednih proizvodnih procesov, se izračuna skupni pretočni koeficient tako, da se zmnoži pretočne koeficiente vseh proizvodnih procesov.

3 SKLEP

Pripravljeno metodologijo in sistem za izračun ogljičnega odtisa za povprečne polizdelke iz skupin polizdelkov ali polizdelek iz posamezne šarže je bil validiran s strani neodvisne tretje osebe (SIQ Ljubljana), ki je potrdila, da upošteva zahteve in priporočila standarda ISO 14067 [1]. Na sliki 2 je prikazan primer izdane izjave o ogljičnem odtisu, ki je pripravljena na podlagi predstavljene metodologije. Takšno izjavo lahko skupina Impol pripravi in izda za katerokoli skupino izdelkov ali točno določeno šaržo izdelkov, ki je bila dostavljena dotičnemu kupcu.



Slika 2: Primer izdane izjave o ogljičnem odtisu

Viri:

- [1] ISO 14067: Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification, 2018-08.
- [2] Product Category Rules (PCR) For Basic Aluminium Products And Special Alloys Product Category Classification: Un Cpc 4153 PCR 2022:08, Version 1.0 Valid Until 2026-12-09.
- [3] Podatkovna baza My Professional Database EN v LCA for Experts, verzija 2022.2.
- [4] <https://ceu.ijs.si/izpusti-co2-tgp-na-enoto-elektricne-energije/>
- [5] [https://www.ecocostsvalue.com/data-tools-books/\(Idemat2025RevA6.xlsx\)](https://www.ecocostsvalue.com/data-tools-books/(Idemat2025RevA6.xlsx))
- [6] Službeni glasnik RS", br. 111 od 25. novembra 2021, 6 od 27. januara 2023)
- [7] <https://www.gov.si teme/trgovanje-s-pravicami-do-emisije-v-industriji-energetiki-pomorstvu-in-letalstvu/#e26054>
- [8] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja - Inventar stakleničkih plinova (NIR 2023) Zagreb - Faktori emisije CO₂, oksidacijski faktori i donje gorjeve vrijednosti (DOV)
- [9] http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2023_01/SG_006_2023_015.htm
- [10] <https://www.google.com/maps>
- [11] <http://ports.com/sea-route/>

TRAJNOSTNI PROIZVODNI SISTEMI

Matevž RESMAN, Marko ŠIMIC, Mihael DEBEVEC, Niko HERAKOVIČ
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Sodobna industrijska podjetja se morajo zaradi vse strožjih globalnih in evropskih zahtev ter premika k trajnostnemu razvoju prilagajati novim smernicam. Med ključnimi cilji so t. i. cilji »20 20 20«, ki vključujejo zmanjšanje porabe energije za 20 %, izboljšanje energetske učinkovitosti za 20 % ter povečanje deleža obnovljivih virov energije na 20 %. Koncept trajnostne proizvodnje predstavlja celosten pristop, pri katerem se ocenjujejo izdelki in proizvodni procesi z namenom zmanjšanja porabe virov, povečanja energetske učinkovitosti in zmanjšanja količine odpadkov. Takšni proizvodni procesi morajo biti okolju prijazni, energetske varčni, odgovorni do naravnih virov, varni za zaposlene ter finančno vzdržni. Uvajanje trajnostne proizvodnje podjetjem omogoča doseganje tako ekoloških kot tudi poslovnih ciljev ter prispeva k dolgoročni konkurenčnosti in stabilnosti.

1 UVOD

Industrijski proizvodni obrati danes vključujejo kompleksne in medsebojno povezane sisteme, ki podpirajo različne proizvodne procese, kot so montaža, varjenje, obdelava materialov, rezanje in druge oblike predelave. Z vedno večjim poudarkom na trajnostnem razvoju ter pod vplivom globalnih in evropskih regulativ se proizvodni sektor sooča z nujnostjo prehoda na okolju prijaznejše in energetske učinkovitejše prakse. Osrednji cilji tega prehoda vključujejo zmanjšanje ogljičnega odtisa, ublažitev posledic podnebnih sprememb ter izpolnjevanje ambicioznih okoljskih zavez, kot so cilji »20 20 20«, ki predvidevajo 20-odstotno zmanjšanje rabe energije, 20-odstotno povečanje energetske učinkovitosti ter najmanj 20-odstotno vključevanje obnovljivih virov energije. Nadaljnji cilji segajo še dlje – zmanjšanje emisij toplogrednih plinov za 40 % v primerjavi z letom 1990 ter več kot 30-odstotno zmanjšanje skupne porabe energije.

V tem okviru se uveljavlja koncept trajnostne proizvodnje, ki temelji na celovitem vrednotenju izdelkov in proizvodnih procesov z vidika porabe virov, emisij ter učinkov na okolje in družbo. Trajnostni proizvodni sistemi zahtevajo jasno opredeljene in merljive cilje, aktivno vključevanje deležnikov, optimizacijo porabe virov ter sistematično spremljanje in poročanje o

dosežkih. Le na ta način je mogoče zagotoviti dolgoročne okoljske in ekonomske koristi ter prehod k bolj odgovorni in konkurenčni industriji prihodnosti [1].

Ob tem postaja jasno, da trajnost ni več le dodatna vrednota ali tržna prednost, temveč nujen strateški pristop za dolgoročno preživetje podjetij. Industrije, ki uspejo pravočasno prepoznati pomen prilagajanja novim okoljskim standardom, ne le zmanjšujejo tveganja, povezana z zakonodajo in okoljskimi vplivi, temveč si hkrati odpirajo poti do tehnoloških inovacij, večje učinkovitosti in trajnostne konkurenčnosti. Sodobni proizvodni sistemi se zato vse bolj usmerjajo v razvoj tehnologij, ki omogočajo pametno upravljanje virov, digitalno spremljanje vplivov ter oblikovanje proizvodnje, ki zadovoljuje potrebe današnjega časa, ne da bi ogrožala možnosti prihodnjih generacij.

2 KAJ JE TRAJNOSTNI PROIZVODNI SISTEM?

Trajnostna proizvodnja [2, 3] pomeni ustvarjanje izdelkov in storitev na način, ki je okolju prijazen, energetske učinkovit, družbeno odgovoren in ekonomsko vzdržen. Gre za proizvodne prakse, ki skušajo zmanjšati negativne vplive na okolje (Slika 1), optimalno izrabljajo naravne vire, zagotavljajo varne

delovne pogoje in obenem ohranjajo konkurenčnost podjetja. Ključno izhodišče trajnostne proizvodnje je ideja, da mora današnje zadovoljevanje potreb potekati tako, da ne ogrozi zmožnosti prihodnjih generacij, da zadostijo svojim.

Ta pristop vključuje več vidikov: zmanjšanje emisij in odpadkov, učinkovito rabo energije in surovin, uporabo obnovljivih virov, uvajanje čistih tehnologij, zasnovo trajnostnih izdelkov ter upoštevanje celotnega življenjskega cikla izdelkov. Poleg okoljskega vidika trajnostna proizvodnja upošteva tudi ekonomsko smiselnost procesov in njihovo družbeno sprejemljivost – to pomeni, da mora biti proizvodnja varna za zaposlene in lokalne skupnosti ter prispevati k širši družbeni blaginji.

V praksi to pomeni tudi preoblikovanje tradicionalnih proizvodnih modelov in vključevanje načel krožnega gospodarstva, kjer se materiali ponovno uporabijo, reciklirajo ali vrnejo v proizvodni proces. S tem se podaljša življenjska doba izdelkov in zmanjša potreba po novih virih. Digitalizacija, avtomatizacija in napredne tehnologije, kot so umetna inteligenca, internet stvari (IoT) ter podatkovna analitika, imajo ključno vlogo pri optimizaciji proizvodnih procesov in spremljanju njihove trajnostne učinkovitosti. Takšne spremembe ne predstavljajo le tehničnih izzivov, temveč zahtevajo tudi spremembo miselnosti in celovito vključevanje trajnostnih načel v strateško načrtovanje podjetij.



Slika 1: Ali lahko s trajnostno proizvodnjo ohranimo okolje?

3 KORAKI ZA VPELJAVO TRAJNOSTNEGA PROIZVODNEGA SISTEMA

V nadaljevanju je navedenih in na kratko predstavljenih petnajst osnovnih korakov, prikazanih na sliki 2, ki jih strokovnjaki navajajo kot ključne pri trajnostnem prehodu [4, 5, 6]. Ti koraki predstavljajo strukturiran in celovit okvir za uvajanje trajnostne proizvodnje, ki zajema tako strateško načrtovanje kot tudi operativne vidike. Namenjeni so podjetjem, ki želijo zmanjšati okoljski vpliv svojega delovanja, povečati učinkovitost rabe virov ter hkrati zagotoviti dolgoročno ekonomsko in družbeno vzdržnost. Vsak korak ponuja konkreten pristop k implementaciji, od začetnega vrednotenja stanja do spremljanja napredka in nenehnega izboljševanja proizvodnih procesov.



Slika 2: Zaporedje korakov za vpeljavo trajnostnega proizvodnega sistema.

3.1 Poglobljeno razumevanje koncepta trajnosti v proizvodnji

Učinkovita uvedba trajnostne proizvodnje se začne z razumevanjem, da vključuje tako okoljski vpliv končnega izdelka kot tudi način njegove izdelave, pri čemer oba vidika zahtevata celostno in preišljeno obravnavo. Pomembno je priznati,

da ni vsak izdelek sam po sebi trajnosten, saj lahko vsebuje materiale z visokim okoljskim odtisom ali je rezultat procesov, ki porabljajo prekomerne količine energije, vode ali ustvarjajo znatne emisije. Zato je ključno prepoznati in izbrati proizvodne metode, ki zmanjšujejo negativne vplive na okolje, kar vključuje uporabo čistih tehnologij, energetske učinkovitih rešitev ter načrtovanje izdelkov z mislijo na njihov celoten življenjski cikel in možnosti ponovne uporabe ali recikliranja. Poseben poudarek je treba nameniti energetske učinkovitosti kot enemu izmed ključnih meril trajnostnega procesa, saj neposredno vpliva na zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, stroškov poslovanja in dolgoročne konkurenčnosti podjetja.

3.2 Analiza stanja in oblikovanje ciljev

Začnemo z oceno trenutnega okoljskega stanja podjetja, kar vključuje zbiranje podatkov o porabi virov, emisijah in odpadkih. Vzpostavimo določimo cilje, ki morajo biti specifični, merljivi in dosegljivi. Zajemati morajo celotno organizacijo, vključno z dobavno verigo, in temeljiti na trdni analizi vplivov.

3.3 Aktivno vključevanje ključnih deležnikov

Za uspešno uvedbo trajnostnih praks je nujno, da so vključeni vsi, ki vplivajo na ali jih prizadenejo spremembe – od zaposlenih in partnerjev do strank in lokalnega okolja. Vzpostavitev odprtega dialoga omogoča boljšo usklajenost in učinkovitejše izvajanje strategij.

3.4 Optimizacija rabe naravnih virov

Iskanje priložnosti za zmanjšanje porabe energije, vode in surovin ter preprečevanje nastajanja odpadkov je ključni korak. To pomeni uvedbo naprednih tehnologij in sprememb v organizaciji dela, ki vodijo do večje učinkovitosti in manjše obremenitve okolja.

3.5 Uporaba trajnostnih materialov

Pregled materialov, ki jih podjetje uporablja, naj vključuje oceno njihovega okoljskega vpliva, možnosti recikliranja (Slika 3) ter trajnost

dobavne verige. Pomembno je dati prednost surovinam, ki so obnovljive ali pridobljene iz odgovornih virov.



Slika 3: Življenjski cikel trajnostnih materialov [7].

3.6 Strategije energetske učinkovitosti

Učinkovito upravljanje z energijo vključuje načrtovanje porabe, uporabo obnovljivih virov ter tehnološke izboljšave, kot so digitalni dvojčki, pametni senzorji in energetske varčne rešitve. Pomembna je uskladitev povpraševanja po energiji z dejanskimi zmogljivostmi oskrbe.

3.7 Sistemi za obvladovanje odpadkov

Vzpostavitev celostnega sistema za zmanjšanje, ponovno uporabo in recikliranje odpadkov omogoča boljši izkoristek virov. Pristop vključuje tudi optimizacijo izdelkov z vidika zmanjšanja odpadkov že v fazi načrtovanja.

3.8 Učinkovito ravnanje z vodo

Analiza porabe vode v proizvodnih procesih omogoča identifikacijo priložnosti za zmanjšanje rabe in ponovno uporabo. Pomembno je spremljanje porabe ter uvedba praks, ki zmanjšujejo obremenjevanje vodnih virov.

3.9 Krepitev znanja in vključenosti zaposlenih

Zaposleni so ključni nosilci sprememb. S stalnim izobraževanjem o trajnostnih pristopih ter vključevanjem v razvoj in izvajanje ukrepov lahko dosežemo večje zavedanje, motivacijo in pripadnost trajnostnim ciljem podjetja.

3.10 Vrednotenje celotnega življenjskega cikla

Ocena vplivov izdelka skozi vse faze njegovega obstoja – od pridobivanja surovin do odstranitve – omogoča sistematično prepoznavanje okoljskih obremenitev in oblikovanje ukrepov za njihovo zmanjšanje.

3.11 Uporaba standardov in pridobivanje certifikatov

Uporaba mednarodno priznanih standardov ter certifikatov, kot so ISO 14001, EMAS ipd., omogoča strukturiran pristop k trajnostnemu upravljanju in zagotavlja preglednost ter verodostojnost podjetja navzven.

3.12 Spremljanje in poročanje rezultatov

Vzpostavitev merilnih sistemov in redno poročanje o dosežkih na področju trajnosti omogočata transparentnost, nadzor nad napredkom in prilagajanje strategij. Pomembno je spremljati tako okoljske kot tudi socialne in ekonomske kazalnike.

3.13 Nenehno izboljševanje praks

Trajnost ni enkratna naloga, temveč stalen proces. Sproten pregled strategij in odzivanje na nove tehnologije, zahteve trga ali predpise zagotavlja, da podjetje ostaja prilagodljivo in usmerjeno v napredek.

3.14 Krepitev sodelovanja

Učinkovita trajnostna prizadevanja temeljijo tudi na sodelovanju z drugimi podjetji, raziskovalnimi institucijami, nevladnimi organizacijami in oblastmi. Takšna partnerstva prinašajo nova znanja in krepijo inovacijske sposobnosti podjetij.

3.15 Jasna komunikacija in ozaveščanje

Pomembno je, da podjetje jasno predstavi svoje trajnostne aktivnosti tako notranji kot zunanji javnosti. Komunikacija mora poudariti koristi za okolje, družbo in kupce, kar krepi ugled in zaupanje v podjetje.

3 SKLEP

Zaključimo lahko, da so trajnostni proizvodni sistemi ključni za prihodnost industrije, saj združujejo okoljsko odgovornost, gospodarsko učinkovitost in družbeno odgovorno ravnanje. Podjetja, ki sprejemajo trajnost kot temeljno vodilo svojih proizvodnih praks, ne le zmanjšujejo negativne vplive na okolje, temveč si obenem gradijo trdno konkurenčno prednost. Z doslednim upoštevanjem načel, kot so celostno razumevanje trajnosti, učinkovita raba virov, vključevanje deležnikov, uporaba obnovljivih virov ter stalno spremljanje in izboljševanje procesov, se lahko podjetja uspešno prilagajajo nenehno spreminjajočim se okoljskim in regulativnim zahtevam. S tem ne krepijo le svojega položaja na trgu, temveč tudi aktivno prispevajo k trajnostnemu razvoju širše družbe. Trajnostna proizvodnja tako postaja ne le izbira, temveč nujnost za podjetja, ki želijo dolgoročno uspevati v odgovornem, naprednem in povezanem svetu.

Viri:

- [1] EU achieves 20-20-20 climate targets, 55 % emissions cut by 2030 reachable with more efforts and policies, (<https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-achieves-20-20-20>), dostop: 16. 04.2025.
- [2] What is Sustainable Manufacturing?, (<https://safetyculture.com/topics/sustainable-manufacturing/>), dostop: 16. 04. 2025.
- [3] Sustainable production – How to achieve it? | iPoint-systems, (<https://www.ifu.com/sustainable-production/>), dostop: 20. 04.2025.
- [4] 15 First Steps For Building A Sustainable Organization, (<https://www.forbes.com/sites/forbescoachescouncil/2021/02/22/15-first-steps-for-building-a-sustainable-organization/>), dostop: 24. 04.2025.
- [5] Six Key Factors for Achieving Sustainable Manufacturing, (<https://www.foundrymag.com/opinion/article/21924600/six-key-factors-for-achieving-sustainable-manufacturing/>), dostop: 24. 04.2025.
- [6] Key Factors For Achieving Sustainable Manufacturing: A Comprehensive Guide, (<https://news.lineview.com/key-factors-for-achieving-sustainable-manufacturing-a-comprehensive-guide/>), dostop: 16. 04.2025.
- [7] OECD lists three steps for sustainable raw materials policy, (<https://www.euractiv.com/section/science-policy/news/oecd-lists-three-steps-for-sustainable-raw-materials-policy/>), dostop: 20.04.2025.

DOSEGANJE IZJEMNE NATANČNOSTI POTI 0,03MM IN ENERGETSKE UČINKOVITOSTI Z ABB OMNICORE ROBOTSKIMI KRMILNIKI

Tomaž LASIČ
ABB d.o.o.

IZVLEČEK

Po 50 letih inovacij smo v ABB predstavili šesto generacijo robotskih krmilnikov OmniCore. OmniCore krmilnik omogoča novo inovacijo Ultra Accuracy za sodelujoče robote GoFa. GoFa Ultra Accuracy dosega poleg vrhunske ponovljivosti pozicije 0,02 mm zdaj dosega tudi izjemno natančnost poti 0,03mm. Široko zasnovan koncept krmilnikov tudi na področju energetske učinkovitosti dosega nov preboj z regenerativnim napajalnikom, ki vrača energijo zaviranja nazaj v omrežje. Dodatno energetska učinkovitost omogoča programska oprema za avtomatsko generiranje robotskih trajektorij. Trajektorije lahko program generira predhodno v simulaciji (off-line) ali neposredno pred premikom (on-line).

OmniCore™

Nova generacija robotskih krmilnikov



OmniCore™ rešitev za prihranek energije Primer: Re-generativno zaviranje

Trajnost

- Ni dodatnih modulov
- Ni potrebe za dodatni prostor
- Ni omejitve zmogljivosti
- Ni dodatnih stroškov
- Ni onesnaževanja s toploto



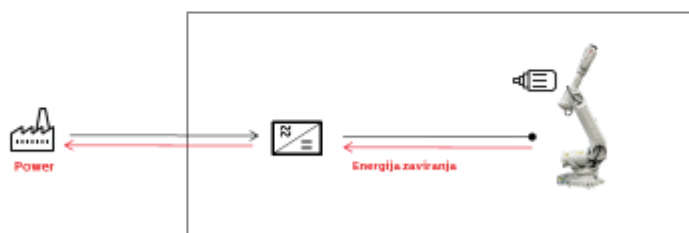
Tehnologija

- SiC² ima visoko energetske učinkovitost.
- Re-generativno zaviranje z aktivnim usmernikom zmanjšuje izpuste.

OmniCore™

Dvosmerni aktivni napajalnik

- Pretvarja energijo zaviranja robota v energijo, ki se preusmeri nazaj v vaše električno omrežje za uporabo drugih naprav. Prihrani energijo za hlajenje.
- V primerjavi s prejšnjo generacijo krmilnikov IRC5 je transformator odstranjen, kar izboljša faktor moči s 0,85 na skoraj 1,0 in prihrani energijo in stroške montaže.



¹Compared to IRC5 and competitors. Highest savings with large robots in intense applications.

²Silicon-Carbid Semiconductor Technology

© 2025 ABB. All rights reserved. stran 3

ABB

Online Automatic path planning

Offline to online

Trajektorije brez kolizij v realnem času

- Optimalna trajektorija in cikel v dinamično spreminjajočem okolju.
- Zaznavanje podatkov okolja v realnem času.
- Poveča zmogljivost mehanskega sistema ob ohranitvi zanesljivosti in vzdržljivosti.

© 2025 ABB. All rights reserved. stran 4



ABB Item Picking Family

Robotske rešitve za pobiranje predmetov

Collision-Free pick points & speed modulation (vse)

- Avtomatsko generiranje **pozicij pobiranja brez kolizij** brez s pomočjo **AI vision**
- **Hitrost in pospeški se** izračunajo na osnovi velikosti, teže in tipa izdelkov*

Automatic Path Planning (Fashion Inductor & Item Picker)

- Avtomatsko generiranje **trajektorij brez kolizij** z uporabo CAD modela ali množice točk. Odstrani potrebo po ročnem programiranju trajektorij in pohitri proces.
- Še posebej uporabno v omejenih prostorih, kjer je iskanje najhitrejše poti brez kolizij ključnega pomena (npr. pri pobiranju iz zabojev in škatel).

*Modulacija hitrosti na osnovi teže ali tipa izdelka zahteva dodatne informacije iz nadzornega sistema.
© 2025 ABB. All rights reserved. 512415

A photograph of an ABB GoFa Ultra Accuracy robot arm. The arm is white and black, positioned in a blue-lit environment with vertical light bars. The ABB logo is visible in the top right corner. Text on the left lists technical specifications, and the bottom features the product name and slogan.

• Ponovljivost pozicije **0,02mm**
• Natančnost trajektorije pod **0,03 mm**
• Absolutna natančnost pozicije **0,1 mm**

GoFa® Ultra Accuracy ENGINEERED TO OUTFIT

© 2025 ABB. All rights reserved.

AbsAcc – Absolute Accuracy

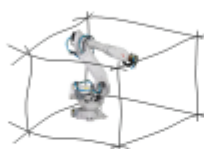
Koncept za doseganje visoke natančnosti robotov

Offline programming



- Virtualni robot z idealnim koordinatnim sistemom

Realni standardni robot



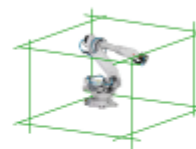
- Realni standardni robot ima natančnost trajektorije 5-15 mm

Kalibracija robota



- Ob proizvodnji se kalibrira robota v celem delovnem območju
- Vsak robot dobi svoj „rojstni list“ (birth certificate)
- Kalibracija možna tudi na terenu

AbsAcc kalibriran robot



AbsAcc kalibriran robot, do to 0,2 mm natančnost (z vključeno AbsAcc opcijo)

AbsAcc opcija obstaja večino ABB industrijskih robotov

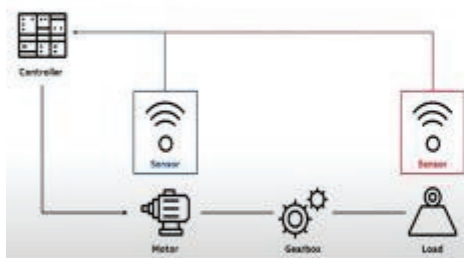
Ponovljivost je enak za standardne robote in za robote s AbsAcc opcijo
 © 2025 ABB. All rights reserved. 51/21/7

ABB

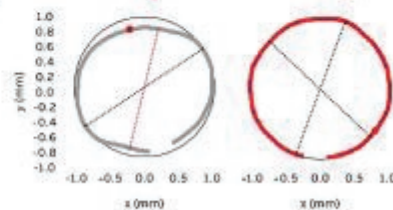
Sekundarno krmiljenje pozicije

Secondary Position Control (SPC)

Building on OmniCore's strength



- Merjenje navora na osi za reduktorjem.
- GoFa ima na vseh oseh senzorje navora, ki omogočajo sekundarno korekcijo krmiljenja.
- 65% izboljšana natančnost glede na standardni sistem z meritvijo navora na osi motorja.
- Natančnost poti
- Ponovljivost
- Absolutna natančnost



© 2025 ABB. All rights reserved. 51/21/8

ABB

ROBOTIZACIJA V DENTALNI INDUSTRIJI

Andrej ZIDAR¹, Max MALAJNER²

¹FANUC Adria d.o.o.

²Robotehnika d.o.o.

IZVLEČEK

Poudarili bomo, kako robotizacija in digitalizacija spreminjata dentalno industrijo ter izboljšujeta kakovost in učinkovitost proizvodov. Partnersko podjetje je za svojega naročnika uporabilo napredne FANUC tehnologije, ki omogočajo natančno izdelavo dentalnih pripomočkov.

Podjetja se v dentalni industriji zavedajo pomembnosti inovacij in nenehno vlagajo v razvoj novih tehnologij, da bi ostali konkurenčni na globalnem trgu. Z FANUC roboti, ki so znani po svoji zanesljivosti in natančnosti, dentalna industrija dosega višjo raven avtomatizacije. Poleg tega integracija FANUC robotov v proizvodne procese zmanjšuje stroške proizvodnje in izboljšuje kakovost končnih izdelkov, kar vodi do večjega zadovoljstva strank.

1 UVOD

Podjetje FANUC je eden največjih dobaviteljev opreme za avtomatizacijo in robotizacijo na svetu. Ledino na tem področju orjemo že skoraj 70 let in pridobivamo izkušnje z lastnim razvojem in testiranjem izdelkov v lastni proizvodnji, kjer deluje več kot 5.000 robotov v enem najbolj avtomatiziranih in robotiziranih obratov na svetu. Za lažjo pripravo in enovito predstavitev strokovnih prispevkov v zborniku ter na spletu smo pripravili oblikovna navodila za njihovo pripravo. Prosimo, da se avtorji držijo teh navodil.



Slika 1: FANUC – proizvodnja

FANUC Adria d.o.o. je podružnica podjetja FANUC, ki skrbi za področje Slovenije, Hrvaške ter Bosne in Hercegovine s tehnično podporo, prodajo in servisom.

Da smo kot prvo podjetje na svetu instalirali več kot 1.000.000 industrijskih robotov, gre zahvala tudi našim integratorjem, ki so strokovnjaki vsak na svojem področju. FANUC namreč skrbi, da kupci dobijo najboljšo možno rešitev. Razumemo, da je nemogoče, da bi eden znal vse, zato združujemo strokovnjake iz različnih področij in jih podpremo in pomagamo doseči in uresničiti vaše cilje. Eden izmed naših integratorjev je podjetje Robotehnika, ki je naredilo celico za dentalno industrijo, ki jo bo predstavil njihov inženir Max Malajner.

Podjetje Robotehnika d.o.o. že od leta 2007 ustvarjamo vrhunske rešitve na področju strojogradnje, avtomatizacije in robotizacije. Naše delo je tesno povezano z željami naročnikov in njihovimi edinstvenimi potrebami. Ne glede na panogo, v kateri delujejo, zanje najdemo inovativne rešitve, ki optimizirajo njihove procese. Naša ključna prednost je celovit pristop – od zasnove in konstruiranja, natančne izdelave strojnih komponent v naši lastni CNC proizvodnji, do strokovne montaže, programiranja in zagona. Ta integriran proces nam pogosto omogoča izjemno časovno učinkovitost.

Kot majhno, družinsko podjetje se ponašamo z izjemno fleksibilnostjo. Pri vsakem projektu se z veseljem in v celoti prilagodimo individualnim zahtevam in željam naših naročnikov.

2 PROJEKT

Za našega naročnika smo zasnovali napredno rešitev za depaletizacijo in končno pakiranje izdelkov v prodajne škatle v dentalni industriji. Prvi izziv je predstavljala zahtevna depaletizacija obstoječih palet, kjer so bili izdelki zgolj 2 mm narazen in izjemno čvrsto nameščeni. Za ta del procesa smo izbrali visoko zmogljiva robota FANUC Scara, opremljena z miniaturnimi dvoprstnimi prijemači. Ta izbira je omogočila doseganje izjemno hitrih gibov, kar je ključno za učinkovitost linije.

Za zagotavljanje neprekinjenega cikla, smo tudi na tej točki implementirali dva robota Scara, ki sinhrono odlagata izdelke na ista vpenjalna mesta. Njuno delovanje usklajuje napredna detekcija kolizij in neprekinjena medsebojna komunikacija.



Slika 2: FANUC Scara robota za depaletizacijo

Drug pomemben izziv je bilo fleksibilno pakiranje izdelkov v prodajne škatle. Naša rešitev omogoča več načinov pakiranja: direktno v škatlo ali pa najprej v plastične komplete in nato pakiranje kompletov v prodajne škatle. Ponovno smo za hitrost in zanesljivost uporabili dva robota Scara, ki skupaj dosežeta cikel 1,8 sekund na izdelek.



Slika 3: FANUC Scara robota za pripravo paletk

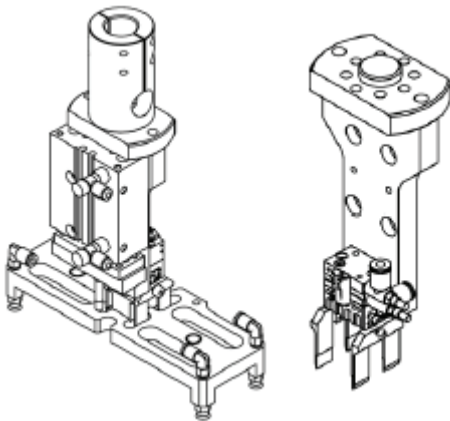


Slika 4: Vakumsko prijemalo z avtomatsko menjavo

Zaradi prostorskih omejitev smo razvili inovativen sistem odklopljivega vakuumskega prijemala, ki si ga robot samostojno pritrdi. Za natančno fiksiranje izdelkov v plastične komplete pa je vsak robot opremljen tudi s tapkalom, ki zagotavlja optimalno prileganje. Tudi pri tem delu procesa robota neprestano komunicirata.

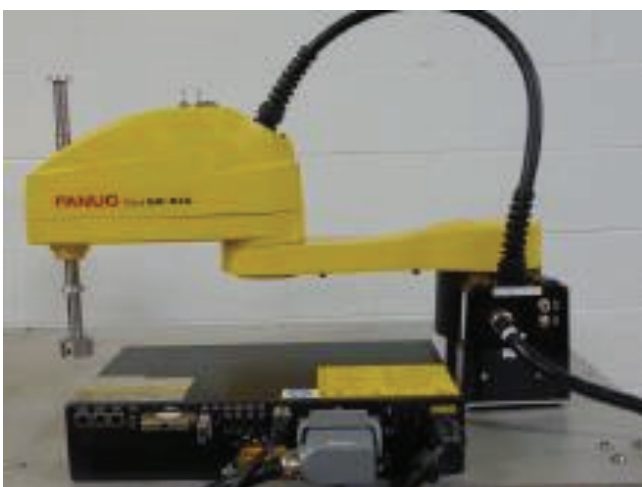


Slika 5: Izmenljivo prijemalo



Slika 6: Delavniška risba prijemala

Uporabili smo robote: Fanuc SR6



Slika 7: Robot Fanuc SR6iA

- 4 osni robot
- Nosilnost 6 kg
- Največji doseg: 650 mm
- Ponovljivost $\pm 0,01$ mm
- Teža mehanske enote 30 kg
- Povprečna poraba energije 0,35 kW

3 SKLEP

V FANUC Adria in ROBOTEHNIKI verjamemo, da je kombinacija strokovnjakov, ki sodelujejo v timskem duhu, ključ do uspeha.

Skupaj gradimo kulturo odličnosti in inovativnosti, ki temelji na medsebojnem spoštovanju, sodelovanju, povezovanju in osebni razvoju. S svojo usposobljeno in motivirano ekipo smo pripravljeni na izzive prihodnosti in zagotavljamo kakovostne storitve in rešitve našim strankam.

Naša ekipa strokovnjakov vam lahko pomaga izboljšati produktivnost in konkurenčnost vašega poslovanja.

Če iščete vrhunske storitve na področju robotizacije in avtomatizacije vaše proizvodnje, je podjetje FANUC Adria z integratorji prava izbira za vas.

Viri:

[1] FANUC: Interno gradivo.

[2] ROBOTEHNIKA: Interno gradivo.

ROBOTSKA VARILNA CELICA Z ROBOTIZIRANIM POSLUŽEVANJEM VARILNIH PRIPRAV

Hubert KOSLER^{1,2}, Igor PUGELJ², Matej MERKAČ¹

¹YASKAWA Slovenija d.o.o.

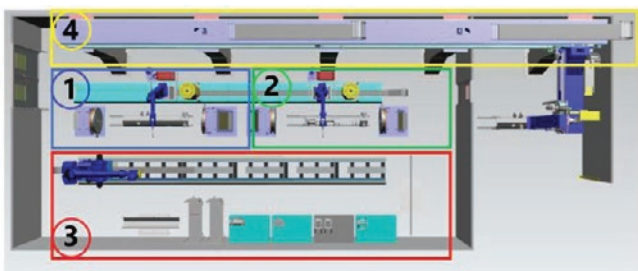
²YASKAWA Ristro d.o.o.

IZVLEČEK

Robotska varilna celica z dvema delovnimi mesti, s servo zasučnimi pozicionerji in univerzalnimi vpenjalnimi pripravami. Dva varilna robota Motoman tip AR2010 na servo talni vozni enoti z avtomatsko menjavo gorilnikov. Robotizirano posluževanje varilnih priprav z robotom Motoman tip GP600 s 600kg nosilnosti na servo talni vozni progi z avtomatsko menjavo prijema. Dvo-osni servo portal opremljen z univerzalnim prijemalom za odvzem končno zvarjenega izdelka iz vpenjalne priprave.

1. UVOD

Robotska celica je namenjena izdelavi okvirja za tekalne valje (za pogonske verige delovnih strojev). Pri zasnovi celice so bili upoštevani trije tipi okvirja in sicer v levi in v desni izvedbi. Robotsko celico sestavljajo štiri delovne postaje. Izdelek se zvari v dveh korakih. Za avtomatizirano izdelavo enega okvirja je skupni čas približno 330 minut. Ta čas vključuje čas vseh robotskih operacij: odvzem podsklopov in odlaganje v vpenjalno pripravo, vision sistem za pozicioniranje podsklopov, točkovno spenjanje podsklopov, varjenje, tipanje pozicije zvarnih spojev in prenos izdelka med postajami in na izhodni trak. Za avtomatsko posluževanje dveh varilnih priprav skrbi 6-osni robot tip GP600 na servo talni vozni enoti, za prenos varjenca med postajami pa 2 osni servo portal.



Slika 1: Zasnova robotske celice

2. ZASNOVE ROBOTSKE CELICE

Postaja 1: Varilno območje 1:

Varilni robot samodejno točkjuje in vari komponente glede na predvideno zaporedje. Sestavne sklope dostavlja strežni robot GP600 in servo portal XZ. Posamezni sklopi se vpenjo v avtomatsko varilno pripravo.

Postaja 2: Varilno območje 2:

Izdelek se iz postaje 1 v postajo 2 prenese s servo portalom XZ, kjer se spojeni sklopi zavarijo. Varilni in strežni robot sodelujeta pri varjenju in dostavi sklopov.

Postaja 3: Manipulacijska cona:

V manipulacijski coni se nahaja strežni robot, ki prevzema posamezne dele iz vhodnih mest in jih prenaša v varilne priprave. Manjši sestavni elementi so odloženi v pozicionirna gnezda na palete na ročne vozičke, večji pa na paleto za prenos z viličarjem. Gnezda za izdelke so varnostno zavarovana po principu „Poka Yoke“. Za povečanje delovnega območja je strežni robot Motoman tip GP600 nameščen na servo talno vozno enoto dolžine 12m.

Postaja 4: Manipulacija končnih izdelkov:

Največja teža izdelka znaša 900kg. Za prenos izdelka med varilno postajo 1 in 2 ter prenos končanega izdelka na izhodni trak, je predviden

samostojen 2-osni XZ-portal, opremljen z univerzalnim prijemalom. Portal zagotavlja pomik v 16.000mm X-smeri in 2.500m v Z smeri. Portal je opremljen z Yaskawa motorji in integriran v robotski krmilnik kot zunanja os, kar pomeni, da se z njim upravlja in programira z robotsko programirno enoto Teachbox. Na mestu odvzema končanih izdelkov iz traku je dostop v območje nadzorovan in varovan z varnostnimi fotosenzorji.

2. GLAVNI SKLOPI ROBOTSKE CELICE

Varilna robota Motoman tip AR2010 sta opremljena z varilnim izvorom Fronius tip TPS600i, z gorilnikom Robacta TX 10i, namenjenim za samodejno menjavo. Povezni paket za žico je integriran v notranjost robotske roke skozi votlo zapestje (peta in šesta os) in vključuje avtomatsko sklopko za menjavo gorilnika. Robot sam zamenja gorilnik znotraj cikla varjenja enega izdelka.

Vpenjalne varilne priprave so vpete v 1-osni zasučni servo pozicioner Motoman tip W5000. Vsaka zasučna stran pozicionerja je opremljena z Yaskawa motorjem, ki sta med seboj povezana kot električna gred. Skupna nosilnost pozicionerja znaša 10.000kg. Za upravljanje z vpenjalnimi pripravami sta pozicionerja opremljena z mediji: hidravlika, zrak, elektrika. Vpenjalne priprave so univerzalne in omogočajo varjenje vseh 6 tipov izdelkov z avtomatsko prilagoditvijo na drugi tip. Osnova je masivno ogrodje, na katerega so montirani naslonski in vpenjalni elementi. Posamezni sklopi so v pripravi prednapeti s hidravličnimi elementi. Zaporedje vpenjalnih korakov in vsa sensorika se upravlja na glavnem operaterskem pultu, kjer se tudi programira in rokuje z vpenjalnimi pripravami.

Strežni robot Motoman tip GP600 (600kg nosilnosti) je montiran na linerano servo vozno progo Motoman tip FBHL4000 dolžine 12m. Servo proga je opremljena z Yaskawa motorjem, kar omogoča sinhrono premikanje robota in programiranje z robotskim pendantom Teachbox. Robot je opremljen z avtomatsko sklopko za samodejno menjavo prijemal. Drugi del avtomatske sklopke je montiran na robotsko prijemalo. Za odzjem vseh sklopov ima robot 10 prijemal; za vsako prijemalo je predvideno

odlagalno mesto. V celici je tudi čistilna naprava za magnetne dele robotskih prijemal.

Veliki varilni sklopi: Haube in LLR letve se v celico dostavijo preko posebnega vozička s pozicionirnimi gnezdi (2x Haube in 2 x letev). Vhodno mesto je varovano s parom hitrih rolo vrat, kar omogoča podajanje elementov med delovanjem celice. Manjši sestavni deli se dostavijo na vozičkih; v celici je 8 mest za vozičke. Vozički so opremljeni s pozicionirnimi paletami za sestavne kose. Paleta za vse izdelke so opremljene z RFID čipi za prepoznavo tipa izdelkov, ki se nahajajo na paleti.

Robotsko podajanje varilnih sklopov v varilno pripravo nadzorujeta 2 sistema. Stacionarni vision sistem: robot preveri tip in položaj kosa, ki ga drži v prijemalu. Glede na odstopanje pozicije, se le-ta ob vstavljanju v varilno pripravo avtomatsko prilagodi. Kontrola pozicije celotnega varjenca. Dodatno se preverja tudi pozicija varilnih spojev izdelka v varilni pripravi. To izvaja varilni robot in spremembe v poziciji se sporočijo strežnemu robotu za korekcije ob podajanju naslednjega sklopa.

Končani izdelki se s pomočjo XZ portala odnesejo na izhodni trak. Masivna izvedba traku zagotavlja prostor za 6 izdelkov. Iz traku se izdelke lahko prevzame z viličarjem ali z mostovnim dvigalom, brez ustavljanja delovanja celice.

Vsi elementi robotske celice so varnostno in komunikacijsko povezani v nadzorni PLC Siemens, s posluževalnim pultom MTP 1200, nameščenim na čelni strani. Ob servisnih vstopih se nahajajo pomožni pulti za potrjevanje dostopa do celice, potrjevanje napak,...

7. ZAKLJUČEK

Z implementacijo robotske varilne celice smo optimirali čase proizvodnje in zagotovili ponovljiv proces izdelave zahtevnih izdelkov. Robotsko posluževanje vpenjalnih varilnih priprav zagotavlja nadzor nad vhodnimi sestavnimi sklopi. Poenostavili smo posluževanje robotske celice, izboljšali ergonomijo in zagotovili pogoje za serijsko proizvodnjo.

Viri:

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

AVTOMATIZIRANO OSKRBOVANJE ROBOTSKIH CELIC Z IZDELKI Z UPORABO AVTONOMNO VODENEGA VOZILA

Maria YAKIMOVSKA, Vinko DREV
LTH Castings d.o.o.

IZVLEČEK

Podjetje LTH Castings d.o.o. že vrsto let uspešno širi svoje poslovanje, pri čemer nenehno vlaga v avtomatizacijo proizvodnih procesov. Kljub trenutni visoki stopnji avtomatizacije so nadaljnje investicije na tem področju nujne, saj industrija hitro napreduje in zahteva stalne izboljšave. Znotraj oddelka Avtomatizacija procesov, ki se nahaja v obratu Ljubljana, smo v preteklih letih postavili in zagnali trenutno največjo skoraj popolnoma avtomatizirano linijo v podjetju. V linijo so vključene 4 robotske celice z 8 obdelovalnimi stroji, ter paletno linijo, ki skrbi za distribucijo izdelkov od robotskih celic, skozi pralni sistem do čiste sobe za nadaljnjo obdelavo. Do pred nekaj meseci so bile robotske celice oskrbovane ročno s pomočjo ročnih viličarjev, sedaj pa smo za popolno avtomatizacijo uvedli oskrbo z uporabo avtonomno vodenega vozila (ang. AGV- Automated Guided Vehicle).

AGV sistem omogoča optimiziran in samodejen transport materiala med vmesnim skladiščem in robotskimi celicami, s čimer zmanjšujemo ročne posege, povečujemo produktivnost ter izboljšujemo varnost v proizvodnem okolju. Njegova naloga je prenašanje namenskih zabojnikov z različnimi tipi izdelkov iz skladišča do robotskih celic, ter vračanje praznih zabojnikov nazaj na namenska mesta v skladišču. S tem dosežemo visoko stopnjo avtonomije in zagotovimo nemoten potek proizvodnih procesov. Celotna implementacija ter ključne prednosti in slabosti sistema bodo podrobneje predstavljene v prispevku.

1 UVOD

V sodobni industriji je avtomatizacija oskrbovanja proizvodnih celic ključnega pomena za povečanje produktivnosti, zmanjšanje človeškega dela in izboljšanje učinkovitosti procesov. V našem podjetju se že več let uspešno poslužujemo avtonomno vodenih vozil (AGV), pri različnih proizvodnih nalogah. Do sedaj smo uporabljali predvsem manjša avtonomna vozila, namenjena premikanju manjših vozičkov med posameznimi celicami v livarni.

V okviru novega projekta pa smo prvič uvedli večjega AGV-ja, namenjenega oskrbovanju robotskih celic z zabojniki. Glavni cilj zasnove je bil zagotoviti nemoten pretok materiala, zmanjšati potrebo po človeškem posegu ter povečati fleksibilnost logističnega procesa.

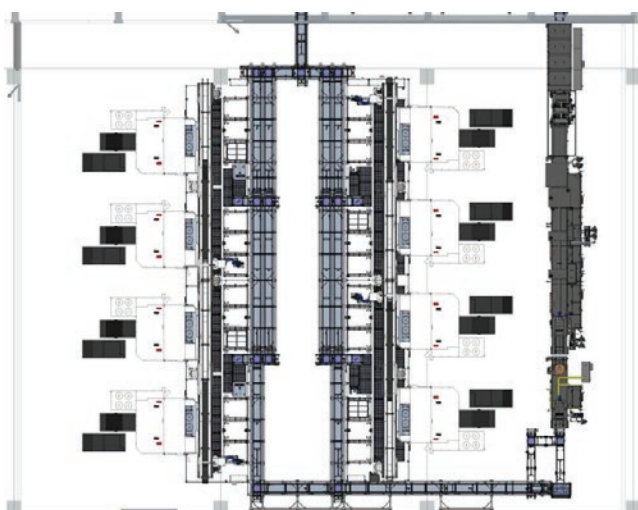
Sistem temelji na uporabi AGV-ja, ki omogoča transport zabojnikov do robotskih celic na podlagi informacij o stanju zalog in potrebah proizvodnje. Vozilo je povezano z glavnim krmilnikom proizvodne linije, ki komunicira tudi

z vsemi ostalimi krmilniki na posameznih celicah, tako da AGV ve, kdaj in kam se mora premakniti.

2 OPIS SISTEMA

Proizvodna linija, ki jo bomo oskrbovali z avtonomno vodenim vozilom (AGV), je sestavljena iz štirih robotskih celic, pri čemer vsaka celica vključuje dva obdelovalna stroja *SW BA06*. Skupno imamo torej osem obdelovalnih strojev, ki so strateško razporejeni znotraj linije. Vsaka robotska celica je razdeljena na dve postaji, pri čemer ima vsaka postaja tri pobiralno/odlagalna mesta za zabojnike.

Pobiralno/odlagalna mesta imajo vgrajena vodila, ki so na začetku malo bolj odprta in omogočajo večjo toleranco pri odlaganju zabojnikov v celico.



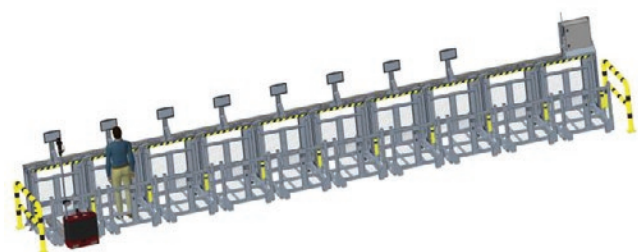
Slika 1: Model linije in robotskih celic

2.1 Vmesno skladišče zabojnikov

Da bi zagotovili nemoten pretok materiala, je za vsako postajo v istem prostoru vzpostavljeno vmesno skladišče.

V tem skladišču je za vsako postajo predvideno eno mesto za polne zabojnike, ki jih AGV pelje iz vmesnega skladišča do posamezne celice. Glede na to, da imamo štiri robotske celice in vsaka vsebuje dve postaji, to pomeni skupno osem postaj in s tem osem mest za polne zabojnike v vmesnem skladišču.

Poleg tega so v vmesnem skladišču predvideni tudi dve dodatni mesti za prazne zabojnike, ki jih AGV vozi nazaj iz celic v vmesno skladišče po zaključeni obdelovalni operaciji. Nad vsakim skladiščnim mestom za polne zabojnike je nameščen prikazovalnik, ki operaterjem prikazuje ključne informacije o stanju zalogovnika in pripadajočih celic.



Slika 2: Model vmesnega skladišča

Za skladiščna mesta, namenjena praznim zabojnikom, pa smo dodali opozorilni sistem v obliki zvočne sirene. Sirena se aktivira v primeru, ko sta obe mesti zasedeni, kar pomeni, da operaterji še niso umaknili praznih zabojnikov in

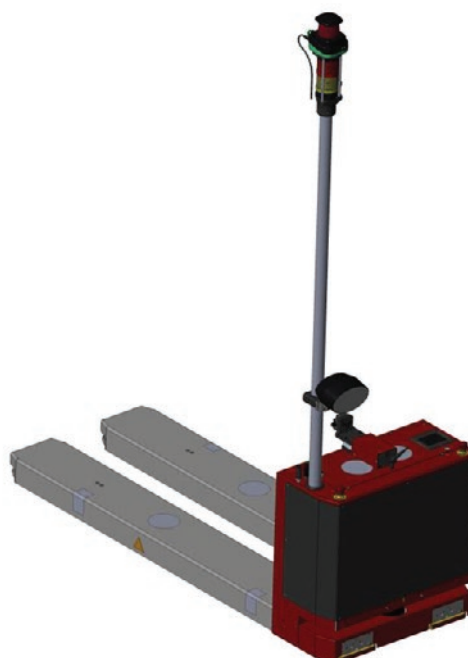
tako niso sprostili prostora za nove. V takšnem primeru AGV ne more odložiti praznega zabojnika, kar lahko vodi do zastoja v oskrbi celic, zato opozorilo omogoča pravočasno ukrepanje. Tako vzpostavljena struktura omogoča učinkovito in avtomatizirano oskrbovanje proizvodnih celic, pri čemer AGV zagotavlja hitro in natančno dostavo zabojnikov med skladiščem in robotskimi celicami.

3 UPORABLJENA OPREMA

3.1 AGV

Jedro avtomatiziranega sistema predstavlja paletni AGV G130 proizvajalca 'Melkus Mechatronics'. Vozilo uporablja lasersko navigacijo na osnovi SLAM tehnologije, ki omogoča delovanje brez potrebe po dodatni infrastrukturi, kar poveča prilagodljivost pri načrtovanju poti v proizvodnem okolju.

AGV se premika vsesmerno, kar zagotavlja visoko manevrsko sposobnost tudi v omejenih prostorih. Zasnovano je kot nizko-dvižni viličar, kar omogoča avtonomno nalaganje palet ter zagotavlja učinkovito manipulacijo z zabojniki v proizvodnih celicah. Vilice AGV-ja se lahko dvignejo največ do višine 130mm, kar pa v našem primeru povsem zadošča glede na zasnovo in višino transportnih zabojnikov.



Slika 3: Avtonomno vodeno vozilo (AGV G130)

3.2 Industrijski računalnik

Za upravljanje nalog AGV-ja uporabljamo industrijski računalnik 'SHUTTLE BOX-PC BPCAL02-i5', na katerem je nameščena programska oprema, ki omogoča definiranje mape proizvodnega okolja, pobiralne in odlagalne pozicije ter različne tipe nalog, kot so: pobiranje zabojnika, odlaganje, premik na določeno pozicijo ali premik na polnilno postajo.

3.3 Siemens krmilnik

V sistemu imamo vključen *Siemens* krmilnik, ki komunicira z AGV-jem ter mu pošilja naloge glede na stanje v robotskih celicah.

Ta krmilnik je povezan z glavnim krmilnikom linije, ki preko vmesnikov za izmenjavo podatkov pridobiva informacije iz vseh robotskih celic. Na ta način je omogočen integriran nadzor nad celotnim proizvodnim procesom.

Z združitvijo podatkov o stanju proizvodne linije in trenutnih potrebah celic se naloge za AGV sprožijo samodejno. Krmilnik poskrbi, da se vozilo premakne na ustrezno lokacijo glede na trenutno potrebo po materialu ali odvzemu praznega zabojnika. Na ta način je zagotovljena optimalna razporeditev nalog in zmanjšano tveganje za zastoje.

3.4 Raspberry Pi touchscreen

Kot podporo operaterjem in dodatni vizualni vmesnik uporabljamo tudi osem 'Raspberry Pi touchscreen' prikazovalnikov, ki so nameščeni nad vmesnim skladiščem – po eden za vsako postajo. Na teh prikazovalnikih prikazujemo ključne informacije, kot so:

- trenutno aktivno kodo izdelka, ki se obdeluje na posameznem obdelovalnem stroju,
- način delovanja celice (avtomatski ali ročni način),
- status zahteve s strani celice (v kolikor je bila sprožena zahteva za zabojnik),
- način oskrbovanja celice (oskrba z AGV-jem ali ročnim viličarjem),
- prisotnost zabojnika na določenem mestu v vmesnem skladišču.

Prisotnost zabojnika preverjamo s pomočjo senzorjev, nameščenih na vsako skladiščno mesto. V primeru, da senzor na določenem mestu ne zazna zabojnika, se naloga za AGV ne sproži, kar preprečuje napačne premike ali prazne vožnje. Vse razen kode izdelka so podatki tipa *BOOL*, ki jih beremo neposredno iz krmilnika za linijo.

Dodatno na vsakem zaslonu, v spodnjem levem kotu, prikazujemo tudi morebitne aktivne alarme, kar omogoča operaterjem hiter pregled nad stanjem sistema in pravočasno ukrepanje v primeru napak ali zastojev.



Slika 4: Primer prikazovalnika nad vmesnim skladiščem

4 IMPLEMENTACIJA SISTEMA

Implementacija avtomatiziranega oskrbovanja robotskih celic z AGV-ja je potekala v več fazah, ki so vključevale najprej testiranje AGV-ja v delavnici, priprava potrebne opreme, načrtovanje in izdelava konstrukcije za vmesnega skladišča, načrtovanje in izdelava elektro omare, prilagoditev programske opreme ter preizkušanje celotnega sistema.

Večino nalog smo najprej preizkusili v naši delavnici, kjer smo simulirali pobiranje in odlaganje zabojnikov ter spremljali natančnost premikov AGV-ja.

Pri testiranju smo se soočili z izzivi, povezanimi z natančnostjo pobiranja in odlaganja zabojnikov. AGV je pri vsakem izvajanju teh nalog zaznaval določeno odstopanje pri pozicioniranju, ki naj bi v idealnih pogojih znašalo ± 1 cm. V praksi pa smo pogosto opazili, da se to odstopanje povečuje, kar je povzročilo težave pri pravilnem pobiranju in odlaganju zabojnikov na predvidena mesta.



Slika 5: Testiranje AGV-ja v delavnici

Za izboljšanje natančnosti smo večkrat izvedli kalibracijo navigacijskega sistema, saj smo ugotovili, da se položaj vozila lahko zaradi manjših premikov ali sprememb v okolju nekoliko spremeni. Z redno kalibracijo in prilagoditvijo nastavitev smo dosegli boljšo natančnost pri pozicioniranju AGV-ja, kar je bistveno izboljšalo uspešnost pobiranja in odlaganja zabojnikov.

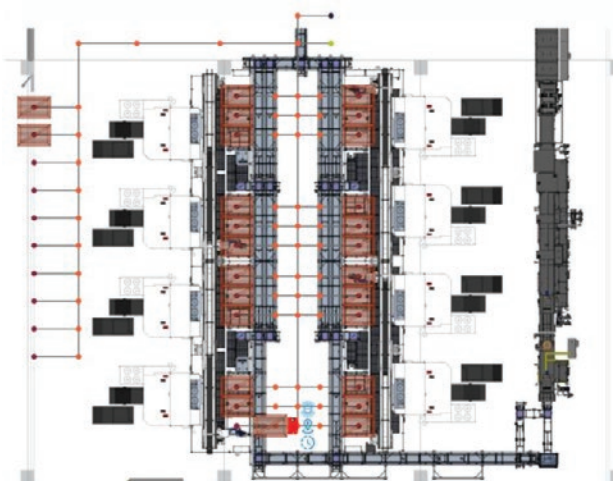


Slika 6: AGV v proizvodnji

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

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

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



Slika 7: Simulacija AGV-ja v programskem okolju TCS

5 POSTOPEK DODELJEVANJA NALOG

Dodeljevanje nalog AGV-ju temelji na vnaprej določenih pogojih, ki zagotavljajo varno in zanesljivo delovanje v proizvodnem okolju. Pred vsako nalogo sistem najprej preveri stanje baterije AGV-ja. V primeru, da je baterije nižja od 10% ,

AGV naloge ne prevzame, temveč se nemudoma usmeri na polnilno postajo.

Če je baterija med 10% in 20%, sistem najprej preveri, ali obstaja aktivna naloga. Če naloge ni, gre AGV prav tako na polnilec. V vseh ostalih primerih, ko je stanje baterije ustrezno ali je naloga nujna, AGV nadaljuje z izvajanjem naloge.

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

5.1 Prevzem praznega zabojnika iz celice

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



Slika 8: Primer prevzem zabojnika iz celice

5.2 Prenos polnega zabojnika v celico

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

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

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

6 SKLEP

Ker gre za projekt, ki smo ga prvič uvedli v takem obsegu, smo se med implementacijo soočili z več izzivi, predvsem tehnične narave. Ena od pogostejših težav je bila povezana s pozicioniranjem AGV-ja, kjer so se pojavljala odstopanja pri natančnosti ustavljanja na določenih točkah, kar je vplivalo na zanesljivost pobiranja in odlaganja zabojnikov. Dodatno smo imeli težave pri vzpostavljanju kontakta s polnilno postajo, kar je v teh primerih povzročalo težave pri samodejnem polnjenju vozila.

Za dodatno nadgradnjo, bi sistem lahko opremili z kamero za vizualno zaznavanje točnih pozicij, kar bi še izboljšalo natančnost pri delovanju. Prav tako bi vpeljali brezstično (brezkontaktno)

polnilno postajo, ki bi poenostavila in pospešila postopek polnjenja, brez potrebe po mehanskem priklopu.

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

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

RAZVOJ ROBOTSKEGA SISTEM ZA POBIRANJE RAZSUTIH OBJEKTOV IZ ZABOJA Z UPORABO GLOBOKIH NEVRONSKIH MREŽ IN ROBOTSKEGA OPERACIJSKEGA SISTEMA (ROS2)

Rok PAHIČ, Iurii VANDIAK, Urban KOLMAN
Moderne tehnologije d.o.o.

IZVLEČEK

Pri manjših in srednjih proizvodnih serijah z variabilnimi oblikami obdelovancev se običajno obdelovance med avtomatiziranimi procesi shranjuje in transportira v razsutem stanju. Na vhodu v takšen proces je potrebno obdelovance spraviti v urejeno pozicijo, kar se v večini primerov še vedno dela ročno. Sistemi za pobiranje razsutih objektov iz zaboja omogočajo robotizacijo takšnih delovnih mest. Razvit sistem zaznava vsebino zaboja s pomočjo 3d kamere. Na zajetih podatkih detekcijski algoritem najde zaboj in lokalizira objekte v njem. S pomočjo geometrijskih podatkov robota se v naslednjem koraku generira robotska trajektorija za pobiranje objekta, ki je kinematično izvedljiva in brez trkov z okolico. Detekcija in lokalizacija objektov poteka s pomočjo globokih nevronske mreže in uporabe oblaka točk. Vsi sklopi sistema so integrirani s pomočjo robotskega operacijskega sistema (ROS2). Takšna integracija omogoča uporabo 3d kamer in robotov različnih tipov in proizvajalcev. Nadzor in konfiguracija sistema je mogoča preko grafičnega vmesnika razvitega na osnovi spletnih tehnologij.

1 UVOD

V proizvodnih procesih je med različnimi fazami in lokacijami proizvodnje potrebno obdelovance shranjevati in transportirati. Na vhodu v takšno avtomatizirano proizvodno fazo, je potrebno imeti vsak posamezen obdelovanec v definirani in urejeni poziciji. To se lahko rešuje s shranjevanjem in transportom obdelovancev v urejen stanju. Pri majhnih in srednjih serijah z variabilnimi oblikami obdelovancev takšno shranjevanje ni ekonomično, zaradi potrebe po vsakokratni fizični spremembi priprav za shranjevanje in transport. Zato se pri takšnih serijah obdelovance shranjuje in transportira v neurejen razsutem stanju, na vhodu v vsak posamezen proces pa s obdelovance manipulira ročno. Robotski sistem za pobiranje razsutih objektov iz zaboja omogoča avtomatizacijo takšnih delovnih mest [1].

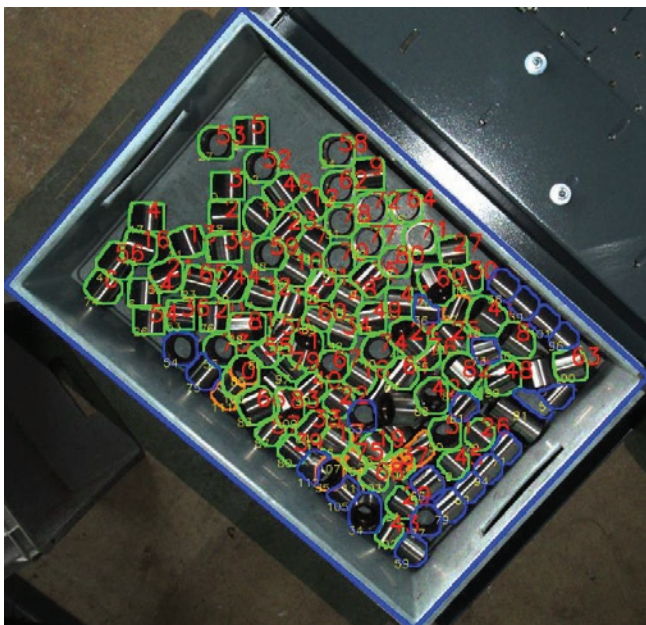
2 ZGRADBA IN DELOVANJE ROBOTSKEGA SISTEMA

Razvit sistem zazna vsebino zaboja s pomočjo 3d kamere. S uporabo globokih nevronske mreže

in zajete slike zazna in segmentira objekte v zaboju (Poglavje 2.1) ter jih na osnovi podatkov oblaka točk lokalizira (Poglavje 2.2) v prostoru robota. Na osnovi predhodno definiranih geometrijskih podatkov robota in prijema ter zajetih podatkov o zaboju in njegovi vsebini generira izvedljivo robotsko pot brez trkov (Poglavje 2.3). Nato je potrebno podatke robotske poti poslati na robota in izvesti gib. Uporabnik mora imeti možnost da med delovanjem sistem čim enostavneje nadzira in pred pobiranje novih objektov čim enostavneje konfigurira (Poglavje 2.4). Takšna kompleksna programska struktura zahteva uporabo različnih algoritmov s področja strojnega vida in robotike ter delovanje vzporednih programov. Primerno okolje za razvoj takšnega sistema je Robotski Operacijski Sistem (ROS 2) [2], ki omogoča enostavno implementacijo vzporednih programov kot vozlišč in komunikacijo med njimi. Prav tako že vsebuje nabor programskih knjižnic z robotskimi algoritmi in zaradi možnost uporabe Python in C++ jezika omogoča enostavno integracijo širokega spektra že obstoječi programskih knjižnic z različnih področjih.

2.1 Detekcija objektov

Detekcija in segmentacija objektov na osnovi oblaka točk je težavna pri objektih ki imajo neizrazite geometrijske značilke ali je velikost teh značilk zelo majhna glede na resolucija oblaka točk ali prisotnim šumom. Močan šum v zajetih podatkih je značilen predvsem za reflektivne objekte, kamor spada veliko kovinskih obdelovancev v industriji. Dvodimezionalne značilke, kot so na primer robovi na slikah objektov, so precej bolj prepoznavne tudi pri takšnih pogojih.



Slika 1: Primeri detektiranih in segmentiranih objektov

Zmogljivost detekcije in segmentacije objektov na slikah se je zelo izboljšala s pričetkom uporabe globokih nevronske mreže. Razvit robotski sistem uporablja dva različna pristopa k detekciji objektov z globokimi nevronske mreže. Pri enostavnejših objektih se uporablja segmentacijska arhitektura, ki omogoča konfiguracijo detekcije in segmentacije novih objektov samo z avtomatizirano nastavitvijo parametrov detekcije iz podatkov objekta (Slika 1). Pri kompleksnejših oblikah objektov pa se uporablja nadgrajena detekcijsko-segmentacijska arhitektura. V tem primeru je potrebno mrežo dotrenirati na simulacijskih podatkih želenega objekta. Treninga traja približno 20 minut kar na računalniku robotskega sistema. Ta arhitektura

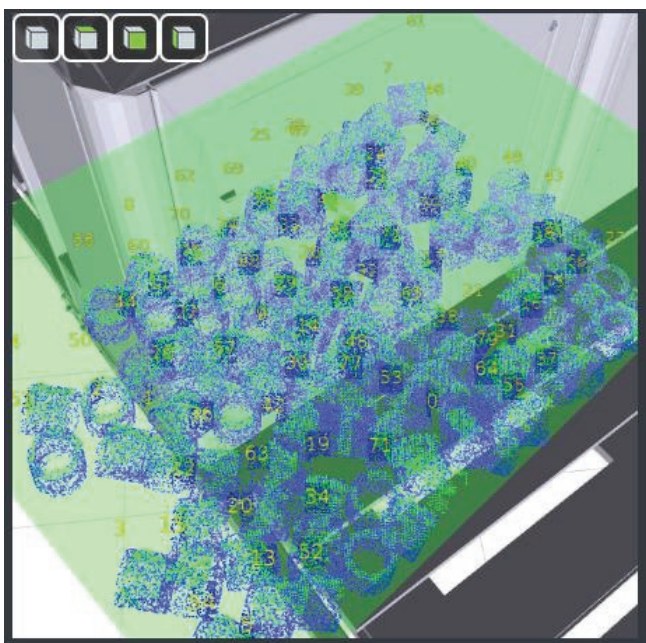
omogoča tudi napovedovanje orientacij objekta (Slika 2) kar pohitri lokalizacijo v naslednjem koraku.



Slika 2: Napovedovanje orientacije objektov z nevronske mreže

2.2 Lokalizacija objektov

Segmentacijska področja slike iz detekcijske faze se v naslednjem koraku uporabi za segmentacijo oblaka točk. Segmentiran del oblaka točk vsakega posameznega detektiranega objekta se uporabi za tridimenzionalno poravnavo površine oblaka točk modela objekta. Lokacija poravnane modela za vsak posamezen objekt predstavlja njegovo lokacijo v prostoru (Slika 3).



Slika 3: Lokalizirani objekti v zaboji

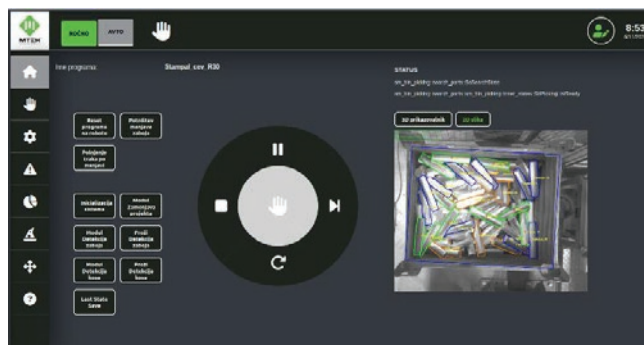
2.3 Generiranje robotskih poti

Za vsak lokaliziran objekt je potrebno generirati izvedljivo robotsko pot njegovega pobiranja. Na modelu objekta so predhodno definirane obstoječe točke prijemanja (Slika 6) objekta. Lokacije objektov se s kalibracijsko transformacijo kamere glede na robota preračuna v koordinatni sistem robota, ter s seznamom točk pobiranja izračuna predlagane položaje teh točk. S pomočjo kinematičnih podatkov robota in prijemala se z inverzno kinematiko za točko pobiranja preveri njena dosegljivost in izvedljivost robotske poti do pobiralne točke. Za gibanje po uporabljajo linearni gibe, ker so kompatibilni z različnimi vrstami robotov. Za vsako rešitev poti se preveri tudi preseganje omejitev gibanja v sklepih in bližine singularnosti.

Kinematično rešitev pobiralne poti mora biti izvedena brez trkov. Kar se preveri s pomočjo geometrijskih modelov oblike prijemala in robota, ter zajetimi podatki trenutnega zaboja in njegove vsebine. V preverjanje poti je mogoče vključiti dele robotske celice, ki so zaradi bližini potencialni za trke. Večino funkcionalnosti je implementiranih z ROS2 knjižnico MoveIt2 [3].

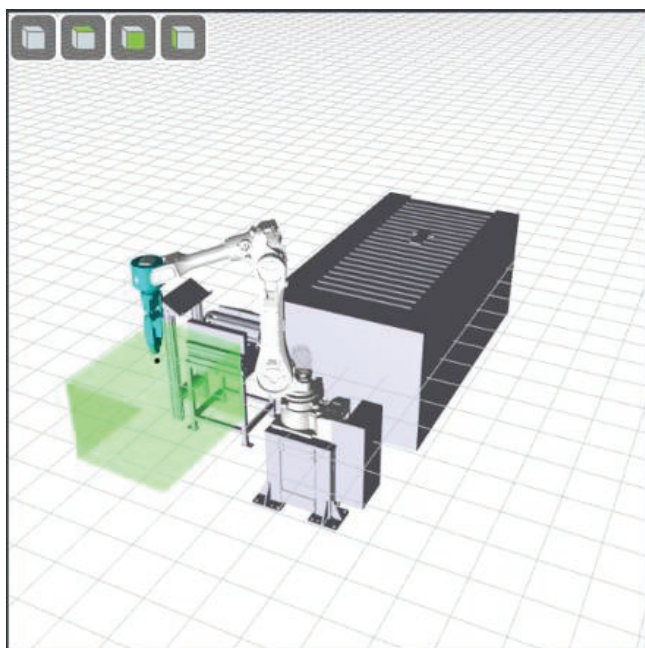
2.4 Grafični vmesnik in geometrijski podatki objekta ter prijemala

Spletni grafični vmesnik je razvit kot sodobna spletna stran. Strukturo vmesnika sestavlja glavni prikazovalni zaslon, ki omogoča uporabniku spremljanje vsebine posameznih menijev in interakcijo s sistemom. Navigacija med meniji poteka prek stranske izbire, ki omogoča hitro preklapljanje med različnimi funkcionalnostmi. Vmesnik vključuje tudi orodno vrstico, kjer lahko uporabnik izbira režim delovanja sistema, izvaja prijavo uporabnika ter spremlja trenutno stanje robotske celice (Slika 4).



Slika 4: Osnovni meni grafičnega vmesnika

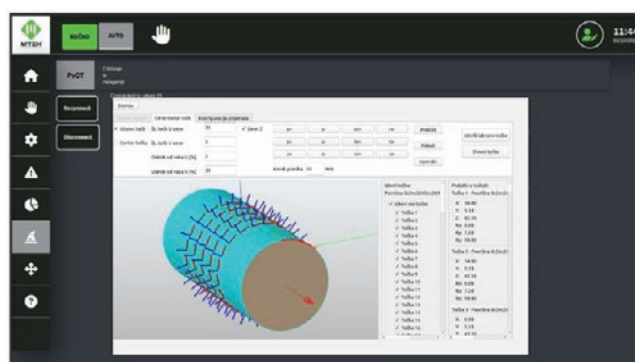
Na začetni meni spletnega grafičnega vmesnika je vključen prikaz 2D slike zajetih kosov. Slika se dinamično posodablja v času izvajanja, glede na uspešnost lokalizacije kosov, kar omogoča hitro zaznavanje morebitnih napak v procesu detekcije in njihovo takojšnjo odpravo (Slika 4). Prikaz 2D slike se lahko zamenja s 3D prikazovalnikom, ki omogoča podroben vpogled v stanje robotskega sistema med delovanjem. Znotraj 3D vizualizacije je prikazan STL model robotske celice, kar uporabniku omogoča boljše razumevanje delovnega okolja. Poleg tega se dinamično prikazuje položaj in dimenzije zaboja, kot jih zazna 3D kamera, kar omogoča spremljanje sprememb v okolju v času izvajanja (Slika 5).



Slika 5: Tridimenzionalni prikaz robotske celice, zaznanega območja zaboja in naslednje pozicije pobiranja s robotom

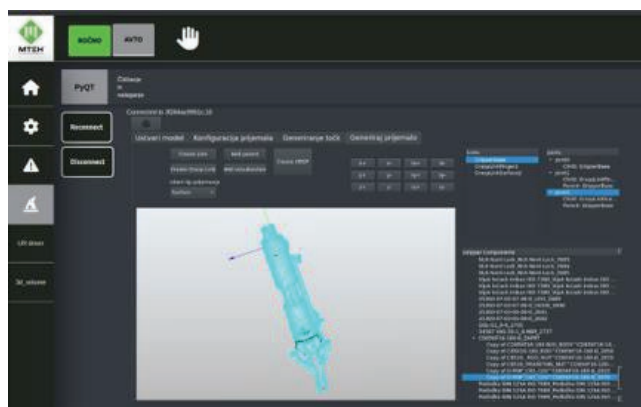
Poleg osnovnega nadzora lahko uporabnik spreminja parametre, povezane z delovanjem robotske celice, kar omogoča prilagoditev sistema glede na specifične zahteve proizvodnega procesa. Z naročanjem na podatke, objavljene na ROS temah, lahko v času izvajanja spremlja stanje stroja, spremlja ključne operativne parametre ter diagnosticira napake in odzive sistema.

Grafični vmesnik omogoča definiranje CAD modela kosa ter določitev pobirnih točk na modelu objekta z namensko aplikacijo, ki omogoča uporabniku, da interaktivno nastavi parametre CAD modela in izbere pobirne točke. Uporabnik lahko točke premika, briše ali generira nove, kar omogoča natančno prilagoditev za specifične naloge pobiranja. Aplikacija prav tako omogoča uvoz modelov v formatu STEP, kar povečuje njeno fleksibilnost za različne vrste kosov. Na koncu uporabnik določi ustrezno konfiguracijo prijemala, ki je odvisna od dimenzij obdelovanca, s čimer zagotovi stabilnost in učinkovit prijem med manipulacijo.



Slika 6: Definiranje točk pobiranja na objektu

Grafični vmesnik omogoča tudi definiranje modela prijemala, kjer se definira točka vpetja na robota, vse točke prijemanja s njihovimi lastnostmi in obliko za preverjanje trkov.



Slika 7: Definiranje podatkov prijemala

Kot dodatno funkcionalnost spletni grafični vmesnik omogoča dostop do parametrov, povezanih z definiranimi projekti za specifične kose pobiranja. Uporabnik lahko za vsak projekt določi tip obdelovanca in mu dodeli ustrezne parametre, ki so ključni za učinkovito pobiranje. Ti parametri, kot so dimenzije, pobirne točke, dimenzije zaboja so shranjeni v podatkovni bazi

2.5 Podporne funkcije

Sistem omogoča enostavno in hitro menjavo med že konfiguriranimi objekti pobiranja. Menjava zahteva spremembo nastavitve večih vzporednih programov iz baze podatkov, zato v ozadju poskrbi program za upravljanje podatkov. Glede na definicijo projekta prebere in nastavi posamezne segmente podatkov v ROS2 vozlišča ali shrani trenutne nastavitve kot vzorec. Omogoča tudi izvoz in uvoz podatkov celotnega projekta med fizičnimi sistemi.

Delovanje sistema zahteva komunikacijo s ostalimi deli proizvodnega sistema kot so robot, programabilni logični krmilnik (PLK), vhodno/izhodne enota ali SCADA sistem. Zato sistem vsebuje komunikacijski vmesnik, ki omogoča komunikacijo med ROS2 programi in zunanjo periferijo preko različnih industrijskih protokolov. Komunikacija na strani ROS2 je enaka ne glede na izbrani komunikacijski protokol, ki se ga pa na strani periferije ob prvi implementaciji pripravi v naprej pripravljeno strukturo. Vsaka posamezna instanca komunikacije je kasneje definirana samo s konfiguracijsko datoteko. Trenutno vmesnik omogoča komunikacijo preko TCP/UDP protokola v obliki znakov ali bitov, ter komunikacijo preko SNAP7 protokola [4].

Po lokalizaciji objektov s pomočjo oblaka točk v koordinatnem sistemu kamere, je potrebno pozicije objektov transformirati v koordinatni sistem robota. To transformacijsko matriko je potrebno izračunati s kalibracijo robotske roke in kamere. Za kalibracijo poskrbi algoritem na osnovi detekcije stožca v oblaku točk. Glede na zaznane pozicije stožca v oblaku točk in prebranimi pozicijami robota, se hkrati izračunata transformacijska matrika vpetega stožca in kalibracijska matrika med robotsko roko in kamero.

3 INTEGRACIJA V PROIZVODNJO

Razvit sistem se je integriral na proizvodni liniji za nalaganje narezkov v procesu kovanja. V prvem primeru (*Slika 10*) nalaga jeklene palice okroglega prereza s pomočjo magnetnega prijema. V drugem primeru (*Slika 8*) nalaga aluminijaste palice okroglega in eliptičnega prereza s

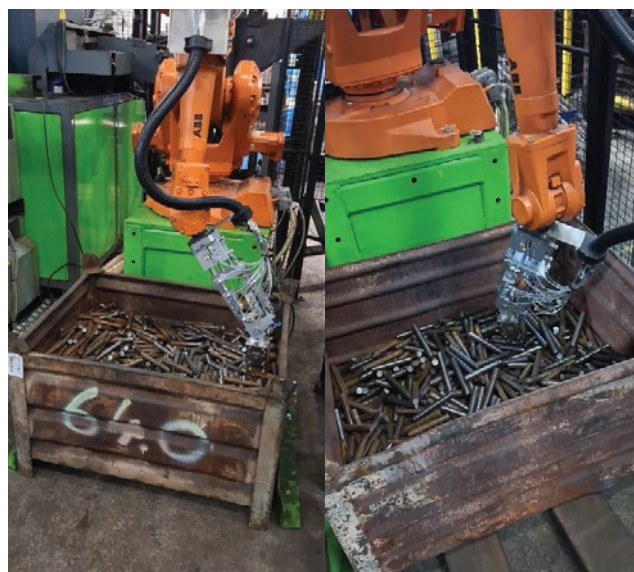
vakuumskim prijemalo. Konfiguracija za pobiranje objekta novih dimenzij obeh oblik je pripravljena parametrično in izvedljiva takoj na proizvodni celici. Prav tako je sistem integriran v kolaborativno modularno celico (*Slika 9*), kjer pobira jeklene kratke cevaste oblike s kombiniranim prijemalom vakuumskih seskov in robotskih prstov. V vsaki izmed treh integracij se uporablja drugačen robot, kamera in oblika prijema.



Slika 8: Pobiranje aluminijastih palic okroglega in eliptičnega preseka v proizvodnji



Slika 9: Integracija sistema v modularno kolaborativno celico



Slika 10: Pobiranje jeklenih palic v proizvodnji

3 SKLEP

Sistem je bil uspešno uporabljen v aplikacijah s različnimi roboti, tipi kamer in prijemale, kar omogoča njegova modularnost strojne opreme. Programska modularnost enostavnejšo integracijo programskih knjižnic iz različnih področji in vzporedno delovanje algoritmov kar pohitri delovanje sistema.. Sistem je sposoben je zaznati reflektivne objekte relativno majhne glede na področja pobiranja, ker kaže na robustnost pristopa uporabe nevronske mreže za detekcijo objektov.

Viri:

- [1] D. Buchholz, »Bin-Picking New Approaches for a Classical Problem«, Braunschweig, Nemčija, 2014
- [2] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, W. Woodall, “Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild,” Science Robotics vol. 7, May 2022.
- [3] David Coleman, Ioan A. Şucan, Sachin Chitta, Nikolaus Correll, Reducing the Barrier to Entry of Complex Robotic Software: a MoveIt! Case Study, Journal of Software Engineering for Robotics, 5(1):3–16, May 2014.
- [4] Snap7. (n.d.). Snap7 project homepage. Retrieved April 9, 2025, from <https://snap7.sourceforge.net/>

INTELLIMAN: UMETNA INTELIGENCA ZA AVTOMATIZACIJO SESTAVLJANJA KABELSKIH SNOPOV

Žiga GOSAR¹, Luca PETAN¹, Gianluca PALLI², Salvatore PIROZZI³

¹ELVEZ, d.o.o.

²Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

³Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"

IZVLEČEK

Avtomatizacija sestavljanja kabelskih snopov predstavlja izziv zaradi fleksibilnosti in variabilnosti komponent. Projekt IntelliMan razvija robotski sistem, izboljšan z umetno inteligenco, ki omogoča natančno in zanesljivo vstavljanje pokovanih vodnikov v konektorje v avtomobilski industriji. Sistem vključuje robotsko roko UR5e z Robotiq Hand-E prijemalom s senzorji in kamero OAK1 RGB za prepoznavo objektov. Z uporabo naprednih AI algoritmov sistem v realnem času ocenjuje oblike žic, njihove orientacije in sile potrebne za vstavljanje. Preizkusi, izvedeni v podjetju ELVEZ, potrjujejo visoko stopnjo uspešnosti sistema ter znatno izboljšano učinkovitost v primerjavi s tradicionalnimi metodami. Prilagodljivost in modularna arhitektura sistema omogočata njegovo uporabo v širšem industrijskem okolju.

1 UVOD

Avtomatizacija sestavljanja kabelskih snopov je dolgo predstavljala izziv v avtomobilski industriji. Kabelski snopi, sestavljeni iz več žic in konektorjev, so ključni za prenos električnih signalov in energije v sodobnih vozilih. Kljub napredku v robotski avtomatizaciji je zaradi fleksibilne in spremenljive narave žic popolna avtomatizacija teh postopkov ostala tako tehnično kot tudi ekonomsko zahtevna.

Tradicionalni postopki sestave se v veliki meri zanašajo na človeško delo, kar je časovno potratno, drago in pogosto povzroča napake in nedoslednosti.

V tem prispevku predstavljamo robotski sistem, okrepljen z umetno inteligenco, ki je zasnovan za reševanje kompleksnosti pri sestavljanju kabelskih snopov. Z uporabo naprednih tehnik umetne inteligence sistem omogoča avtomatizirano rokovanje in vstavljanje fleksibilnih žic v konektorje – nalogo, ki zahteva visoko natančnost in prilagodljivost.

Osnovni sestavni deli sistema so robotska roka UR5e, prijemalo Robotiq Hand-E s senzoriranimi

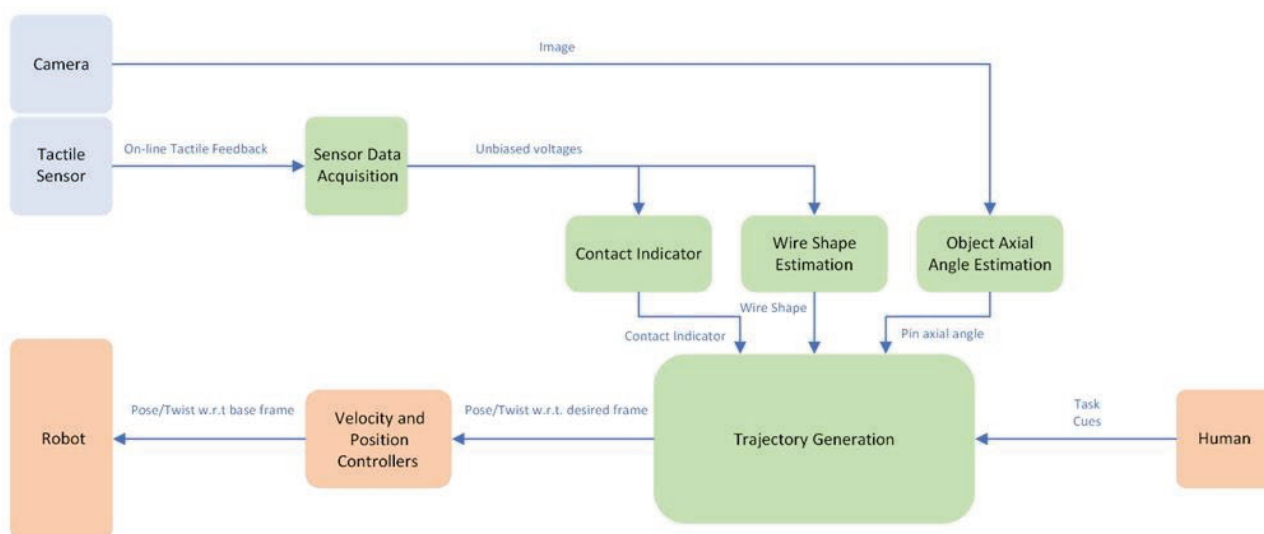
prsti in RGB kamera OAK1 za natančno zaznavo objektov in oceno položaja.

Umetna inteligenca (UI) je ključna za upravljanje nepredvidljivosti oblik in usmerjenosti žic. S pomočjo algoritmov strojnega učenja sistem v realnem času ocenjuje oblike žic in potrebne sile, kar omogoča natančno manipulacijo in vstavljanje.

Raziskavo smo izvedli v sodelovanju s podjetjem ELVEZ, kar omogoča praktično in industrijsko relevantno preverjanje učinkovitosti sistema.

Glavni prispevki tega članka so: prikaz možnosti uporabe umetne inteligence za izboljšanje robotske manipulacije pri zahtevnih sestavljajnih nalogah, in podrobna ocena delovanja sistema v industrijskem okolju.

Rezultati kažejo bistveno izboljšanje učinkovitosti in zanesljivosti, kar odpira vrata širši uporabi robotske avtomatizacije z umetno inteligenco pri prilagodljivih proizvodnih procesih.



Slika 1. Arhitektura modulov za vmesno validacijo, uporabljena v primeru uporabe

2 OPIS PRIPRAVE OBLIKE

Sistem združuje strojno in programsko opremo za doseganje natančnega rokovanja in vstavljanja žic v konektorje (glej sliko 1).

2.1 Strojna oprema

Strojna oprema je sestavljena iz robotske roke Universal Robots UR5e, ki zagotavlja potrebno gibčnost in natančnost za izvedbo naloge. Na robotsko roko je pritrjen prijemalnik Robotiq Hand-E s senzori opremljenimi prsti, ki sistemu omogoča natančen oprijem in manipulacijo z žicami. Poleg tega je v sistem vključena RGB kamera OAK1, ki skrbi za vizualno zaznavanje objektov in ocenjevanje njihove orientacije, s čimer se zagotovi pravilna poravnava med vstavljanjem.

2.2 Programska oprema

Programska oprema temelji na operacijskem sistemu Ubuntu 20.04 in uporablja ROS Noetic kot vmesno programsko plast, ki omogoča komunikacijo med različnimi komponentami in moduli. Arhitektura vključuje naslednje module:

Zajem podatkov s senzorjev: Ta modul obdeluje surove bajte iz mikrokontrolerja senzorja za izračun nepristranskih napetosti, ki

predstavljajo začetne podatke za nadaljnjo obdelavo.

Indikator stika: Modul izračuna indikatorje stika glede na silo, zaznane s taktilnimi senzori, kar sistemu omogoča zaznavanje in prilagajanje fizičnim interakcijam med manipulacijo.

Ocena oblike žice: Modul oceni obliko žice na podlagi podatkov iz taktilnih senzorjev, kar je ključno za natančno rokovanje in vstavljanje žic v konektorje.

Ocena aksialnega kota objekta: Na podlagi slik, zajetih s kamero, modul oceni orientacijo objekta in tako zagotovi pravilno poravnavo žice za vstavljanje.

Generiranje trajektorij: Modul na podlagi podatkov o položaju iz kamere in podatkov o obliki iz taktilnih senzorjev generira potrebne trajektorije za izvedbo naloge.

Regulatorja hitrosti in položaja: Ta dva regulatorja upravljata hitrost in položaj robotske roke glede na zelene parametre ter s tem zagotavljata gladko in natančno gibanje.

Merjenje človeške sile: Modul uporablja šestosni senzor sile in navora za merjenje sile, ki jo med fazo vstavljanja izvaja človek. Izmerjena sila

se normalizira, indikatorji stika pa se primerjajo za določitev pragov za vstavljanje in izvlek.

Ta celovita integracija strojne in programske opreme sistemu omogoča visoko natančno in zanesljivo izvajanje zahtevne naloge sestavljanja kabelskih snopov.

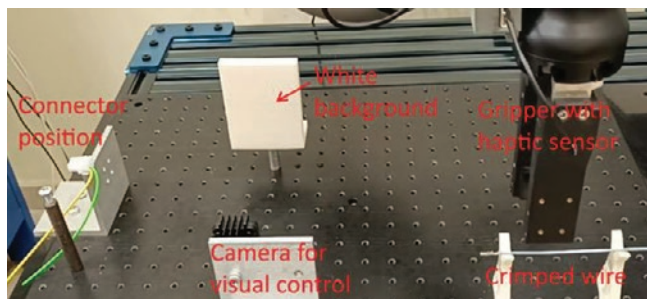
3 METODOLOGIJA

Sistem smo ovrednotili z dvema eksperimentalnima scenarijema:

- Scenarij 1: Konektor je fiksiran na znani lokaciji, žice se poberejo z znanih lokacij.
- Scenarij 2: Žice imajo spremenljive položaje, aksialni koti pini so neznani.

3.1 Scenarij 1

Konektor je fiksiran v znanem položaju, žice se poberejo iz znanih položajev z znano orientacijo. Potrebna je izvedba faze vstavljanja in preverjanje pravilnosti.



Slika 2: Scenarij 1

Med eksperimentom se žica pobere iz zbiralnika z znanim položajem in znanim aksialnim kotom pina. Žica se postavi pred konektor, nato pa se uporabi indikator dotika za izvedbo vstavljanja. Žica se potiska, dokler indikator dotika ne doseže praga $-0,4$ mm, kar zaklene pin v konektor. Nato se žica povleče, dokler indikator ne doseže praga $0,3$ mm, da se zagotovi pravilno zaklepanje. Slika 2 prikazuje eksperiment.

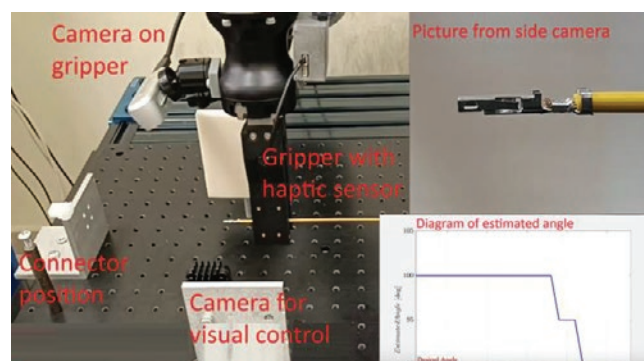
3.2 Scenarij 2

Konektor je fiksiran v znanem položaju, žice se poberejo iz posebej zasnovanega zbiralnika.

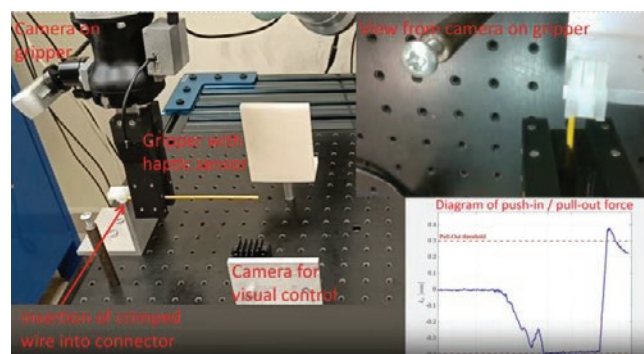
Potrebna je ocena orientacije pobrane žice za izvedbo vstavljanja in preverjanje pravilnosti.

Ta scenarij je bil ovrednoten v dveh primerih:

Scenarij 2a: Žica je pobrana iz zbiralnika z znano orientacijo, aksialni kot pina pa je neznan. Aksialni kot pina se oceni z uporabo modula "Ocena aksialnega kota objekta", pri čemer se žica postavi pred kamero. Kot se diskretizira z ločljivostjo 5 stopinj. Žico se rotira, dokler se ne doseže željeni aksialni kot pina. Nato se žica vstavi v konektor z enakim postopkom kot v scenariju 1. Sliki 3 in 4 prikazujeta postopek eksperimenta pred vstavljanjem žice v konektor.



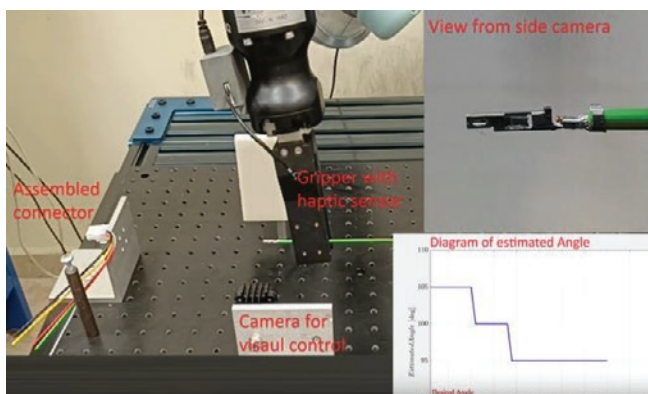
Slika 3. Scenarij 2a – Ocena aksialnega kota objekta pred vstavljanjem v konektor



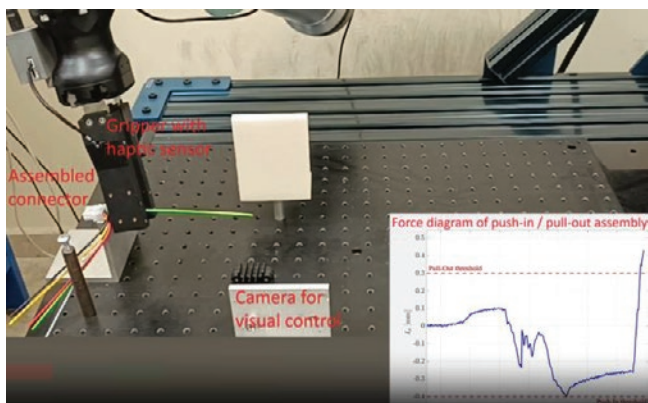
Slika 4. Scenarij 2a – Ocena aksialnega kota objekta pred vstavljanjem v konektor

Scenarij 2b: Gre za najzahtevnejši primer, saj sta tako položaj žice med prsti kot aksialni kot neznana. Postopek je enak kot v scenariju 2a. Žica se najprej postavi pred kamero in se izvede korekcija orientacije, nato robot rotira okoli osi žice, ocenjeno z modulom "Ocena oblike žice", dokler se ne doseže zeleni aksialni kot pina. Nato se žica vstavi v konektor z enakim postopkom kot

v scenariju 1. Sliki 5 in 6 prikazujeta postopek eksperimenta pred vstavljanjem žice v konektor.

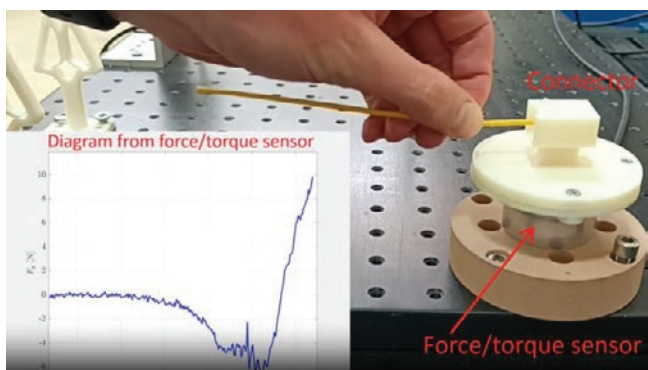


Slika 5. Scenarij 2b – Ocena aksialnega kota objekta pod kotom pred vstavljanjem v konektor



Slika 6. Scenarij 2b – Ocena aksialnega kota objekta pred vstavljanjem v konektor

Slika 7 prikazuje človeka, ki izvaja nalogo, in prikazuje postopek zbiranja podatkov z referenčnim senzorjem sile/navor med izvajanjem naloge s strani človeka.



Slika 7. Človek vstavi pokovan vodnik v konektor

4 REZULTATI

Naslednji ključni kazalniki uspešnosti (KPI) so bili ocenjeni:

- Enot na uro (UPH) – koliko kablov bi sistem uspešno vstavil v konektor v eni uri, kar ocenjuje učinkovitost sistema.
- Stopnja uspešnosti $R = np/no$, kjer je np število uspešno vstavljenih kablov, no pa skupno število kablov.
- Odstotek napak sistema na nalogo.

Tabela 1: KPI-ji eksperimenta

Scenarij	Enot na uro [kos/h]	Stopnja uspešnosti [%]	Napake sistema na nalogo [%]
1	144	100	< 5
2a	64	80	< 5
2b	48	60	< 5

Scenarij 1: Pokazal visoko učinkovitost in popolno stopnjo uspešnosti v nadzorovanih pogojih.

Scenarij 2a: Izkazal zanesljivo delovanje z nekaj spremenljivosti v osnih kotih pina.

Scenarij 2b: Poudaril izzive pri obravnavi popolnoma neznanih spremenljivk, a vseeno ohranil razumno stopnjo uspešnosti.

Rezultati kažejo, da sistem, okrepljen z umetno inteligenco, bistveno izboljša učinkovitost in zanesljivost sestavljanja kabelskih snopov v primerjavi s tradicionalnimi metodami. Zmožnost sistema, da v realnem času obravnava razlike v oblikah in usmerjenosti žic, predstavlja pomemben napredek. Kljub temu pa zapletenost popolnoma neznanih scenarijev (Scenarij 2b) poudarja potrebo po nadaljnem izpopolnjevanju algoritmov umetne inteligence in integracije senzorjev.

Modularna arhitektura sistema omogoča prilagodljivost različnim nalogam in okoljem, zaradi česar je primeren za širšo uporabo v prilagodljivih proizvodnih procesih.

5 ZAKLJUČEK

Robotski sistem, okrepljen z umetno inteligenco, za avtomatizacijo sestavljanja kabelskih snopov dokazuje izvedljivost uporabe umetne inteligence pri reševanju zahtevnih manipulativnih nalog v industrijskem okolju. Naše raziskave kažejo na pomembne izboljšave v produktivnosti in doslednosti, kar poudarja potencial rešitev, ki temeljijo na umetni inteligenci, za revolucijo v prilagodljivih proizvodnih procesih. V prihodnje bo delo usmerjeno v izboljšanje zmogljivosti sistema v še zahtevnejših scenarijih ter širitev njegove uporabnosti na druge industrijske naloge.

Viri:

- [1] (Meattini et al., 2019) Meattini, R., Biagiotti, L., Palli, G., De Gregorio, D., & Melchiorri, C. (2019, June). A control architecture for grasp strength regulation in myocontrolled robotic hands using vibrotactile feedback: Preliminary results. In 2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) (pp. 1272-1277). IEEE.
- [2] (Todorov et al., 2012) Todorov, E., Erez, T., & Tassa, Y. (2012). MuJoCo: A physics engine for model-based control. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 5026–5033. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6386109>
- [3] (Zakka et al., 2022) Zakka, K., Tassa, Y., & MuJoCo Menagerie Contributors. (2022). MuJoCo Menagerie: A collection of high-quality simulation models for MuJoCo [Computer software]. http://github.com/google-deepmind/mujoco_menagerie
- [4] (Valevicius et al., 2018) Valevicius, A. M., Boser, Q. A., Lavoie, E. B., Murgatroyd, G. S., Pilarski, P. M., Chapman, C. S., Vette, A. H., & Hebert, J. S. (2018). Characterization of normative hand movements during two functional upper limb tasks. PLOS ONE, 13(6), e0199549. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199549>
- [5] (Marinelli et al., 2023) Marinelli, A., Boccardo, N., Canepa, M., Domenico, D. D., Semprini, M., Chiappalone, M., Laffranchi, M., De Michieli, L., & Dosen, S. (2023). A Novel Method for Vibrotactile Proprioceptive Feedback Using Spatial Encoding and Gaussian Interpolation. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 70(12), 3354–3365. <https://doi.org/10.1109/TBME.2023.3285850>
- [6] (Egle and Domenico et al., 2023) Egle, F., Di Domenico, D., Marinelli, A., Boccardo, N., Canepa, M., Laffranchi, M., De Michieli, L., & Castellini, C. (2023). Preliminary Assessment of Two Simultaneous and Proportional Myocontrol Methods for 3-DoFs Prostheses Using Incremental Learning. 2023 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICORR58425.2023.10304813>
- [7] (Brooke et al., 1996) Brooke, J. & others. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. Usability Evaluation in Industry, 189(194), 4–7.
- [8] (Hart & Staveland, 1988) Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Advances in Psychology* (Vol. 52, pp. 139–183). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- [9] Plansys2, ROS2 planning system. F. Martín - <https://plansys2.github.io/>
- [10] Fox, M., & Long, D. (2003). PDDL2. 1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains. *Journal of artificial intelligence research*, 20, 61-124.
- [11] MoveIt! Motion Planning Framework for ROS. Picknik Robotics <https://moveit.ros.org/>
- [12] ZeroMQ open-source universal messaging library - <https://zeromq.org/>

Acknowledgments

This work was supported by the European Commission within H2020 IntelliMan Project (GA no. 101070136).

OD VARNOSTI STROJEV DO KIBERNETSKE VARNOSTI

Primož BESTIJANIČ
ControlTech d.o.o.

IZVLEČEK

Na predavanju bomo predstavili ključne varnostne zahteve za stroje po trenutno veljavni direktivi 2006/42/ES in se osredotočili na novosti, ki jih prinaša Uredba o strojih 2023/1230/EU, ki bo v veljavo stopila v začetku leta 2027. Med pomembnimi spremembami so zahteve za obravnavo kibernetičnih tveganj, ki so zdaj enakovredna funkcionalni varnosti, ter prilagoditve za vključevanje avtonomnih funkcij. Obravnavali bomo tudi celoten življenjski cikel strojev in ponudili praktične napotke za učinkovito prilagajanje novim varnostnim zahtevam.

1 UVOD

Danes se v svetu industrije vse bolj pogosto srečujemo z konceptom strojne varnosti. Tukaj se najprej pojavita vprašanji kaj to sploh je in koga vse mora varnost strojev zanimati. Sistem strojne varnosti mora zagotoviti varnost delavcev in oseb, ki stroj uporabljajo ali pridejo z njim v stik. Zanimati pa more vse, ki so s strojem tako ali drugače povezani od razvoja in zasnove do končnega uporabnika.

Danes je znotraj Evropske unije v veljavi še direktiva 2006/42/ES. Z 20.1.2027 pa jo bo zamenjala uredba 2023/1230, kar pomeni, da bo znotraj EU od januarja 2027 veljala enotna uredba brez sprememb na nivoju posameznih držav.

2 UREDBA EVROPSKE UNIJE

Nova uredba bo prinesla kar nekaj sprememb in sicer:

- Po novem bo v veljavi uredba in ne direktiva.
- Povečuje vlogo in odgovornost stroje graditeljem.
- EU izjava o skladnosti
- Uvedba digitalne varnosti in umetne inteligence
- Ta direktiva sedaj združuje strojno in kibernetično varnost
- Med uvedbo nove uredbe in koncem veljave stare direktive bo prehodno obdobje
- Strožji sistem za nadzor spremljanja trga
- Vsebuje vsebino harmoniziranih standardov

Ko govorimo o harmoniziranih standardih znotraj strojne varnosti so v veljavi standardi na spodnji sliki.

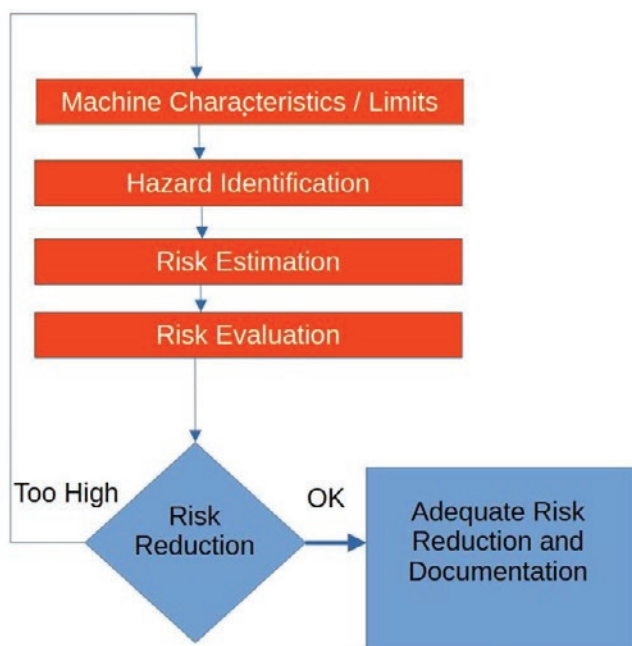
EN ISO 12100 Safety of machinery Basic terms, general principles for design	
EN ISO 13849-1 Safety of machinery Safety-related parts of control systems	IEC 62161 Safety of machinery Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems
IEC 60204-1 Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements	
Machine safety standards with detailed safety requirements for specific machines or a group of machines (ISO 10218 for robots,...)	

Slika 1 Veljavni standardi na področju strojne varnosti

Pri zasnovi sistema strojne varnosti je potrebno slediti naslednjemu zaporedju:

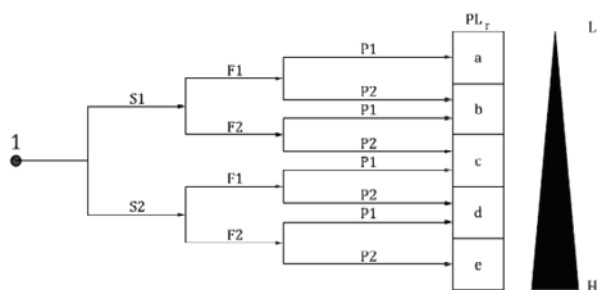
- Dodelitev finančnih sredstev
- Ocena tveganja
- Specifikacija varnostnih zahtev
- Končna ocena tveganja
- Priprava programa
- Validacija in verifikacija aplikacije
- Urejanje dokumentacije

Ena izmed najpomembnejših dejavnosti pri zasnovi varnostnega sistema je definitivno ocena tveganja. Kako se ocene lotiti je definirano z standardom EN ISO 12100 in je predstavljeno tudi na spodnji sliki.



Slika 2 Potek ocene tveganja

Pri zasnovi varnostnega sistema je zelo pomembna tudi določitev varnostnega nivoja. Kako varnostni nivo določimo je prikazano na sliki 3.



Slika 3 Varnostni nivoji

Na zgornji sliki najdemo nekaj različnih parametrov tveganj in sicer:

I. Resnost poškodbe S :

- S1 - rahlo tveganje
- S2 - zelo tvegano

II. Pogostost in/ali čas izpostavljenosti nevarnosti F :

- F1 - redko do manj pogosto in/ali čas izpostavljenosti je kratek
- F2 - pogosto do neprekinjeno in/ali čas izpostavljenosti je dolg.

III. Omejitev škode ali možnost izogibanja P :

- P1 - možno pod določenimi pogoji
- P2 – malokdaj mogoče

Ko pridemo do izračunanega varnostnega nivoja lahko na podlagi tega izberemo tudi komponente. Na koncu pa lahko celoten sistem preverimo s programskim orodjem, kot je SISTEMA s katerim dobimo odgovor ali smo sistem zasnovali tako kot zahteva uredba.

2 DIREKTIVA NIS2

Znotraj EU je na področju kibernetike varnosti od 18. oktobra 2024 veljavna direktiva NIS2. NIS2 zahteva vzpostavitev minimalnega nabora ukrepov na področju kibernetike varnosti, ki jih morajo vse članice zahtevati za subjekte znotraj svojih meja. To velja predvsem za subjekte kritične infrastrukture.

NIS2 je nadgradnja dosedanje direktive NIS in je bila uvedena kot odgovor na vse bolj pogoste kibernetike napade znotraj območja EU.

V Sloveniji NIS2 še ni v veljavi saj jo je treba prenesti v zakonodajo znotraj vsake posamezne države. V Sloveniji se bo to zgodilo s sprejetjem zakona o informacijski varnosti ZinfV-1. Zakon predvideva tako prenos določb direktive, kot tudi vzpostavitev posebnih nacionalnih določb o ohranitvi ali izboljšavi obstoječih določil, ki trenutno urejajo sistem kibernetike varnosti znotraj Republike Slovenije.

Znotraj NIS2 so subjekti razvrščeni v 2 glavni kategoriji in sicer subjekte kritične in subjekte pomembne infrastrukture.

Panoge, ki so klasificirane kot kritična infrastruktura so:

- Energetika
- Zdravstvo in farmacija
- Vodovod in kanalizacija
- Transport
- Finance
- Javna uprava
- Digitalna infrastruktura
- Vesoljska tehnologija

Med pomembne pa spadajo:

- Proizvodnja medicinskih naprav, električne in elektronske opreme.
- Proizvodnja hrane
- Kemična proizvodnja
- Raziskave
- Ponudniki digitalnih storitev
- Pošta
- Upravljanje z odpadki

Z NIS2 prihajajo v veljavo tudi ostrejšše kazni za kršitelje in sicer kazen do €10,000,000 za subjekte panog kritične infrastrukture ali vsaj 2% letnega prihodka. Za pomembne pa je velja kazen €7,000,000 ali vsaj 1,4 % letnega prihodka.

3 SKLEP

Prav tako se z novo direktivo spreminja postopek poročanja incidentov, ki je bilo do sedaj zelo skopo definirano. NIS 2 zahteva zgodnjo poročanje o incidentu krovni državni organizaciji znotraj prvih 24 ur po detekciji vdora. Znotraj 72 ur pa je potrebno krovni organizaciji posredovati tudi prvotno poročilo o incidentu. Ta mora vsebovati oceno resnosti incidenta in vpliv, ki ga ta ima na delovanje organizacije. V roku 30 dni po incidentu pa mora subjekt krovni organizaciji posredovati še končno poročilo o incidentu.

Viri:

- [1] https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/safebk-rm002_-en-p.pdf
- [2] <https://www.nis-2-directive.com/>
- [3] https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sp/oem-sp123_-en-p.pdf

Z DIGITALNIM DVOJČKOM DO OPTIMALNEGA TLOORISA IN LOGISTIKE PROIZVODNJE PRI ZDRUŽEVANJU PROIZVODNIH AKTIVNOSTI V PODJETJU UNIOR

Hugo ZUPAN¹, Boštjan JEGRIŠNIK², Uroš MATAVŽ², Niko HERAKOVIČ³

¹ DIGITEH d.o.o.

² UNIOR d.d.

³ Laboratorij LASIM, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

IZVLEČEK

Prispevek predstavlja uporabo digitalnega dvojčka kot ključnega orodja za optimizacijo tloorisa in logistike proizvodnje v podjetju UNIOR. Zaradi zaprtja ene izmed proizvodnih enot je bilo potrebno preseliti več strojev in tehnologij na dve obstoječi lokaciji, pri čemer je bil cilj zagotoviti učinkovito razporeditev brez dodatnih gradbenih posegov. Z uporabo digitalnega dvojčka smo izvedli natančne simulacije, analizirali več scenarijev in optimizirali materialne tokove. Rešitev je omogočila povečanje števila izvedenih operacij za več kot 320 %, skrajšanje poti materialnih tokov za 43 % in odpravo potrebe po zunanjih logističnih storitvah. Na koncu projekta smo optimizirano rešitev primerjali z začetno postavitvijo, ki jo je predhodno predlagal UNIOR, in ugotovili, da pristop z digitalnim dvojčkom vodi do bistveno boljših rezultatov na področju učinkovitosti, izrabe prostora in zmanjšanja logističnih tokov. Prispevek prikazuje konkreten primer uspešne digitalne preobrazbe v industrijskem okolju.

1 UVOD

V okviru projekta smo izvedli optimizacijo proizvodnega procesa v podjetju UNIOR d.d., divizija ročno orodje, z uporabo digitalnega dvojčka. Zaradi strateškega zaprtja obrata v Starem trgu je bilo potrebno reorganizirati proizvodnjo in preseliti stroje na dve preostali lokaciji v Zrečah in Vitanju.

Cilj optimizacije je bil zagotoviti učinkovito razporeditev proizvodnih kapacitet, izboljšati materialne tokove in maksimizirati izrabo razpoložljivega prostora, pri čemer je bilo ključno preseliti čim več strojev na način, da ni bilo potrebno na obstoječih lokacijah izvajati dodatnih plavajočih temeljev. Digitalni dvojček je omogočil natančno analizo različnih scenarijev in izbiro najbolj optimalne rešitve za izboljšanje proizvodne učinkovitosti in zmanjšanje logističnih stroškov.

2 IZZIVI IN PRILOŽNOSTI

Pred optimizacijo je UNIOR proizvajal ročno orodje na štirih ločenih lokacijah: Zreče, Vitanje, Lenart in Stari trg. Lokacija Stari trg je bila

logistično zahtevno povezana, kar je predstavljalo izziv pri transportu produktov med lokacijami ter usklajevanju podpornih procesov in delovnih nalog (Slika 1).



Slika 1: Transportne poti med različnimi lokacijami.

Zato je bilo potrebno izvesti strateško selitev strojev, tehnologij in proizvodnih procesov na dve obstoječi lokaciji (Zreče in Vitanje), pri čemer je bil ključen cilj optimizacija tloorisov in izboljšanje materialnih tokov. V prvi fazi projekta smo si vse lokacije podrobno ogledali, da smo bolje razumeli

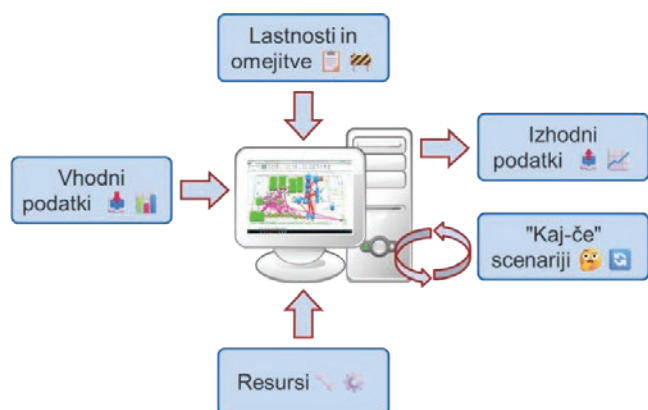
obstoječe stanje in določili ključne izzive, s katerimi smo se soočali pri preselitvi proizvodnje.

3 PROCES OPTIMIZACIJE

Optimizacija proizvodnega procesa je potekala v naslednjih fazah:

3.1 Analiza obstoječega stanja

Najprej smo analizirali materialne tokove, logistične poti in razporeditev strojev. S pomočjo digitalnega dvojčka smo zbrali podatke o trenutnem stanju in identificirali ključne omejitve. V digitalni dvojček (Slika 2) smo vnesli vse potrebne proizvodne podatke, vključno s tlorisi, podatki o resursih, dimenzijami vseh strojev, podatki o vseh delovnih nalogih in operacijah, ki so se izvajale v opazovanem časovnem obdobju, ter določene lastnosti in ostale ključne omejitve.



Slika 2: Preslikava realnega sistema v digitalnega dvojčka.

S strani Uniorja smo dobili seznam vseh strojev in tehnologij, ki bi jih radi preselili iz Starega trga na novi lokaciji. Na koncu je bilo skupno število strojev, ki smo jih preselili 29.

3.2 Simulacija možnih rešitev

Na podlagi zbranih podatkov smo v digitalnem dvojčku modelirali različne »kaj-če« scenarije preselitve strojev in optimizacije materialnih tokov. Ključni kriteriji za izbiro optimalne rešitve so vključevali:

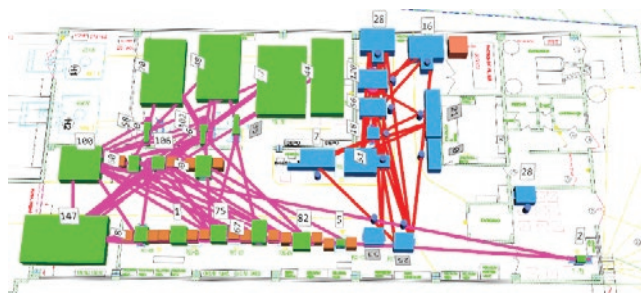
- **Materialne tokove:** zmanjšanje nepotrebnih premikov materiala.

- **Prostorsko učinkovitost:** boljši izkoristek proizvodnih zmogljivosti.
- **Fleksibilnost:** prilagodljivost na bodoče proizvodne zahteve.
- **Minimalne potrebe po novih temeljih:** stroji so postavljeni tako, da je bilo potrebno zgraditi samo 1 temelj.
- **Optimalna postavitev strojev:** stroji so razporejeni tako, da en delavec lahko upravlja več strojev.
- **Združevanje tehnoloških družin:** stroji s podobnimi procesi so postavljeni čim bližje skupaj.
- **Minimalne spremembe obstoječih tlorisov:** optimizacija je bila izvedena z minimalnimi prilagoditvami obstoječih postavitvev.

Rešitve smo validirali skupaj z ekipo UNIOR-ja, tako prek spletnih sestankov kot tudi v živo. Proces je bil iterativen, saj smo skozi več ponovitev iskali optimalno rešitev. Vsako simulirano postavitev smo analizirali, ocenili njeno učinkovitost in na podlagi dobljenih rezultatov sprejeli končne odločitve v dogovoru z ekipo UNIOR-ja.

3.3 Izbor optimalne rešitve

Na podlagi rezultatov simulacij in izvedenih delavnic smo določili optimalno rešitev, ki je omogočila umestitev strojev iz Starega trga na lokaciji Vitanje (Slika 3) in Zreče (Slika 4). S pomočjo digitalnega dvojčka smo analizirali več možnosti in izbrali postavitev, ki omogoča visoko proizvodno učinkovitost, krajše transportne poti ter boljšo izrabo prostora. Upoštevali smo tudi ergonomске dejavnike in omogočili racionalnejšo organizacijo delovnih mest.



Slika 3: Optimiziran tloris Vitanje.



Slika 4: Optimiziran tloris Zreče.

4 REZULTATI OPTIMIZACIJE

Pred začetkom projekta je UNIOR že sam pripravil ročne tlorise za obe lokaciji, Zreče in Vitanje, kjer so predvideli preselitev strojev. V zaključni fazi optimizacije smo naše simulacije in predlagane rešitve primerjali s temi obstoječimi tlorisi, da smo preverili skladnost rešitev ter dodatne možnosti za optimizacijo. S tem smo zagotovili, da smo upoštevali vse relevantne dejavnike in dosegli najboljšo možno razporeditev proizvodnih kapacitet.

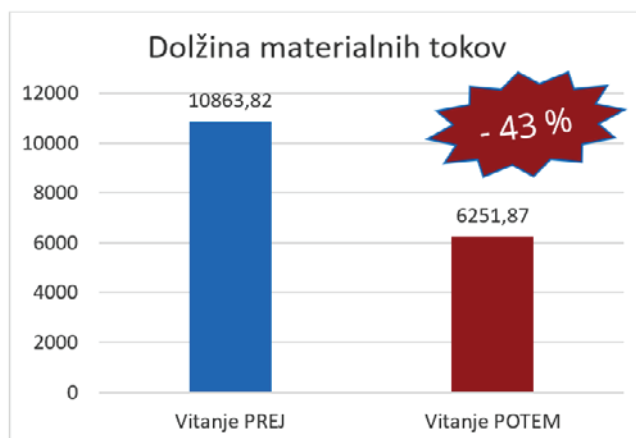
4.1 Vitanje

Primerjava ročno pripravljene tlorisa, ki ga je UNIOR izdelal pred začetkom projekta, s končno rešitvijo v Vitanju (Slika 5), razvito s pomočjo digitalnega dvojčka, je pokazala naslednje izboljšave:

- Povečanje števila preseljenih strojev z **10** na **12**.
- Skrajšanje dolžine materialnih tokov za opazovano obdobje za **43 %** (Slika 6).
- Boljša izraba prostora in optimizacija proizvodnih operacij.



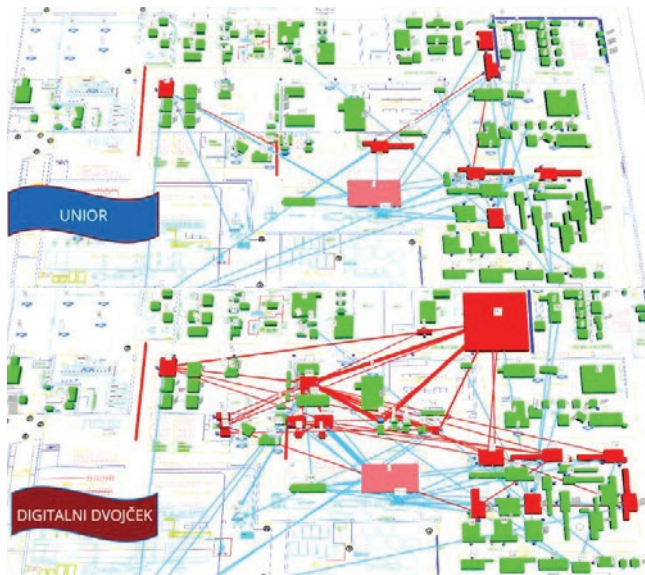
Slika 5: Primerjava tlorisov UNIOR/DD – Vitanje.



Slika 6: Skrajšanje dolžine materialnih tokov za opazovano obdobje za -43 %.

4.2 Zreče

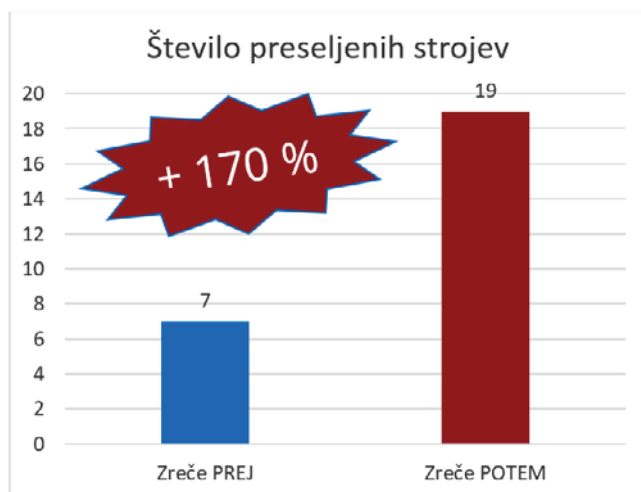
Primerjava ročno pripravljene tlorisa, ki ga je UNIOR izdelal pred začetkom projekta, s končno rešitvijo, razvito s pomočjo digitalnega dvojčka, je pokazala pomembne razlike. Na sliki (Slika 7) je razvidno, da ima novi tloris bistveno več povezav med stroji, kar je posledica večjega števila uspešno preseljenih strojev.



Slika 7: Primerjava tlorisov UNIOR/DD – Zreče.

Rezultati primerjave so naslednji:

- Povečanje števila preseljenih strojev s **7** na **19**.
- Rahlo povečanje dolžine materialnih tokov zaradi povečanega števila operacij.
- **Povečanje števila izvedenih operacij** na preseljenih strojih za **327 %**, kar pomeni občutno izboljšanje proizvodne zmogljivosti na enoto površine.



Slika 8: Povečanje števila preseljenih strojev za 170 %.

5 SKLEP

Projekt optimizacije v podjetju UNIOR je nazorno pokazal, kako lahko digitalni dvojček kot sodobno orodje bistveno prispeva k učinkoviti reorganizaciji proizvodnje. S podatkovno podprto analizo smo identificirali ozka grla, racionalno razporedili stroje in odpravili nepotrebne premike materiala, kar je vodilo do znatno bolj učinkovite proizvodnje.

Iterativni simulacijski postopek je omogočil oblikovanje tlorisov, ki so:

- izboljšali prostorsko razporeditev strojev,
- zmanjšali notranjo logistiko in potrebo po zunanjih prevozih,
- skrajšali poti in povečali izrabo delovnega prostora,
- ter omogočili večjo prilagodljivost prihodnjim spremembam.

Pomembna prednost je bila možnost testiranja različnih rešitev že v fazi simulacij. Tako smo skupaj z ekipo UNIOR izbrali najbolj uravnoteženo varianto, pri čemer smo upoštevali tudi ergonomijo, združevanje sorodnih tehnologij in minimalne prilagoditve obstoječe infrastrukture.

IloT INDUSTRIJSKI INTERNET STVARI KOT JEDRO ZELENIH PAMETNIH TOVARN

Gorazd RAKOVEC

Kompetenčni center za sodobne tehnologije vodenja,
VŠŠ, Kibernova

IZVLEČEK

V pametni tovarni današnjega časa so osnovni gradniki digitalni dvojčki. Ti v svojem jedru izvajajo sinhronizirano interakcijo med fizičnimi in virtualnimi sistemi, ki so prvotno vsi v 3D dimenzijah. Predvsem v kosovni proizvodnji so hitrosti procesov na strojih sorazmerno velike in delovni cikli kratki, zato je na primer 3D simulacija sistemov v realnem času že lahko problematična. Potreben je nek enostavnejši sistem, ki lahko sledi vsem hitrim procesom kosovne proizvodnje in se ga lahko glede na možnosti in potrebe nadgradi v kompleksnejši 3D digitalni dvojček. V kosovni proizvodnji se je uveljavil IloT Industrijski internet stvari kot sistem robnih računalnikov v sinhroni interakciji s fizičnimi sistemi ter asinhroni interakciji z računalništvom v jezeru, oblaku in z osebami preko XR sistemov, z namenom za simulacijo, optimiranje in inoviranje procesov pametne tovarne v zelenem okolju. IloT postaja temelj digitalizacije celotne proizvodnje kot jedra pametne tovarne in tudi zadnje čase na Kitajskem vse bolj popularne temne proizvodnje – dark production, ki jo je prva razvila in uvedla leta 1989 družba Brankamp GmbH v Nemčiji, pri nas pa jo je prva pričela izvajati družba Novi plamen d.o.o. iz Kroke od leta 2009.

1 UVOD

Leta 1997 je britanski inženir Kevin Ashton, soustanovitelj Auto-ID Centra na MIT, začel raziskovati radiofrekvenčno identifikacijo (RFID), ki bi fizičnim objektom omogočil povezavo prek mikročipov in brezžičnih signalov. V govoru leta 1999 je Ashton prvi na svetu skoval besedno zvezo "internet stvari". Mimogrede: izredno zanimivo je, kako Američani skrbijo za objavo, promocijo in spoštovanje imen svojih izumiteljev za vsako najmanjšo stvar, celo za besedno skovanko, kot je Internet of Things. Brez spoštovanja do avtorjev in izumiteljev ni inovacijske družbe, brez te pa ne višje dodane vrednosti.

Na začetku je šlo v bistvu za elektronsko nadgradnjo že znanega sistema črtnih kod. Že leta 1973 je IBM razvil UPC (Universal Product Code), ki je postal standard za avtomatsko identifikacijo vseh izdelkov. Leta 1974 so črtne kode bile prvič komercialno uporabljene v trgovinah. V 90 letih so črtne in tudi 2D kode (pr.: QR koda) postale ključna tehnologija v transportu, trgovini, zdravstvu, logistiki, knjižničnem sistemu in drugih industrijah za

povezavo fizičnih stvari, pa tudi živali, rastlin, itd. z informacijskimi sistemi in njihovo sledenje po vsem svetu. Na začetku je bil RFID zgolj avtomatska brezžična identifikacija predmetov, podobno kot črtne in 2D kode, a je tiskano ID tehnologijo prerasel, prerasel pa je tudi področje identifikacije stvari.

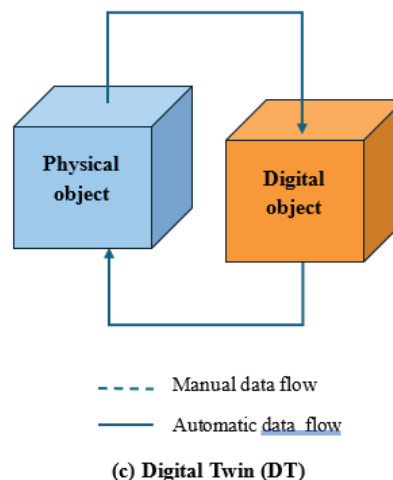
Leta 2012 je General Electric (GE) prvi začel promovirati izraz IloT (Industrial Internet of Things) v okviru svoje iniciative, imenovane "Industrial Internet". General Electric (GE) je začel razvijati "Industrial Internet" kot povezavo med industrijskimi napravami (turbine, generatorji, črpalke) in internetom, da bi omogočili boljše sledenje, analitiko, napovedno vzdrževanje, strateško pa je predvidel tudi uporabo teh podatkov za optimizacijo procesov v realnem času. IloT ni več elektronska koda pritrjena na izdelku, temveč je postal kar cel računalnik z merilniki, senzoriko, aktuatorji, regulatorji, povezan na izdelek na eni strani in na drugi z informacijskimi sistemi v tovarni in v oddaljenih strežnikih - oblakih. IloT je postal osrednji del Industrije 4.0 definirane v Nemčiji leta 2011, saj povezuje fizične stroje in naprave ter računalniške sisteme v tovarnah za izboljšanje

produktivnosti, kakovosti, fleksibilnosti in inovacij.

Od leta 2014 daje so IIoT platforme in pametni sistemi postali ključni del industrijske digitalizacije. Razvili so se napredni senzorski sistemi, avtonomni sistemi in oblačne platforme za analitiko podatkov, ki omogočajo boljšo optimizacijo proizvodnje, manjše stroške, večjo energetska učinkovitost, boljše napovedno vzdrževanje, boljše sledenje procesom in boljšo varnost.

2 SPLOŠNA DEFINICIJA IIOT 4.0

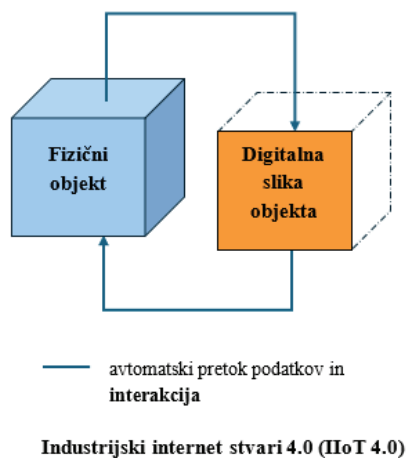
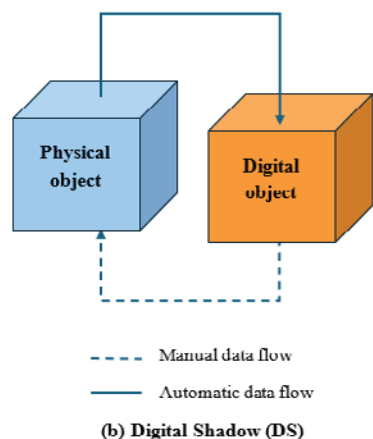
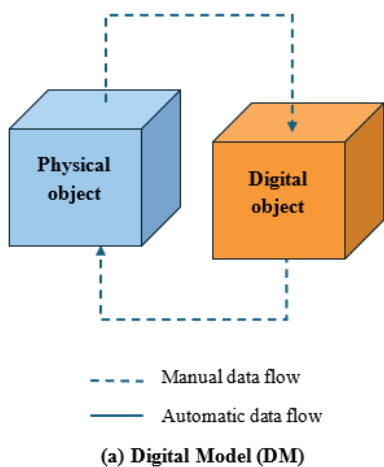
Za industrijsko prakso se skuša poleg digitalnih dvojčkov, kot najkompleksnejšega kibernetičnega fizičnega sistema Industrije 4.0 definirati tudi manj kompleksne sisteme, ki pa so še vedno kibernetični in fizični hkrati. Tako je prvi avtor digitalnih dvojčkov Michael Grieves narisal shemo definicij dodatnih kibernetičnih fizičnih entitet na sliki 1.



Slika 1: (a) Digitalni model, (b) Digitalna senca in (c) Digitalni dvojček [2]

Shema pove več kot sto besed. Definicije brez shem so praktično malo uporabne. Če pogledamo sliko definicije originalnega avtorja digitalnih entitet (slika 1), potem dobimo iz (a) in (c) tudi dodatno definicijo digitalnih dvojčkov: Digitalni dvojček je digitalni model z dvosmernim avtomatskim pretokom podatkov med fizičnim in digitalnim objektom.

Vidimo, da v teh shemah (slika1) manjka IIoT, ki je tudi eden od enostavnejših kibernetičnih fizičnih sistemov. Definicije glavnih kibernetičnih fizičnih sistemov je treba poenotiti. Analogno sledi shema IIoT 4.0 na sliki 2.



Slika 2: IIoT 4.0 kot sinhrona interakcija med fizičnim objektom in digitalno sliko

Pravilen izraz je pridevnik virtualni, a se je v praksi namesto izraza »virtualni« že uveljavil izraz »digitalni«, ki se smatra tudi za pravilen. Pojem fizičnih sistemov vključuje objekte in procese. 2D slike vključujejo: video, fotografije, ID kode (črtne, 2D in RFID) z 2D sliko fizičnih objektov in 2D slike fizičnih procesov.

2D slike fizičnih objektov prikazujejo v proizvodnji predvsem: celo proizvodnjo, otoke (linije in celice so iz 3. ere), stroje, orodja, izdelke, njihove dele, zgradbe, energijo, notranje, zunanje okolje, transportna sredstva, skladišča, humanoidne robote, osebe, sredstva zelenega prehoda, ipd.

2D slike fizičnih procesov v kosovni proizvodnji prikazujejo: oblikovanje, preoblikovanje, spajanje, ločevanje, energijske obdelave, površinske obdelave, oplemenitenje, strego in montažo, kontrolo, vzdrževanje, logistiko, energetiko in procese zelenega prehoda.

2 IIoT V PROIZVODNJI KOSOVNE PAMETNE TOVARNE KOT DIGITALNEM DVOJČKU

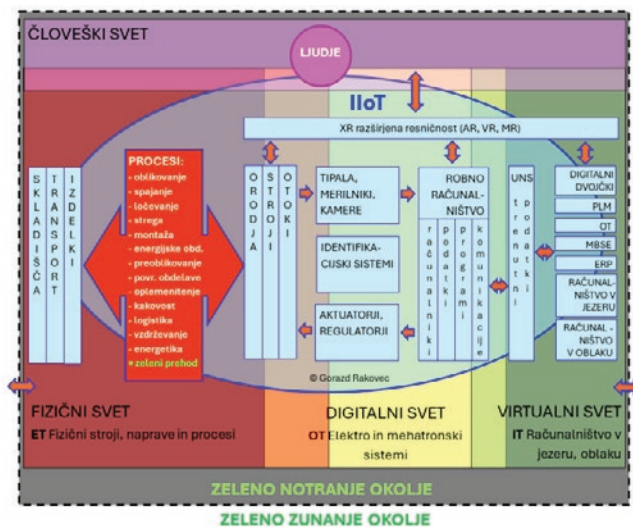
Izhajamo iz definicij DTC [1]: »Digitalni dvojček je integrirana virtualna predstavitev entitet in procesov iz resničnega sveta, ki temelji na podatkih, s sinhronizirano interakcijo pri določeni frekvenci in natančnosti.« in »Sisteme digitalnih dvojčkov sestavljajo integrirani in sinhronizirani sistemi IT/OT/ET, uporabljajo podatke v realnem času in zgodovinske podatke za predstavitev preteklosti in sedanjosti ter simulacijo prihodnosti.«

Industrijski internet stvari v okviru kosovne proizvodnje kot digitalni dvojček je prikazan z modro elipso na sliki 3.

IIoT sistemi se nahajajo v kosovni tovarni večinoma v proizvodnji. To razdelimo na osnovne kibernetske svetove:

1. **Človeški svet** je svet, v katerem se nahaja proizvodno osebje od operaterjev, predelavcev, tehnologov, kontrolorjev, vzdrževalcev, planerjev, kooperantov do vodstva in vseh služb tehnologije, kakovosti, planiranja, vzdrževanja, logistike, proizvodne informatike in orodjarne.

2. **Fizični svet – fizični dvojčki** vključujejo proizvodnjo, otoke (v 3. dobi: linije, celice), stroje, orodja, izdelke, dele izdelkov, materiale, zgradbe, energijo, notranje, zunanje okolje, transportna sredstva, skladišča, humanoidne robote, sredstva zelenega prehoda in jedro proizvodnje, fizične procese; strojne in ročne. Fizični procesi v kosovni proizvodnji so že dolgo točno definirani na področju tehnologije kot vede o materialih, sredstvih, podatkih, energijah in procesih za izdelavo izdelkov in sicer so to: oblikovanje, preoblikovanje, spajanje, ločevanje, energijske obdelave, površinske obdelave, oplemenitenje, strega in montaža. Sledijo procesi kontrole, vzdrževanja, logistike, energetike in zelenega prehoda.



Slika 3: Področje Industrijskega interneta stvari IIoT (elipsa) v okviru kosovne pametne tovarne s poudarkom na proizvodnji iz digitalnih dvojčkov.

3. **Virtualni svet – virtualni dvojčki** vključuje računalnike, omrežja, podatke, programe. Podatki so shranjeni v različnih spominskih enotah, od datotek, baz podatkov na robu (edge) UNS (Unified Namespace - poenoten imenski prostor) do jezera (lake), megle (fog), oblaka (cloud) ipd. Sem spada tudi PLM (product lifecycle management) sistem, imenovan tudi digitalna nit, ki služi kot

repozitorij in sistem upravljanja digitalnih dvojčkov z vsemi dodatnimi datotekami, ki ga opisujejo in se imenujejo AAS (asset administration shell). Poleg prenosa podatkov imamo tudi prenos zvoka, slike, videa, krivulj signalov in v svetu XR tudi drugih efektov v čim krajšem času. Prenos podatkov zajema žična, brezžična, optična omrežja, internetna omrežja, znotraj tovarn najpogosteje Ethernet in v proizvodnji Profibus, Profinet, Modbus, CAN bus, DeviceNet, Industrijski Ethernet, 5G, 6G, itd. Programi vključujejo poslovne programe, digitalne dvojčke, CAx, OT, MES, SCADA, itd.

4. **Digitalni svet – vmesnik sinhronizirane interakcije** (ni dvojček) vzpostavlja interakcijo med človeškim, virtualnim in fizičnim svetom. Prek sistemov razširjene resničnosti XR in HMI vzpostavlja interakcijo med ljudmi in virtualnim svetom. Prek mehatronskih sistemov: tipala, merilniki povratne zveze, aktuatorji, regulatorji, identifikacijski sistemi, robni računalniki, pa vzpostavlja interakcijo med virtualnim svetom in krmiljenimi stroji v fizičnem svetu. Mehatronski sistemi morajo delovati sinhrono, saj mora virtualni svet brez bistvenih zakasnitev slediti fizičnemu in obratno.
5. **Zeleno notranje okolje** je fizični prostor, v katerem se nahajajo prvi štirje svetovi pametne tovarne. Notranje okolje običajno omejujejo zgradbe pametne tovarne, ki so tudi pametni sistemi, ki zagotavljajo in optimirajo dejavnike notranjega okolja in njihove lastnosti: zrak, vakuum, plini, hitrost, smer plinov, turbulenznost, ioni, mikroorganizmi, kapljice, vlaga, temperatura, tlak, prah, vibracije, hrup, zvok, svetloba, nečistoče, elektromagnetno valovanje, ipd.
6. **Zeleno zunanje okolje** vključuje fizični del: planet Zemljo s površjem, rekami, oceani, ljudi, stvari, pojave, naravo, ozračje in pa družbeni del z vidika tovarn: država, trgi, konkurenca, zakonodaja, geografska lega, prebivalstvo, kultura, religija, politika, mediji, mesta, transport, energijski viri, kmetijstvo, ipd. Dve dvojni puščici

iz notranjega v zunanje okolje nakazujeta logistiko izdelkov in drugih objektov, ki se nadaljuje v krožno gospodarstvo, ki bo obravnavano v drugem prispevku.

7. **Kibernetični fizični proces** je multiinterakcija med vsemi šestimi dejavniki (človeški svet, fizični svet, virtualni svet, digitalni svet, zeleno notranje in zunanje okolje) in je sedmi dejavnik kibernetičnega fizičnega sveta – pametne tovarne. Vsi dejavniki hkrati delujejo drug na drugega z interakcijo. En dejavnik vpliva na vse ostale in vsi ostali vplivajo z nasprotno enakim vplivom na enega. Vplivi vseh dejavnikov so spojeni v en kibernetični fizični proces, ki ima drugačne lastnosti od interakcije posameznih parov dejavnikov kibernetičnega fizičnega procesa.

Rezultat celotnega kibernetičnega fizičnega sistema z vsemi 7 dejavniki mora biti optimalen razvoj in izdelava individualnih izdelkov po naročilu kupca in tudi velikoserijskih izdelkov po ceni ne dosti večji od masovnih izdelkov v zelenem varnem okolju za dobrobit ljudi v super inovacijski družbi.

3 DEFINICIJE IIoT V PROIZVODNJI KOSOVNE PAMETNE TOVARNE

Kot pri vseh sistemih pametnih tovarn, je veliko definicij tudi za IIoT. Če naredimo povzetek z upoštevanjem sheme na sliki 3, dobimo definicijo: IIoT je sistem računalnikov na robu procesov, ki so preko merilnih, identifikacijskih sistemov in aktuatorjev v sinhroni interakciji s stroji, orodji, izdelki in drugimi fizičnimi sistemi, trenutnimi podatki UNS ter v asinhroni interakciji z računalništvom v jezeru, megli, oblaku in z osebami preko razširjene resničnosti XR za vizualizacijo, simulacijo, nadzor, diagnosticiranje, predikcijo, vzdrževanje, kakovost, analizo in optimizacijo ter inoviranje vseh procesov pametne tovarne v zelenem notranjem in zunanjem okolju s krožnim gospodarstvom.

Sledi **skrajšana** definicija: IIoT je sistem robnih računalnikov v sinhroni interakciji s fizičnimi sistemi ter asinhroni interakciji z računalništvom v jezeru, oblaku in z osebami preko XR sistemov, za simulacijo, optimiranje in

inoviranje procesov pametne tovarne v zelenem okolju.

Posamezne krajše specifične definicije so lahko tudi:

- IIoT je sistem integracije fizičnih in virtualnih sistemov pametnih tovarn.
- IIoT sistem je nosilec interakcije med virtualnimi in fizičnimi sistemi pametnih tovarn.
- IIoT sistem je jedro digitalnih dvojčkov.
- IIoT sistem je jedro Industrije 4.0 in 5.0.
- IIoT sistem je temelj digitalne in zelene transformacije.

4 UNS (UNIFIED NAMESPACE) – CENTRALNI REPOZITORIJ TRENUTNIH PODATKOV

UNS (Unified Namespace) ali poenoten imenski prostor je programska plast v sistemu industrijske avtomatizacije prihodnosti, ki deluje kot centraliziran repozitorij vseh podatkov, zbranih iz senzorjev, IIoT naprav, strojev, robotskih sistemov, ipd. Uspešno delovanje UNS zagotavlja komunikacijski protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Ta zagotavlja, da lahko posredniki podatkov, ki sestavljajo enotni imenski prostor, obdelujejo ogromno količino podatkov, ki tečejo skozi njih, in zmanjšajo obremenitev na "satelitskih" sistemih. UNS beleži in predstavlja samo trenutno stanje vsakega procesa, aplikacije ali podatkovnega toka v realnem času. Za dostop do podatkov o preteklih časovnih vrstah je potrebna še druga sistemska komponenta: podatkovno jezero.

Podatkovno jezero zbira in shranjuje vse zgodovinske podatke v komponentah sistema industrijske avtomatizacije in infrastrukturnih elementih, vključno z OT, SCADA, ERP in MES. Podatki se zbirajo in shranjujejo v vseh domačih formatih in strukturah - strukturiranih, polstrukturiranih in nestrukturiranih. Uporaba podatkovnega jezera omogoča podjetjem, da shranijo podatke iz vseh virov v svojem poslovnem omrežju na enem mestu, kar zaposlenim v podjetju omogoča, da hitro najdejo in dostopajo do informacij, ki jih potrebujejo, izvedejo analizo in sodelujejo pri njih v realnem času.

Seveda v današnjem času sledi še prenos podatkov preko interneta na oddaljene strežnike v oblaku, kjer se lahko uporabi tudi enake programe, kot v jezeru, samo da je zakasnitev še nekoliko večja. Možno je procesiranje različno predelanih informacij tako na robu, jezeru in oblaku.

5 PREDNOSTI IIoT

Sedanje in prihodnje izvajanje IIoT je tesno povezano z najnovejšim tehnološkim razvojem: strojno učenje, umetna inteligenca, poslovna inteligenca, veliki podatki, kvantno računalništvo, ipd. IIoT podjetjem prinaša številne prednosti, nekaj glavnih po mnenju svetovalnega podjetja Morgan Stanley [3]:

- Povečuje kakovost in produktivnost.
- Ustvarja nove poslovne priložnosti.
- Zmanjšuje stroške sredstev v njihovem življenjskem ciklu.
- Povečuje varnost delavcev.
- Poganja proces inovacije izdelkov.
- Izboljšuje razumevanje zahtev potrošnikov.
- Platforma IIoT je jedro pametne tovarne in digitalnih dvojčkov.

6 TEMNA PROIZVODNJA - DARK PRODUCTION

Zadnje čase je na Kitajskem vse bolj popularna temna proizvodnja – dark production. To je kosovna obdelovalna strojna proizvodnja v kateri se ponoči med drugo in tretjo izmeno ugasnejo luči, ker je v njej minimalna prisotnost oseb. To ni nekaj avtomatiziranih linij, ki so že izdelane za avtomatsko delovanje. Podnevi je še vedno prisotna večja človeška posadka. Določena dela namreč ni možno izvajati brez ljudi: kontrola kakovosti, vzdrževanje, menjave večjih orodij, menjave večjih količin materialov, ipd. Proizvodnjo z ugasnjenimi lučmi je prva izvedla leta 1989 inženiring družba Brankamp GmbH v Nemčiji. Ta je predtem razvila posebne IIoT sisteme s specialnimi senzorji in ojačevalci, ki so to proizvodnjo prvič omogočili. Vsi stroji so opremljeni z analognimi senzorji v orodjih, stikali na mehanizmih in tudi izhodnimi releji za krmiljenje strojnih funkcij. Proizvodnjo so

poimenovali Geisterschicht (angleško Ghost Shift). Danes se bolj uporablja izraz temna proizvodnja- dark production. V Sloveniji smo temno proizvodnjo s posredovanjem avtorja tega članka prvič pričeli graditi v družbi Novi plamen d.o.o. iz Kroke od leta 2008 dalje in po nekaj letih deluje na preko 50 strojev v proizvodnji. Seveda je potrebno avtomatizirati tudi vse strojne in strežne podsisteme.

7 SKLEP

Digitalni dvojčki so virtualna replika fizičnih sistemov. Repliko lahko naredimo samo če poznamo fizični sistem. Bolje, ko poznamo fizične sisteme, boljše digitalne replike lahko naredimo. Najprej moramo poznati fizične stroje, orodja, izdelke, materiale, fizične procese z vsemi parametri, šele potem lahko razvijamo digitalne dvojčke, digitalne sence in tudi IIoT. Nasproti fizičnega sveta se nahaja virtualni svet, ki se začne s podatki. Ti podatki so izdelani avtomatsko z IIoT interakcijskim sistemom sinhrono s potekom fizičnih procesov. In kakšna je struktura teh podatkov? Struktura podatkov v proizvodnji se ne dela samo po strukturi organizacije, kot v poslovnem sistemu, temveč po strukturi orodij, strojev, otokov, tehnoloških procesov, njihovih parametrov, materialov, itd. Struktura podatkov je delana v skladu s strukturo strojev v eni simbolni besedi za vse fizične sisteme in procese. Kar je pravilen parameter (npr. temperatura v prvem gnezdu) v enem orodju, je napačno (npr. temperatura v prvem gnezdu) v drugem orodju. V manjši tovarni gre število digitalnih 2D slik, IIoT, plus 3D digitalnih dvojčkov v tisoče, v večji pa v milijone. Zato je tu bistven sistematičen, tipiziran, standardiziran močno voden pristop, drugače nastane kaos.

Poleg nabora in strukture podatkov je treba definirati tudi metode, funkcije, algoritme, za vizualizacijo, simulacijo, nadzor, diagnosticiranje, predikcijo, vzdrževanje, kakovost, analizo in optimizacijo ter inoviranje procesov v orodjih in arhitekturo vseh programov, 2D digitalnih slik strojev in morda tudi 3D digitalnih dvojčkov strojev. Ker gre tu za podatke iz delov stotin orodij, na desetinah strojev za stotine izdelkov in desetine materialov,

so vsi rezultati interpretirani v skladu s strojno stroko, saj gre za optimiranje strojev.

Po vseh orodjih, strojih in prostorih je treba dograditi ustrezne senzorje, na točno določena mesta, drugače zajeti podatki niso uporabni. Za pravilno vgradnjo analognih senzorjev glavnih tehnoloških parametrov mora arhitekt poznati na pamet vsa orodja, vse stroje, vse materiale, vse izdelke, vse tehnološke in kontrolne procese z vsemi parametri, da lahko postavi optimalno konfiguracijo senzorjev, merilnikov, kamer, aktuatorjev in omrežja robnih računalnikov, ki jih tudi mora poznati na pamet, in vsi skupaj tvorijo celoviti IIoT sistem, ki je temelj pametne tovarne.

Pametna tovarna kot zgradba iz IIoT, digitalnih dvojčkov in digitalnih senc mora delovati kot en optimalen sistem, zato je bistveno načrtovanje najprej arhitekture cele tovarne s strani arhitekta, podobno kot v gradbeništvu. Kjer izdelujejo posamezne projekte s projektnim vodenjem različnih inženiring izvajalcev, vsak naredi svoj sistem in malo upošteva obstoječe. Nihče pa ne more upoštevati sistemov, ki jih še ni in bodo prišli v naslednjih letih, so pa del pametne tovarne. Sistemi morajo biti ne samo povezani, temveč tudi prilagojeni drug drugemu in odvisni drug od drugega. Če vsi sistemi niso usklajeni, tovarna postane najprej skrupucalo in zgradba brez arhitekture se na določeni točki podre sama od sebe. Dejstvo je, da klasično projektno vodenje izgradnjo pametne tovarne pelje v kaos, zato je zanjo neuporabno. Seveda klasika ostaja še naprej na projektih razvoja in izdelave izdelkov za kupce. Za pametne tovarne pa je konec klasičnega projektnega vodenja. Pametna tovarna se zgradi lahko samo s kibernetičnim fizičnim menedžmentom, kar smo že objavili.

Viri:

- [1] DTC Digital Twin Consortium: *What is a Digital Twin?*, 02.2025. Dostopno na: <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin/>
- [2] Grieves Micheal: *Digital Model, Digital Shadow, and Digital Twin*, Digital Twin Institute, April 6, 2023.
- [3] Iberdrola: *What is IIoT? Discover the Internet of things*, 02.2025. Dostopno na: <https://www.iberdrola.com/innovation/what-is-iiot>

POLICA AVTODOMA – INOVATIVNA IZRABA TERMIČNO RECIKLIRANIH STEKLENIH VLAKEN ODPADNIH DUROPLASTOV

**Sebastjan ZAVERLA¹, Blaž NARDIN¹, Silvester BOLKA¹, Marko VERČKOVNIK¹,
Rajko BOBOVNIK¹, Gregor VEDENIK², Lara LETONJE², Saša VEDENIK²**

¹Fakulteta za tehnologijo polimerov

²VEPLAS d.d.

IZVLEČEK

V prispevku bomo predstavili uporabo industrijskega odpada termično recikliranih steklenih vlaken odpadnih duroplastov v podjetju Veplas v kombinaciji s duroplastično matrico. Od ideje do končne rešitve sta sodelovala podjetje Veplas in Fakulteta za tehnologijo polimerov iz Slovenj Gradca. Uporabili smo reciklirana steklena vlakna v obliki mate z multiaksilano orientacijo in matrico, ki jo v podjetju Veplas uporabljajo v rednem proizvodnem procesu po »vacuum assisted RTM« tehnologiji. Z izbranim pristopom smo dobili duroplastični kompozit, kjer so vlakna reciklirane steklene mate imela funkcijo ojačitve za duroplastično matrico, ki je v našem primeru nenasičena poliesterska smola. Duroplastična matrica je nenasičena poliesterska smola namenjena RTM postopku izdelave kompozita. Pri termičnem recikliranju steklenih vlaken zaradi izpostavljenosti visokim temperaturam izgubimo nanos silana na steklenih vlaknih. Slednji zagotavlja izboljššan oprijem med vlakni in matrico ter posledično zahtevane mehanske lastnosti izdelanega kompozita. Da smo dosegli dobre medfazne interakcije med duroplastično matrico in steklenimi vlakni mate smo dodali kompatibilizator. Cilj je dodati kompatibilizator v matrico brez potrebe po predhodni pripravi steklenih vlaken, ki podaljša in podraži proizvodni proces. Predhodno smo testirali štiri kompatibilizatorje v treh različnih deležih v kompozitu in izmed njih izbrali najustreznejšega. Tako smo dosegli izboljššan oprijem duroplastične matrice z recikliranimi steklenimi vlakni. Termično reciklirana steklena vlakna smo uporabili v uveljavljenem postopku izdelave police avtodoma v podjetju Veplas. Tako pripravljen kompozit je zaradi uporabe reciklatov okolju prijazen. Delo je bilo izvedeno v okviru projekta DeremCo.

1 UVOD

Odlaganje kompozitnih izdelkov na okolju prijazen način je eden najpomembnejših izzivov, s katerimi se soočata industrija in skupnost. Predvideva se, da bo skupna svetovna proizvodnja kompozitnih materialov do leta 2015 preseгла 10,3 milijona ton, kar bo zavzemalo prostornino več kot 60 milijonov kubičnih metrov. Materiali iz steklenih vlaken in duroplastične matrice predstavljajo približno 90 % vseh trenutno proizvedenih kompozitov, ki jih je težko in drago reciklirati. Trenutni stroški recikliranja kompozitov iz stekla in duroplasta niso konkurenčni v primerjavi s stroški uporabe novega materiala. Poleg tega so mehanske lastnosti recikliranih steklenih vlaken nižje od originalnega materiala in so običajno prenizke za uporabo v strukturnih kompozitnih izdelkih, ki zahtevajo visoko trdnost. Zaradi teh razlogov je odlaganje na odlagališče najpogostejši način odstranjevanja

odpadnega kompozitnega materiala. Vendar pa to predstavlja okoljski problem zaradi izjemno velike količine materiala, ki ga je treba vsako leto zakopati. Poleg tega so steklena vlakna trpežna in se v tleh ne razgradijo zlahka.

Ker postaja odlaganje kompozitov na odlagališča vse težje, je industrija prisiljena reciklirati večje količine materiala. Za recikliranje kompozitov se uporabljajo različne metode, ki so običajno razvrščene kot mletje, kemični ali termični postopki. Najpogostejši postopek je termično recikliranje s pirolizo v rotacijski peči ali fluidizirani postelji. Postopek v bistvu vključuje sežiganje odpadnega kompozita pri visoki temperaturi (običajno 400–550 °C) v odsotnosti zraka, da se polimerna matrica razgradi v olje/vosek, oglje in plin. Po odstranitvi polimera se vlakna segrejejo v zraku, da se oksidira preostalo oglje in odstrani površinska kontaminacija. Vlakna se nato obnovijo za ponovno uporabo. Vendar pa se njihova mehanska trdnost zmanjša zaradi visoke temperature, potrebne za razgradnjo matrice.

Trdnost steklenih vlaken se hitro zmanjšuje z naraščajočo temperaturo nad približno 400 °C, pri čemer običajne temperature, uporabljene za sežiganje kompozitov iz duroplastične matrice, povzročijo izgubo trdnosti od 80 do 95 %. Tako veliko zmanjšanje trdnosti pomeni, da obnovljena steklena vlakna niso primerna za ponovno uporabo v strukturnih kompozitih. Do danes ni bilo objavljenih nobenih študij, ki bi sistematično preučevale učinke parametrov ponovne obdelave termičnega recikliranja (npr. temperatura, čas, atmosfera peči) na preostale lastnosti obnovljenih E-steklenih vlaken. [1]

Površina komercialno izdelanih steklenih vlaken je rutinsko obdelana z organofunkcionalnimi silani skupaj z drugimi sestavinami, kot so različni filmski tvorci in pomožna sredstva. Takšna površinska obdelava, običajno imenovana sizing, je ključni korak, ki vpliva na uspeh ali neuspeh večine ojačitvenih izdelkov zaradi pomembne vloge, ki jo ima pri ceni, obdelovalnosti in zmogljivosti tega izdelka. Organofunkcionalni silani lahko služijo kot vezni agent za spodbujanje interakcije med vlakni in matrico z različnimi mehanizmi adhezije, kot sta kemična vezava in molekularna interdifuzija. [2]

Pri reciklaži duroplastičnih polimerov z uporabo metode pirolize v odsotnosti kisika pride zaradi povišanih temperatur, ki so jim izpostavljena steklena vlakna do razgradnje silanskega nanosa na steklenih vlaknih. S tem se spremeni površinska lastnost vlaken. Silanski nanos deluje kot molekularno vezivo med hidrofilnimi steklenimi vlakni in hidrofobno matrico. Posledica je izboljššan oprijem med matrico in ojačitvenimi vlakna kar izboljša mehanske lastnosti kompozita. Izostanek nanosa silana poleg degradacije mehanskih lastnosti zaradi izpostavljenosti visoki toplotni obremenitvi pripomore k slabšim mehanskim lastnostim kompozita. V raziskavi smo iskali način kako izboljšati mehanske lastnosti zaradi odsotnosti silanskega nanosa na steklenih vlaknih na način, da ne posegamo v ustaljene proizvodne procese z vidika dodajanja dodatnih procesov, ki imajo za rezultat podaljšanje izdelovalnih časov ali vključevanje dodatnih vzporednih procesov, kot so na primer predpriprava ojačitvenega materiala.

Zaradi tega smo se osredotočili na dvig mehanskih lastnosti z dodatki neposredno v matrico, ki bi izboljšala molekularne vezi med ojačitvenimi vlakni in matrico. Na regeneracijo steklenih vlaken po izpostavitvi visokim temperaturam se nismo osredotočali.

Cilj je bil kako doseči sprejemljive mehanske lastnosti za ne strukturno nosilne kompozitne izdelke z uporabo vpeljanih proizvodnih procesov (LRTM), uporabljene matrice, dodatkov za matrico in termično recikliranih steklenih vlaken v obliki mate. Ciljni izdelke je bila kompozitna polica avtodoma, ki jih proizvajajo v podjetju Veplas d.d. po metodi LRTM v dvodelnih togih kalupih.

V prvem koraku smo določili čase procesa zamreževanja in doseženo maksimalno temperaturo (peak temperature) upoštevajoč tri različne deleže dodatkov v skupni masi matrice. Pridobljeni rezultati so nam služili za rangiranje ustreznosti dodatkov.

V drugem koraku smo na izdelali z uporabo ogrevane stiskalnice vzorce v konfiguracijah dodatkov in deležev le teh ter v nadaljevanju izvedli test mehanskih lastnosti.

S tem smo določili najvplivnejše dodatke in določili postopek priprave matrice za izdelavo vzorčne police avtodoma z uporabo termično recikliranih steklenih vlaken.

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 novembra 2025 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, OPS Breznik, Technol, Tehnos, Turnaplast in CAP. V prispevku bomo predstavili sodelovanje FTPO, kjer smo pripravili termoplastične kompozite s PET vlakni, ki nam jih je dobavilo podjetje CAP kot njihov industrijski odpad po termoformiranju.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

Termično reciklirano steklena vlakna v obliki mate, katerih vir so bili duroplastični ekstrudirani profili, nam je dostavilo italijansko podjetje Centrocot. Oznaka steklene mate je RIV001-COT1 in je sestavljena iz 85% s pirolizo pridobljenih steklenih vlaken z dodatkom 5% komercialnih steklenih vlaken (OCV Panelux 2400 – 2<) in 10% PET-PP veziva. »Komercialna ste« steklena vlakna so bila dodana zaradi tehnologije izdelave reciklirane mate.

Matrico in pripadajoče trdilo je dostavilo podjetje Veplas. Matrica je nenasičena poliesterska smola namenjena za »vacuum assisted RTM« postopek proizvajalca Sarzyna Chemical in pripadajočim trdilom M50 MEK.

Dodatek 1 - s komercialnim imenom Iso 139/4 je predpolimer na osnovi 4,4' - difenilmetan diizocianata (MDI) proizvajalca BASF, dostavilo podjetje Kopur.

Dodatek 2 – s komercialnim imenom Dynasytan DAMO proizvajalca EVONIK iz naše zaloge.

Dodatek 3 – s komercialnim imenom Dynasytan GLYMO, proizvajalca Helios, ki smo prejeli iz Heliosa.

Dodatek 4 – s komercialnim imenom BYK-P9920 proizvajalca BYK-Chemie GmbH, nam je priskrbelo podjetje Technos iz Izole.

Sestava vzorcev je navedene v Tabeli 1. za test časa in temperature zamreževanja matrice in Tabela 2 za sestavo testnih vzorcev.

3.2 Priprava vzorcev

Vzorci smo pripravljali v dveh korakih tako kot so potekali preizkusi.

3.2.1 Priprava vzorcev za merjene T (°C) / t (s)

Za pripravo vzorcev katerih sestava je navedena v Tabeli 1 smo natehtali 50 g matrice, nato dodali ustrezen delež dodatka, temeljito premešali ter na koncu dodali določen delež trdila. Nakar smo dobljeno zmes še enkrat temeljito premešali.

Tabela 1: Sestava vzorcev za test temperature in časa zamreževanja matrice

Vzorec	matrica (%)	trdilo (%)	Dodatek 1 (%)	Dodatek 2 (%)	Dodatek 3 (%)	Dodatek 4 (%)
Vzorec 90-00	97	3	0	0	0	0
Vzorec 90-01	96	3	1	0	0	0
Vzorec 90-02	94	3	3	0	0	0
Vzorec 90-03	90	3	7	0	0	0
Vzorec 90-04	96	3	0	1	0	0
Vzorec 90-05	94	3	0	3	0	0
Vzorec 90-06	90	3	0	7	0	0
Vzorec 90-07	96	3	0	0	1	0
Vzorec 90-08	94	3	0	0	3	0
Vzorec 90-09	90	3	0	0	7	0
Vzorec 90-10	96	3	0	0	0	1
Vzorec 90-11	94	3	0	0	0	3
Vzorec 90-12	90	3	0	0	0	7

3.2.2 Priprava vzorcev za merjene upogibnega in nateznega preizkusa na ogrevani stiskalnici

Tabela 2: Sestava vzorcev za test temperature in časa zamreževanja matrice

Vzorec	Mata RIV001-COT1 (št. slojev)	trdilo (%)	Dodatek 1 (%)	Dodatek 2 (%)	Dodatek 3 (%)	Dodatek 4 (%)	Delež matrice (%)
Vzorec 91-00	2	3	0	0	0	0	64
Vzorec 91-01	2	3	1	0	0	0	67
Vzorec 91-02	2	3	3	0	0	0	66
Vzorec 91-03	2	3	7	0	0	0	65
Vzorec 91-04	2	3	0	1	0	0	66
Vzorec 91-05	2	3	0	3	0	0	55
Vzorec 91-06	2	3	0	7	0	0	50
Vzorec 91-07	2	3	0	0	1	0	64
Vzorec 91-08	2	3	0	0	3	0	64
Vzorec 91-09	2	3	0	0	7	0	62
Vzorec 91-10	2	3	0	0	0	1	64
Vzorec 91-11	2	3	0	0	0	3	64
Vzorec 91-12	2	3	0	0	0	7	62

3.3 Laboratorijski testi

Za test časa in maksimalne temperature pri zamreževanju matrice smo uporabili Programsko opremo Veriner Graphical Analyst V6.1. in pripadajočim BT senzorjem za merjenje temperature Vernier GO Direct Temperature. Zajemanje temperature je bilo nastavljeno na eno sekundo. Temperatura okolice je bila 23°C in relativna zračna vlaga 26%.

Plošče za vzorce za mehanske preizkuse so bile stisnjene v stiskalnici Baopin BP-8170-B. Temperatura stiskanja je bila nastavljena na 60 °C, tlak stiskanja pa na 0,3 MPa ter čas stiskanja 15 minut. Narejene plošče smo »starali« dve uri v ventilacijski peči pri 60 °C. Tako pripravljen plošče smo ročno razrezali na ustrezne dimenzije za upogibni in natezni preskus.

Upogibni in natezni preizkusi so bili opravljeni na napravi Shimadzu AG-X plus v skladu z ISO 178 oziroma ISO 527. Za vsak vzorec je bilo opravljenih pet meritev. Pri upogibnem preizkusu smo vrednotili upogibni E modul (E_f), maksimalno upogibno trdnost (σ_{fM}) ter upogib pri maksimalni upogibni trdnosti (ϵ_{fM}). Pri nateznih preizkusih smo vrednotili natezni E modul (E_t), natezno trdnost (σ_m) in raztezek pri pretrgu (ϵ_{tb}).

3.4 Proizvodni test

Proizvodni preskus je bil narejen v proizvodnih prostorih podjetja Veplas d.d. in z njihovo inštalirano opremo ter obstoječim predpisanim procesom za »vacuum assisted RTM« postopek v togih kompozitnih kalupih.

Poleg v poglavju 3.1 opisanih materialov so bili še dodatno uporabljeni naslednji materiali:

- ločilno sredstvo s katerim je bil tretiran kalup je bilo: LS Chemlease
- lepilo za polaganje mate: standardno lepilo v spreju za boljši oprijem mate na kalup
- bela barva za obarvanje matrice: nenasičena poliestrska smola z dodatki pigmenta in UV stabilizatorja.

Uporabljena je bila:

- injicirna naprava za smolo: proizvajalca Wolfangel in
- RTM kalup: Polica avtodoma: izdelan v orodjarni VEPLAS d.d.

Proizvodni parametri:

- Standardni zapiralni tlak kalupa
- Tlak injiciranja do 1 bar
- Vsa smola je bila injicirana v enem koraku.
- čas zamreževanja matrice in utrjevanja: 4 ure

4 REZULTATI

4.1 Odvisnost T (°C) / t (s) zamreževanja matrice glede na vrsto in delež dodatka

Dodatki in vrsta dodatka različno vpliva na dosežen »temperature peak« tako na maksimalno temperaturo kot na čas potreben za dosego maksimalne temperature. Dodatek 1 in Dodatek 2 pospešita eksotermno reakcijo medtem pa dodatek 3 in 4 podaljšata odprti čas matrice glede na vzorec brez dodatka, ki doseže »peak« po 40 minutah in ki doseže temperaturo 113,4 °C. Dodatek 1 skrajša čas zamreževanja matrice obratno sorazmeren glede na delež dodatka v celotni zmesi. Podobno je pri dodatku 2 kjer pa pride pri deležu 7% do zaviranja kemične reakcije, temperatura ne preseže 40°C, celotna zmes ima premalo lastne energije za zamreževanje in matrica se ne utrdi. Dodatek 3 in 4 zavirata čas reakcije – večji kot je delež dodatka dlje časa potrebuje matrica, da doseže »temperaturni peak«, ki je povsod višji kot pri referenčnem vzorcu 90-00. Prav tako se pokaže, da večji delež dodatka niža doseženo maksimalno izmerjeno temperaturo pripravljene matrice.

Tabela 3: Doseženi maksimalni časi in temperature pri različnih dodatkih in njihovem deležu v zmesi.

Vzorec	T_{max} (°C)	t_{Tmax} (min)	T_{max} / T_{max00} (%)	t_{Tmax} / t_{Tmax00} (%)
Vzorec 90-00 »Base line«	113,4	40	100	100
Vzorec 90-01	118,6	30	105	77

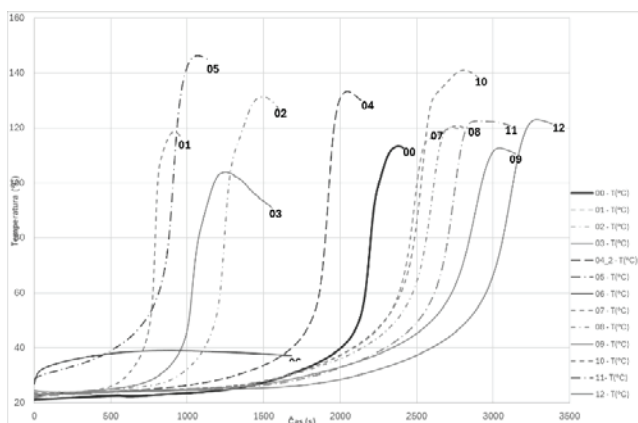
Vzorec	T _{max} (°C)	t _{Tmax} (min)	T _{max} / T _{max00} (%)	t _{Tmax} / t _{Tmax00} (%)
Vzorec 90-02	131,6	25	116	63
Vzorec 90-03	104,0	21	92	52
Vzorec 90-04	150,7	16	133	40
Vzorec 90-05	146,4	18	129	45
Vzorec 90-06	39,4	10	35	25
Vzorec 90-07	120,8	46	106	116
Vzorec 90-08	120,3	45	106	114
Vzorec 90-09	112,7	51	99	128
Vzorec 90-10	141,1	47	124	118
Vzorec 90-11	122,6	48	108	122
Vzorec 90-12	123,1	55	109	138

4.2 Upogibni preizkus

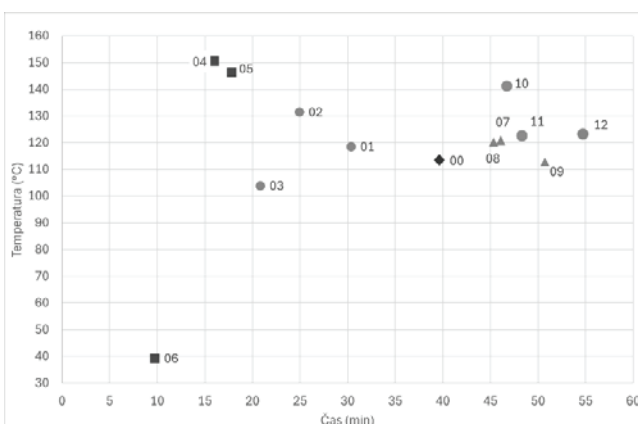
Rezultati upogibnega preizkusa so zbrani v tabeli 3. Na raztros izmerjenih podatkov (STD – standardna deviacija) v veliki meri vpliva tudi homogenost razporeditve steklenih vlaken v mati, ki je posledica tehnologije izdelave reciklirane mate, ter različne dolžine uporabljenih recikliranih vlaken za izdelavo mate.

Tabela 3: Rezultati upogibnega testa – ISO 178

Sample	E _f (GPa)	σ _{fM} (MPa)	ε _{fM} (%)
Vzorec 91_00	5,11	65,7	1,54
Vzorec 91_00 -STD	0,23	3,83	0,09
Vzorec 91_01	5,93	71,64	1,37
Vzorec 91_01 -STD	0,63	10,35	0,12
Vzorec 91_02	6,83	86,78	1,36
Vzorec 91_02 -STD	0,36	12,58	0,16
Vzorec 91_03	6,69	75,79	1,29
Vzorec 91_03 -STD	0,68	4,89	0,05
Vzorec 91_04	3,95	42,04	1,5
Vzorec 91_04 -STD	0,41	4,52	0,07
Vzorec 91_05	4,45	36,96	1,6
Vzorec 91_05 -STD	0,24	2,36	0,23
Vzorec 91_06	2,6	28,83	1,92
Vzorec 91_06 -STD	0,25	2,02	0,11
Vzorec 91_07	4,07	41,87	2,08
Vzorec 91_07 -STD	0,21	3,67	0,15
Vzorec 91_08	7,52	80,22	1,34
Vzorec 91_08 -STD	0,45	7,27	0,11
Vzorec 91_09	7,88	57,03	1,03
Vzorec 91_09 -STD	0,43	6,49	0,16
Vzorec 91_10	6,41	69,04	1,31
Vzorec 91_10 -STD	0,36	5,67	0,13
Vzorec 91_11	5,85	63,11	1,38
Vzorec 91_11 -STD	0,17	5,88	0,11
Vzorec 91_12	5,33	59,88	1,43
Vzorec 91_12 -STD	0,04	2,2	0,06



Slika 1: Odvisnost T (°C) / t (s) zamreževanja matrice glede na vrsto in delež dodatka



Slika 2: Odvisnost T (°C) / t (min) zamreževanja matrice glede na vrsto in delež dodatka

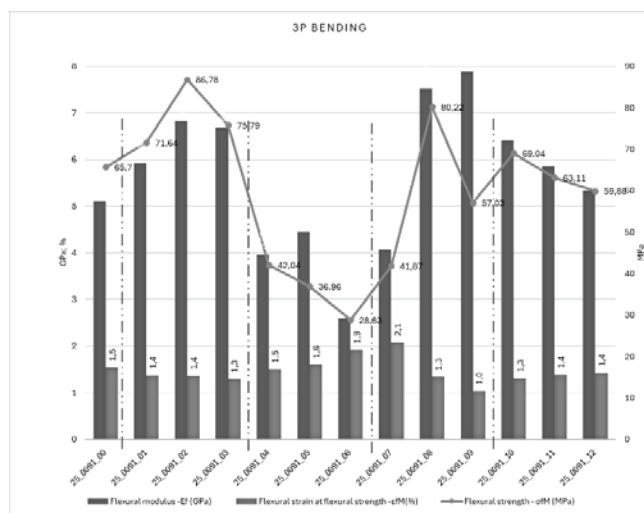
Dodatek 1 v povprečju zviša upogibni E modul kompozita za 34% če ga dodamo 3%. Dodajanje večje količine (7%) ne izboljša vrednosti E modula, zniža pa upogibno trdnost σ_{fM} na isti nivo kot ga ima kompozit z 1% dodatka 1. Upogib je vedno nižji od referenčnega od 5% do 12% glede na referenčnega.

Dodatek 2 zniža E modul in upogibno trdnost σ_{fM} tudi za več kot 50% glede na referenčni kompozit brez dodatkov. Najvišja vrednosti E modula je pri 3% dodatka. Upogibna trdnost pa pada z višanjem deleža dodatka od 64% do 44% glede na količino dodatka 2 v kompozitu. Upogib

je pri 1% dodatka 2 nižji od referenčnega za 3% nato pa z večanjem dodatka narašča in doseže 4% in 25% višji upogib kot referenčni kompozit.

Dodatek 3 z dvigom deleža dodatka v kompozitu narašča E modul. 1% dodatka zniža tako E modul kot upogibno napetost pod referenčno. Dodatek 3% dodatka 3 izboljša E modul za 47% in σ_{fM} za 22%. Dvig vsebnosti dodatka na 7% še malenkostno poviša E modul vendar pa σ_{fM} pade na 78% referenčnega vzorca brez dodatka. Upogib je pri 1% dodatka 3 višji od referenčnega za 35% nato pa z večanjem dodatka strmo pade in doseže 13% in 23% manjši upogib kot referenčni kompozit.

Dodatek 4 – z povečevanjem vsebnosti dodatka 4 se E modul in upogibna trdnost σ_{fM} znižujeta. E modul pri vseh treh (1%, 3% in 7% dodatka) ostaja višji od referenčne vrednosti za 25, 14 in 4%. Upogibna trdnost pa pri najnižjem deležu dodatka 4 izkazuje vrednosti za 5% višje kot so referenčne in 4% in 9% nižje dosežene vrednosti z naraščanjem deleža dodatka 4. Upogib je pri 1% dodatka 2 nižji od referenčnega za 15% nato pa z večanjem dodatka narašča in doseže 90% in 93% manjši upogib kot ga izkazuje referenčni kompozit.



Slika 3: Odvisnost E modul (E_f), maksimalna upogibna trdnost (σ_{fM}) ter upogib pri maksimalni upogibni trdnosti (ϵ_{fM}) od vrste in deleža dodatka v matrici izdelanih vzorcev s termično reciklirano mato.

4.3 Natezni preizkus

Rezultati nateznega preizkusa so zbrani v tabeli 4. Na raztros izmerjenih podatkov (STD) ravno tako pri upogibnem testu v veliki meri vpliva tudi homogenost razporeditve steklenih vlaken v mati, ki je posledica tehnologije izdelave reciklirane mate, ter različne dolžine uporabljenih recikliranih vlaken za izdelavo mate.

Tabela 3: Rezultati nateznega testa – ISO 527

Sample	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ϵ_{tb} (%)
25_0091_00	5,05	34,56	1,23
25_0091_00 -STD	0,56	6,74	0,29
25_0091_01	6,72	39,47	1,19
25_0091_01 -STD	0,48	8,39	0,30
25_0091_02	6,55	46,29	1,56
25_0091_02 -STD	0,86	2,92	0,16
25_0091_03	6,09	44,17	1,55
25_0091_03 -STD	0,30	6,52	0,25
25_0091_04	4,16	24,95	1,19
25_0091_04 -STD	0,84	3,02	0,16
25_0091_05	2,39	14,01	1,28
25_0091_05 -STD	0,63	0,62	0,10
25_0091_06	2,45	17,73	1,44
25_0091_06 -STD	0,33	0,58	0,05
25_0091_07	2,71	16,18	1,22
25_0091_07 -STD	0,24	2,36	0,10
25_0091_08	4,67	32,70	1,31
25_0091_08 -STD	0,22	4,62	0,20
25_0091_09	3,27	21,76	1,21
25_0091_09 -STD	0,15	2,77	0,16
25_0091_10	4,46	33,37	1,31
25_0091_10 -STD	0,23	2,96	0,19
25_0091_11	3,50	32,11	1,67
25_0091_11 -STD	0,28	1,09	0,11
25_0091_12	4,57	35,26	1,49
25_0091_12 -STD	0,17	2,37	0,19

Dodatek1 zviša vrednost E_t modula glede na referenčni vzorec do 33% pri 1% dodatka 1. Et modul v nadaljevanju pada z dodano količino dodatka 1 za 3% in nato še za 9% pri 7% dodatka. Najvišja natezna trdnost je dosežena pri 3% dodatka 1 in je za 30% višja kot pri referenčnem kompozitu. Je pa raztezek pri pretrgu - ϵ_{fM} nižji kot pri referenčne vzorca in se z zviševanjem deleža dodatka 1 poveča za 25% glede na referenčni vzorec.

Dodatek 2 zniža vse tri merjene vrednosti (E_t , σ_{Tm} , ϵ_{tb}) v kompozitu glede na referenčni kompozit . Najvišje dosežene vrednosti so zabeležene pri

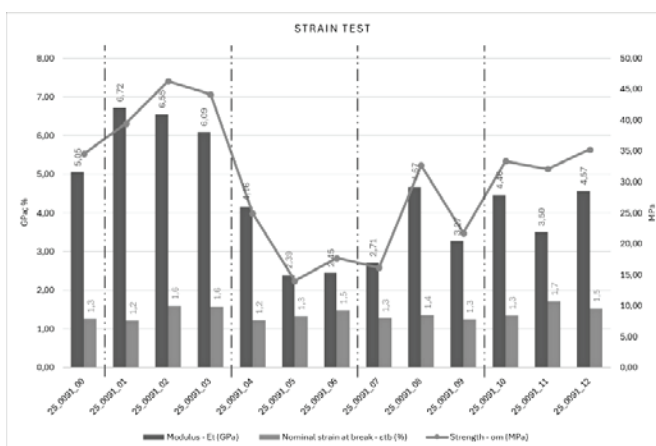
uporabi 1% dodatka 2, a so še vedno nižje – $E_t = 82\%$, $\sigma_{tm} = 72\%$ in $\epsilon_{tb} = 97\%$ glede na referenčni kompozit (100%).

Dodatek 3 prav tako ne izboljša nateznih lastnosti v primerjavi z referenčnim kompozitom. Najbližji je kompozit z 3% dodatka 3, ki dosega 92% vrednosti E modula, 95% σ_{tm} in 107% ϵ_{tb} glede na referenčni kompozit.

Dodatek 4 ne izboljša merjenih mehanskih vrednosti glede na referenčni kompozit. Še najbližje izmerjene vrednosti izkazuje vzorec 91-12 s 7% dodatka 4 - 90% vrednosti E modula, 102% σ_{tm} in 107% ϵ_{tb} glede na referenčni kompozit. Prav tako je standardna deviacija pri tem vzorcu najnižja.



Slika 5: Polaganje termično reciklirane mate v kalup



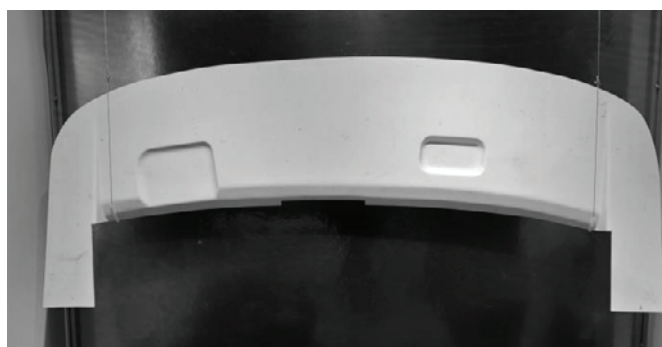
Slika 4: Odvisnost E modul (E_t), maksimalna natezna trdnost (σ_{tm}) ter raztezek pri pretrgu (ϵ_{tb}) od vrste in deleža dodatka v matrici izdelanih vzorcev s termično reciklirano mato.



Slika 6: Injiciranje matrice

4.4. Proizvodni preizkus

Na pred pripravljen kalup za polico avtodoma je bil položen ročno krojen ojačitveni material - termično reciklirana mata (RIV001-COT01) v treh plasteh. Po polaganju je sledilo zaprtje kalupa in injiciranje matrice s trdilom in dodatkom 1 z 3 wt%. Po zaključenem obdobju zamreževanja matrice in utrjevanja v kalupu je bil izdelek – polica avtodoma, snet iz kalupa in obrezan z uporabo robotskega vodnega reza (Water jet).



Slika 7: Polica avtodoma

5 SKLEP

V tej raziskavi smo preučevali vpliv dodatkov v matrici na mehansko lastnost kompozita z namenom izboljšanja adhezije med matrico in ojačitvenim materialom – termično recikliranimi steklenimi vlakni. Na podlagi treh izvedenih preizkusov smo ugotovili, da je kompozit iz termično obdelanih steklenih vlaken in matrice z dodatkom 1, 1-3 % masnega deleža glede na matrico optimalno razmerje za doseganje izboljšanih mehanskih lastnosti ter skrajšanje časa zamreževanja. Zaradi lokalno manjšega volumna smole temperatura v neogrevanem kalupu ne bo bistveno presegala temperature referenčnega vzorca.

Glavni cilj raziskave, ponovna uporaba termično predelanega industrijskega odpada duroplastov – odrezkov ali odpadnih duroplastičnih izdelkov po koncu njihove življenjske dobe, je bil dosežen. Izdelana je bila polica avtodoma z uporabo že vpeljanih proizvodnih procesov. Rezultati testov odpirajo nove možnosti uporabe kompozitov, ojačenih s termično recikliranimi steklenimi vlakni, za industrijske aplikacije.

VIRI:

- [1] Feih, S., Boiocchi, E., Mathys, G., Mathys, Z., Gibson, A. G., & Mouritz, A. P. (2011). Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres. *Composites Part B: Engineering*, 42(3). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.12.020>
- [2] Yang, L., & Thomason, J. L. (2013). Effect of silane coupling agent on mechanical performance of glass fibre. *Journal of Materials Science*, 48(5). <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6960-7>

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**

ZAGOTAVLJANJE KVALITETE IZDELKOV S POMOČJO MERJENJA TLAKA V ORODJU

Rok GLINŠEK, Boštjan ŠKRLJ, Matija OBOLNAR
Hella Saturnus Slovenija d.o.o.

IZVLEČEK

Pri izdelavi tehnično zahtevnih izdelkov, kot je avtomobilska karoserijska svetlobna oprema, je stabilnost proizvodnega procesa ključnega pomena za zagotavljanje visoke kakovosti. Zahteve po natančnosti so zelo visoke, saj so ti izdelki izpostavljeni strogim tehničnim in varnostnim standardom. Enakomerno polnjenje kavitet pri brizganju plastike je pomembno za preprečevanje napak in doseg konstantnih rezultatov.

1 UVOD

Pri brizganju plastike je stabilnost procesa ključna za doseganje visoke kakovosti in ponovljivosti izdelkov. Pri večkavitetnih orodjih lahko neenakomerno polnjenje kavitet vodi do odstopanj v dimenzijah in kakovosti, kar poveča izmet in stroške proizvodnje. Zato je natančno spremljanje in regulacija procesnih parametrov, kot so tlak v orodju in temperatura vročih kanalov, bistvenega pomena za optimizacijo procesa.

V proizvodnji so se pojavile težave z zagotavljanjem enakomernega polnjenja, zato smo iskali rešitev, ki bi izboljšala stabilnost procesa in zmanjšala napake. Tako smo se odločili za implementacijo naprednega sistema, ki omogoča optimizacijo procesa brizganja in izboljša kakovost izdelkov ter povečuje proizvodno učinkovitost [1].

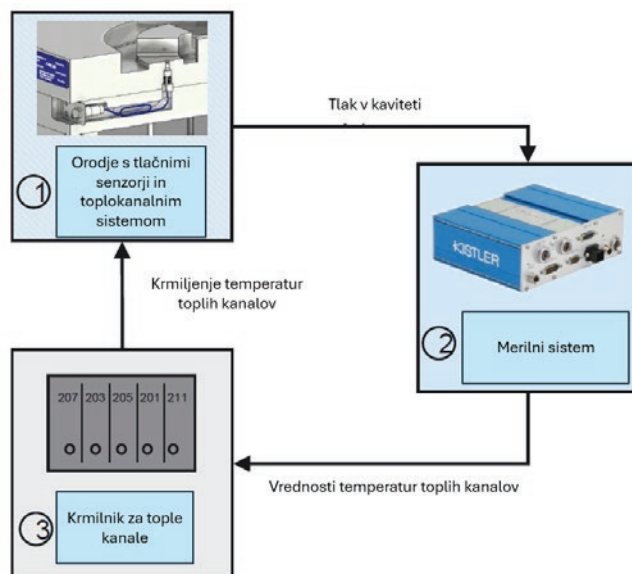
2 VLOGA TLAČNIH SENZORJEV PRI BRIZGANJU PLASTIKE

Tlačni senzori igrajo ključno vlogo pri spremljanju in nadzoru procesa brizganja plastike. Z merjenjem tlaka v posameznih kavitetah lahko v realnem času zaznamo neskladnosti v procesu polnjenja. Senzorji zagotavljajo podatke, ki jih je mogoče uporabiti za prilagajanje parametrov procesa, s čimer se zagotovi enakomerno polnjenje in zmanjša verjetnost napak. Pomembna je tudi pozicija

tlačnih senzorjev saj tlak z oddaljevanjem od dolivnega mesta pada. Pozicija senzora je odvisna od samega izdelka, najbolj optimalna pozicija pa je na tretjini poti tečenja.

3 SISTEMA KISTLER COMONEO IN MULTIFLOW

Eden izmed glavnih izzivov pri brizganju plastike je zagotavljanje enakomernega polnjenja vseh kavitet. Podjetje Kistler ta izziv naslavlja s celovito rešitvijo, ki združuje sistem za spremljanje procesa ComoNeo in sistem za balansiranje vročih kanalov Multiflow [2, 3].



Slika 1: Sistem Multiflow [3]

3.1 SISTEM ZA SPREMLJANJE PROCESA COMONEO

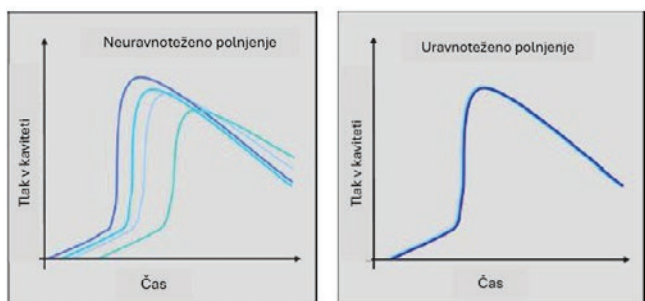
Sistem ComoNeo omogoča optimizacijo, spremljanje in dokumentiranje procesov brizganja plastike na podlagi tlaka v kaviteti. Ključne funkcije vključujejo:

- Merjenje tlaka v kaviteti v realnem času.
- Zgodovino ciklov, ki shrani vsaj 50.000 ciklov.

Te funkcije omogočajo proizvajalcem ohranjanje dosledne kakovosti izdelkov in izboljšanje stabilnosti procesa [2].

3.1 SISTEM ZA BALANSIRANJE VROČIH KANALOV MULTIFLOW

Sistem Multiflow dopolnjuje ComoNeo z avtomatskim prilagajanjem temperatur vročih kanalov za balansiranje tlaka v vseh kavitetah. Ko sistem ComoNeo zazna razlike v tlaku med kavitetami, sistem Multiflow odgovori s fino nastavitvijo temperatur toplih kanalov, s čimer zagotovi enakomerno polnjenje. Če tlak začne naraščati prezgodaj, pomeni da se kaviteta polni prehitro. Zato je treba temperaturo toplih kanalov nekoliko znižati, da se pretok upočasni in uskladi z ostalimi kavitetami. Če pa tlak naraste prepozno, se kaviteta polni prepočasi, kar lahko povzroči nepopolno zapolnitev, v tem primeru je priporočljivo zvišati temperaturo toplih kanalov. S takšnim prilagajanjem lahko dosežemo bolj enakomerno in stabilno polnjenje vseh kavitet [3].



Slika 2: Balansiranje polnjenja kavitet [3]

4 PREDNOSTI BALANSIRANJA POLNJENJA KAVITET S POMOČJO TLAČNIH SENZORJEV

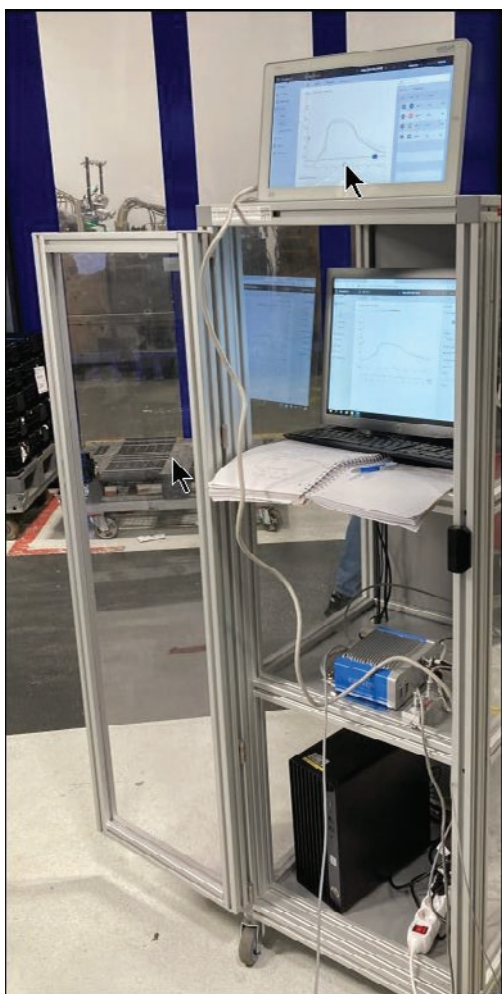
Uvedba sistemov za balansiranje na podlagi tlačnih senzorjev, kot sta ComoNeo in Multiflow, ponuja več prednosti:

- Zmanjšuje razlike v tlaku med kavitetami.
- Zagotavlja enakomerno polnjenje vseh kavitetah.
- Izboljšana kakovost izdelkov: Z zagotavljanjem enakomernega polnjenja kavitet sistemi zmanjšujejo napake in izboljšujejo splošno kakovost brizganih izdelkov.
- Zmanjšanje količine izmeta: Dosledno polnjenje zmanjšuje pojavnost defektnih delov, kar vodi do nižjega izmeta
- Izboljšana stabilnost procesa: Spremljanje in prilagoditve v realnem času ohranjajo stabilne pogoje procesa, tudi med nihanji serij.

5 PRIMER IZ PRAKSE: BALANSIRANJE 4 KAVITETNEGA ORODJA

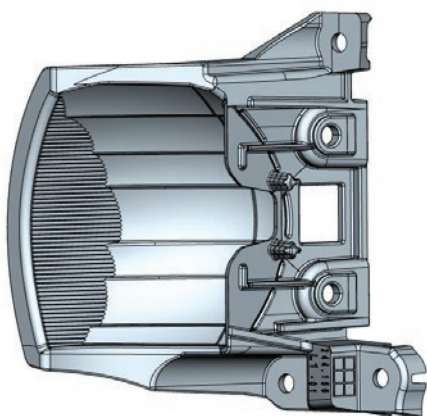
V podjetju smo se soočili z izzivom neenakomernega polnjenja pri 4-kavitetnem orodju za proizvodnjo radomov. Kljub natančni zasnovi orodja so se pojavile razlike v kakovosti izdelkov med posameznimi kavitetami, kar je povzročilo povečan izmet in zmanjšano učinkovitost proizvodnje.

Za reševanje tega problema smo uvedli sistem Kistler ComoNeo v kombinaciji s sistemom Multiflow. Da bi omogočili čim širšo uporabo sistema, smo razvili premično enoto, ki jo je mogoče enostavno priklopiti na več različnih orodij. S tem smo bistveno povečali fleksibilnost uporabe ter omogočili hitrejšo implementacijo rešitev na različnih proizvodnih lokacijah. Premična enota se je izkazala za zelo uporabno tudi pri optimizaciji novih orodij in validaciji procesa, saj omogoča zbiranje podatkov že v fazi kvalifikacije izdelka. Tako lahko morebitne težave prepoznamo in rešimo že pred začetkom serijske proizvodnje.



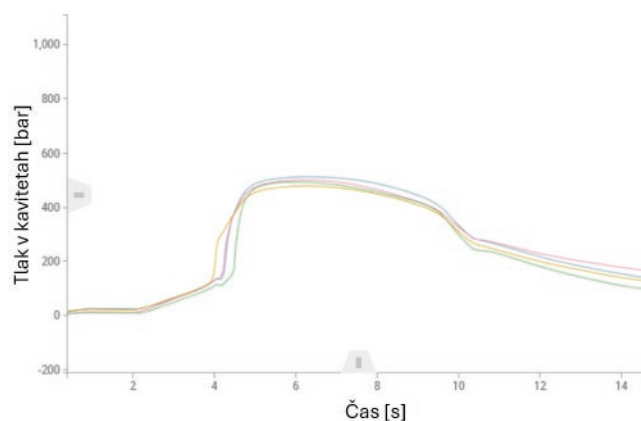
Slika 3: Premična enota ComoNeo

Test naprave smo nato izvedli še na 4-kavitetnem orodju za reflektor. Ker je orodje opremljeno tudi z sistemom FlexFlow, ki ga lahko prav tako uporabljamo za balansiranje, smo primerjali rezultate obeh sistemov.

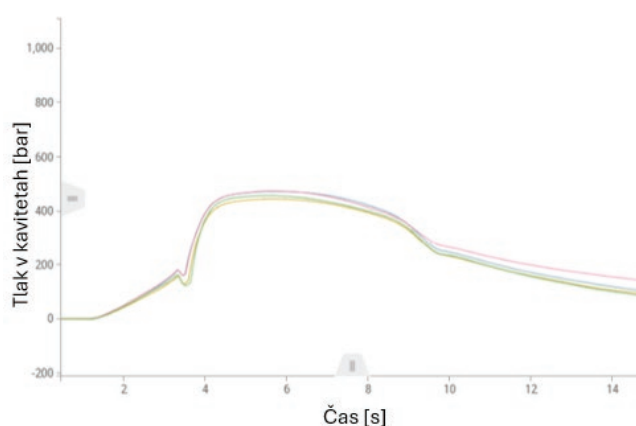


Slika 4: Reflektor

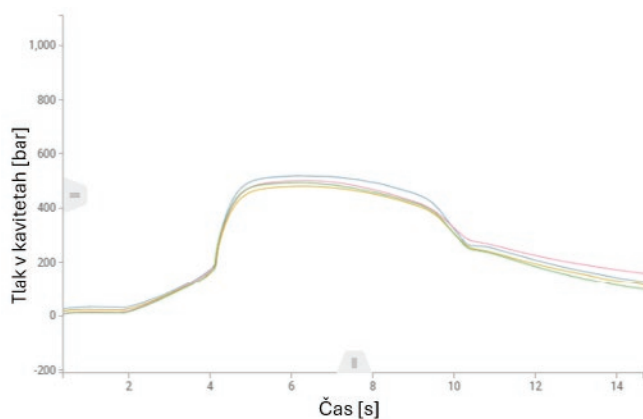
Tlačni senzorji so bili nameščeni v vsako kaviteto, kar je omogočilo natančno spremljanje tlaka med procesom brizganja. Na spodnjih grafih so prikazani profili tlaka med brizganjem v posameznih kavitetah za vsak primer. Razvidno je, da v primeru brez nadzora prihaja do razlik v tlakih med kavitetami, kar nakazuje na neenakomerno polnjenje. Tako Flexflow kot Multiflow sta znatno izboljšala stanje, vendar je Multiflow dosegel najboljše uravnoteženje in stabilnost procesa. Ko je sistem zaznal razlike v tlaku, je sistem Multiflow samodejno prilagodil temperature vročih kanalov, da je izenačil polnjenje vseh kavitet.



Slika 5: Serijski proces brez uporabe sistemov za balansiranje



Slika 6: Balansiranje s sistemom Flexflow



Slika 7: Balansiranje s sistemom Multiflow

S tem primerom smo pokazali, kako lahko uvedba naprednih sistemov za spremljanje in uravnoteženje procesa brizganja plastike bistveno izboljša stabilnost procesa in doslednosti kakovosti izdelkov.

6 SKLEP

Balansiranje brizgalnih tlakov v brizgalnih orodjih, s pomočjo tlačnih senzorjev, je ključni vidik pri proizvodnji visokokakovostnih, tehnično zahtevnih izdelkov. Sistemi, kot sta Kistler ComoNeo in Multiflow, zagotavljajo spremljanje v realnem času in samodejne prilagoditve, kar omogoča enakomerno polnjenje kavitete, izboljšuje kakovost izdelkov in povečuje učinkovitost proizvodnje. Uvedba takšnih naprednih sistemov je strateška poteza k doseganju proizvodnje brez napak pri brizganju plastike.

Viri:

- [1] Plastics Today: How Hot Runner Temperature Control Impacts Part Quality, (<https://www.plasticstoday.com/plastics-processing/hot-runner-technology-for-optimal-part-to-part-consistency>)
- [2] Kistler Group: ComoNeo – Cavity Pressure Monitoring System, (<https://www.kistler.com/INT/en/cp/process-monitoring-and-control-system-comoneo-5887a/P0000382>)
- [3] Kistler Group: Multiflow – Automatic Hot Runner Control, (<https://www.kistler.com/INT/en/cp/software-extension-comoneomultiflow-2809a/P0000202>)
- [4] Interna dokumentacija podjetja Hella Saturnus, Ljubljana, 2025

HITRA IZDELAVA BRIZGANIH IZDELKOV S POMOČJO 3D-TISKANIH ORODIJ

Andrej GLOJEK
TECOS

IZVLEČEK

V članku je predstavljen potek razvoja PEMF Surround naprave od ideje, industrijskega designa in priprave tehnološkega modela ob upoštevanju pravil konstruiranja plastičnih izdelkov. Razvoj je bil podprt z naprednimi simulacijami brizganja, po potrebi mehanskimi analizami. Izdelani so bili printani prototipi, ki so omogočili funkcionalno preverjanje in realno testiranje. Na osnovi simulacij je bil pripravljen zahtevek za orodje. Izvedeni so bili pregledi orodij in korektura na osnovi simulacij z upoštevanjem dejanskega hlajenja. Po preizkusu orodja na stroju so bili določeni optimalni parametri procesa. Izdelki so bili optično izmerjeni, sestavljeno je bilo mersko poročilo in potrjena skladnost. Računalniško podprt razvoj je omogočil zagon brez korekcij, kar je skrajšalo čas vstopa izdelka na trg.

Industrijski razvoj – od ideje do izdelka (CAD model na osnovi idej naročnika)

Razvoj izdelkov od ideje do serijskega produkta

- Pomoč Start-up podjetnikom pri razvoju raznovrstnih izdelkov
- Določitev ustreznih materialov, sestave produkta in tehnologije izdelave
- Stroškovna optimizacija in prilagoditev izdelka za proizvodnjo
- Razvoj, podprt z mehanskimi simulacijami, analizo brizganja kosa, 3D skeniranjem
- Izdelava vmesnih prototipov z lastnim FDM, SLA tiskalnikom ...
- Izdelava orodij in maloserijska proizvodnja

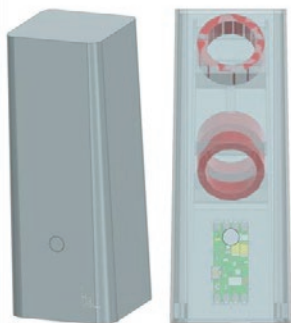


Razvoj PEMF Surround naprave



DESIGN predlogi

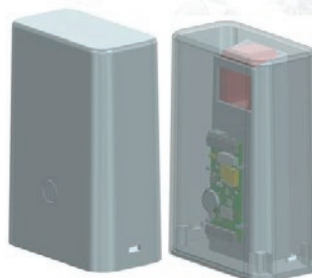
Design predlog 1



Design predlog 2



Design predlog 3



Design predlog 3

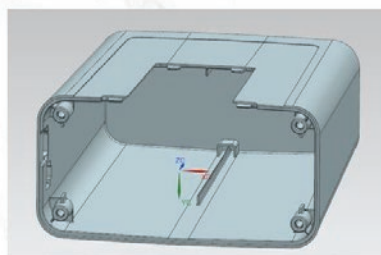
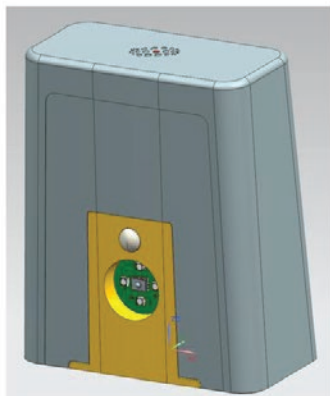


5

www.tecos.si info@tecos.si +386 3 490 09 20

TECOS

CAD model izdelka

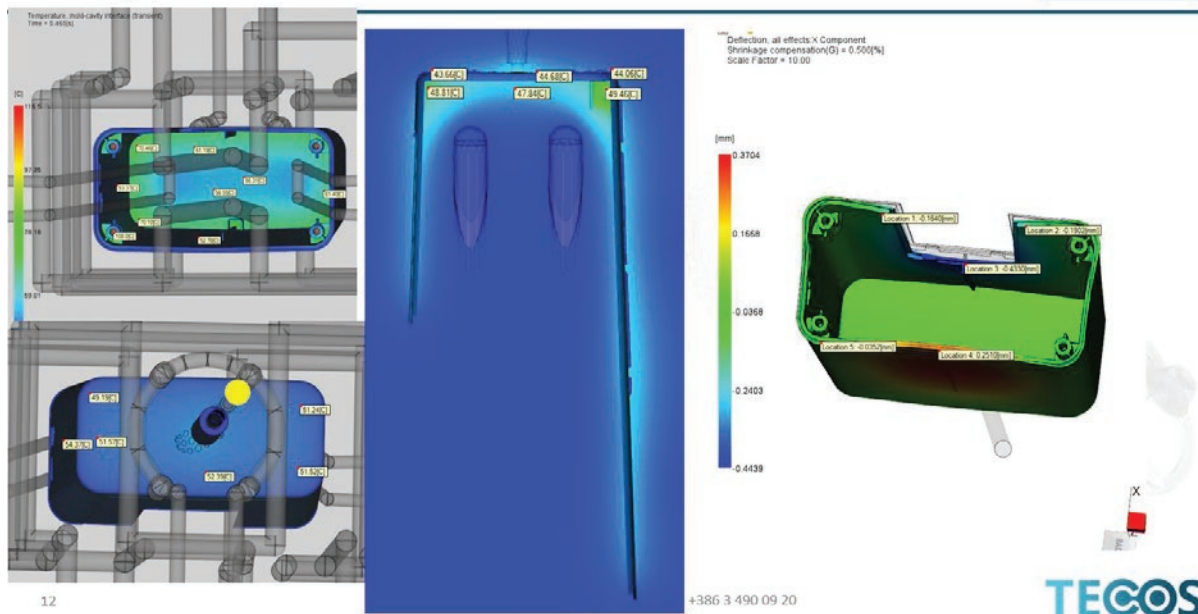


6

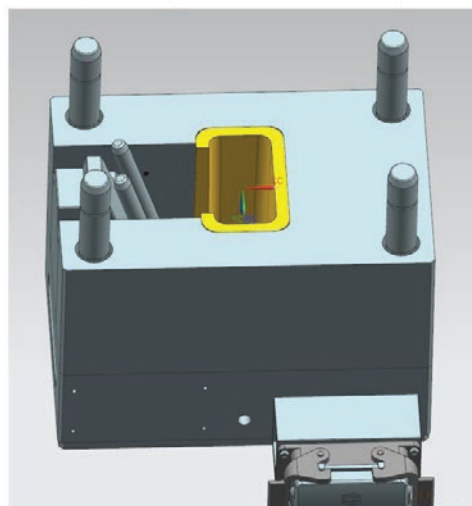
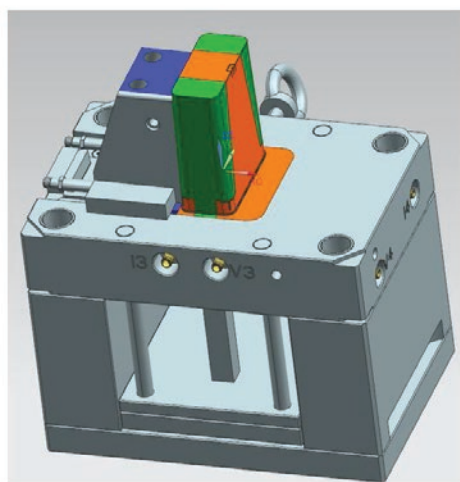
www.tecos.si info@tecos.si +386 3 490 09 20

TECOS

Simulacija procesa



Pregled konstrukcije orodja

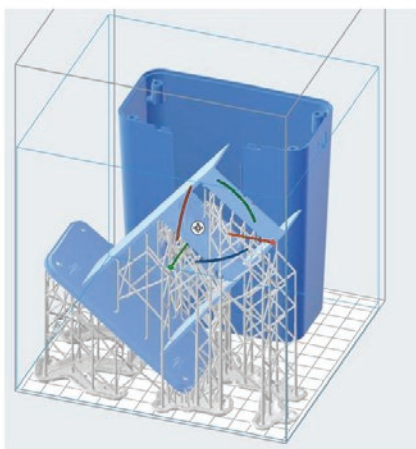


11

www.tecos.si info@tecos.si +386 3 490 09 20

TECOS

Printanje prototipov

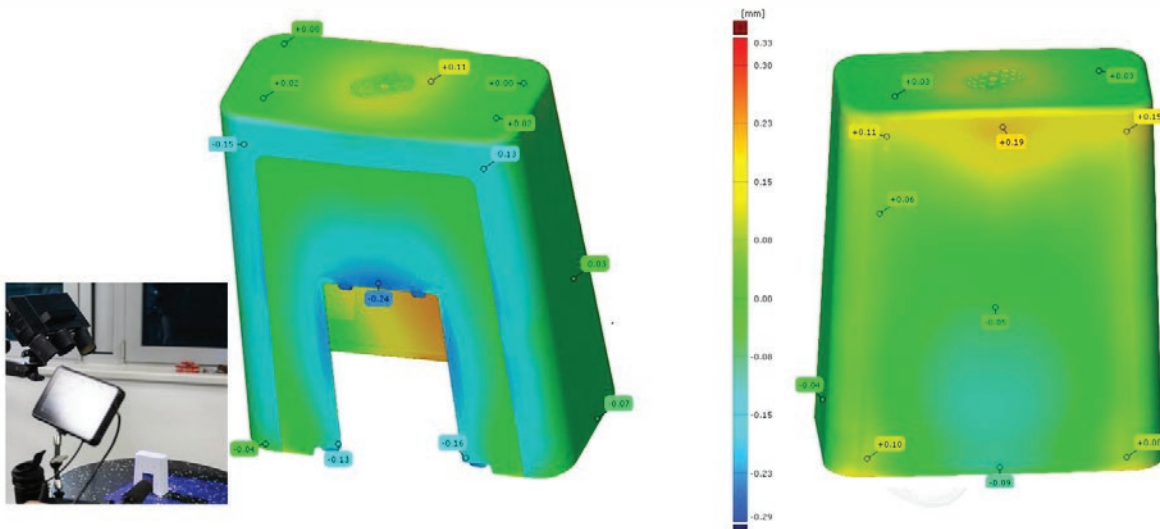


8

www.tecos.si info@tecos.si +386 3 490 09 20

TECOS

Meritev in potrditev izdelka



14

www.tecos.si info@tecos.si +386 3 490 09 20

TECOS

ANALIZA VPLIVA MENJAVE MATERIALA OHIŠJA POGONSKE ENOTE KUHINJSKEGA ROBOTA NA RAVEN HRUPA IN PSIHOAKUSTIKO

Tadej NOVAKOVIČ, David ENCI, Boštjan ZAFOŠNIK
BSH Hišni aparati d.o.o. Nazarje

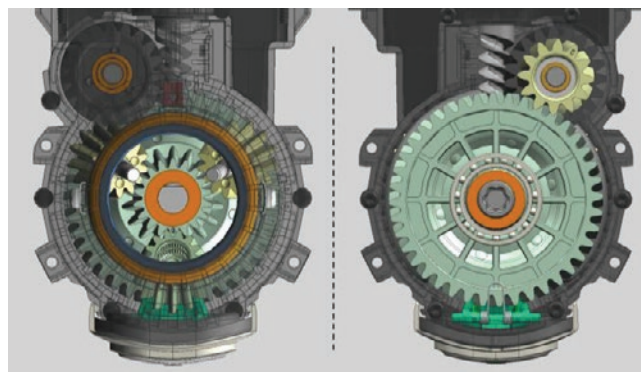
IZVLEČEK

Kuhinjski roboti so večnamenski majhni gospodinjski aparati, ki se uporabljajo za različne aplikacije, kot so gnetenje testa, stepanje smetane, mešanje, ipd. Pripomočki, ki se uporabljajo na osnovnem aparatu, zahtevajo različne specifikacije navora in vrtilne hitrosti. Rešitev za te zahteve je pogonska enota z več odgoni. Kompleksni planetni in polžasti prenosi generirajo hrup, ki je predvsem diskretne narave. Ohišje pogonske enote je stična točka s preostalimi elementi aparata, ki prenaša strukturne vibracije iz zobnikov na preostali del aparata. Hrup se izseva z velikih površin ohišja aparata. Ker ohišje pogonske enote predstavlja glavno pot za generirane sile, imajo njegove materialne lastnosti vpliv na hrup. Analizirana sta bila dva materiala ohišja. Primerjali smo številne značilnosti hrupa, kot so raven zvočne moči in psihoakustične značilke. Zvočni signal je bil posnet v skladu z EN60704-2-11 in ISO3744. Za vsak material je bilo analiziranih dvajset vzorcev aparatov, sestavljenih na proizvodni liniji. Rezultati kažejo, da so razlike med vzorci istega materiala precej večje od povprečne razlike med materiali. Variacija proizvodnje torej bolj vpliva na zvočne značilnosti aparatov kot sprememba materiala. Poleg tega je očitno, da izstopajoči aparati kažejo variacijo v geometriji zobnikov, ki jo je potencialno mogoče prepoznati z opazovanjem psihoakustičnih značilk hrupa ali vibracij.

1 UVOD

Kuhinjski roboti so majhni gospodinjski aparati, ki uporabnikom omogočajo enostavno pripravo različnih jedi kot so kruh, sladice, sekljana zelenjava, ipd. Funkcionalnosti se zagotavljajo z uporabo različnih orodij, kot sta gnetilec in metlica za stepanje, ter priključkov kot so mešalnik, pretočni rezalnik, priključek za mletje mesa, ipd. Ker ima vsak izmed priključkov svoje zahteve glede vrtilne frekvence ter navora pogona, je pogonska enota kompleksen sestav z več odgoni (Slika 1). Sestavljena je iz polžastega prenosa, zobniških dvojic ter planetnega reduktorja. Kot taka predstavlja kompleksni vir vibracij ter posledično strukturalnega hrupa, saj se vibracije preko ohišja enote preko pritrdilnih točk širijo na ohišje celotnega aparata, kjer se z večjih površin okrova posledično izseva strukturalni hrup. Ohišje pogonske enote prenaša obremenitve s podpor zobnikov na ostale elemente aparata, zato so njegove materialne lastnosti pomembne, tako s stališča trdnosti, kot tudi hrupnosti celotnega aparata. Pri menjavi materialov tekom življenjskega cikla produkta, je

zato potrebna posebna skrb, da se ne povzroči poslabšanje zvočnih karakteristik aparata.



Slika 1: Reduktor pogonske enote – pogled od spodaj (levo) in pogled od zgoraj (desno)

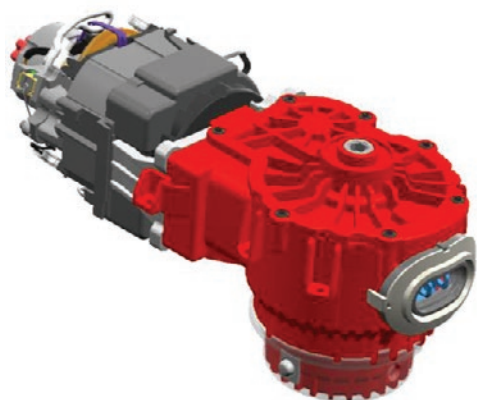
Hrup je pomemben del uporabniške izkušnje kuhinjskega robota. Pri tem je pomembno poudariti, da ne gre le za deklarirano zvočno moč, saj značaj hrupa - poleg same jakosti, pomembno vpliva na uporabnikovo dožemanje kakovosti celotnega aparata. Značaj hrupa pri tem predstavlja nabor časovno-frekvenčnih značilnosti zvoka, ki jih pokriva področje psihoakustike. Psihoakustična analiza se lahko vrši na več načinov, običajno pa kot njihova kombinacija. Gre za kombinacijo subjektivnih

ocen hrupa in merljivih parametrov, s katerimi skušamo opisati človeško dožemanje hrupa. Subjektivne ocene lahko pridobimo s t.i. slušnimi testi, kjer uporabniki poslušajo zvočne posnetke ter jih ocenjujejo s pomočjo semantičnih diferencialov. S pomočjo teh ocen lahko razvijemo model nadležnosti hrupa, ki povezuje psihoakustične značilke, ki se jih računa iz zvočnega signala s subjektivnim dožemanjem uporabnikov. Analiza v tem prispevku je omejena le na uporabo psihoakustičnih značilk, ki se jih računa iz signala zvočnega tlaka, saj slušnih testov nismo izvajali.

V prispevku je obravnavan vpliv menjave polimernega materiala ohišja pogonske enote na značilnosti izsevanega hrupa. Na začetku so predstavljeni obravnavani vzorci aparatov ter metodologija meritev ter obdelave rezultatov. Na kratko so predstavljene uporabljene psihoakustične značilke. Analiziran je raztros rezultatov glede na variacijo v proizvodnji. Analiza obsega ravni zvočne moči celotnega aparata ter psihoakustične značilnosti hrupa. Na koncu so predstavljene ugotovitve ter možnosti za izboljšave ter nadaljnjo obravnavo.

2 VZORCI IN METODOLOGIJA

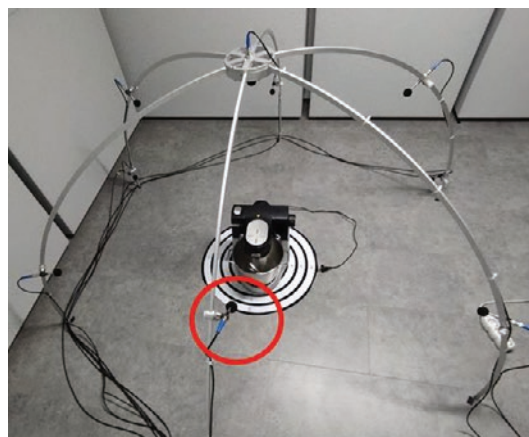
V analizo je bilo zajetih skupno 20 vzorcev kuhinjskih robotov Bosch Serije 6. Prvih 10 vzorcev ima ohišje pogonske enote (Slika 2) izdelano iz obstoječega materiala (v nadaljevanju označen kot »Serijski«), drugih 10 vzorcev pa ima ohišje pogonske enote iz materiala drugega proizvajalca, vendar iz iste družine polimerov (v nadaljevanju označen kot »Nov«).



Slika 2: Ohišje pogonske enote (rdeče)

Vsi vzorci so bili sestavljeni na proizvodni liniji. Aparat omogoča nastavitve hitrosti po nivojih od 1 do 7, meritve pa so se izvajale pri hitrostih 3 in 7.

Meritve zvočne moči L_W so se izvajale v polgluhi sobi ter mikrofoni nameščenimi po polkrogli skladno z EN60704 ter ISO3744 (Slika 3). Z rdečo krožnico na Sliki 3 je označen mikrofoni, ki smo ga uporabili za analizo signalov zvočnega tlaka ter preračun psihoakustičnih značilk.



Slika 3: Postavitev aparata za meritve zvočne moči, rdeče označen mikrofoni za obdelavo signalov

Uporabili smo psihoakustične značilke - Glasnost N (DIN 45631 / A1), Tonalnost T (DIN 45681), Ostrina S (DIN 45692), Stopnja fluktuacije F [1], Hrapavost R [1]. Iz navedenih značilk smo izračunali tudi psihoakustično nadležnost PA , ki jih povezuje v eno-številčno vrednost. Parameter je v osnovi zasnoval nemški profesor Eberhard Zwicker, zato se ga imenuje tudi Zwickerjeva nadležnost [2]. Uporabili smo razširjeno obliko, ki je posebej uporabna za zvoke z močnim tonalnim značajem, [3]. Za preračune smo uporabili implementacijo kalkulacije značilk v programskem okolju NI Labview.

Vsi prikazani rezultati so bili normirani na maksimalno vrednost (oznaka % $_{MAX}$) izmed obravnavanih vzorcev, tako da so primerjalne vrednosti izražene v odstotkih maksimalne vrednosti.

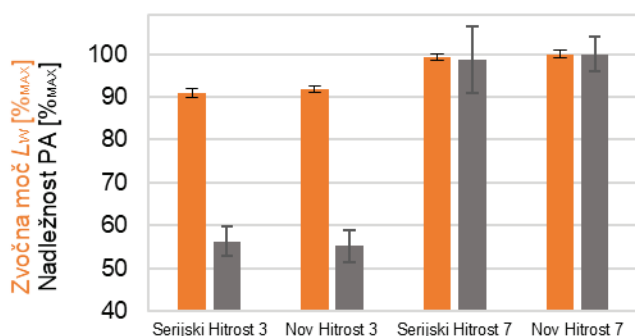
3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Na začetku tega poglavja so predstavljeni integralni rezultati in primerjava meritev zvočne moči ter psihoakustične nadležnosti. V nadaljevanju je predstavljena podrobnejša

psihoakustična analiza hrupa aparatov za oba materiala ohišja pogonske enote.

3.1 Integralna analiza rezultatov

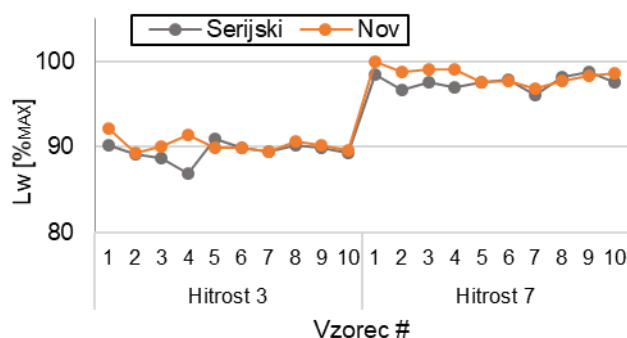
Če primerjamo povprečne ravni zvočne moči, za oba materiala (Slika 4), opazimo, da ni večjih razlik. Pri tem je raztros (standardni odklon) rahlo večji pri novem materialu, kar lahko pripišemo dejstvu, da orodje za brizganje ohišja ni bilo optimirano za novi material. Pri nadležnosti opazimo trend rahlo nižje vrednosti pri starem materialu, vendar je raztros večji in prekrije povprečno razliko, zato ni mogoče zaključiti, da je kateri od materialov bolj primeren.



Slika 4: Primerjava rezultatov zvočne moči in nadležnosti hrupa

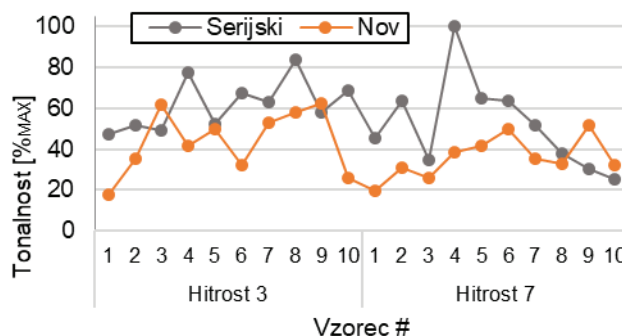
3.2 Poglobljena analiza rezultatov

Ker integralne značilnosti hrupa ne dajo dovolj dobrega vpogleda v razlike med materiali, je potrebno analizirati posamezne značilke ter diskretne spektre hrupa. Slika 5 prikazuje variacijo zvočne moči med posameznimi vzorci za obe obravnavani vrtilni hitrosti. Raztros ima lahko več virov, v tem primeru pa gre predvsem za variacijo geometrije brizganih zobnikov.



Slika 5: Zvočna moč vzorcev za obe vrtilni hitrosti

Zobniki povzročajo izrazito tonalen (pri diskretnih frekvencah) hrup, zato smo v nadaljevanju analizirali Tonalnost (Slika 6). Prikazana je za oba materiala pri nastavitvah hitrosti 3 in 7 za vse obravnavane vzorce.

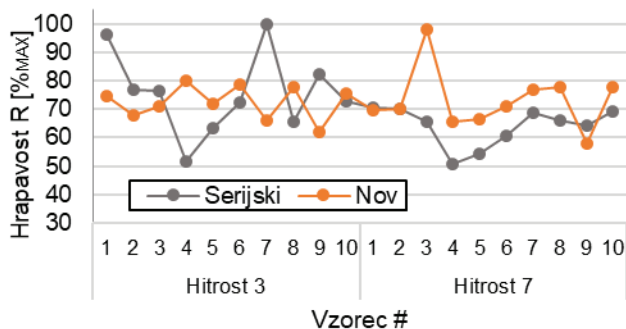


Slika 6: Tonalnost hrupa za obe vrtilni hitrosti

Tonalnost ima visok vpliv na negativen vtis pri uporabnikih, zato je še posebno pomemben parameter. To je izrazito zlasti, ko so vrednosti tega parametra visoke. Skupno gledano ima aparat z novim materialom ohišja pogonske enote nižjo tonalnost, raztros pa je pri obeh primerih visok. Vrednosti so poleg tega konsistentne tudi po spremembi vrtilne hitrosti. Tonalni hrup pri pogonski enoti aparata povzroča predvsem ubiranje zobnikov. Doprinos zobniških dvojic k skupni ravni hrupa je predvsem pri diskretnih frekvencah, ki so enostavno določljive iz števila zob in vrtilne frekvence posameznega zobnika. Tonalnost kot eno-številčni parameter upošteva diskretne frekvenčne komponente po celotnem spektru.

Ker je maksimalno prestavno razmerje pogonske enote visoko – približno 1:80, se pojavijo tudi nizkofrekvenčni pojavi, ki jih z običajno spektralno analizo hrupa ni mogoče zaznati. V primeru meritev vibracij se te pojavi analizirajo s pomočjo ovojnica signala (*ang. envelope detection*), v psihoakustiki pa te pojave opisujeta hrapavost (Slika 7) ter stopnja fluktuacije, ki upoštevata nizkofrekvenčne modulacije amplitude zvočnega signala. V obravnavani pogonski enoti je glavni vir tega hrupa nosilec planetov ter notranje ozobje, ki je brizgano v samo ohišje pogonske enote. Morebitne anomalije oziroma odstopanja geometrije teh elementov lahko tako prepoznamo z uporabo psihoakustičnih značilk. Če poslušamo

zvočne posnetke izstopajočih vzorcev na Sliki 7, opazimo, da je hrup manj ugoden od vzorcev z nižjimi vrednostmi parametra hrapavost.



Slika 7: Porazdelitev parametra hrapavost

3.3 Anomalije pri uporabi zvočne moči za ocenjevanje vpliva hrupa na uporabnike

Zvočna moč je najpogostejši parameter, ki se ga uporablja za ocenjevanje hrupa produktov. Pri večjih hišnih aparatih je obvezna navedba ravni zvočne moči kot del energijske nalepke. Ko gre za oceno dojetja hrupa kupcev, pa je slika lahko drugačna. Na diagramu na Sliki 8 je primerjava zvočne moči, nadležnosti ter tonalnosti za vzorec 4.



Slika 8: Primerjava zvočne moči, nadležnosti hrupa in tonalnosti za vzorec 4

Opaziti je, da je zvočna moč vzorca, ki ima ohišje pogonske enote izdelano iz novega materiala, višja v primerjavi s serijskim materialom, pri tem pa sta nadležnost hrupa in tonalnost višja pri serijskem materialu. V primeru, da bi bil tak rezultat konsistenten in statistično relevanten, bi lahko napačno ocenili, da je aparat, kjer smo uporabili nov material, manj ugoden za uporabnika s stališča hrupa.

4 ZAKLJUČEK

Ko gre za produkte za domačo rabo, je kupec in uporabnik tisti, na katerega je vpliv hrupa največji. Cilj proizvajalca je torej narediti produkt, ki seva hrup, ki je kar najmanj nadležen. Najenostavnejša ocena je meritev in primerjava zvočne moči, saj je metoda standardizirana in enostavna za izvedbo in obdelavo rezultatov. Težava pri uporabi zvočne moči za oceno vpliva na uporabnika je, ker ta ne upošteva človeškega odziva na zvok, ampak samo raven zvočnega tlaka, ki je na določen način integrirana po navidezni površini okoli analiziranega vira. Za kompenziranje frekvenčnega odziva človeškega sluha se pri tem uporabi še A-vrednotena krivulja (filter). Težava te metode je, da ne upošteva pojavov, ki vplivajo na človeški sluh, kot je spektralno maskiranje, različni časovni dogodki v zvoku, subjektivno dojetje posameznika ali segmenta uporabnikov, ter posebnih zahtev uporabnikov za posamezno vrsto produktov.

Da bi izboljšali produkte in uporabniško izkušnjo, ter s tem njihovo dodano vrednost, je zato potrebno hrup obravnavati tudi s pomočjo psihoakustike.

Viri:

- [1] Zwicker, E, Fastl, H. Psychoacoustics: Facts and models. Vol. 22. Springer Science & Business Media; 2013.
- [2] H. Fastl, E. Zwicker Psychoacoustics – Facts and Models (3rd ed.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2007:), p. 325
- [3] G.-Q. Di, X.-W. Chen, K. Song, B. Zhou, and C.-M. Pei, "Improvement of Zwicker's psychoacoustic annoyance model aiming at tonal noises," Applied Acoustics, vol. 105, pp. 164–170, 2016.

NOVI TRENDI V AVTOMOBILSKI INDUSTRIJI - PRILOŽNOSTI IN IZZIVI ZA PLASTIČARJE

Aleš ADAMLJE

Hella Saturnus Slovenija, d.o.o.

IZVLEČEK

Trendi v avtomobilski industriji se v zadnjih letih hitro spreminjajo. Zahteve po trajnostnem razvoju in znižanju emisij silijo proizvajalce avtomobilov k razvoju in uporabi alternativnih pogonov in trajnostnih materialov, razvoju novih konceptov polizdelkov in sestavov ter znižanju stroškov za ohranjanje konkurenčnosti.

Novi trendi ne prinašajo le novih konceptov izdelkov ampak tudi nove pristope pri razvoju izdelkov, saj je partnersko sodelovanje oblikovalcev avtomobilov, razvojnih oddelkov na strani kupca in dobavitelja, dobaviteljev materialov, orodjarjev in proizvajalcev strojev in opreme, ključno za kvaliteten izdelek. Poleg tega je pri razvoju izdelka nujna uporaba sodobnih inženirskih metod, s katerimi izboljšamo konstrukcijo izdelkov za proizvodnjo.

V podjetju Hella Saturnus Slovenija smo v zadnjih letih intenzivno vpeti v razvoj novih konceptov karoserijskih polizdelkov in sestavov za sprednji del avtomobila, ki zahtevajo nove pristope pri izdelavi.

V članku bo predstavljen primer panela s funkcijo "light from nowhere" ter izzivi in priložnosti, s katerimi se srečujemo dobavitelji izdelkov pri razvoju in industrializaciji panelov. Za ohranitev konkurenčnosti na trgu moramo dobavitelji nenehno razvijati nove koncepte izdelkov, ki sledijo trendom na trgu in zahtevam posameznih kupcev.

1 UVOD

Spremembe v avtomobilski industriji so v zadnjih letih prinesle velike izzive tako proizvajalcem vozil kot tudi dobaviteljem po celotni dobaviteljski verigi. Za ohranjanje konkurenčnosti na trgu so tako proizvajalci kot dobavitelji prisiljeni razvijati nove izdelke, ki se razlikujejo od konkurenčnih rešitev izdelkov na trgu. Trendi uporabe alternativnih pogonov, trajnostnega razvoja, individualizacije in povezljivosti vozil ter izboljšanja aktivne in pasivne varnosti vozil so v zadnjih letih postali ključni pri razvoju novih vozil. Novi trendi zahtevajo nove koncepte izdelkov in sestavov tako v potniški kabini kot na zunanjih karoserijskih delih avtomobila. Le ti prinašajo dobaviteljem v avtomobilski industriji dodatne priložnosti pri razvoju vozil.

Na sliki 1 je predstavljen nov koncept vozila Saphir podjetja Forvia, pri katerem so ključni poudarki na udobju, varnosti, uporabi novih

tehnologij in trajnostnemu razvoju. Avtomobil ne bo več le prevozno sredstvo ampak prilagodljiv osebni prostor za delo, prosti čas in socialno interakcijo. [1]



Slika 1: Koncept Saphir - avtomobil prihodnosti podjetja Forvia [1]

Poleg prilagodljivega potniškega prostora prinaša avtomobil prihodnosti veliko sprememb na področju oblikovanja karoserije avtomobila, še posebej na sprednjem in zadnjem delu karoserije.

Na sliki 2 in 3 sta prikazana nova koncepta osvetlitve sprednjega dela avtomobila, na sliki 4 pa nov koncept osvetlitve zadnjega dela avtomobila.



Slika 2: Koncept osvetlitve vozila prihodnosti – sprednji del [2]



Slika 3: Koncept osvetlitve vozila Forvia Saphir z integracijo zaslona in projekcij [1]

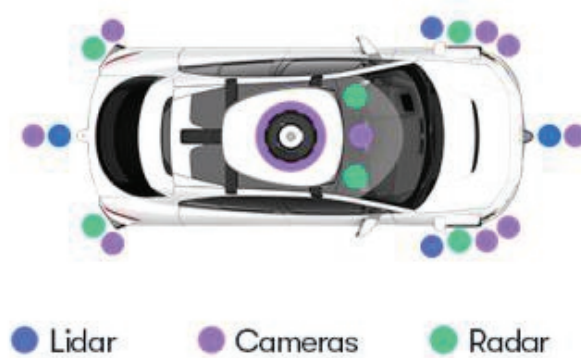


Slika 4: Koncept osvetlitve - zadnji del vozila [3]

Trend oblikovanja karoserijskih izdelkov gre v smeri individualizacije in diverzifikacije osvetlitve glede na znamko vozila ter integracijo

zaslonov in projekcij, ki bodo omogočili direktno komunikacijo z ostalimi deležniki v prometu.

Eden od ključnih trendov prihodnosti je tudi avtonomna vožnja. Za avtonomno vožnjo mora biti vozilo opremljeno s sistemi senzorjev, kamer in programske opreme, ki bodo v prihodnosti omogočili popolnoma samodejno vožnjo (nivo 5). Na sliki 5 je shematsko prikazan primer opreme vozila s sistemi za samodejno vožnjo podjetja Waymo. Sistem je sestavljen iz večjega števila radar in lidar senzorjev ter kamer, ki omogočajo povsem samodejno vožnjo vozila. Za delovanje ti sistemi zahtevajo uporabo ustreznih materialov in prilagojeno konstrukcijo izdelkov.



Slika 5: Sistem senzorjev in kamer za samodejno vožnjo – Waymo One [4]

Trajnostni razvoj avtomobilov zahteva tudi uporabo okolju prijaznih materialov. Delež le teh v izdelkih se iz leta v leto povečuje. V preteklosti se je v manjši meri uporabljalo mehansko reciklirane materiale, z novimi regulativami pa se povečuje delež tako mehansko kot kemijsko recikliranih materialov ter materialov, ki bazirajo na bio surovinah.

2 PRIMER PANELA "LIGHT FROM NOWHERE"

Primer novega tipa izdelka - panela za sprednji del karoserije avtomobila je prikazan na sliki 6. Osnovna značilnost predstavljenega panela je homogen enobarvni izgled z dodanimi napisi in logotipom. V primeru uporabe funkcije osvetlitve prihaja svetlobe iz zadnje strani panela in ustvarja različne svetlobne učinke glede na željeno funkcijo. Zasnova panela omogoča, da je z

uporabo potiskanih folij grafika panela prilagojena zahtevam kupca. Osnovna barva grafike panela je lahko nevtralna ali harmonizirana z barvo vozila.



Slika 6: Panel "light from nowhere" [5]

Panel je sestavljen iz 8 osnovnih polizdelkov (slika 7), ki se sestavijo v enem montažnem procesu. V panel je integrirana elektronika in viri svetlobe.



Slika 7: Sestavljen panel [2]

Ob uporabi svetlobnih funkcij (slika 8) se na sprednji površini panela ustvarijo svetlobni učinki, ki so odvisni od željene svetlobne funkcije.



Slika 8: Osvetljen panel [5]

Panel dodatno omogoča integracijo radarskega sistema. Sprednja plošča panela ima v področju radarja vgrajen sistem ogrevanja (slika 9), ki onemogoča zaledenitev sprednje površine panela

ko temperature padejo pod ledišče. S tem je funkcija radarja zagotovljena v vseh vremenskih pogojih.



Slika 9: Osvetljen logotip panela z integriranim sistemom ogrevanja [5]

Na sliki 10 so predstavljene različne osvetlitve panela glede na uporabljeno svetlobno funkcijo. Posamezne funkcije so namenjene uporabniku vozila ali interakciji z okolico. Funkcije lahko prikazujejo stanje vozila ali podajajo informacije uporabniku vozila in ostalim deležnikom v prometu.



Slika 10: Osvetljen panel glede na svetlobno funkcijo [5]

Dodatno ima panel možnost individualizacije v obliki dodatnih napisov ali grafike na poljubnem delu sprednje površine panela (slika 11).



Slika 11: Integracija napisov na plošči panela [5]



Slika 12: Osvetljena konture sprednjega dela vozila [5]



Slika 13: Multifunkcionalna osvetlitev sprednjega dela vozila – ločena žaromet in panel [5]

3 PRILOŽNOSTI IN IZZIVI ZA PROIZVAJALCE POLIZDELKOV IN SESTAVOV IZ POLIMEROV

Novi trendi prinašajo plastičarjem nove priložnosti in hkrati izzive na globalnem trgu. Pritiski po znižanju cen izdelkov dobavitelje silijo v proizvodnjo dimenzijsko večjih in kompleksnejših polizdelkov in sestavov z višjo dodano vrednostjo. Za proizvodnjo le teh so potrebni novi tehnološki postopki in oprema. Kompleksnejši koncepti izdelkov zahtevajo vključevanje kupcev, orodjarjev, dobaviteljev materialov in dobaviteljev strojev in opreme. tekom celotnega procesa razvoja in industrializacije izdelka. Uporaba sodobnih inženirskih metod tekom razvoja in partnersko sodelovanje vseh deležnikov je nujno za uspešen zagon proizvodnje izdelka.

Na slikah 12, 13 in 14 je prikazanih nekaj trendov oblikovanja sprednjega dela vozila z integriranimi svetlobnimi funkcijami. Posamezne zasnove se razlikujejo glede števila, velikosti, oblike in svetlobnih funkcij posameznih sestavnih delov. Na vozilih se lahko osvetli zunanja kontura (slika 12), izvede multifunkcionalno osvetlitev z ločenimi sestavi za panel in žaromete (slika 13) ali pa integrira panel z žarometi (slika 14). Pri vseh predstavljenih konceptih so gabariti izdelkov večji kot v trenutnih konceptih izdelkov, kar za večino dobaviteljev predstavlja nove izzive glede doseganja pričakovane kakovosti izdelkov in razpoložljivosti strojev in opreme.



Slika 14: Multifunkcionalni panel z integriranimi žarometi [5]

4 SKLEP

Spremembe na avtomobilskem trgu zahtevajo nenehno prilagajanje in sledenje zahtevam trga, partnersko sodelovanje vseh deležnikov v vseh fazah razvoja izdelka, uporabo sodobnih inženirskih metod in inovativnost. Uvajanje novih tipov izdelkov, novih tehnoloških postopkov in nadgrajevanje znanj so stalnice, ki so ključne za obstoj dobaviteljev na globalnem trgu.

Viri:

[1] Mobility always find path with Forvia, Presskit 2025; https://www.forvia.com/sites/default/files/2025-04/Auto Shanghai 2025_PressKit_EN_0.pdf; 29.04.2025.

[2] Forvia Hella: Front phygital shield; <https://www.forvia.com/en/pioneering-technologies/safe-and-automated-driving>; 29.04.2025.

[3] Safe and avtomated driving - Dinamic lighting with flatlight; <https://www.forvia.com/en/pioneering-technologies/safe-and-automated-driving>; 29.04.2025.

[4]Waymo One help: How our cars drive; <https://support.google.com/waymo/answer/9190838?hl=en>; 29.04.2025

[5] Forvia_Front_Phygital_shield.pdf; Hella Forvia 2024; 08.05.2024 (osebni arhiv)

LSR – BRIZGANJE TEKOČEGA SILIKONA

Miha PUŠNIK
FANUC Adria d.o.o.

IZVLEČEK

Tokrat vam predstavljamo aplikacijo brizganja tekočega silikona za katerega se uporablja kratica LSR – Liquid Silicone and Rubber.

1 UVOD

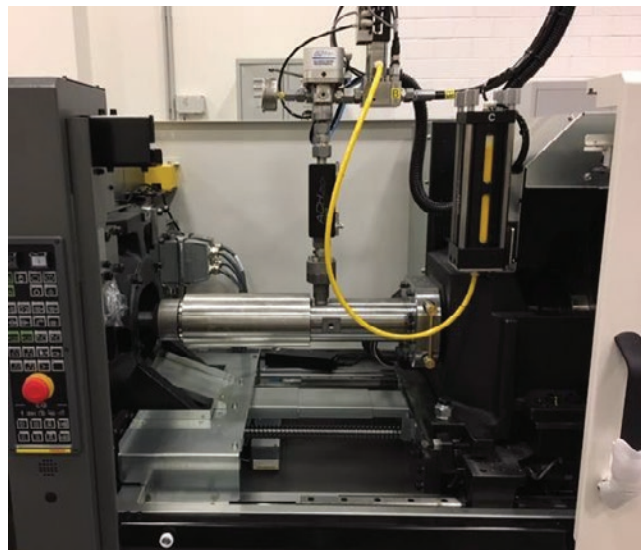
Injekcijsko Brizganje je splošno razširjena tehnologija predelave termoplastov in duroplastov v najrazličnejših industrijah. Z brizganjem praviloma izdelamo visoko serijske enostavne ali tehnične plastične kose, ki konkurirajo in v določenih segmentih prehitujejo rabo kovin. Glavna prednost brizganja je ta, da po končani predelavi ni dodatnih operacij za odzemanje ali preoblikovanje materiala. To glavno prednost izrablja tudi LSR tehnologija, ki omogoča brizganje silikona in s tem konkurira gumiranim delom. Tako je LSR boljša izvedba gumiranja oziroma vulkanizacije, saj je LSR tehnologija veliko bolj čista. Čistost pomeni, da lahko uporabljamo materiale za stik s hrano in medicino.



Slika 1: FANUC Roboshot demo brizgalni stroj zapiralne sile 130t

2 VAŠE PREDNOSTI

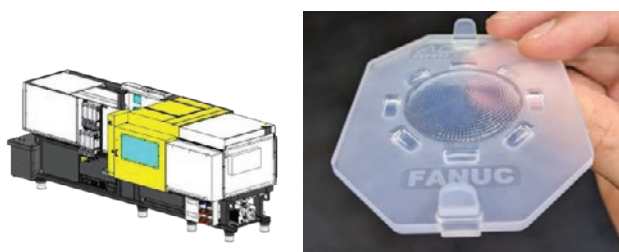
- CNC Natančnost
- Visoka stabilnost in ponovljivost za manj izmeta
- AI Varovanje orodja in izmetal
- AI Nadzor plastificiranja
- Funkcija pred brizganja za hitrejša cikle.



Slika 2: Brizgalna enota za brizganje silikona

LSR injekcijsko brizganje je postopek, kjer dve komponenti silikona premešamo in jih hladne vbrizgamo v vroče orodje. Tako dobimo brizgane silikonske kose, ki so pripravljene za uporabo. V Sloveniji je le par podjetij, ki obvladujejo brizganje tekočega silikona, saj takšna aplikacija zahteva posebna orodjarska znanja. Trenutno v

Sloveniji ni orodjarne, ki bi se ukvarjala z izdelavo orodij za brizganje tekočega silikona, zato je LSR segment nekakšna neznanka na našem trgu. Kljub temu imamo v Sloveniji podjetje, ki uporablja Fanuc LSR aplikacije kateremu se bo predvidoma v kratkem pridružilo še eno novo podjetje, ki želi svojemu podjetju izboljšati dodatno vrednost z osvojitvijo te nove tehnologije. Opažamo porast zanimanja za LSR tehnologijo, zato smo z lokalnimi partnerji razvili poslovni model s katerim lahko dostavimo rešitve na ključ.



Slika 3: Razvoj LSR aplikacije

3 LSR APLIKACIJO SESTAVLAJJO

- Dozirni sistem za doziranje dvokomponentnega silikona
- Stroj za brizganje silikona
- Orodje
- Oprema za brizganje in odzemanje kosov iz orodja

Kot že zgoraj omenjeno brizgamo hladen silikon v toplo orodje. Za tako viskozne materiale potrebujemo izjemno tesnost, natančnost in ponovljivost vbrizga. Brizgamo v vakuum s posebnimi zapiralnimi ventili, ki lahko kontrolirajo volumen brizga v vsakem gnezdu orodja. Izjemno pomembna je ponovljivost procesa, saj le tako lahko zagotovimo konstantno kvaliteto silikonskih kosov.



Slika 4: FANUC LSR aplikacija v čisti sobi

3 SKLEP

Preciznost, ki jo lahko zagotovi Fanuc krmilnik uporabimo za kvalitetno mešanje in doziranje. Celotno aplikacijo in vso dodatno opremo tako upravlja FANUC CNC krmilnik, ki je v svetu prepoznan po svoji stabilnosti in robustnosti. S FANUC servo tehnologijo poskrbimo za izjemno energetske učinkovitost in natančnost. Glede dozirnih sistemov Fanuc ponuja različne sisteme in dobavitelje opreme, ki jih potrebno izbrati skladno z zahtevami projekta.

KROŽNO GOSPODARSTVO NI VEČ IZBIRA – TEMVEČ NUJA. KAKO EU SPREMINJA PRAVIL IGRE

**Anja POPOVIČ ANDOLJŠEK, Kristina OBU VAZNER, Urška BUTOLEN,
Aleš MIHELČ**
Gorenje, d.o.o.

IZVLEČEK

Prispevek obravnava prehod k trajnostni industriji kot nujnost in ne več kot izbiro, pri čemer Evropska unija postavlja nove standarde preko Uredbe o okoljsko primerni zasnovi trajnostnih proizvodov (ESPR). Ta zahteva celosten pristop k oblikovanju izdelkov, vključujoč popravljivost, reciklabilnost in zmanjševanje ogljičnega odtisa. Ključno orodje v tem prehodu je digitalni potni list izdelka (DPP), ki omogoča sledljivost in transparentnost skozi celoten življenjski cikel izdelka. Projekta CircThread in CIRPASS-2 podpirata razvoj in implementacijo DPP ter digitalizacijo krožnih modelov v industriji. Gorenje sodeluje kot vodilni industrijski partner in s tem krepi svojo vlogo v trajnostni preobrazbi evropske proizvodnje.

1 UVOD

Industrijska doba nas je naučila ene stvari: viri niso neskončni. Po stoletjih nepremišljenega izkoriščanja Zemljinih zalog se zdaj soočamo s posledicami – podnebnimi spremembami, onesnaženjem in vedno večjim odpadkom. A čas brezbržnosti je mimo. Evropska unija postavlja temelje novemu, odgovornejšemu poslovnemu modelu, kjer trajnost ni le marketingov slogan, temveč regulativna obveznost.

2 UREDBA O OKOLJSKO PRIMERNI ZASNOVI TRAJNOSTNIH PROIZVODOV – ESPR EU 2024/1781

Julija 2024 je stopila v veljavo nova Uredba o okoljsko primerni zasnovi trajnostnih proizvodov (ESPR EU 2024/1781), ki radikalno spreminja pravila oblikovanja, proizvodnje in ravnanja z izdelki. Namesto zgolj energetske učinkovitosti (kot je določala stara direktiva 2009/125/ES) morajo podjetja zdaj razmišljati v celostnem okviru:

- Kako podaljšati življenjsko dobo izdelka (popravljivost, modularnost, nadgradnja)?
- Kako zmanjšati odpadke (reciklabilnost, ponovna uporaba komponent)?

- Kako zgraditi proizvode, ki bodo vzdržni v celotnem življenjskem ciklu?

ESPR namreč ne velja le za izdelke, ki za svoje delovanje potrebujejo energijo – zdaj zajema skoraj vse vrste blaga, ki je na voljo na evropskem trgu. To pomeni, da bodo podjetja morala prilagoditi svoje modele, če želijo ostati konkurenčna.

3.1 Digitalni potni list izdelka – DPP

Kako zagotoviti, da bo vsak izdelek resnično trajnosten? EU odgovarja z digitalnim potnim listom izdelka (Digital Product Passport – DPP), orodjem, ki bo spremenilo način, kako proizvajamo, uporabljamo in recikliramo blago.



Slika 1: Digitalni potni list izdelka (TRAC ID)

Digitalni potni list je digitalna baza, ki vključuje različne podatke in informacije o izdelku s katerimi podaja odgovore na vprašanja:

- Materiale in sestavine (vključno s potencialno škodljivimi snovmi).
- Ogljični in okoljski odtis (*Koliko emisij je bilo ustvarjenih pri proizvodnji, kakšen vpliv ima izdelek na okolje?*).
- Navodila za popravila in vzdrževanje (*Kako podaljšati življenjsko dobo izdelka?*).
- Možnosti recikliranja in razgradnje (*Kako izdelek razstaviti z minimalnim odpadkom?*).
- Skladnost z regulativami (RoHS, REACH, ESPR).

Zakaj je DPP prelomnica? Potrošniki bodo lahko sprejemali informirane odločitve – kupovali bodo trajnostne izdelke z dolgo življenjsko dobo. Proizvajalci bodo morali razvijati proizvode, ki bodo sledljivi in vzdržni – ali pa izgubiti dostop do trga. Regulatorji bodo lažje spremljali skladnost in kaznovali tiste, ki kršijo postavljena pravila. In kaj to pomeni za podjetja?

- Prilagoditev ali izpad. ESPR in DPP bodo kmalu postali obvezni – podjetja, ki se ne bodo pripravila, bodo izgubila konkurenčnost.
- Nov poslovni model. Trajnost ni več samo strošek – prinaša priložnosti za inovacije, zmanjšanje odpadkov in večjo zvestobo potrošnikov.
- Digitalizacija proizvodnje. Podjetja bodo morala vključiti sledljivost že v fazo oblikovanja izdelkov.
- EU ne postavlja le novih standardov – spreminja pravila igre. Podjetja, ki bodo razumela, da trajnost ni le regulativna omejitev, temveč priložnost za inovacije, bodo vodila naslednjo industrijsko revolucijo.

3 CIRCTHREAD IN CIRPASS-2: EVROPSKI PROJEKTI, KI OBLIKUJEJO PRIHODNOST KROŽNEGA GOSPODARSTVA

Kot odgovor na izzive trajnostne proizvodnje Evropska unija aktivno podpira in financira številne inovativne projekte, ki razvijajo rešitve za digitalni potni list izdelka (DPP) in krožno gospodarstvo. Med vidnejšimi pobudami sta projekta CircThread in CIRPASS-2, katerih cilj je ustvariti infrastrukturo za sledljivost izdelkov skozi celoten življenjski cikel – od načrtovanja do recikliranja.

3.1 CircThread

CircThread je štiriletni projekt v okviru programa Horizon Europe, ki združuje ključne akterje iz industrije, znanosti in javnega sektorja. Njegova glavna vizija je vzpostaviti odprto digitalno platformo, ki bo omogočila nemoteno izmenjavo podatkov o izdelkih med proizvajalci, dobavitelji, servisnimi centri, reciklažnimi podjetji in končnimi uporabniki.



Slika 2: Logotip projekta »CircThread«

Ključne komponente projekta:

- Digitalizacija materialnih tokov: Sledenje surovinam od vira do končne uporabe.
- Podatkovna interoperabilnost: Zagotavljanje, da lahko različni sistemi (ERP, PLM, SCADA) delujejo skupaj.
- Pilotni primeri v realnem okolju: Testiranje rešitev na konkretnih izdelkih, kot so gospodinjski aparati in elektronika.

Gorenje sodeluje kot eden vodilnih industrijskih partnerjev, pri čemer se osredotoča na razvoj DPP za trajnostne gospodinjske aparate. Skupaj s slovenskimi podjetji (SkyLabs, Surovina, Zeos) in romunskim Simavi razvijajo rešitve za:

- Avtomatizirano beleženje podatkov (materiali, energijska učinkovitost, možnosti popravil).
- Povezavo z obstoječimi proizvodnimi sistemi za posodabljanje informacij v realnem času.
- Vključevanje potrošnikov prek enostavnih orodij (npr. QR kod za dostop do podatkov).

3.2 CIRPASS-2

CIRPASS-2 je strateški projekt, ki gradi na rezultatih predhodnih projektov in se osredotoča na praktično uvedbo digitalnih potnih listov v ključnih panogah, kot so:

- Elektronika (pametne naprave, IT oprema),
- Tekstil (od trajnostnih vlaken do recikliranja),
- Baterije (sledljivost kritičnih mineralov).



Slika 3: Logotip projekta »CIRPASS-2«

Glavni cilji projekta so:

- Razvoj standardiziranih DPP rešitev, ki jih lahko podjetja hitro implementirajo.
- Povezava z že obstoječimi regulativami (RoHS, REACH, EcoDesign).
- Vključevanje malih in srednjih podjetij (MSP) – zagotavljanje, da tudi manjša podjetja lahko sledijo zahtevam.

Gorenje v sodelovanju s turškim partnerjem Ekodenge testira uporabo DPP v krožnih poslovnih modelih, kot so:

- Ponovna uporaba komponent (npr. uporaba delov iz starih naprav pri popravilih).
- Proces razgradnje.
- Spremljanje ogljičnega odtisa skozi celotno življenjsko dobo izdelka.

3.3 Zakaj so ti projekti ključni za prihodnost?

CircThread in CIRPASS-2 niso zgolj raziskovalni projekti – gre za praktične korake k digitalni in krožni preobrazbi industrije. Njihovi rezultati bodo:

- Oblikovali evropske standarde za DPP.
- Pospesili sprejem trajnostnih poslovnih modelov (npr. proizvodnja kot storitev, »pay-per-use«).
- Omogočili transparentnost, ki bo potrošnikom in regulatorjem dal večjo zaupanje v zelene izdelke.

Za podjetja kot je Gorenje sodelovanje v teh projektih pomeni strateško prednost – ne le pri izpolnjevanju regulativ, temveč tudi pri oblikovanju prihodnosti trajnostnega poslovanja.

Prihodnost industrije je sledljiva, digitalna in krožna – ali bo vaše podjetje del te spremembe?

Viri:

- [1] European Commission. 2022. Green Deal: New proposals to make sustainable products the norm and boost Europe's resource independence. European Commission Press corner.
- [2] New Ecodesign for Sustainable Products Regulation (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401781)
- [3] Protokol (<https://www.protokol.com/dpp-solutions/product-circularity/>)
- [4] CircThread (<https://circthread.com>)
- [5] CIRPASS-2 (<https://cirpass2.eu>)

LONČEK ZA VZGOJO RASTLIN S HIDROPONIKO IZ ODPADNEGA POLIPROPILENA V KOMBINACIJI Z ODPADNIMI KOKOSOVIMI VLAKNI

**Marko VERČKOVNIK¹, Natalija ŠTUMPFL², Silvester BOLKA¹, Blaž NARDIN¹,
Primož MLAČNIK², Sebastjan ZAVERLA¹, Rajko BOBOVNIK¹**

¹Fakulteta za tehnologijo polimerov

²KO-SI d.o.o.

IZVLEČEK

V prispevku bomo predstavili uporabo odpadnega polipropilena v kombinaciji z odpadnimi kokosovimi vlakni, za izdelavo lončka nizke gostote, ki omogoča vzgojo rastlin na podlagi hidroponike. Na Fakulteti za tehnologijo polimerov smo za pripravo termoplastičnega kompozita uporabili odpadne transportne trakove podjetja KO-SI v obliki recikliranega polipropilena, katerega smo zmleli in mu dodali zmleta odpadna kokosova vlakna, ki predstavljajo industrijski odpad podjetja KOSI. Za doseganje ustreznega spajanja matrice ter vlaken smo dodali še ustrezen kompatibilizator. Ta je zagotovil dobre medfazne interakcije med odpadnimi kokosovimi vlakni in reciklirano polipropilensko matrico. S pomočjo računalniško podprtega načrtovanja (angl. Computer Aided Design, CAD) s programom Siemens NX 12 smo najprej izrisali 3D model lončka primernega za vzgojo rastlin s hidroponiko. Sledilo je konstruiranje orodja za termoformiranje, katero smo natisnili s tehnologijo ciljnega nalaganja (angl. Fused Deposition Modeling, FDM). S pomočjo stiskalnice smo izdelali plošče iz pripravljenega kompozitnega materiala. Te smo nato s pomočjo termoformirke ter 3D natisnjene orodja preoblikovali v lončke za vzgojo rastlin s hidroponiko.

Izvedba je lep primer sodelovanja industrije in raziskovalne inštitucije na področju krožnega gospodarstva.

1 UVOD

Industrijski odpadki so na splošno bolj ločeni kot komunalni odpadki, poleg tega so pogosto tudi precej manj onesnaženi kot komunalni odpadki. To posledično pomeni, da dodatno sortiranje in pranje industrijskih odpadkov ni potrebno. Reciklaža industrijskih odpadkov je s tega vidika precej olajšana [1]. Glavna prednost termoplastičnih kompozitov je, da kombinacija matrice in odpadnih ojačitvenih vlaken omogoča doseganje odličnih lastnosti, hkrati pa se proizvodni stroški znižajo [2].

V zadnjem času je recikliranje PP zelo pomembna tema, predvsem zaradi naraščanja količine PP v termoplastičnih komunalnih odpadkih. Velik del embalaže je namreč izdelan iz PP. Polipropilen grafitiran z malein anhidridom kot kompatibilizator v kompozitu odpadnih kokosovih vlaken in polipropilenske matrice omogoča boljšo disperzijo odpadnih kokosovih vlaken v PP matrici. Poleg tega uporaba tega kompatibilizatorja izboljša medfazno adhezijo

odpadnega PP z naravnimi vlakni. Odpadni kompozit ima povišano togost v primerjavi s recikliranim polipropilenom [2,3].

Cilj te študije je bil zagotoviti zadostno togost kompozitnega materiala ter ohraniti zadosti nizko gostoto, ki poleg vzgona zagotavlja plovnost končnega izdelka. Poleg tega pa pripraviti funkcionalen izdelek iz industrijskih odpadnih surovin. Uporabljena odpadna kokosova vlakna ohranjajo nizko gostoto in povečajo trdnost ter togost kompozita. Industrijski odpad je bilo pred predelavo potrebno le zmleti, sortiranje in pranje le tega ni bilo potrebno. V okviru študije je bilo potrebno konstruirati samo orodje za termoformiranje ter to orodje prilagoditi kompozitnemu materialu. Ravno zaradi tega smo se za izdelavo teh prototipnih orodij izbrali tehnologijo FDM. Verziji orodja za termoformiranje se tako med seboj razlikujeta v geometriji. Pri tem smo skušali doseči optimalno geometrijo orodja za termoformiranje, ki omogoča najenostavnejšo izdelavo lončkov za hidroponiko.

2 SODELOVANJE Z INDUSTRIJSKIM PARTNERJEM KO-SI

V okviru te študije smo z industrijskim partnerjem v naši bližini, na pobudo ideje s strani industrijskega partnerja KO-SI pripravili lonček za hidroponično vzgojo rastlin. Cilj sodelovanja je prikaz ponovne uporabe odpadnih surovin v funkcionalnem izdelku.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

Pri eksperimentalnem delu študije smo na podlagi predhodnih raziskav kompozitov ojačenih z zmletimi odpadnimi kokosovimi vlakni pripravili dve različici materiala z različnim deležem dodatkov ter nastavitve parametrov pri kompavndiranju.

3.1 Uporabljeni materiali

V študiji smo uporabili industrijski odpad podjetja KO-SI d.o.o. Uporabili smo kokosova vlakna podjetja KO-SI, ki predstavljajo industrijski odpad za katerega podjetje išče inovativne rešitve uporabe in aplikacije v različnih izdelkih. Prejeli smo tudi odpadne transportne trakove podjetja iz polipropilena. Za ustrezno spajanje smo uporabili kompatibilizator PP-g-MAH (Graftabond 02025A CA), katerega smo kupili od GRAFT POLYMER d.o.o. iz Slovenije.

3.2 Priprava vzorcev

Izdelali smo dve verziji kompozitnega materiala, v prvi smo uporabili 20 % odpadnih kokosovih vlaken v kombinaciji z dodatkom 5 % kompatibilizatorja PP-g-MAH (Graftabond 02025A CA) in 75 % rPP. Prav tako smo izdelali verzijo materiala, kjer smo uporabili 30 % odpadnih kokosovih vlaken z dodatkom 5 % kompatibilizatorja PP-g-MAH (Graftabond 02025A CA) in 65 % rPP (Tabela 1).

Tabela 1: Sestava vzorcev

Vzorec	rPP (%)	Kokosova vlakna (%)	PP-g-MAH
0	100	/	/
1	75	20	5
2	65	30	5

Pred kompavndiranjem smo kokosova odpadna vlakna posušili tako, da je bila vlaga pod 0,1 %. Po kompavndiranju smo biokompozit prav tako posušili na vlago pod 0,1 %. Sušenje smo izvedli v laboratorijskem sušilniku pri 80 °C.

Vse vzorce smo najprej kompavndirali na dvopolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je bil 20 mm, L/D razmerje 44:1, obrati polžev 300 min⁻¹, temperature cilindra od 165 °C na vstopni coni do 190 °C na šobi. Šoba je imela dve odprtini premera 4 mm. Filamenta smo vodili preko vodne kopeli (15 °C) v granulator Scheer, kjer smo filamenta narezali na dolžino okoli 5 mm.

S pomočjo stiskalnice smo izdelali plošče za termoformiranje. Vzorce smo pripravili s stiskalnico Baopin BP-8170-B. Pred termoformiranjem smo med kovinski plošči enakomerno razporedili material. Kompozitni material smo nato s ploščama vstavili v segreto stiskalnico. Temperatura zgornje in spodnje grelne plošče stiskalnice je znašala 185 °C. Najprej smo uporabili profil z nižjim tlakom pred stiskanja 0,25 MPa ta je trajal 90 s. Tlak smo nato povečali na 2 MPa za 60 s. Sledilo je ohlajanje grelnih plošč do temperature plošč 60 °C, nato se je stiskalnica odprla. Kompozitno ploščo smo nato pustili med dvema kovinskimi ploščama, dokler se ni ohladila.

Slika 1 prikazuje odpadne trakove PP (levo zgoraj), odpadna kokosova vlakna (sredina zgoraj), granulati biokompozita (desno zgoraj), izrezani vzorci za testiranje mehanskih lastnosti (levo spodaj) in kompozitna plošča (desno spodaj).



Slika 1: Odpadni trakovi PP (levo zgoraj), odpadnih kokosovih vlaken (sredina zgoraj), granulati biokompozita s 20 % odpadnih kokosovih vlaken (desno zgoraj), in kompozitna plošča (desno spodaj)

3.3 Laboratorijski testi

Vse laboratorijske teste smo opravili v laboratorijih na Fakulteti za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu.

Natezni test smo izvedli na trgalnem stroju Shimadzu AG-X plus 10 kN. Ta je bil izveden skladno z ISO 527. Razmak čeljusti je bil 115 mm, hitrost testiranja do raztezka 0,25 % je bila 1 mm/min, nad 0,25 % do pretrga pa 50 mm/min.

Termogravimetrične analize (TGA) smo izvedli na instrumentu Perkin Elmer TGA 4000. Vzorec smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa izotermno držali pri 550 °C 5 min v kisikovi atmosferi (20 mL/min).

Diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) smo izvedli na kalorimetru Mettler Toledo DSC 2 skladno z ISO 11357. Hitrost segrevanja in ohlajanja je bila 10 °C/min. Vzorce smo segrevali od - 50 °C do 200 °C, pri 200 °C je sledil izotermni segment 5 min. Potem smo jih ohlajali od 200 °C do - 50 °C, kjer je sledil izotermni segment pri - 50 °C 5 min. Potem so se vsi koraki še enkrat ponovili. Vrednotili smo temperaturo kristalizacije (T_c), entalpijo kristalizacije (ΔH_c), temperaturo steklastega prehoda (T_g), specifično toploto (c_p), tališče (T_m) in talilno entalpijo (ΔH_m) iz prvega ohlajanja in drugega segrevanja.

3.4 Izdelava lončkov za hidroponiko

Za modeliranje lončka in orodja smo uporabili CAD program Siemens NX 12. Najprej smo izrisali 3D model lončka primerne za vzgojo rastlin s hidroponiko. Sledilo je konstruiranje orodja za termoformiranje na podlagi lončka. Pripravili smo različne verzije orodja.

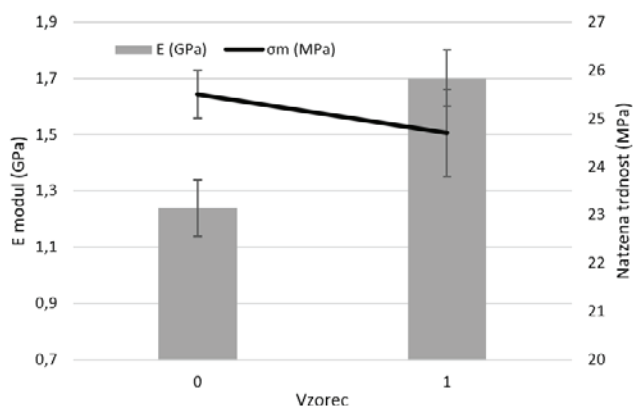
Te različice orodij za termoformiranje smo natisnili s FDM tehnologijo 3D tiska, uporabili smo polietilen tereftalat glikol (PETG), proizvajalca Plastika Trček. Za 3D tisk smo uporabili 3D tiskalnik Tumaker Bigfoot 500 Pro Dual.

Termoformiranje je potekalo s FormBox FBA 180123EU. V termoformirko smo vpeli pripravljene kompozitne plošče ter jih približali h grelcu. Orodje za termoformiranje smo nato vstavili na termoformirko. Termoformirka ne omogoča spremljanja temperature, zato smo uporabili največjo možno grelno moč in nastavili časovnik na 2,5 min. Sledilo je termoformiranje s pomočjo vakuuma, katerega zagotavlja vakuumski sesalec. Glede na rezultate termoformiranja smo prilagajali obliko orodja.

Ko smo bili zadovoljni z rezultati termoformiranja smo najbolj primerno obliko orodja v kombinaciji s primernejšo verzijo materiala uporabili za izdelavo večje količine lončkov za hidroponiko.

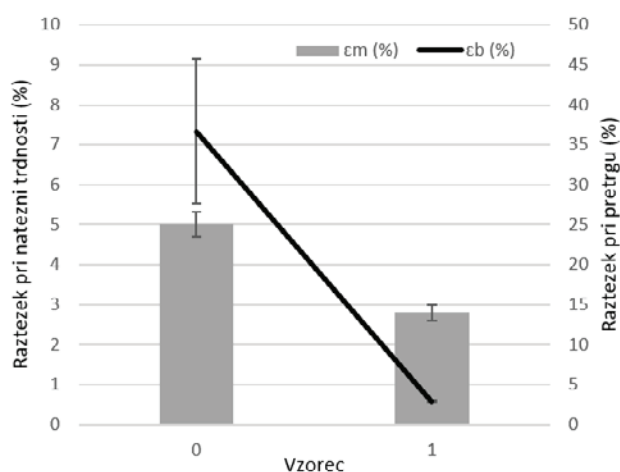
4 REZULTATI

Laboratorijske teste smo izvedli na verziji materiala, ki se je izkazala za primernejšo pri termoformiranju (vzorec 1). Uporaba odpadnih kokosovih vlaken v kombinaciji s kompatibilizatorjem v rPP matrici v vzorcu 1 zvišuje natezni E modul (E). S slike 2 lahko opazimo, da se natezna trdnost (σ_m) nekoliko zmanjša v primerjavi z natezno trdnostjo rPP (vzorec 0). Opazimo lahko, da se raztezek pri natezni trdnosti (ϵ_m) in raztezek pri pretrgu (ϵ_b), kar precej zmanjšata (Slika 3).



Slika 2: Natezni E modul in natezna trdnost

Kot posledica dobrih medfaznih interakcij med odpadnimi kokosovimi vlakni in rPP zaradi kompatibilizatorja PP-g-MA, lahko opazimo povečanje natezne togosti za 68 %. Opazimo lahko tudi zmanjšanje natezne trdnosti za 6 %, sklepamo lahko, da se to pojavi zaradi kokosovih vlaken, katerih dolžina je manjša od kritične dolžine kokosovih vlaken. Opazimo lahko tudi, da se standardna deviacija natezne trdnosti vzorca 1 poveča do te mere, da je v območju natezne trdnosti vzorca 0. Zaključimo lahko, da je PP-g-MA dober kompatibilizator, saj se natezna togost precej poveča, zaradi premajhne dolžine kokosovih vlaken pa lahko opazimo nekoliko manjšo natezno trdnost.



Slika 3: Raztezek pri natezni trdnosti in raztezek pri pretrgu

TGA analiza prikazuje enostopenjski razpad vzorca. Iz tabele 2 lahko opazimo, da dobimo pri kompozitu z dodanimi odpadnimi kokosovimi vlakni dvostopenjski razpad. Prvi razpad pri nižji

temperaturi je razpad kokosovih vlaken v kompozitu, drugi pri višji temperaturi je razpad rPP matrice z dodatki, v primerjavi s vzorcem 0 lahko vidimo, da ima vzorec 1 višjo temperaturo degradacije matrice, ki je lahko posledica višje stopnje kristaliničnosti zaradi dodatka kokosovih vlaken. Opazimo lahko tudi 6,8 % anorganskih polnil, katera so posledica mineralnih snovi v naravnih vlaknih (Tabela 2).

Tabela 2: Rezultati TGA analize

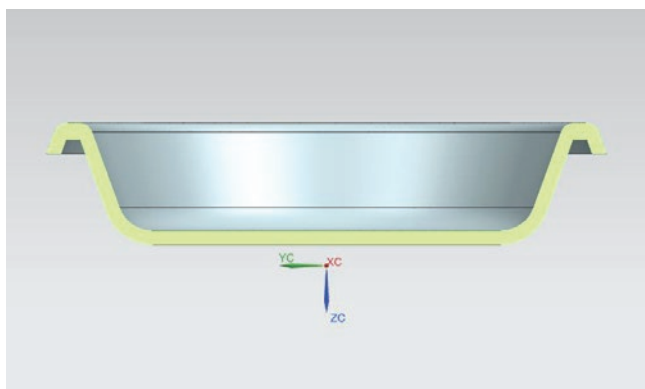
Vzorec	T _{d1} (°C)	T _{d2} (°C)	Ostaneček (%)
0	/	437,7	0,00
1	337,8	464,4	6,83

Dodatek odpadnih kokosovih vlaken ne vpliva na temperaturo tališča pri rPP biokompozitu. Steklasti prehod je pri -11,9 °C, tališče je pri 166 °C. Do kristalizacije pri ohlajanju pride pri 125 °C (Tabela 3). Iz tabele 3 lahko opazimo, da se temperatura steklastega prehoda nekoliko zmanjša zaradi dodanih kokosovih vlaken, ki delujejo kot nukleacijska jedra in omogočajo doseganje višje stopnje kristaliničnosti. Stopnja kristaliničnosti je izračunana glede na delež matrice in je kvocient deleža matrice ter talilne entalpije ter teoretično najvišje talilne entalpije.

Tabela 3: Rezultati DSC analize

Vzorec	T _g (°C)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
0	-3,9	123,8	58,46	165,7	64,33	31
1	-11,9	125,4	49,09	166,0	55,60	38

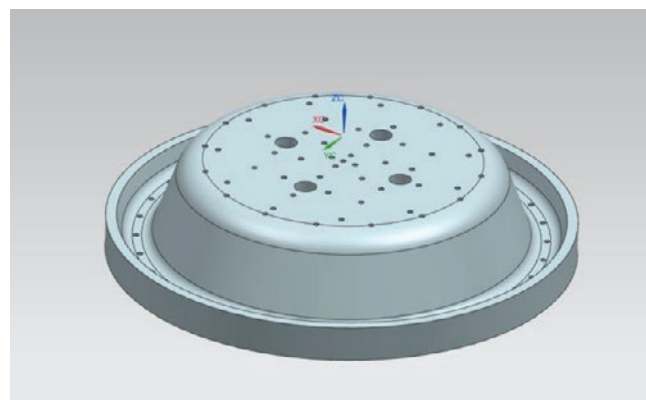
Pri modeliranju orodja za termoformiranje smo izhajali iz dimenzij lončka. Pri tem smo okvirno ocenili začetne dimenzije in sicer zunanji premer lončka 80 mm ter višina lončka 20 mm. Sledilo je modeliranje lončka v programu Siemens NX 12. Na sliki 4 lahko vidimo prerez modela lončka ter na podlagi tega, tudi samo geometrijo le tega.



Slika 4: Prerez modela lončka

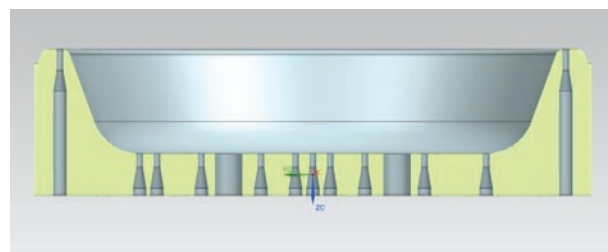
Pri samem modelu lončka smo upoštevali smer preoblikovanja pri termoformiranju, prav tako pa smo se skušali izogniti nenadnim spremembam geometrije v smeri preoblikovanja kompozitne plošče. To smo upoštevali za lažje preoblikovanje kompozitne plošče, na modelu lahko vidimo kot 110° in zaokrožitev 7 mm v notranjem delu lončka.

Na podlagi te geometrije lončka je sledilo modeliranje prve verzije orodja za termoformiranje (Slika 5). Najprej smo se odločili za moško verzijo orodja, saj smo želeli večjo debelino izdelka v sredini izdelka. Za lažje preoblikovanje smo v smeri preoblikovanja izdelali manjše luknje premera 1 mm. Te luknje so s pomočjo vakuumu olajšale preoblikovanje kompozitne plošče. Rezultati termoformiranja so pokazali slabost takšne izvedbe orodja. Zaradi gretja kompozitne plošče, ki je vpeta ob straneh in ne neenakomerne temperaturne porazdelitve se plošča najhitreje segreje na sredini, saj je tam tudi najvišja temperatura. Te lokalne spremembe temperature na kompozitni plošči pa se odražajo v razlikah povesa. Poves kompozitne plošče je torej najvišji v sredini, kjer ima kompozitna plošča tudi najvišjo temperaturo. Poleg tega pa smo ugotovili, da je premer lukenj nekoliko premajhen in ne omogoča dobrega izsesavanja zraka.



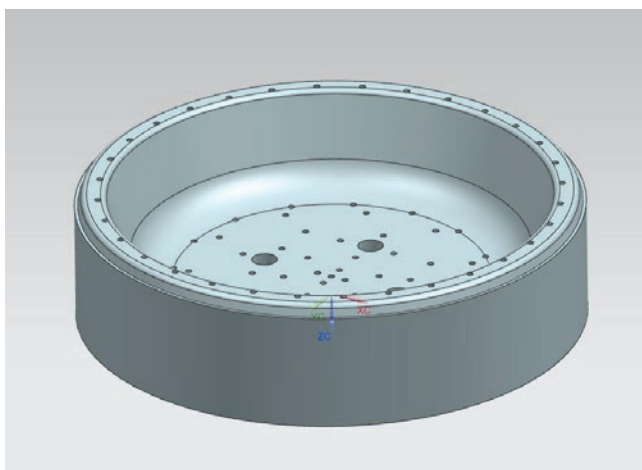
Slika 5: Moška različica orodja za termoformiranje lončkov

Ravno zaradi lokalnosti povesa smo se odločili za modeliranje druge ženske verzije orodja. Poleg tega smo pri modeliranju druge različice orodja upoštevali slabše izsesavanje prve različice. Ravno zaradi tega smo naredili poglobljene luknje, kjer začetni premera luknje znaša 2 mm. Ta se nato zmanjša na 1 mm na zadnjih 3 mm dolžine luknje. Za lažje 3D tiskanje smo na prehodu luknje iz 2 mm na 1 mm uporabili posnetje dolžine 3 mm (Slika 6).



Slika 6: Moška različica orodja za termoformiranje lončkov

Izkazalo se je, da je sprememba oblike imela precejšen vpliv na samo kakovost izdelanih lončkov. Ženska različica orodja je prikazano na sliki 7.



Slika 7: Ženska različica orodja za termoformiranje lončkov

3D tisk orodij za termoformiranje je potekal na 3D tiskalniku Tumaker Bigfoot 500 Pro Dual. Pri 3D tisku smo uporabili parametre 3D tiska navede v tabeli 4.

Tabela 4: Parametri 3D tiska orodij

Temperatura šobe (°C)	Hitrost (mm/s)	Višina sloja (mm)	Gostota zapolnjevanja (%)	Temperatura delovne mize (°C)
230	60	0,20	30	70

5 SKLEP

V okviru raziskave smo testirali biokompozit, pripravljen iz rPP, odpadnih kokosovih vlaken in z dodatkom kompatibilizatorja PP-g-MA. Togost biokompozita z odpadnimi kokosovimi vlakni in PP-g-MA je bistveno višja v primerjavi z rPP. Trdnost biokompozita z odpadnimi kokosovimi vlakni in PP-g-MA je nekoliko nižja v primerjavi z rPP, zaradi dolžine uporabljenih kokosovih vlaken, ki je krajša od kritične dolžine kokosovih vlaken. Višja togost in nekoliko nižja trdnost potrjujeta dobre interakcije med sestavinami biokompozita po zaslugi kompatibilizatorja PP-g-MA. Toplotna stabilnost biokompozitov z odpadnimi kokosovimi vlakni je višja v primerjavi z rPP. Tališče in temperatura kristalizacije se pri biokompozitih z odpadnimi kokosovimi vlakni glede na rPP ne spremenita. Stopnja kristaliničnosti biokompozitov je višja

glede na rPP. Temperatura steklastega prehoda se pri biokompozitu pomakne k nekoliko nižji temperaturi, kar se sklada z višjo stopnjo kristaliničnosti biokompozita. Višja stopnja kristaliničnosti zaradi dodanih kokosovih vlaken v matrici, ki delujejo kot nukleacijska jedra, omogoča izboljšanje mehanskih in toplotnih lastnosti biokompozita.

V okviru raziskave smo razvili tudi optimalno obliko lončka ter na podlagi izdelka in lastnosti kompozitnega materiala tudi obliko orodja. Ta oblika omogoča enostavnejšo izdelavo lončkov za vzgojo rastlin s hidroponiko. Poleg tega pa smo uspeli iz odpadnih surovin s pomočjo ustreznega kompatibilizatorja pripraviti material, ki ga lahko preoblikujemo v funkcionalen izdelek.

V okviru študije smo prikazali tudi uporabo tehnologije FDM za hitro izdelavo prototipnih orodij.



Slika 8: Moška različica orodja (zgoraj desno), ženska različica orodja (zgoraj levo) in lonček za vzgojo rastlin s hidroponiko (spodaj sredina)

Viri:

- [1] Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K.: *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. Waste Management. 2017; 69: 24–58.
- [2] Zhidan, L., Chao, C., Zixian, G., Shaozao, T., Xiuju, Z.: *A Compatibilized Composite of Recycled Polypropylene Filled with Cellulosic Fiber from Recycled Corrugated Paper Board: Mechanical Properties, Morphology, and Thermal Behavior*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 122 (2011) No.4, pp. 2789-2797.
- [3] G. Di Bella, V. Fiore, *Natural Fibre Reinforced Composites*, n.d. <https://www.researchgate.net/publication/233991603>.

RAZVOJ IN IMPLEMENTACIJA PDCA CIKLA

Andrej ZADRAVEC, Nik ŠKORJA
Plastika Skaza d.o.o.

IZVLEČEK

PDCA pomeni Plan-Do-Check-Act, znan tudi kot Demingov cikel ali Shewhartov cikel. Je metoda nenehnega izboljševanja procesov, ki se uporablja za prepoznavanje in reševanje problemov ter izvajanje izboljšav na sistematičen in učinkovit način. Štirje koraki PDCA so:

- *Načrtovanje, kjer se identificira težava ali priložnost in pripravi načrt za njeno obravnavo;*
 - *Izvedba, kjer se načrt izvaja;*
 - *Preverjanje, kje se merijo in analizirajo rezultati implementacije;*
 - *Ukrepanje, kjer se vse potrebne prilagoditve izvedejo na podlagi rezultatov.*
- Postopek se nato ponovi, da se nadaljujejo izboljšave v kontinuitivnem principu.*

1 UVOD

Kakovost v ustroju življenja ljudi obstaja že precej pred implementacijo le-te v organizacije ter skupine znotraj katerih ljudje delujejo ter izvajajo naloge z namenom produktivnosti ter feedbacka v smislu resursov. Kakovost je pri ljudeh od vedno veljala, pa Čepprav jo je bilo težko definirati - ko jo popolnoma razstavimo in jo razdelamo do njene golote in osnove pridemo do koncepta, ki govori o določenih principih ter lastnostih, kjer je subjekt ali objekt lahko uporabljen oz kolikšna je njegova kompatibilnost za uporabo glede na dane Okoliščine. Kakovost, bi lahko rekli, tj. sarm sebi ne obstaja ampak mora v določeni situaciji priti do problema, ki zahteva dotično rešitev - glede na vse dane rešitve lahko na to ordinalno ocenimo katera izmed teh je najbolj optimalna, najbolj fleksibilna, zahteva najmanj resursov, etc. in na podlagi tega potem določimo kakovost. Percepcija iz katere gledamo kakovost je seveda odvisna Od situacije v kateri iščemo ter potrebujemo nekaj kakovostnega, vendar pa v osnovi to predstavlja utilitarizem, aplikativnost pred estetikom.

Vključevanje ter pomembnost kakovosti se je pričela z razvojem civiliziranih združb, kjer se razvila tekmovalnost, kjer se je razvila konkurenca ter kjer je pomembnost kakovosti bila odgovor na hitrejše, boljše ter na dolgi rok bolj ekonomično. Že od nekdanj obstaja rek nikoli nisi tako bogat, da

boš kupoval poceni - in to drži predvsem pri kakovostnih izdelkih ter storitvah, kjer investicija v njih pomeni investicijo v dolgoročnost, trajnost, obstojnost ter visoko raven storilnosti in uporabnosti. Ko so se v razvoju industrije pojavili kompleksnejši procesi produciranja je bila zahteva po kontrolingu povečana - sicer so bili ti procesi poslovanja na začetku bolj enostavni ter je bilo za nadzor nepotrebno razvijati kompleksnih sistemov, vendar pa je s časom nastopila kompleksnost, ki je zahtevala implementacijo bolj razsežnih ter bolj kompleksnih sistemov, ki omogočajo hitro zaznavo problema, hitro reagiranje na problem ter hitro solucijo.

Tako se je v tistem času poleg ostalih metoda razvil PDCA cikel, ki ima svoje korenine v šestdesetih letih prejšnjega stoletja - nekateri ga povezujejo tudi z utemeljitvijo TQM v povojnem času na Japonskem zato pa je precejkrat tudi Demingov cikel tj. po utemeljitelju TQM ter ideološkem vodji reparacije Japonskem v petdesetih letih. PICA je tj. metoda za optimiziranje poslovanja. ki se uporablja za nenehno izboljševanje procesov in izdelkov - znotraj tega tudi njegov akronim pomeni plan, do, check in act. Cikel tako vključuje naslednje korake - v slovenskem jeziku:

- Načrt: Prepoznajte problem ali priložnost in načrtujte rešitev

- Izvedbo: Izvedite načrt in ga preizkusite v majhnem obsegu
 - Preverjanje: ocenite rezultate testa in zberite podatke
 - Ukrepanje: uporabite podatke za sprejemanje odločitev in ukrepanje za izboljšanje postopka.
- Predstaviti pomen PDCA cikla za organizacijo skozi konsistentno in vpeljano monitoriziranje ter odpravljanje napak.
 - Razčleniti pomen PDCA cikla v občem smislu ter konkretizirati njegovo uporabo na vsakdanjem nivoju.

Cikel PDCA je neprekinjena zanka, pri kateri vsak korak temelji na prejšnjem. Organizacijam tako omogoča postopne ter izboljšave procesov poslovanja, vendar pa je pomembno, da je implementacija ter uporaba pravilna ter dosledna - samo tako lahko dosežemo in uvedemo tudi kakovost.

Poslovni procesi so podvrženi konstantnim spremembam ter zahtevam po fleksibilnosti ter prilagajanju glede na razvoj industrije ter storitvenih dejavnosti - v evoluciji razvoja sodobnega Časa, sploh na tem mestu, govorimo pri tem o rapidnih premikih, ki lahko včasih trajajo samo hip ter se v naslednjih trenutkih spremenijo v nekaj popolnoma diametralnega. Da lahko trendom ter potrebam trga sledimo je potrebno, spremembe zaznamo, da jih znamo implementirati, preveriti njihovo delovanje ter ponovno nadgrajevati področje, ko te tranzicije niso zadosti. Problem naše zaključne naloge je tj. potreba po identifikaciji in analizi težav, ki se pojavljajo v poslovnih procesih podjetja. To lahko vključuje raziskovanje težav s kakovostjo, učinkovitostjo, produktivnostjo in drugimi kazalniki uspešnosti — čeprav se bomo v temelju nekako usmerjali v kakovost. Skozi princip PDCA Cikla. Problematika tako vsebuje kako uvesti koncept, ki optimizira poslovne procese, kako ga meriti ter kako v samem temelju določiti, kaj so naši kazalniki ter pojmovanja glede kakovosti ter kakovostnega poslovanja.

V razgovoru se bomo tako usmerjali v cilje, ki opredeljujejo, da želimo:

- Skozi osnovo literature ter virov temeljno in temeljito definirati pojav PDCA cikla ter njegove implementacije v organizacijah.
- Predstaviti ter utemeljiti razumevanje kakovosti za potrebe organizacije skozi njeno celovito pojmovanje.
- Izpostaviti poglobitve prednosti, ki jih predstavlja PDCA cikel ter jih znotraj naloge tudi pisno ovrednotiti.

2 KAKOVOST V POSLOVANJU

Koncept kakovosti ter standardizacija kakovosti se precejkrat zdi kot dejanje ter pojav v sodobnem svetu industrializacije ter poslovanja - vendar pa se je nadzor kakovosti pojavil že v srednjeveškem času, natančneje v trinajstem stoletju na tleh Evrope. Takrat se je kakovost ter njen nadzor izvajal znotraj tako imenovanih obrtniških cehev, kjer so bili postavljeni določeni standardi znotraj določenega ceha nato pa se je blago, ki je bilo proizvedeno označevalo s strani pregledovalcev (kar bi bila danes inšpekcija), če ni dosegalo standardov. Metodologija se je takrat posluževala samo standardiziranja ter ocenjevanje produktov in ne storitev, pa vendar je vseeno izjemno uporabno ter pregledno uporabiti te temelje v kasnejših konceptih, ki so nastali na tem temelju. Iz tega so se kasneje razvili tudi sistemi za nadzor kakovosti v industrijski revoluciji, kar pa je bilo precej bolj zahtevno saj se je obrtniški ceh razvil v industrijsko manufakturo, kjer so procesi bili kompleksnejši, nabor ter obseg produktov pa precej večji.

Poslovanje je v tovarniški sistem iz obrtnega znotraj Velike Britanije naredil v drugi polovici osemnajstega stoletja, kar je nekaj desetletij kasneje, kot že omenjeno, vodilo v industrijsko revolucijo — na tem mestu je bilo potrebno, da ameriški strokovnjaki, kot velesila, utemeljijo ter razvijejo prakse nadzora proizvodnih metod ter njihove kakovosti. Na začetku so se ZDA držale ortodoksne tovarniškega sistema nadzora, tistega, ki je bil implementiran v Evropi - nato pa je konec devetnajstega stoletja Frederick W. Taylor zasnoval tovarno s pomočjo inženirjev, kot nadzornike pa je zaposlil obrtnike, ki so poprej delovali kot delavci. S tem je povzročil izjemen skok produktivnosti vendar pa je ta povišan parameter izjemno vplival na kakovost, kar je pomenilo njen upad.

Ko kasneje govorimo o sodobnih sistemih optimizacije poslovanja ter vodenja lahko na tem

mestu njihovo pojavnost poudarimo nekje na začetku dvajsetih let dvajsetega stoletja, ko se je zahteva po kakovosti pojavila - na začetku predvsem skozi tehniko statističnega vzorčenja s strani Walter A. Shewarta. Ker je v dvajsetih bil tudi povojni čas, je bilo povpraševanje po rasti, storilnosti ter produktivnost zopet vse večje — na koncu tega desetletja pa je prišlo do zloma. Da lahko velesila kot je npr. ZDA resnično uvede določene prijeme optimizacije poslovanja na makro ravni je bilo ključno, da se mora iz intuitivnost obrniti v sistematizacijo, logičnost ter strukturiranost, ki bo omogočala tako monitoring kot sprotno odpravljanje napak. Med prvimi utemeljitelji takšnih praks sta bila Joseph M. Juran ter W. Edwards Deming - prav tako tudi strokovnjaka, ki sta z implementacijo TQM v času po drugi svetovni vojni na noge postavila gospodarstvo Japonske ter ga utemeljila kot najkakovostnejšo ter trdno gospodarstvo vseh časov.

Na tem mestu se bomo na kratko obrnili v Deminga ter njegovem doprinosu optimizacije poslovnih procesov skozi kvaliteto, da se lahko nato na kratko navežemo na revolucijo v kvaliteti, ključne mejnike le-te ter nosilce teorij danes. Deming je tj. matematik, fizik ter statistik, ki je bil rojen l. 1900 - bil je velik navdušenec nad Shewartom ter njegovimi tehnikami zato je tudi nadaljeval ter popolnjeval svoje znanje v tej smeri. V tridesetih letih prejšnjega stoletja je z ameriški uradi deloval na statističnem področju popisa prebivalstva, kjer je skozi implementacijo svojih metoda povzročil dvig produktivnosti za šestkrat. Po drugi svetovni vojni na področju samoaktualizacije Deming ni več dosegal svojih standardov ter se je skozi to napotil na Japonsko, kjer naj bi prav tako statistično sodeloval pri popisu prebivalstva — vendar pa je po naključju, v sodelovanju z njihovimi inženirji ter znanstveniki srečal problematiko, ki je Japonsko težila v tistem času. To je bilo reparacija gospodarstva v povojnem času ter razvoj industrije kakovosti. S tem se je na Japonskem pričela implementacija sistema TQM, ki je bila izjemno dobro sprejeta prav tako pa je požela tudi izjemne rezultate - Japonska je izjemno hitro postala velesila na področju kakovosti ter tako prehitela tudi ZDA, ki pa določenih metodologij s strani Deminga niso bili pripravljene sprejeti. V treh

desetletjih delovanja Deminga na japonski problematiki se je diskrepanca med kakovostjo ameriškega ter japonskega gospodarstva poznala do te mere, da so Demiga zaprosili, da dvigne raven poslovanja FORD MC. To je storil, vendar pa implementacija njegovega TQM sistema ni prevzela celotnega ameriškega gospodarstva, kar v celovitosti ni moglo povzročiti takšen razcvet, kot se je zgodil na Japonskem.

V tem času, ko je ameriška industrija občutno zaznala primat japonske kakovosti, se je pričela tudi kakovostna revolucija v modernosti — v ZDA so se sprejeli tako imenovani ukrepi proti neravnovesju, na podlagi česar so se začele sprejemati nove prakse, kot je recimo JIT sistem, pa vendar ta desetletjem implementacije TQM na japonskih tleh seveda ni bil kos v tako momentalnem intervalu. V naslednjih desetletjih se je tako na področju kakovosti razvilo precej metod npr. Motorola je uvedla koncept 6sigma, kar teži k izdelkovni ter procesni popolnosti. Iz tega je kasneje prišlo tudi precej hibridnih optimizacij kot kombinacija vitke proizvodnje ter 6sigme, seveda pa samo z metodami ter sistematizacijo ne gre nadomestiti najpomembnejšega tj. tisto, kar so posedovali Japonski — harmonijo, koherentnost ter disciplino implementirano v ideologiji naroda. Z revolucijo kakovosti, je Mednarodna organizacija za standardizacijo (ISO) pričela v osemdesetih letih dvajsetega stoletja tudi z večjim poudarjanjem na standardih kakovosti, tako so se poudarili mejniki:

- 1987 - ISO objavi ISO 9001 standard, ki temelji na osmih načelih vodenja kakovosti temeljnih za optimizirano poslovno prakso.
- 1994 - ISO objavi prvo revizijo standarda ISO 9001.
- 2000 - ISO objavi drugo revizijo standarda ISO 9001 v katerega se vključita tudi ISO 9002 ter ISO 9003.
- 2008 - ISO objavi tretjo revizijo standarda ISO 9001.
- 2015 - ISO objavi ISO 9001 :2015 različico, ki postane temelj na organizacijskem nivoju skozi korenine v TQM. Izboljšave so v tem predvsem na področju prilagodljivosti revizije, podpore sistemu kakovosti ter predvsem skozi to, da se standard kakovosti bolj temeljito obrača tudi v storitev ter ne samo izdelek.

Izzivi sodobnega poslovnega sveta so danes precej kompleksni ter razvejani, nekateri temelji seveda še vedno stojijo na pionirskih osnovah Juran ter Deminga, vendar pa je kakovost ter implementacija le-te v poslovne sisteme danes prevzela drugačno obliko. Da lahko sledimo nadzoru kakovosti ter njegovim smernicam, ki se spreminjajo na dnevni bazi je potrebno stalno razvijanje standardov ISO, kar predstavlja temeljno orodje, da se lahko procesi izboljšujejo ter optimizirajo. Skozi to pa je seveda pomembno konstantno certificiranje, usposabljanje ter predvsem implementacija metodologij, ki omogočajo izboljšanje poslovnega procesa kot npr. SPC, CIP VRM, BPR, 6sigma, etc. Danes so vodilni strokovnjaki na raziskovanju znotraj tega področja v družbi Juran — če pa govorimo o samostojnem raziskovalcu je smiselno omejiti ime Noriaki Kano. To je raziskovalec, ki je razvil sistem imenovan po njegovem priimku tj. KANO kar je okvir zadovoljstva strank, ki podjetjem pomaga razumeti potrebe in želje strank. Po mnenju Kana je mogoče potrebe kupcev razvrstiti v tri kategorije: osnovne potrebe, potrebe po uspešnosti in potrebe po vznemirjenju. Osnovne potrebe so minimalne zahteve, za katere kupci pričakujejo, da jih bo izpolnjeval izdelek ali storitev, potrebe po zmogljivosti so lastnosti in atributi, ki jih kupci pričakujejo, potrebe po vznemirjenju pa so nepričakovane ali dodatne lastnosti, ki lahko navdušijo kupce. Model KANO se lahko uporablja za usmerjanje razvoja izdelkov in trženjskih prizadevanj ter za merjenje zadovoljstva strank - lahko pa ga kot merjenje kakovosti uporabljamo tudi v modelih kot je TQM, kjer se obračamo v proces managementa kot celote - kjer pa v upoštevanje pride tudi PDCA ter njegova implementacija.

3 CIKEL PDCA ALI DEMINGOV KROG

Cikel PDCA je v strokovni literaturi, ki obsega diskusije o kakovosti ter optimizacij poslovnih procesov, zelo frekventno omenjen. Včasih se sicer skriva pod ostalimi imeni, kot so Demingov cikel, Demingovo kolo ali Shewart-Demingov cikel, vendar to ne spremeni njegove pojavnosti ter njegove aplikativnosti kot jo poznamo znotraj organizacij. Metodologijo PDCA je razvil ter utemeljil Deming sočasno ter predvsem za

reševanje problematike reparacije gospodarstva v povojni Japonski - s to metodologijo je lahko tako reševal probleme kakovosti ter nadzoroval operacije, ki so bili v procesu reparacije.

Cikel PDCA je industriji kakovosti pomagal premagati različne kakovosti težave na različnih področjih in različnih operacijah. Mnogi so cikel PDCA uporabili, da bi predlagali alternativni sistem upravljanja s pitno vodo za uveljavljen sistem upravljanja z vodo v Kanadi. Prav tako so uporabil cikel PDCA za uvedbo novega sistema upravljanja z energijo za mala in srednje velika podjetja (MSP) v Indiji, da bi izboljšal njihovo učinkovitost in pobude za upravljanje z energijo. Poleg tega je implementacija uporabe cikla PDCA bila implementirana tudi, da bi raziskali priložnost za razširitev proizvodnje in proizvodne zmogljivosti enega od majhnih podjetij za proizvodnjo mila. Vsaka od prej omenjenih študij kaže, kako je mogoče cikel PDCA uporabiti kot primarno orodje za ocenjevanje neučinkovitih procesov in predlaganje korektivnih ukrepov za izboljšanje teh procesov.

3.1 Potek PDCA cikla

Tako imenovan Demingov krog obsega štiri ciklične korake, ki se usmerjajo v reševanje težav, ki se dotičejo kakovosti - znotraj tega govorimo o diagnostiki problema, raziskavi problema ter preko tega uvedbi korakov, ki omogočajo solucijo tega problema znotraj poslovnega procesa, da se ga tj. dokončno znebimo.

- Načrtovanje - Stopnja na kateri se implementirajo določene optimizacije ter izboljšave, ki se dotičejo nastalih težav v zvezi s kakovostjo poslovnega procesa organizacije
- Izvajanje - Izvajanje načrtovanih ukrepov po določeni sistematiki te metodologiji.
- Preverjanje - Merjenje ter monitoriziranje implementiranih ukrepov znotraj sistema v katerega smo jih uvedli.
- Ukrepanje - Dodatno izboljševanje ter optimizacija ukrepov skozi ponavljanje vseh štirih korakov.

V naslednjih odstavkih se bomo tako posvetili vsaki fazi posebej ter jo praktično ovrednotili glede na hipotetična vprašanja, skozi katerega jo lahko ovrednotimo znotraj posamezne

organizacije. Torej v fazi načrtovanja je pomembno, da najprej začnemo z ocenitvijo organizacija - na tem mestu, če se recimo obrnemo v projekt znotraj podjetja je potrebna ocena nujnosti projekta, njegove učinkovitosti ter zaželenih ciljev. Pri tem lahko recimo uporabimo metodo braistoriming, petkrat zakaj ali pa recimo diagram ribje kosti skozi katere se usmerimo v identificiranje golega, surovega ter osnovnega problema - uporaba določene metodologije je odvisna od velikosti organizacije, od velikosti skupine, ki deluje na določenem problemu ter od narave problema s katerim se ukvarjajo. Pri evalvaciji organizacije ali projekta znotraj nje se je vsekakor potrebno usmeriti v določena vprašanja, ki se dotičejo posameznih poslovnih procesov tj. kjer je najbolj smiselno, da se postavijo takšna, ki določijo nujnost ter potrebe projekta kot na primer:

- Ali je dodajanje dodatne proizvodne linije ena izmed ali edina rešitev za razširitev proizvodne kapacitete ter zmogljivosti ?
- Ali je bo za delovanje dodatnega oddelka, ki se dotiče razvoja na projektu dovolj sredstev?
- Kako intenzivno bo dodatna proizvodna linija vplivala na obremenitev managerjev?
- Katere so temeljne pozitivne lastnosti izvedbe projekta?
- Kateri so najbolj možni negativni scenariji izvedbe tega projekta?
- Ali je realna uporabnost projekta dosegljiva glede na zastavljene resurse s petnajstodstotnim odstopanjem od načrtovanega?

V fazi izvajanja znotraj Demingovega cikla se delovanje v osnovi razdeli na tri korake in sicer izdelavo seznama kontrole za zagotovitev kakovosti; vzpostavitev ocene tveganja preko FMEA ter; izdelava osnutka, ki vsebujejo smernice za projekt. Pri prvem koraku moramo povzeti vse dejavnosti, ki jih moramo doseči pred samo izvedbo uvajanja določene spremembe — na tem mestu lahko npr. govorimo o posodabljanju dokumentacije ter uvajanju novih smernic znotraj podjetja. Namen tega koraka je, da se vzpostavi varovalka, ki onemogoča, da bi se na predhodne že vpeljane optimizacije kvalitete zgodil vpliv, ki bi jih porušil ali eliminiral. V drugem koraku faze izvajanja se tako usmerimo v oceno tveganja preko

Failure Modes and Effects Analysis - to pomeni prehodno ovrednotenje implementacije željene spremembe ter skozi to tudi ovrednotenje potencialne napake, ki se je pojavila ter ki se skozi to lahko dodatno pojavi. FMEA ocena se je razvila v šestdesetih ter je bila aplicirana znotraj aeronavtske industrije za ocenjevanje najvišjih stopenj tveganj - po tem se je ta metoda rahlo modificirala s čimer so jo začeli uporabljati v ostalih industrijah kot npr. avtomobilski, živilski, etc. To kar iz ocen tveganja analitiki pridobijo je nato podlaga za tretji korak tj. oblikovanje osnutka za smernice projekta, kar potrebno uvesti v operativno strategijo skozi statistiko, kar se nato uporablja kot parametre za orodja, ki implementirajo spremembe v določenem projektu.

Po tem, se lahko usmerimo v fazo preverjanja znotraj PDCA cikla, kjer se vse kar se je razvilo med prvima dvema fazama prekontrolira — tj. vsa odstopanja, ocene tveganja, preventivni ter potencialni korektivni ukrepi, načrti, finančne projekcije, etc. na tem mestu se lahko tako ustvari jasno ter točno smernico ukrepanja skozi zbrane ter ovrednotene informacije iz prejšnjih korakov. Na tem mestu pa vstopimo v zadnjo fazo in sicer fazo ukrepanja, kjer pa se vse ocenjene ter zbrane informacije aplicirajo v sam proces, katerega smo želeli optimizirati ter izboljšati — skozi to se dogaja kotroling ter monitoring potencialnega ter pričakovanega izboljšanja določenega poslovnega procesa.

Ta faza pa je tudi nastavek za nadaljevanje ciklične zasnove PDCA v smislu, da se lahko krožno vračamo nazaj skozi vse faze optimizacije poslovnega procesa ter tako konstantno in ažurno izboljšujemo proces na kontinuitivni bazi.

3.2 Implementacija kontinuitivnega razvoja

V kontinuitivnem razvoju ter njegovi implementaciji v podjetje skozi aplikacijo PDCA cikla je v strokovni literaturi napisano veliko pozitivnega v prid rasti podjetja ter utrjevanju koncepta kakovosti in trajnosti - vendar pa je skozi to potrebno razumeti tudi, da obstajajo določeni izzivi, ki jih takšna kontinuitivnost prinaša. Organizacijski problemi, ki se pojavljajo pri uporabi dotične metode so pojmovanje te kontinuitivnosti — v PDCA ciklu ta dinamika ter ciklizacije ne pomeni, da je vsakršen cikel

dokončen cilj, ampak le del poti konstantnega izboljševanja tj. optimiziranje že optimiziranega. Da lahko dosežemo razumevanje tega procesa moramo znotraj organizacije ustvariti kulturno reformo, ki pomeni razumevanje dotičnega cikla kot poslovno prakso podjetja in ne kot začasno rešitev, ki razreši pojavnost enkratne problematike. Takoj ko delo postane smo začasno tj. se PDCA uporabi kot začasna rešitev in ne kot implementacije poslovne prakse — takrat postane njegova uporabnost precej nizkokakovostna, kar pa je v tem primeru precej paradoksalno. Mehanizem te metode se nahaja v tem, da enkratne izboljšave ne razumemo kot enkratnega cilja — pomen organizacije je, da jo pojmujejo ter jemljejo kot organsko, kot Živi sistem, ki ima nove zahteve, ki ima nove preference, ki ima aktualna področja katera je treba nasloviti — tj. področja, ki se konstantno spreminjajo. Če pa želimo nasloviti spremembe, ki so konstantne, je potrebno uvesti kontinuitivnost, kar pa PDCA cikel predstavlja in samo v tej obliki je učinkovit do tega nivoja zaradi katerega je bil ustvarjen.

Da lahko uvedbo kontinuitivnosti uvedemo na celotno organizacijo se je tega potrebno lotiti vertikalno tj. iz vodstva navzdol — v tem primeru precej koristi uvedba seminarjev ter izobraževanj, kar tako integrira angažiranost managementa z razumevanjem zaposlenih. Strokovnjaki v člankih precejkrat izpostavljajo negotovost ter strah managementa pri nenadnih spremembah ter tveganjih, ki v njih ne vzbujajo sigurnosti glede sposobnosti zaposlenih, vendar pa hkrati želijo kratkoročni dobiček in točno to so temeljne problematike, ki se z metodo kot je PDCA cikel razreši na metodološki, ideološki ter filozofski ravni podjetja — seveda ob implementaciji tudi na operativni.

Implementacija kontinuitivnih izboljšav v podjetju je tj. mehanizem, ki zahteva precej vloženega truda, da se to na organizacijski ravni sprejme kot princip dela ter, da se to razume kot prednost in prehod iz tradicionalizma v evolucijo. Pomembnih je pet stopenj, ki se v modelih uvajanja pojavljajo znotraj implementacije kontinuitivnih metoda:

1. stopnja - Na tem mestu se s strani vodstva predstavi princip kontinuitivnih izboljšav, kjer se s strani zaposlenih nato pojavi nekakšno

zanimanje znotraj te tematike. Povod za predstavitev principa je lahko nastali problem v podjetju, predstavitev na seminarju skozi informativni vidik ali pa v končni fazi tudi opazovanje prakse pri drugih organizacijah.

2. Stopnja - Na tej stopnji se je organizacija odločila za implementacijo metode kontinuitivnega izboljševanja npr. PDCA, kar pomeni, da je potrebno uvesti določena izobraževanja ter seminarje, ki zaposlene ozavešajo o tem, kaj to pomeni za njihovo delo, kaj to pomeni za organizacijo kot celoto ter kako bodo v nadaljnjih korakih potekale interakcije tako horizontalno kot vertikalno v podjetju.
3. Stopnja - Na tej stopnji je metoda kontinuitivne spremembe vpeljana v strategijo organizacije, kar pomeni, da se določeni poslovni procesi ali pa poslovni proces v celoti, če govorimo oTQM, izvajajo znotraj teh metod.
4. Stopnja - Na tej stopnji je metoda kontinuitivne spremembe vpeljana do te točke, da se lahko posameznim oddelkom ali pa projektom podeli decentralizirana avtonomija, kar pomeni, da se njihov npr. PDCA cikel izvaja na mikroravni tj. neodvisno od ostalih v smislu vsakdanje orientacije. Seveda pa je še vedno pomembno, da celotna organizacija ostane integrirana ter koherentna.
5. Stopnja - Na tej stopnji je kontinuitivno izboljševanje implementirano na ravni celotne organizacije, kar pomeni, da je celotna ideologija ter praktično ravnanje sprejeto kot del identitete podjetja ter njegovega soočanja z optimizacijo poslovnih praks.

Kar se dogaja skozi stopnje, je pojav razumevanja procesa s strani organizacije kot celote - v tem procesu učenja so aktivni tako managerji kot zaposleni. Zaposleni na tem mestu vidijo razliko na operativni ravni, vendar pa ne vidijo tako kakovosti ter optimizacije izboljšave - dočim na drugi strani managerji vidijo statistiko izboljšav vendar ne dosegajo takojšnjega feedbacka od delavcev glede razumevanja spremenjene metodologije dela. Do neke mere je uvajanje takšnega principa dela seveda eksperimentalno, sploh ko govorimo o tranziciji iz tradicionalizma k evolucijski držbi dinamike, vendar pa je stopenjska implementacija takšnega

principa ravno ključ do tega, da eksperiment ne postane in nikoli ni kockanje, ampak postopno uvajanje celotne organizacije na nov princip dela. Kot nov princip in naravno okolje se to razume nekje na tretji stopnji, kjer je lahko rezultat spremenjenega principa dela viden že na celotni organizaciji - tako skozi kakovostnejše izdelke ali storitve kot tudi razvoj poslovanja ter manjši pojavno frekventnost odstopanj v poslovni praksi.

Skozi analizo ter študije posameznih organizacij ter poslovnih praks je izpostavljen model, ki navaja vzpodbujevalce ter inhibitorje procesa implementacije metoda kontinuitivnih sprememb in sicer:

- Upravljanje in strategija - Podpora managementa ter vzpostavljanje strategije podjetja je eden izmed temeljev, ki omogoča, da se vsi zaposleni aktivno povežejo z vodilnimi ter v dejavnosti sodelujejo. Znotraj tega je zmanjšana možnost upora, delovanja proti sistemu ter napačni interpretaciji reforme, kar je značilno predvsem za momentalne poizkuse solucij v tradicionalnih operacijah.
- Določanje ciljev in potreba po metrikah - Če želimo uvesti metodo kontinuitivne spremembe je potrebno imeti prav tako konstantno težnjo po zastavljanju ciljev, ki so merljivi tako ordinalno kot kardinalno. Pomembno je, da so o ciljih seznanjeni vsi, vsak s svojo ravno zahtev ter da znotraj tega razumejo pomen njihovega doprinosa k optimizaciji.
- Upravljanje vodenja - Vodja kontinuitivne optimizacije lahko deluje tako slabo kot dobro, kar pomeni, da je lahko tako vzpodbudnik kot inhibitor. Pomembno je, da je kot vzpodbudnik vključen v vse procese implementiranja sprememb ter da ne drži stava v katerem je implementacija spremembe momentalna ter rapidna z edino ambicijo po povečanju finančne kompenzacije organizacije.
- Vključenost delavcev - kar se dotiče uvajanja procesa, je zanj Izjemno pomembna integracija, ki pa ne sme siliti v centralizacijo. Pomembno je, da se razume hierarhija, vendar pa se mora dopustiti določena avtonomija ter raziskovanje, kjer delavec odkriva svoje zmožnosti ter potrebe, ki se razvijajo v novem okolju ter novem principu dela.

- Razjasnitev in ustvarjanje novih struktur - vsak oddelek mora imeti na tej ravni jasno in točno razjasnjene naloge, ki se jih dotičejo v procesu implementacije kontinuitivnega izboljševanje ter prav tako kasneje tudi, po implementaciji, v samem procesu metodologije npr. PDCA
- Metode za razširitev nenehnih izboljšav - Podjetje na tem mestu ustvari personalno metodologijo, ki omogoča trajnost izvajanja in povzroči, da se praktične izboljšave razpršijo po preostalem delu podjetja na intuitiven način skozi priprave ter preventivno ravnanje npr. temeljni dejavnik uspeha Toyote je bil, da so ustvarili lastno metodo, ki je bila dobro prilagojena njihovi organizaciji, za uvajanje vitkosti. Skozi to je bilo tudi zelo težko kopirati ter na tem mestu biti konkurenčen Pomen tega je razvoj standardiziranega pristopa k delu, kar omogoča širitev v interdisciplinarnost.
- Kulturni vidik - Kultura podjetja je odločilna za nenehne izboljšave, kar pomeni, da se lahko iz tradicionalizma ter konvencionalnih metod usmerijo samo kot celota s tem, da razumejo potrebe ter razumevanje vseh ter jih združijo v celoto, ki potuje proti istem cilju npr. kot je storilo japonsko gospodarstvo v povojnem času in to na makro nivoju.
- Usposabljanje in sposobnosti - Pomanjkanje usposabljanja med zaposlenimi se lahko šteje za oviro, kot tudi pomanjkanje veščin za reševanje problemov s strani managementa preko nizkokakovostne prakse vodenja, kar definitivno zavira proces implementacije kontinuitivnih izboljšav.

Pri uvajanju principov kontinuitivnega izboljševanja je tako pomembna pro aktivnost tako na individualni kot organizacijski ravni pri čemer največ dosežemo skozi sodelovanje, posvetovanje ter naklonjenost, pozive ter racionalno prepričevanje preko navdiha. Izjemno pomembno kar tudi podrobneje razlagamo skozi lastno interpretacijo ter raziskavo:

- Posvetovanje - Pri tem gre za ciljne vzpodbujanje ciljne osebe, da predlaga optimizacijo v predlogu ali pomaga pri načrtovanju dejavnosti ali spremembe, za katero je zaželena podpora in pomoč ciljne osebe. Tako damo npr. zaposlenim občutek

identifikacije, sodelovanja ter doprinosa v razvoju celotnega projekta. Organizacijo tako na tem mestu identificiramo ter jo potrjujemo kot homogeno in koherentno.

- Naklonjenost - Izdajanje pohval in laskanj pred ali med poskusom vplivanja na dotično osebo v procesu, ko ta izvaja naloge v pričakovanju z zastavljenim ter se z novimi izzivi sooča preko odprtosti ter osebne rasti.
- Sodelovanje - Ponujanje ter zagotavljanje ustreznih virov in pomoči na poti do razumevanja ter prevzemanja določenih principov ter praks, ki so nerazumljene ter tuje.
- Racionalno prepričevanje - Uporaba logičnih argumentov ter soslednih povezav preko dejanskih dokazov za prikaz izvedljivosti ter dosegljivosti ciljev organizacije ali projekta znotraj nje.
- Navdihujoči pozivi - Apeliranje na vrednote in ideale tj. emocionalno integriranje osebe v samem procesu.

Sodobne organizacije so vedno ideološko vodene skozi revolucionarnost ter novitete manjše množice princip kolektivne zavesti ter usmerjenosti k istem cilju kot je to bilo npr. v socializmu, v tem rapidnem ter hiperkapitalističnem smislu ne gre več zaznati na tako intenzivnem nivoju. Problematika se skriva v kulturoloških razlikah ter onemogočanju povezanosti na ideološki ravni skozi izpolnjevanje skupnih ciljev. Ko govorimo na primer o organizacijah večjega razpona je preprosto diverziteta ljudi ter njihovih hotenj zaradi zunanjih impulzov tako raznolika ter razvejana, da samo enoplastna motivacija ne zadostuje kot vzgib za spremembo v polnosti.

Pri izpostavljanju problematike izpostavljam problematiko iluzije resničnosti, pri kateri se kolektivna zavest ustvari preko zahteve po nečem površinskem npr. na ravni organizacije govorimo o večji finančni kompenzaciji zaposlenega ob uvedbi metode kontinuitivnega izboljševanja. Ko se preko te iluzije, kar je v tem primeru finančna kompenzacija kvazi povežemo z ideologijo ter spremembo hitro ugotovimo, da kompenzacija pogosto ne odtehta spremembe, če te spremembe ne začutimo in ne želimo kot homogen del organizacije na ideološki ravni.

V organizacijah se tako skriva precej zapleten ter kompleksen mehanizem, ki pa je kontradiktoren. Z zdolgočasenimi ter rutinskimi ljudmi je precej lažje ravnati kot pa s tistimi, ki so izpostavljeni stresu ter izzivom. Implementacija nove metode vsekakor predstavlja stres ter povečan miselni tok zaposlenih, kar pomeni tudi večji napor organizacije kot celote. Odvisno od same osebe organizacije ter vodstva je to, ali so sposobni zaposlenega vzpodbuditi do te ravni, da bodo v klicu po spremembi v podjetju razumeli to dejanje kot samoaktualizacijo glede na Maslowo teorijo in bodo to storili resnično iz temelja svoje potenciala ter ne samo skozi oči izboljševanja poslovnega rezultata. Takšni detajli nato ločujejo primerno ter kvalitetno implementacijo praks od tistih, ki so momentalne ter usmerjene zgolj in samo v hiperkapitalistični nazor vodstva.

3 SKLEP

Cikel PDCA, znan tudi kot Demingov ali Shewhartov cikel, se je izkazal za izjemno uporabno orodje znotraj organizacij vseh velikosti ter oblik - tj. organizacij, ki stremijo k kontinuitivni optimizaciji kvalitete poslovnih procesov, storitev ter izdelkov. Z PDCA te principe dosegamo skozi upoštevanje štirih korakov tj. Načrtovanja, izvajanja, preverjanja in ukrepanja kar organizaciji omogoča postopnost in slojevito uvajanje principa glede na pripravljenost.

Temeljna prednost cikla PDCA je njegova enostavnost, kjer razdelitvijo procesa izboljševanja na majhne, obvladljive korake organizacijo usmerja v en vidik svojega procesa naenkrat, namesto da poskušajo izvesti velike spremembe naenkrat - seveda pa vseeno govorimo o spremembi celote preko principa TQN, znotraj katerega PDCA deluje. Princip PDCA omogoča prepoznavo ter obravnavo težav ter priložnosti na hitrejši ter bolj učinkovit način. Po mojem mnenju je prednost PDCA cikla prav tako njegova prilagodljivost, saj se lahko uporablja za katerikoli postopek ali izdelek; za katerikoli panogo; za katerikoli velikost organizacije, tako korporacijo kot individualno raven; ter na katerikoli ravni organizacije tj. ali govorimo o posameznem oddelku ali pa o organizaciji kot celoti.

Skozi to se je cikel PDCA izkazal kot močno orodje za organizacije, ki želijo optimizirati svoje

poslovne procese ter preko tega uvajati principe kontinuitivnega optimiziranja. To je namreč metodologija, ki organizacijam omogoča nenehno prepoznavanje in obravnavanje področij za izboljšave v njihovih procesih in izdelkih. Ta pristop temelji na načelu nenehnega učenja in prepričanju, da lahko majhne postopne izboljšave sčasoma vodijo do pomembnih rezultatov. Ena od ključnih prednosti kontinuitivnosti optimizacije je njegova zmožnost opolnomočenja zaposlenih na vseh ravneh organizacije, da prepoznajo in obravnavajo težave in priložnosti. Z vključevanjem zaposlenih v proces izboljšav lahko organizacije izkoristijo znanje in strokovnost svoje delovne sile, kar lahko vodi do učinkovitejših in učinkovitejših rešitev. Prednost kontinuitivne optimizacije je prav tako njegova osredotočenost na odločanje na podlagi podatkov in dokazov. Z zbiranjem in analiziranjem podatkov lahko organizacije prepoznajo temeljne vzroke težav in ocenijo učinkovitost svojih rešitev. To jim omogoča sprejemanje premišljenih odločitev in ukrepanje, ki bo najverjetneje vodilo do izboljšav. Kontinuitivnost tj. ni samo orodje za proizvodne ali storitvene panoge, ampak se lahko uporablja tudi management na osebem področju.

Skratka, kontinuitivno optimiziranje je izjemno uporabna ter močna metodologija, ki ob implementaciji omogoča nenehno prepoznavanje in obravnavanje področij za izboljšave v svojih procesih in izdelkih. Najlažje se jo aplicira preko PDCA cikla, saj lahko skozi plastovitost ter posamezne faze dosežemo popolno avtonomijo ter neodvisnost posameznih delov od celote — hkrati pa vsi fragmenti usmerjajo proti istem skupnem cilju. Da pa lahko te principe dosežemo, pa je seveda potrebno trdno, organizirano, zdravo ter ambiciozno delovno okolje, ki posamezniku omogoča samoaktualizacijo na osebni nivoju ter izražanju persone pri doseganju kolektivnega cilja za skupno dobro.

PRIMERJAVA NAPREDNIH 3D TEHNOLOGIJ ZA SKENIRANJE PRI NADZORU KVALITETE INDUSTRIJSKIH IZDELKOV

Jakob FABJAN, Adela PIŠMO, Vesna PUNGERČAR, Slavko ARH
Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto

IZVLEČEK

3D skeniranje je nekontaktna tehnologija, s katero lahko fizični objekt pretvorimo v digitalni model, kar industriji omogoča obratni inženiring in nadzor kakovosti (preverjanje skladnosti s predpisi). Pri nadzoru kakovosti se pogosto uporabljajo napredne tehnologije kot je 3D skeniranje. Vendar imajo te napredne tehnike določene omejitve: če ima na primer predmet izvrtine ali če so poškodbe skrite v notranjosti, jih s temi metodami ne moremo zaznati. Takšne informacije pa so ključnega pomena za napovedovanje trajnosti materiala in odkrivanje skritih napak (razpoke, prisotnost vključkov, nehomogenost materiala). Zato se naša raziskava osredotoča na primerjavo treh različnih tehnik za zajem tridimenzionalnih podatkov industrijskega izdelka iz aluminija: 3D skeniranje s strukturirano svetlobo, 3D skeniranje z lasersko svetlobo in skeniranjem z uporabo računalniške tomografije (CT). Cilj je bil primerjati posamezne tehnike glede na natančnost izdelave v primerjavi s CAD modelom ter glede na količino in kakovost informacij, ki jih posamezna tehnika omogoča. Pri tem smo upoštevali, ali tehnika omogoča analizo zunanjih geometrijskih lastnosti materialov in drugih pomembnih značilnosti. Rezultati raziskave kažejo, da je kombinacija 3D skeniranja skupaj s CT analizo smiselna za preverjanje visoke kakovosti in boljše napovedi življenjske dobe industrijskega izdelka.

1 UVOD

Eden izmed pomembnih ciljev industrijske proizvodnje je nadzor kakovosti. Kot navaja avtor Mitra v svoji monografiji [1] je kontrola kakovosti definirana kot: »Sistem, ki vzdržuje željeno raven kakovosti, skozi preverjanje povratnih informacij o izdelku/storitvi in implementaciji popravnih aktivnosti, ...«. Ena od vrst povratnih informacij o industrijski proizvodnji je dimenzija njenega končnega izdelka. To pomeni, da morajo biti dimenzije izdelkov med procesom kontrole izmerjene z različnimi vrstami merilnih naprav.

Pogosto se uporablja koordinatni merilni sistem (CMM), pri katerem merilna konica določi položaj z dotikom merjenega izdelka, potem ko se premakne iz vnaprej določenega položaja po natančno predpisani poti. Najtočnejši CMM-ji dosegajo točnost tudi pod 1 μm [2]. Ključne slabosti CMM-ja so, da so izmerjeni le položaji določenih točk, tako da meritev ne zajema oblike preostale površine. Za vsako obliko izdelka je potrebno pripraviti nov program merjenja. Mehki merjenci (pene, gume, ...) se ob dotiku deformirajo, kar povzroči popačenje meritve.

Izvajanje meritev s CMM je počasno v primerjavi z brezkontaktnim merjenjem, kjer lahko npr. s 3D skenerjem zajamemo tudi več milijonov točk na sekundo. CMM so nepremične, zato je potrebno izdelek dostaviti do naprave.

Kot alternativa CMM-u se uporabljajo optični 3D skenerji. Za merjenje izdelkov manjših od 10 m se uporabljata dva tipa optičnih skenerjev in sicer 3D skener s strukturirano svetlobo in 3D skener z laserskimi žarki.

3D skenerji s strukturirano svetlobo na izdelek projicirajo različne progaste svetlobne vzorce. Ti se zaradi različnih oddaljenost točk na merjencu od skenerja popačijo. Kamere to popačitev zajamejo na slike. Na podlagi več slik (pri vsaki se projicira drugačen vzorec) se lahko določi, kje v prostoru se nahaja posamezna točka na izdelku. Iz vsakega zornega kota se mora tako zajeti več slik. Pri tem pa se zajamejo vrednosti vseh delov predmeta, ki se nahajajo znotraj merskega območja. Glavni pomanjkljivosti 3D skenerjev s strukturirano svetlobo sta njihova občutljivost na barvo in odbojnost površine izdelka ter občutljivost na svetlobo iz okolice. Kot rešitev prve pomanjkljivosti se pogosto uporablja

posebno razpršilo za 3D skeniranje, ki prekrije površino izdelka s tanko plastjo belega prahu.

3D skenerji z laserskimi žarki delujejo na principu triangulacije. Na podlagi poznavanja kota in razdalje med laserskim virom in kamero ter položaja laserske linije na sliki, je mogoče določiti prostorski položaj točk na površini izdelka.

Rentgenska računalniška tomografija (CT) se je uveljavila kot ključna nekontaktna, ne destruktivna metoda v industrijskem meroslovju in medicinski diagnostiki, saj omogoča zajem podrobne notranje in zunanje geometrije kompleksnih objektov [3]. Prehod CT-tehnologije iz tradicionalnih radioloških aplikacij v visoko natančno dimenzijsko meroslovje omogoča njena sposobnost vizualizacije notranjih struktur, ki so nedostopne za taktilne ali optične merilne sisteme [4]. CMM merilni sistemi, ki še vedno veljajo za zlati standard pri merjenju zunanjih dimenzij, se pogosto izkažejo kot neustrezni pri ocenjevanju notranjih struktur [3]. V primerjavi s konvencionalnimi merilnimi sistemi ima CT številne prednosti, zlasti pri merjenju delov z visoko površinsko hrapavostjo ali prisotnostjo votlin ter kompleksnih notranjih struktur [5]. Kljub temu delovanje CT-sistemov še vedno omejujejo različni dejavniki, kot so velikost vokslov (volumetrična enota v 3D prostoru), artefakti zaradi utrjevanja spektra rentgenskega žarka (ang. *beam hardening*) ter negotovosti, povezane z algoritmi za določanje površin [6].

Inovativni pristopi danes vključujejo metode globokega učenja za avtomatizirano zaznavanje napak v CT-volumskih podatkih. Takšni pristopi izkazujejo visoko odpornost na artefakte, kar odpira možnosti za avtomatizirane in linijsko integrirane CT-sisteme za nadzor kakovosti. [5]

Pomembno je poudariti, da industrijska uporaba CT-tehnologije ni omejena le na kovinske komponente. V gradbeništvu se je CT pokazal kot primerno orodje pri analizi povezanosti in porazdelitve por v poroznem asfaltu. Takšna analiza omogoča razvrščanje zračnih por v koristne in škodljive, kar neposredno vpliva na vodoprepustnost vozišča in njegovo konstrukcijsko stabilnost [7]. Ta široka uporabnost potrjuje vse večjo vlogo CT-

skeniranja pri karakterizaciji materialov v različnih inženirskih panogah.

Izbira med CT, 3D skeniranjem in koordinatnimi merilnimi sistemi (CMM) je v veliki meri odvisna od zahtev po kakovosti meritev, točnosti ter ekonomičnosti. Nižja ločljivost CT skenerja pri zaznavanju površinske teksture ter občutljivost na materialne lastnosti zahtevata dopolnjevanje z drugimi merilnimi metodami, kar omogoča bolj zanesljivo validacijo rezultatov [8].

3D in CT skeniranje danes predstavljata tehnologiji natančnega merjenja, saj sta prilagojeni izzivom sodobne proizvodnje in karakterizacije materialov. Z napredkom računalniških metod in razvojem standardov bo vloga teh tehnologij v procesih zagotavljanja kakovosti postajala vse bolj ključna.

2 METODOLOGIJA

Naša raziskava se osredotoča na primerjavo treh različnih tehnik za zajem tridimenzionalnih podatkov industrijskega izdelka iz aluminija: 3D skeniranje s strukturirano svetlobo, 3D skeniranje z lasersko svetlobo in skeniranjem z uporabo računalniške tomografije (CT). Cilj je bil primerjati posamezne tehnike glede na natančnost izdelave v primerjavi s CAD modelom ter glede na količino in kakovost informacij, ki jih posamezna tehnika omogoča.



Slika 1: Prikaz izdelka, ki smo ga 3D skenirali

Izbrani testni predmet je izdelan iz aluminija (Slika 1) in je sestavljen iz dveh valjastih delov. Spodnji del je širši ($\Phi 60$ mm) in nižji (8 mm), v njem pa se nahajata dve nasproti ležeči izvrtini.

Zgornji del je ožji ($\Phi 32,8$ mm) in višji (32,9 mm) ter vsebuje natančno obdelane utore in odprtine. Njegova geometrijska oblika je zaradi izvrtn kompleksna kar omogoča primerjavo med različnimi metodami skeniranja.

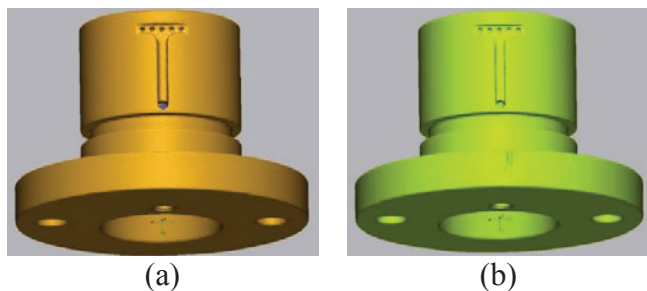
2.1 3D laserski skener

Za merjenje z laserskim skenerjem smo uporabili 3D skener kanadskega podjetja CREAMFORM, MetraSCAN BLACK+™ Elite (točnost 25 μm) in programsko opremo VXelements 11. Pri skeniranju smo nastavili ločljivost 0,2 mm ter čas zaslonke 0,78 ms. Skeniranje smo izvedli v dveh delih. Najprej smo poskenirali izdelek z zgornje strani nato smo ga obrnili za 180° in ga poskenirali še s spodnje strani. Oba skena smo nato umestili v skupni koordinatni sistem in ju združili v programu za zajem podatkov. Kot rezultat skeniranja smo iz programa izvozili mrežo v obliki stl datoteke (Slika 2a).

2.2 3D skener s strukturirano svetlobo

Pri skeniranju s strukturirano svetlobo smo uporabili skener južnokorejskega podjetja VYLO vrste RAPTOR 3DX in programsko opremo za zajem podatkov 3DXPartner. Pri skeniranju smo nastavili najnižjo možno resolucijo skeniranja (0,09 mm) Pred skeniranjem smo izdelek prekrili s skenirnim razpršilom, saj je njegova površina za skener s strukturirano svetlobo preveč odbojna. Ravno tako kot pri laserskem skeniranju smo skeniranje izvedli v dveh korakih.

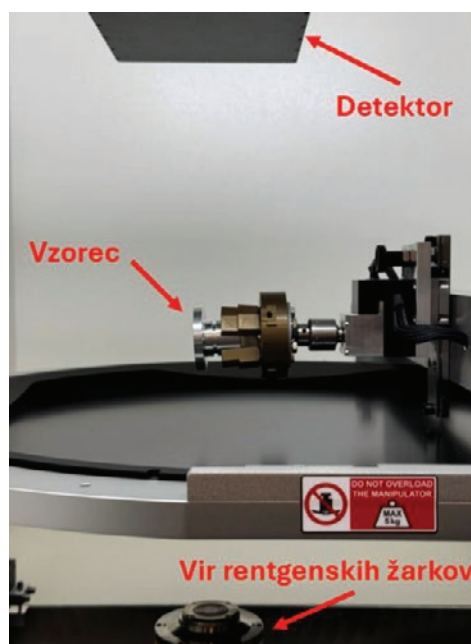
Na sliki 2b je prikazan 3D model po skeniranju s 3D skenerjem s strukturirano svetlobo.



Slika 2: Rezultat skeniranja s (a) 3D laserskim skenerjem in (b) 3D skenerjem s strukturirano svetlobo

2.3 Računalniška tomografija (CT)

Za potrebe računalniške tomografije je bila uporabljena naprava Nikon Metrology XT V 160 (Belgija), za rekonstrukcije slik pa programska oprema CT Pro3D (Nikon Metrology). Za nadaljnjo analizo podatkov in vizualizacijo je bil uporabljen VGSTUDIO MAX (Volume Graphics, Nemčija). Na sliki 3 je prikazana namestitev vzorca v napravo med skeniranjem.



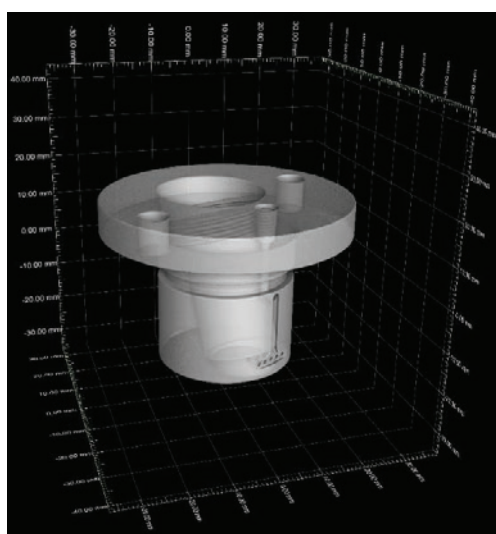
Slika 3: Položaj vzorca v CT skenerju

Testni predmet se je med zajemanjem podatkov rotiral okoli horizontalne osi, za 360°. Za vsako stopinjo rotacije so bile posnete štiri rentgenske slike. To omogočila izboljšano ostrino in povečano ločljivost skenirane slike. Parametri skeniranja – vključno z napetostjo (160 kV), tokom (69 μA), povečavo (1.581), številom slik (5000) ter časom osvetlitve (354 ms / 2.82 fps) – so bili izbrani glede na fizikalne lastnosti materiala in kompleksnost oblike, z namenom pridobiti čim bolj kakovostne prikaze notranjih struktur. Za dosego optimalne vizualizacije manjših detajlov je bila povečava prilagojena velikosti testnega predmeta, ustrezen čas osvetlitve pa je omogočil zmanjšanje šuma in izboljšanje kakovosti slike.

Za generiranje rentgenskih žarkov je bila uporabljena volframova tarča, medtem ko je 0,5 mm bakreni filter služil kot sredstvo za

izločanje nizkoenergijskih žarkov, ki bi zmanjšali kakovost posnetkov.

Slikovni podatki, pridobljeni z rentgenskim slikanjem, so bili združeni v 3D model z uporabo programa CT Pro3D. Določanje površin je potekalo v VGSTUDIO MAX, pri čemer je bila uporabljena napredna nastavitvev, ki temelji na sivinskih vrednostih posameznih vokslov. Pravilna opredelitev površine je bistvenega pomena za kasnejše meritve in primerjave. Vizualni prikaz končnega 3D modela je prikazan na sliki 4.



Slika 4: Vizualni prikaz CT skeniranega modela

Za primerjavo CAD-modela s CT-skeniranim modelom je bil uporabljen modul *Nominal/Actual Comparison* v programu VGSTUDIO MAX.

3 ANALIZA REZULTATOV

Analizo rezultatov meritev zunanjih površin smo izvedli v programu Geomagic Control X 2023. 3. 0. Tu smo najprej izvedli okvirno (funkcija Initial Alignment) in nato še detajlno (funkcija Best Fit Alignment) poravnavo med CAD modelom in izmerjenimi mrežami. Nato smo uporabili funkcijo, ki primerja odstopanje med izmerjenimi mrežami in CAD modelom.

Tabela 1: Odstopanja površinskih meritev v mm

	Min.	Max.	Avg.	RMS	Std. Dev.
CT skener	-0,6886	0,6872	0,0149	0,1095	0,1291
Strukturirana svetloba	-0,9622	0,9595	0,0036	0,0817	0,0816
Laserski skener	-1,6504	1,6523	0,0012	0,1765	0,1765

V tabeli 1 so prikazane kvantitativne vrednosti odstopanj med izmerjenimi površinami in referenčnim CAD-modelom za vse tri uporabljene metode skeniranja. Ti podatki vključujejo minimalno in maksimalno odstopanje, povprečno vrednost, koren srednje kvadratne vrednosti (RMS) ter standardni odklon, kar omogoča celovito oceno natančnosti posamezne metode pri zajemu geometrije.

Treba pa je upoštevati, da je RAPTOR 3DX bolj specializiran za skeniranje izdelkov tega velikostnega razreda (mersko območje do 300 mm), med tem ko lahko z MetraSCAN BLACK+™|Elite skeniramo tudi kose velikosti več metrov.

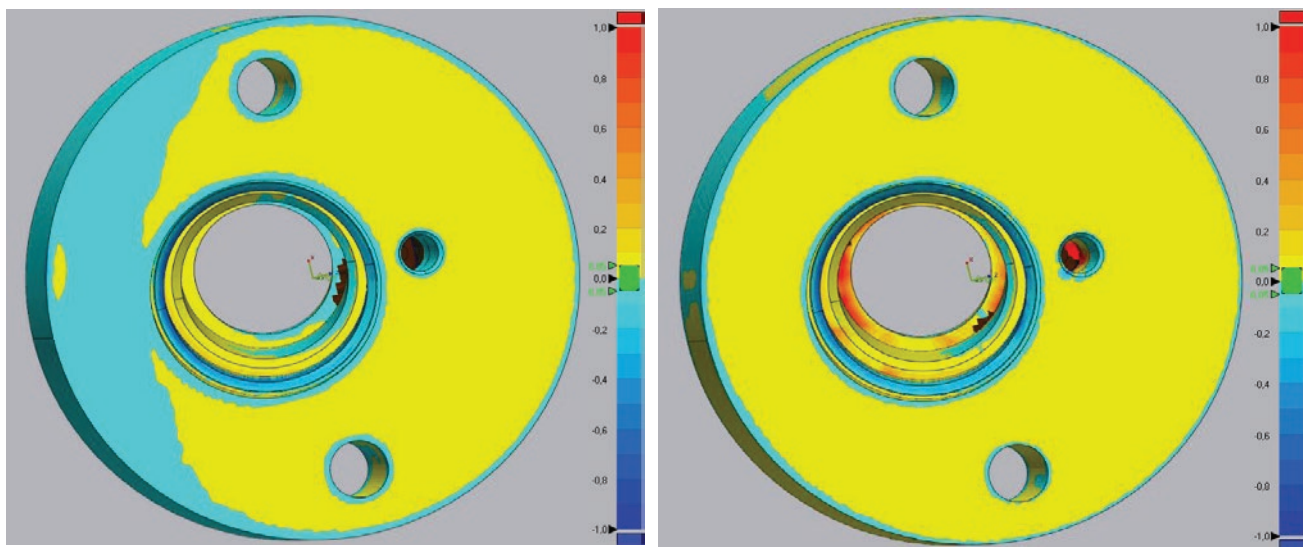
Iz slike 5a in slike 5b pa je razvidno, da imata oba optična skenerja težavo pri zajemanju sten globokih in ozkih izvrtin. Na skrajnih legah takih izvrtin, kjer skenerja še lahko zaznata točke, pride do največjih odstopanj (min. in max. v tabeli 1). Stene globokih ozkih izvrtin lahko tako zazna le CT skener.

Na sliki 5, bolj rdeče barve predstavljajo točke katerih meritev se nahaja nad površino modela izdelka, bolj modre barve pa točke katerih meritev se nahaja pod površino modela izdelka.

Na sliki 5c so prikazani rezultati analize CT-skeniranja, pri čemer je prikazano tudi odstopanje za eno izmed toleriranih mer. V tem primeru je bila dopustna toleranca $\pm 0,1$ mm (cilinder spodaj), izmerjeno odstopanje pa je znašalo 0,08 mm, kar pomeni, da vrednost ostaja znotraj dovoljenega območja. Poleg zunanjih značilnosti so s CT-skeniranjem vidne tudi notranje strukture izdelka, kar je prikazano na sliki 6. Ta sposobnost natančne vizualizacije notranjih komponent je ključna prednost CT-tehnologije v primerjavi z optičnimi metodami, še posebej pri nadzoru kakovosti izdelkov z notranjimi votlinami ali kompleksnimi funkcionalnimi elementi. Če se osredotočimo na spodnji del izdelka, natančneje

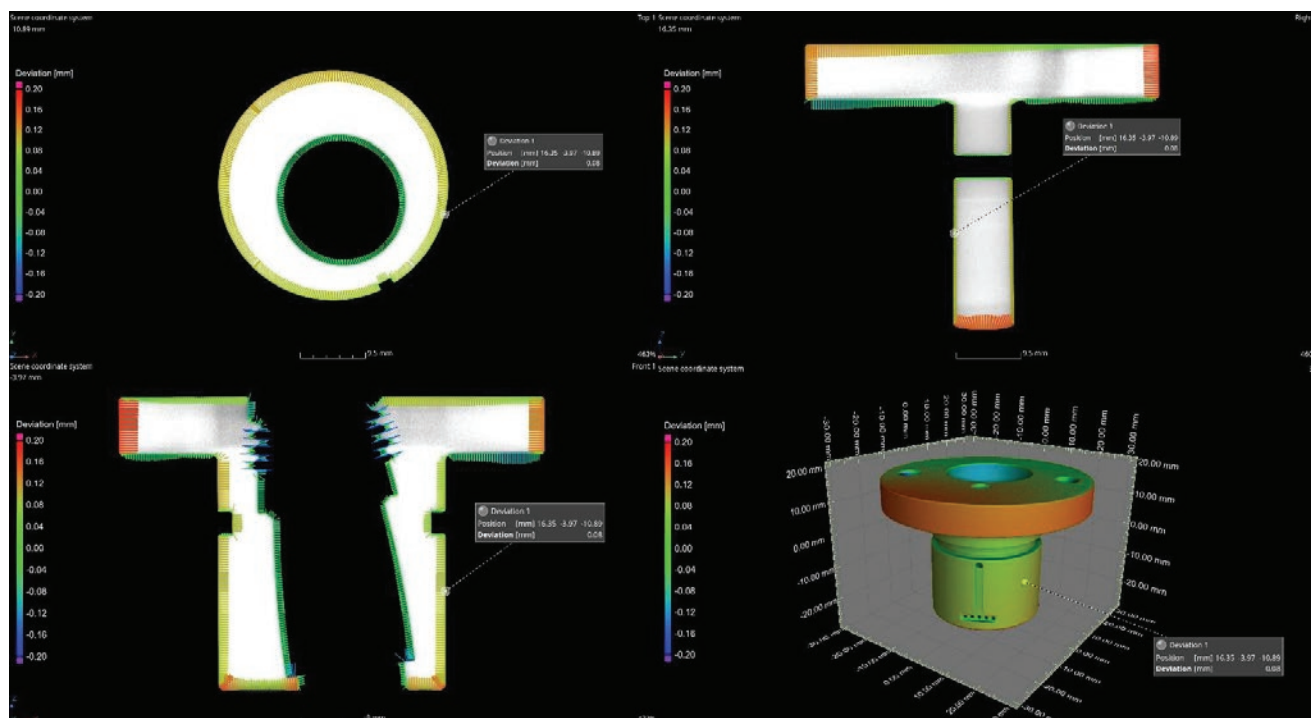
na spodnji cilindar, je razvidno, da CT skener izkazuje večja odstopanja v primerjavi z 3D skenerjema. Glavni razlog za to so artefakti, ki nastajajo pri CT-skeniranju v območjih z večjo debelino materiala. Povečana absorpcija rentgenskih žarkov na debelejših delih vpliva na

kakovost rekonstrukcije, kar vodi do manjše natančnosti v teh regijah. Kljub temu pa so izmerjena odstopanja še vedno v okviru dopustnih toleranc, kar potrjuje, da je metoda zanesljiva tudi pri kompleksnejših geometrijah.



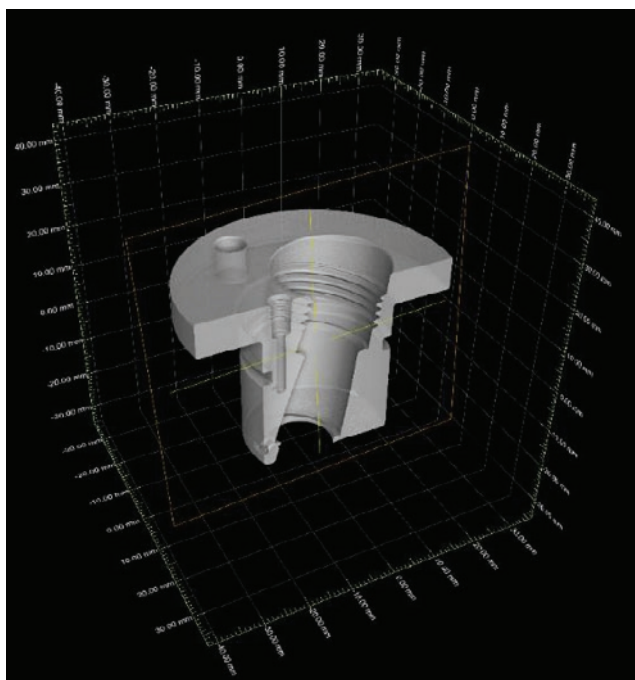
(a)

(b)



(c)

Slika 5: Prikaz odstopanj pri: (a) strukturirani svetlobi, (b) laserskem skeniranju in (c) CT skeniranju



Slika 6: Prikaz notranje geometrije izdelka (CT)

3 SKLEP

Primerjalna analiza treh naprednih metod – 3D laserskega skenerja, 3D skenerja s strukturirano svetlobo in računalniške tomografije (CT) – je pokazala, da ima vsaka tehnologija svoje prednosti in omejitve, ki jih je treba upoštevati glede na specifične izdelke in merilnega namena.

3D skener s strukturirano svetlobo je najnatančnejši pri zajemu zunanje geometrije manjših komponent, kar potrjuje nizka RMS vrednost in zelo dobra skladnost s CAD-modelom. 3D laserski skener, kljub nekoliko višjim odstopanjem, ponuja večjo prilagodljivost glede velikosti merjencev in hitrost zajema.

CT skeniranje statistično ne dosega enake površinske natančnosti kot optični sistemi, vendar ga odlikuje sposobnost celostnega zajema notranjih struktur, kar je ključnega pomena pri analizi komponent z notranjimi votlinami, izvrtinami ali potencialnimi defekti.

Optimalna izbira tehnologije 3D skeniranja ni univerzalna, temveč mora temeljiti na konkretnih zahtevah aplikacije – vrsti izdelka, zahtevani natančnosti, dostopnosti površin ter potrebi po notranji analizi. Kombinacija CT in optičnih metod se tako izkaže kot učinkovit pristop za celostni nadzor kakovosti industrijskih komponent.

4 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] Mitra, A.: *Fundamentals of Quality Control and Improvement*, John Wiley & Sons, 2016.
- [2] <https://www.zeiss.co.in/metrology/systems/cmms/brid-ge-type-cmms/xenos.html>
- [3] Villarraga-Gómez, H., Lee, C., Smith, S.T.: Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures, *Precision Engineering* 51(2018)3, str. 291–307.
- [4] Dach, E., Bergauer, B., Seidel, A., von Wilmsowsky, C., Adler, W., Lell, M., Wichmann, M., Matta, R.-E.: Impact of voxel size and scan time on the accuracy of three-dimensional radiological imaging data from cone-beam computed tomography, *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery* 46(2018)12, str. 2190–2196.
- [5] Fuchs, P., Kröger, T., Garbe, C.S.: Defect detection in CT scans of cast aluminum parts: A machine vision perspective, *Neurocomputing* 453(2021)1, str. 85–96.
- [6] Liu, W., Chen, X., Zeng, W., Sun, W., Gorman, D., Wilson, A., Qi, Q., Scott, P., Jiang, X., Lou, S.: Comparison of X-ray computed tomography and coordinate-measuring system dimensional measurement for additive manufacturing parts using physical and simulation methods, *Measurement* 229(2024)1
- [7] Zhao, Y., Wang, X., Jiang, J., Zhou, L.: Characterization of interconnectivity, size distribution and uniformity of air voids in porous asphalt concrete using X-ray CT scanning images, *Construction and Building Materials* 213(2019)1, str. 182–193.
- [8] Gapinski, B., Wieczorowski, M., Marciniak-Podsadna, L., Dybała, B., Ziółkowski, G.: Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D, *Procedia Engineering* 69(2014)1, str. 255–262.

EVALUATION OF BATTERY CELLS AND MODULES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY USING CT TECHNOLOGY

Ena PERIČIĆ¹, Andrea PERKOVIĆ¹,
Luka KURTALJ², Josip KOS², Nenad DRVAR², Tomislav HERCIGONJA²
¹Rimac Technology d.o.o
²Topomatika d.o.o

SUMMARY

The paper provides an overview and highlights the advantages of using industrial computerized tomography (CT) in evaluating battery cells and modules intended for electric vehicles in the automotive industry. The main advantage of CT technology lies in its non-destructive nature, which enables the creation of a digital twin of the actual product, allowing for a detailed insight into the actual condition of the battery cell without the need for physical disassembly.

For battery system manufacturers, CT technology facilitates the digital transformation of processes in product development and quality control, offering faster and more accurate identification of manufacturing defects, damage analysis after rigorous testing, and ensuring safety in mass production of new battery systems.

The paper presents the results of three-dimensional measurements of battery cells from the product development phase, obtained using the ZEISS Metrotom CT system. Data evaluation was conducted using the ZEISS Inspect X-Ray software package, which enables comprehensive analysis of digital twins.

1 INTRODUCTION

With the rapid shift from gas-powered vehicles to electric vehicles, it has become apparent that there is a growing need to test battery cells and modules to maximize our understanding of these critical components of electric vehicles (EVs), which influence key metrics such as range, energy efficiency, and safety.

CT technology, which employs X-ray imaging to generate highly detailed, three-dimensional visualizations of internal structures, has become an indispensable tool in non-destructive testing (NDT). It allows manufacturers to inspect and analyze battery components without disassembly, offering unparalleled insights into structural integrity, material distribution, and potential defects.

2 COMPUTED TOMOGRAPHY

The main components of any industrial CT device are the X-ray source, the automated

rotational stage for positioning the object of scanning, and finally, the detector (Figure 1).

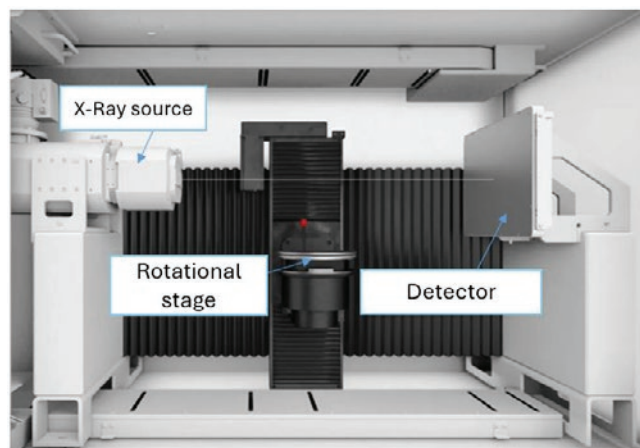


Figure 1 Main components of an industrial CT system

The X-ray source generates X-rays that pass through the scanned object and are then captured by the detector. The attenuation of the X-rays that reach the detector depends on the density and thickness of the material from which the scanned object is made. The object is rotated using an automated rotational stage, and the process is repeated until the object has completed a full 360° rotation. Afterward, the software employs

reconstruction algorithms to combine all captured images and automatically generate a volumetric model, which is then polygonized. The final result is a triangular polygonal mesh (Figure 2).

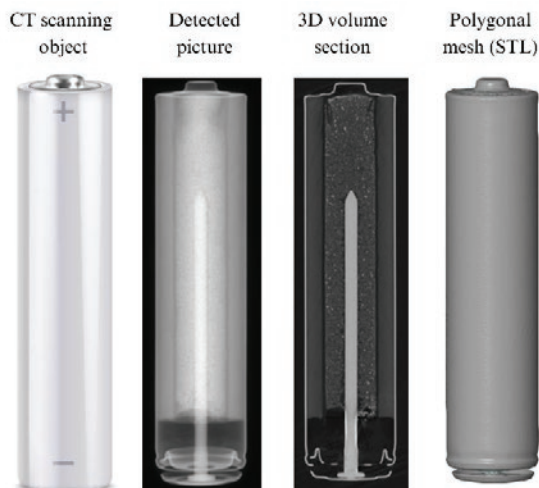


Figure 2 Digitalization process of a battery sample

2.1 Advantage of CT technology over conventional testing methods

The main advantage of computed tomography over conventional testing methods for analysis of interior structure is its non destructive nature.

The ability to see inside a product without disassembly is invaluable not only in battery system testing but also in applications such as injection molding of plastics, metal casting, assembly analysis, and porosity evaluation. CT technology also enables the digitalization of products, allowing users to store information and reports indefinitely. This ensures that no data is lost and provides a long-term reference for quality control and product analysis.

The results of digitalization can be easily analyzed using software like ZEISS Inspect X-Ray, which offers the following capabilities:

- Comparison of the actual product with the nominal model
- Analysis of assemblies consisting of multiple components
- Cross-sectional analysis of assemblies
- Porosity analysis
- Dimensional and GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) analysis
- Cross-sectional analysis of the product

- Wall thickness analysis
- Preparation of a measurement report

2.2 ZEISS METROTOM 6 scout CT system

The ZEISS Metrotom 6 Scout (Figure 3) is a metrological and inspection CT device suitable for analyzing polymer, aluminum, and titanium products. It is equipped with a 3k resolution radiation detector, a rotating table with 5-axis movement capability, and a radiation source with a power of 50 W and a voltage of up to 225 kV.



Figure 3 ZEISS METROTOM 6 scout [1]

The system features a variable resolution range from 3 μm to 80 μm (Figure 4), depending on the distance between the scanned object and the radiation source. For the highest possible resolution, the scanned object must be positioned as close as possible to the source. Conversely, when scanning larger products, the object should be positioned closer to the radiation detector. The system's maximum measuring volume is Φ240 mm x 400 mm.

The control of the system is fully integrated into ZEISS Inspect X-Ray, meaning it is possible to both control the CT and analyze the results within a single software.

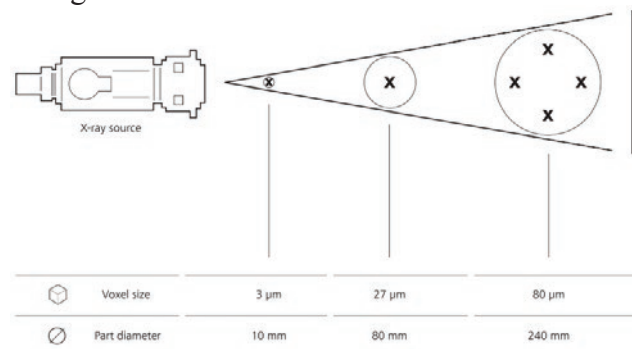


Figure 4 Variable resolution of METROTOM 6 Scout [1]

3. INSPECTION OF BATTERY SYSTEMS USING CT TECHNOLOGY

Computed Tomography (CT) technology has emerged as a transformative tool in the inspection and analysis of battery systems, offering unparalleled insights into their internal structures.

This non-destructive imaging method provides high-resolution, three-dimensional (3D) visualizations, enabling detailed examination of battery components at micrometer levels.

By revealing defects, damages, and design flaws that could compromise performance and safety, CT scans have become indispensable across various stages of battery development, manufacturing, and failure analysis.

This section explores the application of CT technology in the visual inspection of single cells and modules, followed by a detailed discussion of defect analysis with industry-relevant examples.

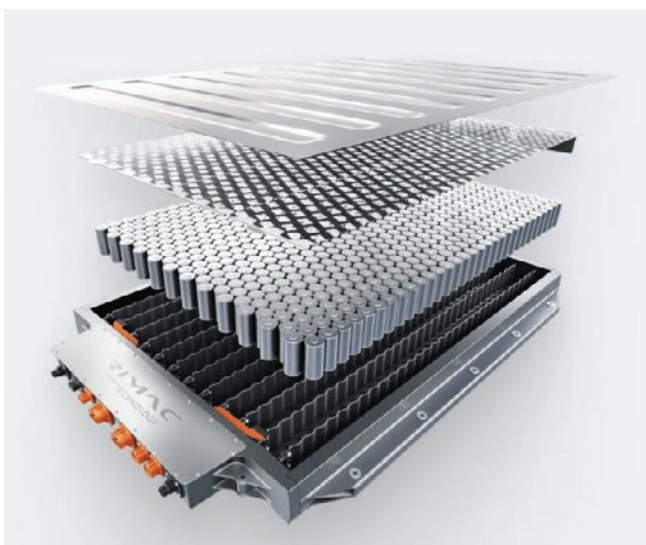


Figure 5 Cell-to-pack technology sample from Rimac Technology [2]

3.1 Visual Inspection of Single Cells

The inspection of individual battery cells using CT technology offers a comprehensive view of their internal architecture without compromising their integrity.

This non-destructive approach is particularly valuable for lithium-ion cells, which are prone to internal issues such as short circuits, separator failures, or electrode misalignments—conditions that can precipitate hazardous outcomes like thermal runaway or fires.

CT scans deliver high-resolution 3D images that allow engineers to analyse the cell's internal structure with precision, identifying anomalies that might otherwise remain undetected.

The advantages of CT scanning in single-cell inspection are various.

For safety assurance, it enables the detection of critical flaws, such as electrode misalignments or separator breaches, which could lead to internal shorts and subsequent thermal events.

In quality control during manufacturing, CT scans identify defects like uneven material distribution or foreign material contamination, ensuring that only cells meeting strict standards proceed to assembly.

Additionally, in research and development (R&D), this technology facilitates the evaluation of novel materials and designs by providing detailed insights into their behaviour under various conditions. For instance, CT scans are widely employed across the industry to assess the integrity of electrode stacks and current collectors, such as tabs, in cylindrical, prismatic, and pouch cells, ensuring optimal performance and longevity.

3.2 Visual Inspection of Modules

At the module level, CT technology extends its utility to the inspection of interconnected cells and associated components within a battery pack. Modules, which integrate multiple cells via welds, tabs, busbars, and other connectors, require robust structural integrity to function reliably.

CT scans provide a detailed examination of these interconnections, revealing potential weaknesses that could affect electrical performance or thermal management. Moreover, this method allows for the assessment of thermal interfaces, connectors, and other pack-level components, ensuring they withstand operational stresses.

The benefits of CT scanning for modules mirror those at the cell level, with added emphasis on system-level reliability.

For safety assurance, it identifies issues such as weld imperfections or tab misalignments that could lead to electrical faults or overheating. In quality control, CT scans detect manufacturing inconsistencies, such as poor contact between cells and busbars, which could degrade module performance.

In R&D, the technology supports the optimization of module designs by evaluating the impact of new interconnection methods or materials. A common industry practice involves using CT scans to inspect the welds between cells and busbars in electric vehicle (EV) battery packs, ensuring durability and resistance to vibration and thermal cycling.

3.3 Defect Analysis

CT technology plays a pivotal role in defect analysis, enabling precise identification of failure mechanisms in battery systems. By examining the internal structure of failed cells or modules, engineers can pinpoint the root causes of issues such as swelling, leaks, or capacity loss.

Below, two specific examples illustrate how CT scans have been instrumental in diagnosing defects at the cell and module levels, reflecting practical applications in industry settings.

Example 1: Tab Bending at the Cell Level

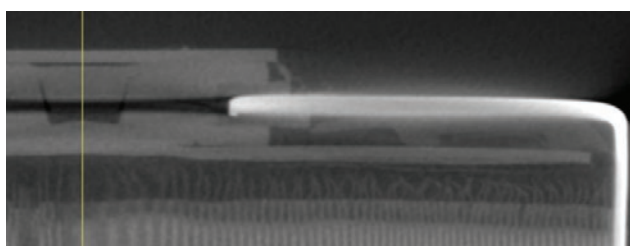


Figure 6 Tab-bending example

One prevalent defect observed during cell cycling is "tab bending," a phenomenon driven by volumetric changes in the electrodes. As a cell undergoes charge-discharge cycles, the electrode materials expand and contract, increasing in volume.

In designs with insufficient free space to accommodate this swelling—often referred to as jelly roll expansion—the tabs, typically thin layers

of soft aluminium, experience mechanical stress and deform.

This bending can compromise the cell's integrity, potentially piercing the separator and causing an internal short circuit when the positive and negative electrodes come into contact.

Such shorts result in a measurable voltage drop, constituting a field failure. In severe cases, this could theoretically escalate to a temperature increase and thermal event, though such outcomes have not been observed in our specific instances.

CT scanning has proven invaluable in this context, allowing us to visualize the extent of tab deformation and confirm the design flaw, thereby guiding subsequent improvements to cell architecture.

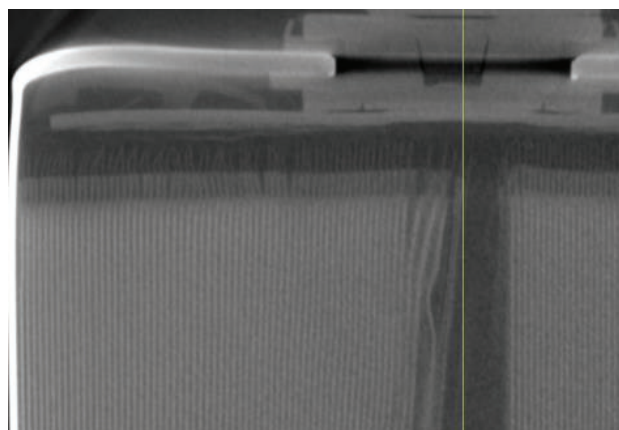


Figure 7 Electrode misalignment

Example 2: Cell Bulging During Thermal Events

Another critical defect analysed using CT technology is "cell bulging," which occurs during a thermal event when significant internal pressure builds up within the cell.

This pressure causes the cell's top terminal to deform outward, a phenomenon measured to determine the maximum or worst-case scenario. Understanding the extent of this bulging is essential for designing battery systems with sufficient clearance or structural accommodations to prevent secondary short circuits.

Such shorts could arise if the bulging terminal contacts conductive components, such as a busbar, within the module.

CT scans have enabled us to quantify the degree of deformation and assess its implications, providing critical data to refine system designs and

enhance safety by mitigating the risk of unintended electrical connections.

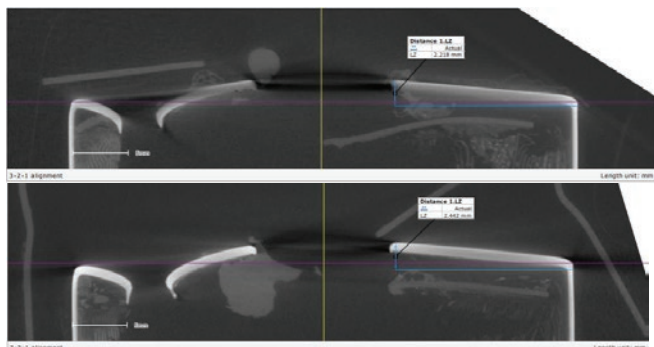


Figure 8 Cell bulging examples

Example 3: Two-Cell Testing at the Module Level

In module-level analysis, CT scans have been employed to evaluate the performance of a two-cell configuration connected by a busbar, which serves as a fuse during destructive testing. The objective of this "2-cell testing" is to ensure that the fuse reacts appropriately to protect the neighbouring cell from entering a thermal event under abuse conditions.

Specifically, CT imaging is used to assess whether the fuse has activated correctly and to inspect the insulation for damage. Maintaining intact insulation is critical to prevent contact between conductive components, which could lead to electrical faults.

Traditional evaluation methods during abuse testing often fail to provide clear insights into these internal dynamics, making CT scans an essential tool.

Our application of CT technology in this scenario has confirmed the fuse's safe reaction and identified instances where insulation integrity was preserved, informing design refinements for enhanced module safety.

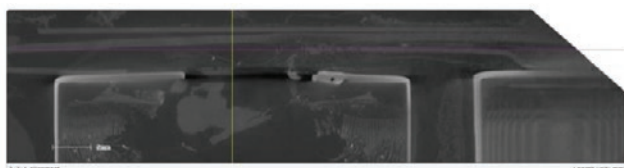


Figure 9 Two-cell testing

3.4 Rimac Technology: Driving the Future of Electric Innovation

Rimac Technology is a Croatian technology company at the forefront of electric mobility, specializing in high-performance electric vehicle (EV) components and systems.

A spin-off of Rimac Automobili, the company has grown into a global leader in EV technology, supplying some of the world's most renowned automotive brands.

What They Do?

Rimac Technology designs, develops, and produces key electric vehicle systems, including:

- High-performance battery systems
- Electric drive units (motors + inverters)
- Vehicle control units and software
- Connectivity and telemetry platforms

These components are developed entirely in-house, offering complete vertical integration—from concept to series production. The company focuses on modular, scalable solutions that can be customized for both hypercars and mass-production EVs.

Vision

With a strong focus on sustainability, innovation, and cutting-edge performance, Rimac Technology aims to be the go-to supplier for advanced EV systems.

Their long-term vision includes not only electrifying performance vehicles but also enabling large-scale electrification for mainstream manufacturers.

4 INDUSTRIAL CT METROLOGY

As mentioned in section 2.1, CT technology allows for a complete quality control of the product. Below, more detailed explanations of the mentioned functions can be found.

4.1 Dimensional analysis

CT scanning provides excellent accuracy and repeatability of results, completely eliminating the need for surface preparation, and offers the ability to measure dimensions that are invisible to the naked eye, making it an ideal technology for dimensional analysis of assemblies.

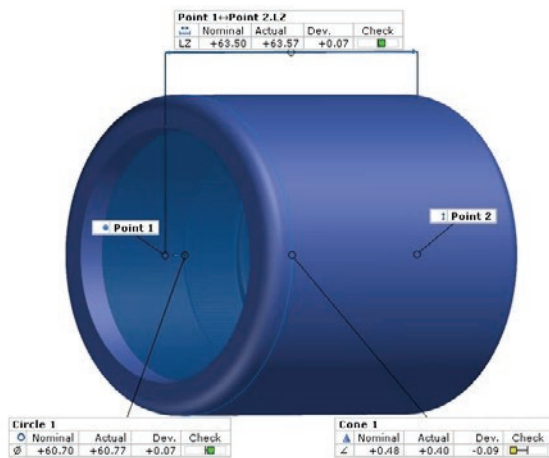


Figure 10 Dimensional analysis of a plastic part

4.2 Defect analysis

Material inhomogeneity significantly negatively affects the mechanical properties of the material, and cracks, inclusions of other materials, and similar irregularities can lead to assembly failure.

4.2.1 Visual inspection

Visual inspection is among the faster methods for analyzing defects. Based on variations in the gray values of pixels, it is possible to determine whether air bubbles, inclusions of higher density materials or cracks are present inside the product.

This process is similar to the conventional method for testing the porosity of plastic products,

as the sample is virtually sectioned, and the quality inspector examines the cross-sections to determine whether the sample meets the required standards. (Figure 11)

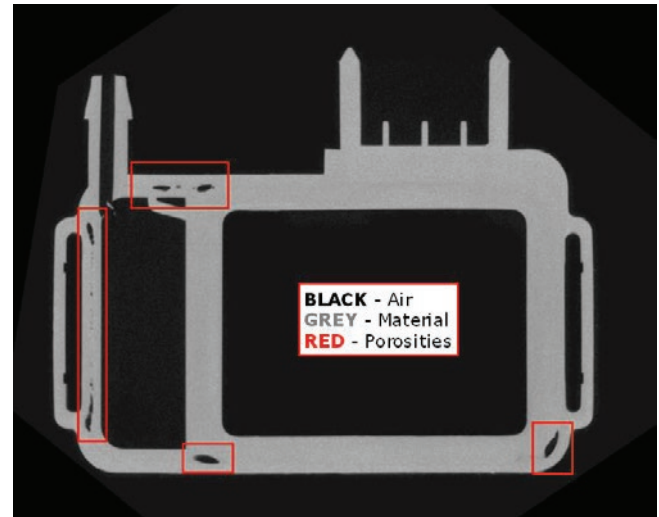


Figure 11 Visual inspection of porosities

This type of analysis is also useful for verifying whether all necessary components are present within an assembly. (Figure 12)

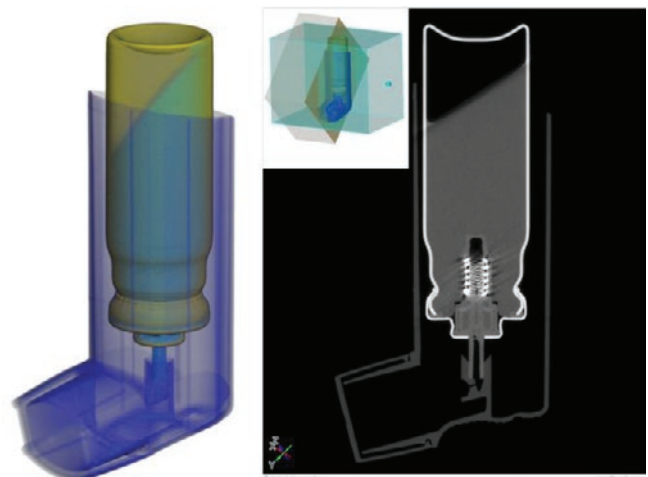


Figure 12 Assembly analysis

4.2.2 Porosity analysis according to P203

Porosity analysis according to P203 using ZEISS Inspect X-Ray allows for quantitative analysis of internal voids, air pockets, or other material inconsistencies within a product that may affect its integrity and performance.

P203 is a standard related to quality control in materials and their structures, particularly

concerning the volume, shape and location of porosities.

This advanced porosity analysis ensures that any defects that could compromise the structural integrity or functionality of a product are detected early, allowing manufacturers to address issues before final production or use. It provides a reliable and non-destructive method for quality control in industries where material integrity is critical, such as aerospace, automotive, and manufacturing.

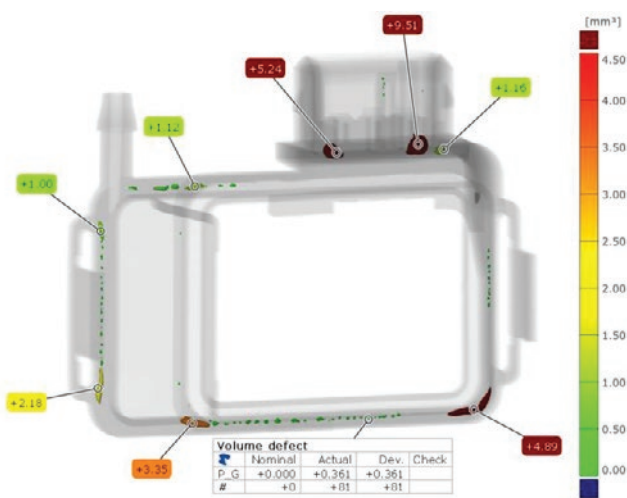


Figure 13 Global porosity, defect count & defect volume according to P203

4.3 GD&T analysis

Given the fact that CT technology enables the digitalization of the complete geometry of a product, it is possible to perform GD&T analysis even on surfaces that are not visible to the naked eye.

In the ZEISS Inspect software package, it is possible to evaluate geometric tolerances in accordance with international standards ISO 1101 and ASME Y14.5M, such as flatness or roundness (Figure 13).

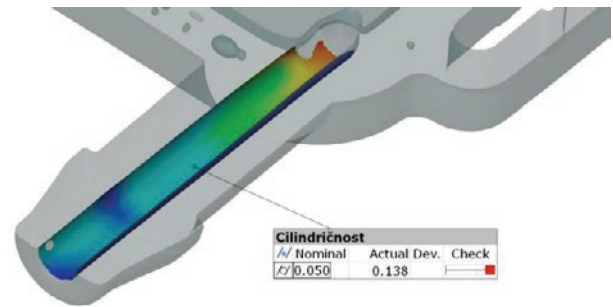


Figure 14 Cylindricity check [3]

5 CONCLUSION

Computed Tomography (CT) digitalization has become indispensable in battery technology by detecting defects, structural damages, and design flaws that could compromise performance and safety.

Its non-destructive, high-resolution imaging capabilities are critical across all phases of battery development, manufacturing, failure analysis, and on module-level.

- **R&D:** CT technology evaluates new interconnection methods and materials, enabling data-driven improvements in module design.
- **Production Quality Control:** It identifies manufacturing defects such as uneven material distribution or foreign contaminants, ensuring only cells adhering to stringent quality standards advance to assembly.
- **Safety Assurance:** CT scans detect critical risks like weld voids or electrode tab misalignments that could trigger electrical faults, thermal runaway, or catastrophic failures.

Because of complete 3D digitalization of product, one digital twin can be used for visual inspection and comprehensive measurement tasks.

Sources:

- [1] www.topomatika.hr, 28.4.2025.
- [2] <https://www.rimac-technology.com/battery>, 20.4.2025.
- [3] L. Kurtalj, J. Kos, N. Drvar, T. Hercigonja: CT SKENIRANJE ZA MJERENJE I ANALIZU DEFEKATA PLASTIČNIH PROIZVODA, IRT Forum 2022

TOPOMATIKA

Več kot 20 let kontrole kakovosti

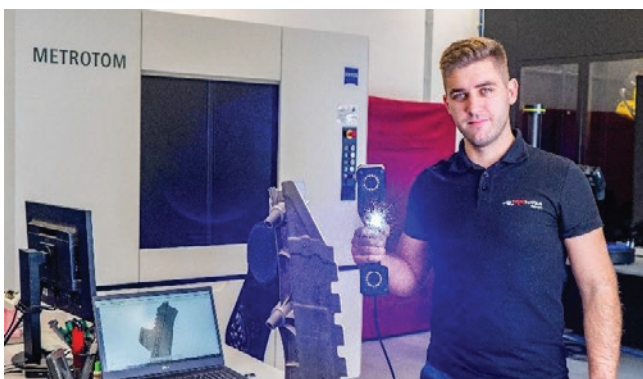
TOPOMATIKA d. o. o. ima več kot dvajset let izkušenj v industrijskem meroslovju, merilno tehnologijo in profesionalno ekspertizo za nudenje rezultatov visoke kakovosti, ki so vam potrebni za odločanje tistega trenutka, ko vam je to potrebno.

Z optičnimi merjenji smo začeli davnega leta 2002, tako da lahko potrdimo, da optična merjenja funkcionirajo, ker se s tem ukvarjamo že več kot dvajset let!

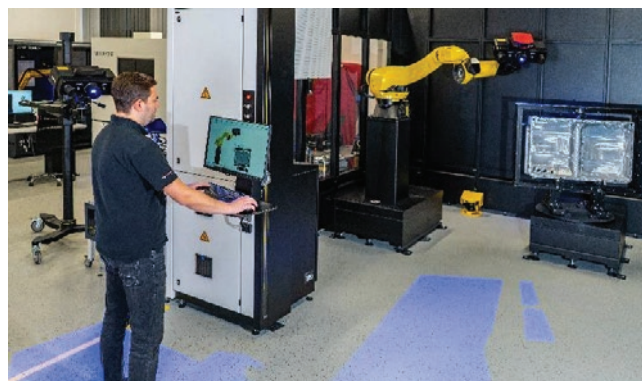
V tem času smo dejavnost razširili z opremo, ki ob kontroli zunanje oblike omogoča kontrolo materiala in obnašanja vaših proizvodov med eksploatacijo. Poglejte slike iz TOPOMATIKA laboratorija.



Strokovnjak za računalniško tomografijo podjetja TOPOMATIKA Luka Kurtalj, mag. meh. inž., ob CT napravi ZEISS METROTOM 6 scout



Strokovnjak za prenosni laserski 3D-skener podjetja TOPOMATIKA Maximilian Hercigonja s ZEISS T-SCAN hawk 2



Strokovnjak za robotizirane 3D optične meritve podjetja TOPOMATIKA Josip Kos, mag. meh. inž., med upravljanjem močnega robotiziranega sistema ZEISS ATOS ScanBox serije 5



Strokovnjak podjetja TOPOMATIKA Tomislav Petrić posnet med preverjanjem točnosti merilnega sistema s pomočjo standardiziranega artefakta



Strokovnjak za področje meroslovnih izobraževanj podjetja TOPOMATIKA Marko Horvat mag. meh. inž., od AUKOM i ZEISS IINSPECT izobraževanju

Vabljeni v TOPOMATIKA laboratorij.

AVTOMATIZACIJA PREDNASTAVITVENIH IN MEDPROCESNIH MERITEV

Gregor TRESKA¹, Tim HERBERTSON²

¹Trecon d.o.o.

²EROWA AG

IZVLEČEK

Avtomatizacija prednastavitvenih in medprocesnih meritev v CNC-proizvodnji omogoča bistveno višjo natančnost, krajši čas nastavitvev, zmanjšanje človeških napak ter sprotno zaznavo odstopanj med obdelavo, kar vodi do manj izmeta in višje kakovosti izdelkov. S tem se poveča učinkovitost in prilagodljivost proizvodnje, omogoča brezosebno obratovanje in uvaja sledljivost podatkov. Različna proizvodna okolja – orodjarne, podizvajalske delavnice, serijska proizvodnja in strojogradnja – lahko avtomatizacijo meritev uporabijo glede na svoje potrebe, kar jim omogoča boljši nadzor nad kakovostjo in večjo konkurenčnost. Uvedba takšnih rešitev hkrati spodbuja razvoj novih kompetenc, kot so digitalna metrologija, analiza podatkov in upravljanje pametnih proizvodnih celic, ter pomeni korak proti pametni tovarni prihodnosti.

1 UVOD

V sodobni proizvodnji z uporabo CNC strojev postaja avtomatizacija meritev ključni element za doseganje visoke natančnosti, zanesljivosti in učinkovitosti. V članku bomo obravnavali prednosti prednastavitvenih meritev (priprava orodij, elektrod in obdelovancev pred obdelavo) in medprocesnih meritev (nadzor dimenzij med samim obdelovalnim procesom). obravnavali bomo kako ti postopki prispevajo k boljšemu delovanju proizvodnje in kako se jih lahko implementira v različnih proizvodnih okoljih.

2 KLJUČNE PREDNOSTI AVTOMATSKIH MERITEV

V primerjavi s sekvenčnimi ročnimi meritvami odlikujejo avtomatizirane meritve predvsem naslednje prednosti:

- **Povečana natančnost:** Avtomatske merilne naprave zagotavljajo mikrometrsko točnost ter ponovljivost meritev, kar močno zmanjša odstopanja pri obdelavi.
- **Prihranek časa:** Zunanji prednastavitveni postopki prihranijo čas na stroju. Namesto da bi CNC-stroj izvajal meritev orodij, lahko takoj začne z obdelavo. Prav tako se z medprocesnimi meritvami omogoči neprekinjeno obdelovanje brez čakanja na ročni pregled.

– Zmanjšanje človeških napak:

Digitalno preneseni podatki zmanjšajo možnost napačnih vnosov ali napačnega branja meritev. CNC-stroji lahko sami prilagodijo odstopanja brez posredovanja operaterja.

– Manj napak in zavrženih kosov:

Sproten nadzor kakovosti omogoča zaznavo napak med procesom, ne šele na koncu. To bistveno zmanjša količino izmeta.

– Sledljivost in analiza podatkov:

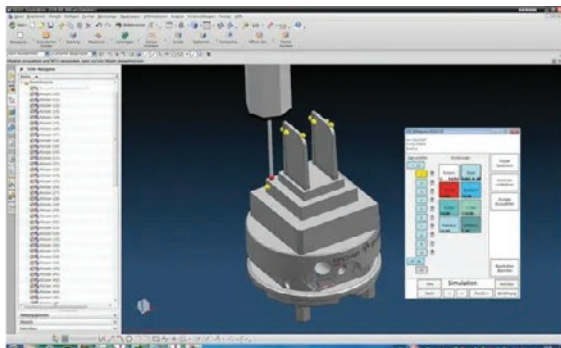
Samodejno beleženje podatkov omogoča napredno statistično analizo, sledenje kakovosti ter dokazovanje skladnosti izdelkov v zahtevnih panogah (npr. letalska, medicinska).

3 UČINKOVITOST IN FLEKSIBILNOST V PROIZVODNJI

Avtomatizacija meritev omogoča hitrejše menjave izdelkov in krajši čas nastavitvev. To je še posebej pomembno za podizvajalske delavnice in orodjarne, ki obdelujejo majhne serije ali unikatne izdelke. S pomočjo programske opreme, kot je **QMeasure**, lahko merilne točke generiramo neposredno iz CAD-modela, kar dodatno poveča prilagodljivost.

Poleg tega omogočajo integrirane avtomatizirane celice – ki vključujejo stroje, merilno napravo in robota – paralelno izvajanje

več operacij (npr. obdelava enega kosa, medtem ko se drug meri). S tem se poveča izkoristek strojev in zmanjša potreba po človeškem nadzoru.



Slika 1: Prikaz načrtovanja medprocesne meritve elektrode v programu CAD [3]

4 IZBOLJŠAN NADZOR KAKOVOSTI

Avtomatizirane meritve v realnem času omogočajo zaprt sistem vodenja kakovosti. CNC-stroj lahko po vsakem koraku samodejno preveri dimenzije in po potrebi prilagodi program.

Prav tako se s prednastavitvijo orodij zunaj stroja zagotovi, da so vneseni korektni podatki, brez potrebe po testnih obdelavah. V serijski proizvodnji pa se lahko uvede 100% avtomatska kontrola, kar izredno zmanjša možnost, da bi do montaže prišel neustrezen izdelek.

Vsi rezultati meritev se lahko samodejno zabeležijo, kar omogoča sledljivost in dolgoročno optimizacijo procesov s pomočjo analize trendov.

5 NOVE KOMPETENCE V PROIZVODNJI

Z implementacijo avtomatiziranih meritev se razvijajo nove ključne kompetence, ki bodo v naslednji letih igrale pobembno vlogo:

- integracija digitalne metrologije: povezovanje merilnih naprav s stroji in programskimi sistemi ter razumevanje kalibracije in merilne negotovosti,
- znanja s področja pametne tovarne (Industry 4.0): Upravljanje celic preko MES sistemov (npr. EROWA JMS 4.0) in sposobnost razumevanja medsebojnega delovanja naprav,
- programiranje merilnih postopkov in avtomatizacije: Znanje programiranja CMM strojev, uporabe robotskih krmilnikov in izdelave CNC makrov za meritve,

- analiza podatkov in izboljšava procesov: Uporaba rezultatov meritev za statistično kontrolo in prediktivno vzdrževanje,
- meddisciplinarno sodelovanje: Povezovanje znanj med obdelovalci, kontrolorji kakovosti in avtomatiki.

6 UPORABA V RAZLIČNIH PROIZVODNIH PANOGAH

Spodnja tabela prikazuje, kako lahko različne proizvodne panoge uporabijo avtomatizirane meritve sebi v prid.

PANOGA	UPORABA AVTOMAT. MERITEV	GLAVNE KORISTI
Orodjarne	Avtomatska meritve orodij, elektrod, meritev med postopki EDM	Natančnost pri izdelavi kalupov, manj ročnega prilagajanja, možnost brezosebne nočne obdelave
Strojegradnja	Vgrajene meritve za poravnavo in preverjanje komponent	Višja kakovost sestave strojev, manj popravkov in skrajšan čas montaže
Serijska proizvodnja	100% avtomatska kontrola, spremljanje orodij, zamenjave	Nižja stopnja izmeta, zanesljivost pri velikih količinah
Podizvajalske delavnice	Prilagodljive celice, hitre menjave izdelkov, RFID sledenje	Večja agilnost, podpora manjšim serijam z visoko točnostjo

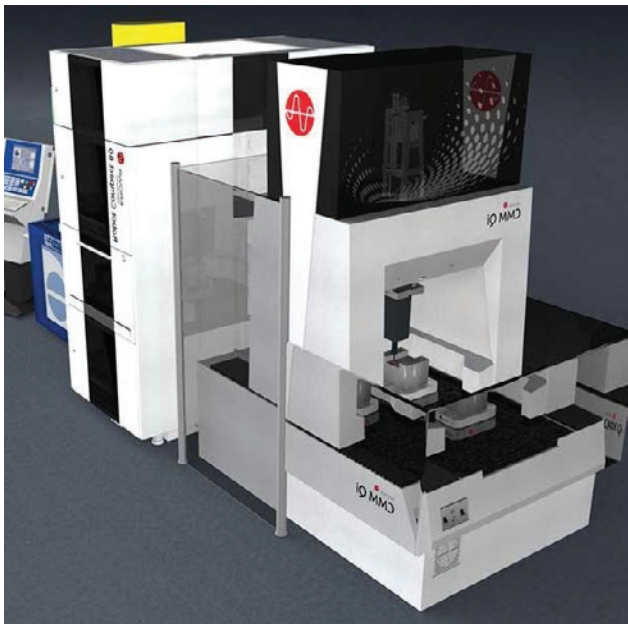
Slika 2: Prikaz prednosti po dejavnostih

7 KONCEPTUALNA IMPLEMENTACIJA IN PRIMER IZ PRAKSE

Če si zamislimo popolnoma avtomatizirano CNC obdelovalno celico, jo lahko sestavljajo rezkalni stroj, stružnica, brusilni stroj in merilni stroj (CMM), vse skupaj oskrbuje robot na tirnici. Vsak stroj ima vgrajene sonde za medprocesno merjenje, ki omogočajo hitre kontrole med obdelavo. Osrednji sistem razporeja naloge: npr. surov odlitek gre najprej v rezkanje, nato ga robot prenese na CMM za vmesno meritev; če je ustrezen, gre naprej na struženje itd.

Sistem lahko kadar koli izvede meritve bodisi na stroju bodisi na CMM-u, da preveri ustreznost kosa. Orodna revija vsebuje že prednastavljena orodja – če se orodje obrabi, stroj sproži menjavo

in sistem že pozna geometrijo nadomestnega orodja, saj je bila vnaprej izmerjena. Vse korake beleži upravljalna programska oprema. Ta usklajen proces omogočajo med seboj povezana merilna oprema, roboti in programska logika.



Slika 3: robotska strega CMM Qi [2]

7.1 Odprtost in povezljivost

Pri izbiri avtomatizacijskih rešitev morajo proizvajalci upoštevati odprtost in združljivost sistemov. Veliko sodobnih rešitev podpira standardizirane, ki omogočajo komunikacijo med stroji in merilnimi napravami različnih proizvajalcev.

Cilj je ustvariti ekosistem, v katerem podatki tekoče prehajajo od presetterjev in sond do CNC krmilnikov in osrednje baze za razporejanje in nadzor kakovosti. Ob pravilni kombinaciji tehnologij lahko tudi manjša podjetja vzpostavijo avtomatizirano merilno zanko – pogosto se začne s presetiranjem orodij in sondiranjem na stroju, nato pa postopoma nadgradi do popolne robotsko podprte proizvodne celice.

7.2 Programsko upravljanje procesov in integracija

Temelj celotne avtomatizirane celice predstavlja krmilna programska oprema, ki usklajuje delovanje strojev, robotov in merilnih naprav. To je pogosto MES-sistem ali upravljalnik celic, specifičen za avtomatizacijsko rešitev. Primer takega sistema je EROWA JMS

4.0 (Job Management System), ki upravlja vse podatke in orkestrira proizvodnjo znotraj celice. JMS omogoča razporejanje del, usmerja robota, kateri kos kam naložiti, priključuje ustrezen CNC program, sproži merilni postopek in zabeleži rezultate.

Ključnega pomena je, da takšna programska oprema ponuja uporabniški vmesnik za operaterje, ki omogoča razporejanje nalog, določanje prioritet in obravnavo opozoril. Integracijska programska oprema je povezana tudi z višjenivojskimi sistemi (npr. ERP, planiranje, CAD/CAM), kar omogoča povezavo med pisarno in proizvodnjo. Na primer, JMS lahko samodejno uvozi naročila in ustvari proizvodne naloge, modul QMeasure pa omogoča generiranje merilnih programov neposredno iz CAD podatkov.

V kontekstu avtomatiziranih meritev lahko nadzorni sistem na primer samodejno preusmeri kos na dodatno meritev, če rezultat pade na mejno vrednost, ali pa obvesti operaterja v primeru neuspešne kontrole kakovosti. V bistvu ta programska plast zapre krog med fizičnim izvajanjem in digitalnim odločanjem. Uporabniška kompetenca za delo s takšno programsko opremo je ključna za uspeh, saj gre za »možgane« avtomatizirane celice.

8 KORAKI ZA POSTOPNO IMPLEMENTACIJO AVTOMATIZIRANIH MERITEV

8.1 Analiza potreb in ciljev

- Določite, kaj želite avtomatizirati: prednastavitve orodij, obdelovancev, merjenje med procesom ali končna kontrola.
- Ugotovite kritične mere in točke, ki najbolj vplivajo na kakovost izdelka.
- Opredelite, ali želite zmanjšati čase nastavitvev, izboljšati kakovost, omogočiti brezosebno obratovanje ali vse naštetu.

8.2 Pregled obstoječih procesov

- Dokumentirajte obstoječe ročne merilne postopke.
- Ocenite časovne izgube in pogostost napak pri obstoječem načinu merjenja.

- Preverite obstoječo opremo: CNC-stroji, sonde, merilne naprave, MES sistemi – kaj že imate in kaj je potrebno nadgraditi.

8.3 Izbira primerne opreme in rešitev

- Za prednastavitve: izberite presetter za orodja (npr. ročni ali CNC) ali CMM napravo za obdelovance.
- Za medprocesne meritve: izberite nastrojne sonde, laserske merilnike ali senzorje za prelom orodja.
- Dodatno: robotski manipulatorji, celični upravljalni sistemi (npr. JMS), ter programska oprema za meritve (npr. QMeasure).

8.4 Načrtovanje integracije

- Določite, kateri stroji bodo povezani v avtomatiziran cikel (CNC, merilne naprave, roboti).
- Poskrbite za podatkovno povezljivost (npr. prenos offsetov iz presettera v CNC).
- Uskladite delovanje z obstoječim ERP/MES sistemom, če obstaja.

8.5 Pilotni projekt

- Začnite z manjšim obsegom – ena delovna celica ali en merilni proces.
- Nastavite avtomatske merilne rutine, programirajte merilne točke in testirajte komunikacijo med napravami.
- Preverite časovne prihranke in kakovost rezultatov.

8.6 Usposabljanje zaposlenih

- Operaterje naučite uporabe nove opreme (presetterjev, sond, robotov).
- Tehnologe in programerje usposobite za programiranje merilnih ciklov in uporabo merilne programske opreme.
- Kakovostniki naj se naučijo analize merilnih podatkov in razumevanja avtomatiziranih poročil.

8.7 Postopna razširitev sistema

- Ko je pilotni projekt uspešen, postopoma vključite več strojev, procesov ali delovnic.

- Uvedite standardizacijo merilnih strategij med različnimi timi in projekti.

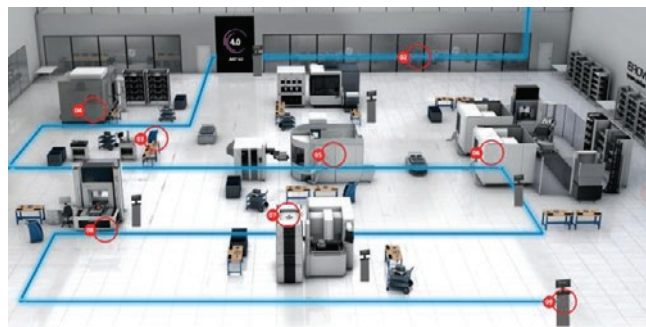
8.8 Spremljanje in optimizacija

- Redno spremljajte merilne rezultate in odzive sistema.
- Izvajajte statistično kontrolo procesov (SPC).
- Optimizirajte merilne rutine za hitrost in učinkovitost.
- Uvedite vzporedno vzdrževanje merilne opreme in kalibracije.

9 ZAKLJUČEK

Avtomatizacija meritev pomeni premik k bolj natančni, učinkoviti in inteligentni proizvodnji. Ne gre zgolj za vgradnjo nove opreme, temveč za celostno prenovo procesa z uporabo integrirane tehnologije in digitalizacije.

Podjetja s tem pridobijo večjo zanesljivost, zmanjšajo stroške, povečajo kapacitete in razvijejo novo generacijo kompetentnih operaterjev, ki prehajajo v vlogo upravljavcev celic. Tovrstne tehnologije niso več omejene na velike proizvajalce – danes so dostopne tudi manjšim obratom, ki želijo biti konkurenčni v zahtevnem globalnem trgu.



Slika 4: Prikaz delavnice z orkestriranim medprocesnimi meritvami. [3]

Viri:

- [1] SME Tech Paper, "Automation Redefines Tool Presetting," May 2021 – high-mix shop benefits ([Automation Redefines Tool Presetting](#))
- [2] EROWA AG, Product literature for and CMM Qi ([EROWA CMM Qi](#))
- [3] EROWA AG, JMS 4.0 & QMeasure brochure ([Controlled data flow | EROWA LTD](#))

OpenEOL: ODPRTA PLATFORMA ZA KONČNO KONTROLO PROIZVODNIH PROCESOV

**Janko SLAVIČ¹, Robert BOLČINA², Janez LUZGAR³, Domen GORJUP¹,
Klemen ZALETELJ¹, Tibor BARŠI PALMIČ¹, Andrej BIČEK³, Gregor VIDMAR³,
Luka JELOVČAN³, Matej ANKO³, Mark GLADEK³, Matej LEBAN², Sebastjan ZADEL²,
Matjaž LUKEŽIČ², Rok BENEDETIČ², Matjaž VOVK², Borut PELJHAN², Martin FURLAN²,
Boštjan GREGORIČ², Niki UŠAJ²**

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (LADISK)

²MAHLE Electric Drives Slovenija d.o.o.

³Domel d. o. o.

IZVLEČEK

OpenEOL je odprtokodna platforma, ki bazira na programskem jeziku Python, namenjena končni kontroli (EOL) izdelkov v proizvodnem procesu. Odlikujejo jo enostavna uporaba, prilagodljivost in integracija z industrijsko strojno opremo. Podpira analizo velikih podatkov in strojno učenje. Ključne lastnosti platforme so: odprtokodna integracija industrijske strojne opreme, napredne analitične metode, zmanjšana odvisnost od programske opreme zaprte kode, prilagodljivost in enostavno vzdrževanje.

OpenEOL je razvit v okviru projekta GREMO (Univerza v Ljubljani, Mahle, Domel) in je že v uporabi na proizvodnih linijah. Trenutno je zaseben, v načrtu pa je prehod na odprtokoden model razvoja do leta 2027. Platforma podpira standarde industrijske strojne opreme (PLC, DAQ, gonilniki CAN/Modbus itd.), kar omogoča natančno in zmogljivo kontrolo kakovosti. Oblikovan je z mislijo na industrijske implementacije in prilagojen zahtevam sodobne proizvodnje.

1 UVOD

OpenEOL je v programskem jeziku Python napisana platforma za končno kontrolo izdelkov. Paket ima ambicijo postati vodilna svetovna odprtokodna platforma za končno kontrolo izdelkov. To bo platforma dosegla z enostavno uporabo, odprto licenco in konceptom od inženirjev za inženirje. Platforma OpenEOL je pripravljena za analizo velikih podatkov ter za strojno učenje.

Nekateri poudarki paketa: povezovanje različne industrijske strojne opreme z orodji odprte kode, napredne analize, enostavnost uporabe in vzdrževanja, zmanjšanje odvisnosti od strojne in programske opreme zaprte kode, prilagodljivost, brezplačno za zasebno ali komercialno uporabo.

V okviru projekta GREMO so v razvoj paketa trenutno vključeni Fakulteta za strojništvo (UL), Mahle in Domel. Paket pokriva večino potreb trenutnih partnerjev in se že uporablja na več proizvodnih linijah. Paket se danes razvija v zaprtem repozitoriju, glede na načrt prehoda na

javni repozitorij pa bo platforma javno objavljena v letu 2027; do takrat pa se je (pod določenimi pogoji) projektu mogoče pridružiti v zaprtemu razvoju. Pred javno dostopnostjo, je pomembna naloga konzorcija zagotoviti mehanizme dolgoročne vzdržnosti platforme.

2 KOMPONENTE OPENEOL

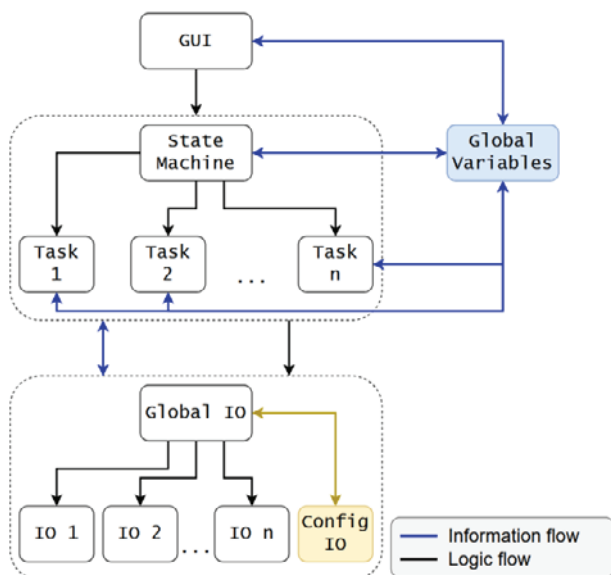
Za zagotovitev ustrezne razčlenitve in hkrati brezhibne integracije komponent projekta, komponente lahko komunicirajo, kot je prikazano na Sliki 1. Tok informacij je v večini primerov usmerjen skozi objekt Global Variables, izjema je interakcija med nalogami in IO objekti. Logični tok (klic funkcij) se v nekaterih primerih izvaja neposredno.

Kratek opis komponent, prikazanih na Sliki 1:

- **Tasks:** temeljne enote delovanja znotraj projekta OpenEOL. Povezujejo se tako s

strojno opremo kot z GUI. Vsaka naloga je sposobna delovati neodvisno, medtem ko dostopa do deljenih virov. Task zagotavlja obravnavo napak in beleženje ter omogoča varno izvajanje vzporednih niti v ročnih in avtomatskih načinih.

- **State Machine:** usklajevalna plast, ki poganja Taske, nadzoruje potek testa in se ustrezno odziva na predvidena in nepredvidena stanja Taskov. State Machine ima pregled in nadzor nad EOL napravo.
- **IO modul:** most med programsko in strojno opremo, ki standardizira komunikacijo z različnimi vrstami strojne opreme in baz podatkov.
- **Global IO:** osrednje vozlišče, ki združuje vse IO module in zagotavlja eno samo točko dostopa za interakcijo s strojno opremo.
- **Global Variables:** objekt, ki omogoča interakcijo med komponentami, preko njega si komponente delijo podatke. Njegove zmogljivosti vključujejo tudi sledenje podatkom specifičnih vzorcev in samodejno sprožitve posodobitve GUI.
- **Uporabniški vmesnik (GUI):** zagotavlja preprost, a zmogljiv način za definiranje kompleksnih uporabniških vmesnikov.

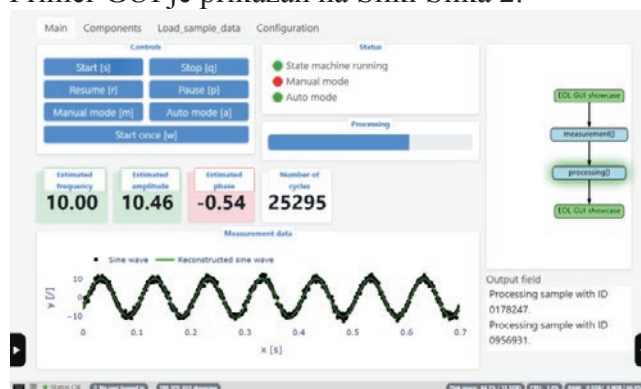


Slika 1: Tok informacij in komponente OpenEOL

2.1 Uporabniški vmesnik

Uporabnik večinoma komunicira z EOL napravo prek uporabniškega vmesnika.

Uporabniški vmesnik ponuja komponente, kot so gumbi, potrditvena polja, različni grafi, vnosna polja, izbirni dialogi, drsniki, indikator stanja (progress bar), tabele in druge. Poleg osnovnih komponent, uporabniški vmesnik omogoča spremembo jezika, upravljanje uporabnikov in njihovih pravic za dostop, predpripravljene poglede za nadzor Task-ov in IO povezav, avtomatsko generiran diagram trenutnega stanja State Machine-a in druge napredne možnosti. Primer GUI je prikazan na Sliki Slika 2.



Slika 2: Primer OpenEOL grafičnega vmesnika

2.2 State Machine

Razred *StateMachine* je zasnovan kot plast, ki ima nadzor nad osnovno funkcionalnostjo nalog (*Task*) in omogoča kompleksne delovne tokove s sekvenčnim in paralelnim izvajanjem nalog, celovitim upravljanjem izvajanja in podporo različnim načinom delovanja. *StateMachine* je ključen element za upravljanje zaporedja nalog v aplikaciji. Ključne značilnosti razreda so:

- Sekvenčno in vzporedno izvajanje: Omogoča izvajanje nalog v zaporedju ali vzporedno, kar podpira kompleksne delovne tokove nalog.
- *Watchdog* naloge: *StateMachine* podpira naloge, ki so konfigurirane za neprekinjeno spremljanje sistema ali procesov in niso podvržene običajnim ukazom za nadzor stanja (*start*, *stop*, *pause*, *resume*).
- Upravljanje vrstnega reda izvajanja: Zagotavlja, da se naloge izvajajo v vnaprej določenem vrstnem redu, ki ga je mogoče po potrebi ponavljati v zanki.
- Načini izvajanja: Omogoča ročne in avtomatske načine delovanja. Pri ročnem

načinu je za prehod med nalogami potrebno podajanje eksplicitnih ukazov, medtem ko avtomatski način naloge izvaja neprekinjeno, dokler ni podan ukaz za zaustavitev.

- Dostop do globalnih spremenljivk (*GlobalVariables*) in IO objektov: Zagotavlja, da vse naloge znotraj *StateMachine*-a dostopajo do globalnih vhodno-izhodnih podatkov in spremenljivk, kar omogoča deljenje stanj in IO operacij med nalogami.
- Interaktivni način: Ponuja terminal za neposredno interakcijo s strojem stanj med delovanjem, kar olajša ugotavljanje napak in ročni nadzor.
- Samostojno delovanje: Lahko deluje neodvisno od grafičnega uporabniškega vmesnika, kar omogoča prilagodljivost za različne načine uporabe.

Ker *StateMachine* podeduje vse lastnosti razreda *Task*, so tudi ukazi za nadzor enaki, z nekaj dodatnimi funkcionalnostmi:

- *start*: Začne izvajanje. Podaja možnost zagona v novi niti (*thread*) in možnost delovanja v zanki.
- *stop*: Ustavi izvajanje. Uskladi ustavljanje posameznih *Task* objektov in IO povezav.
- *pause*: Začasno prekine delovanje. Uporablja se lahko za ustavitev na določenih točkah v poteku izvajanja.
- *resume*: Nadaljuje delovanje nalog po premoru.
- *skip*: Izpusti določeno nalogo iz izvajanja.

2.3 Vhodni in izhodni moduli (IO)

IO objekti se uporabljajo za komunikacijo med programom OpenEOL in strojno opremo. Osnovna funkcionalnost kateregakoli IO objekta je določena z razredom *IOBase*. S podrazredi razreda *IOBase* je mogoče podpreti poljuben komunikacijski protokol (npr. CAN, OPC UA, serijski, VISA).

Osnovne značilnosti IO modulov:

- Konfiguracija: Preko metode *configure*, ki omogoča inicializacijo s prilagojenimi parametri.
- Upravljanje povezav: Metodi *connect* in *disconnect* za upravljanje povezav z IO napravami.
- Obdelava podatkov: Abstraktne metode *read*, *write*, *acquire* in *generate* za komunikacijo z IO napravami in obdelavo podatkov.
- Beleženje dogodkov: Uporablja vgrajen *logger* za beleženje dogodkov in napak.
- Upravljanje stanja: Preverjanje in spreminjanje stanja preko metode *check_state* in povezanih lastnosti.
- *Watchdog*: Izbirni proces v ozadju, ki spremlja stanje IO procesa.
- Sočasnost: Podpora za sočasno izvajanje IO metod, če je omogočena, z uporabo razreda *ThreadPoolExecutor*.
- Varnost niti: Zagotavljanje varnega delovanja med nitmi z uporabo *dekoratorjev* metod.

Nabor trenutno podprtih IO modulov prikazuje Slika 3.

National Instruments
Serial
OPC
Modbus
Database IO API
Simulator
Snap 7
Socket
Visa
CAN
ADS

Slika 3: Nabor podprtih IO modulov

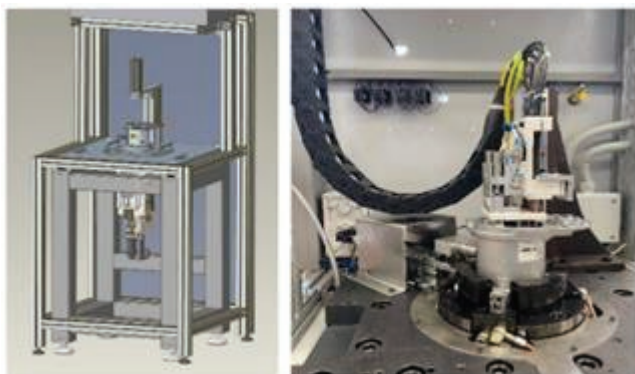
3 INDUSTRIJSKE IMPLEMENTACIJE

Platforma OpenEOL trenutno podpira dve implementaciji v slovenski proizvodni industriji.

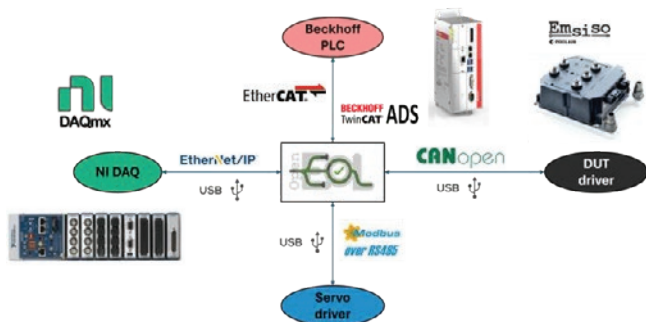
Implementacija Mahle 1 (

Slika 4) je avtomatizirana naprava za kontrolo električnih veličin na koncu proizvodne linije elektromotorjev v podjetju Mahle.

Slika 5 prikazuje IO shemo naprave Mahle 1, ki vključuje PLC - Beckhoff, DAQ - National Instruments, periferne naprave - CAN in Modbus.



Slika 4: Prototipna naprava Mahle 1

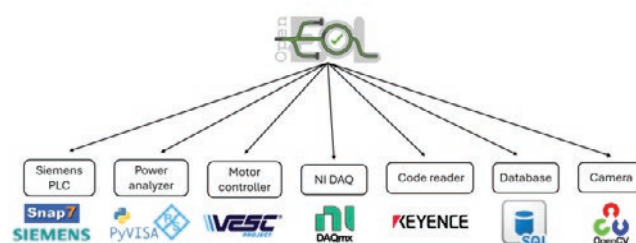


Slika 5: IO shema implementacije Mahle 1

Implementacija Domel 1 (Slika 6) je polavtomatska naprava za kontrolo strukturne celovitosti, električnih veličin in mehanskih vibracij elektromotorjev na koncu proizvodnega procesa. Shema IO naprav je prikazana na Sliki Slika 7. Poleg komunikacije s PLC (Snap7) med drugim vključuje NI merilno opremo, laboratorijsko merilno opremo (VISA), komunikacijo s SQL podatkovno bazo ter kontrolo na osnovi računalniškega vida in metod strojnega učenja (OpenCV, pyTorch).



Slika 6: Prototipna naprava Domel 1



Slika 7: IO shema implementacije Domel 1

4 ZAKLJČKI

Projekt OpenEOL predstavlja pomemben korak k vzpostavitvi odprte, modularne in trajnostne platforme za izvajanje EOL-procesov v industrijskem okolju. V tem prispevku smo predstavili osnovne koncepte in arhitekturo sistema, ki se je že izkazal z delujočima industrijskima implementacijama. Projekt napreduje z jasnim ciljem, da do leta 2027 postane javno dostopna platforma z odprto kodo, široko dokumentacijo in možnostjo profesionalne podpore. Tak pristop bo omogočal pregledno in sodelovalno razvijanje sistema, ki bo dolgoročno služil kot temelj za prilagodljive in učinkovite EOL-rešitve tako v slovenski industriji kot tudi širše.

AGILNO UVAJANJE ZAPOSLENIH V KOMPLEKSNIH PROIZVODNIH SISTEMIH S POMOČJO DIGITALNEGA USPOSABLJANJA

Žiga GOSAR¹, Marina PANOSKA¹, Klemen BABUDER², Matija ZUPANČIČ²

¹ELVEZ, d.o.o.

²Art Rebel 9, d. o. o.

IZVLEČEK

Projekt ONBOARD-AI se osredotoča na razvoj agilnega, digitaliziranega procesa uvajanja novih zaposlenih v kompleksne proizvodne sisteme. Uporablja napredne tehnologije, kot so interakcija človek-stroj (HMI) in konverzijska umetna inteligenca (AI), da bi skrajšal čas usposabljanja, izboljšal pridobivanje spretnosti in povečal produktivnost. Razvit bo interaktivni digitalni učni sistem, ki vključuje vizualne predstavitve, video vodiče in igre za simulacijo delovnih nalog. Poleg tega bo AI v realnem času analizirala uspešnost uporabnikov in prilagajala vsebine. Cilj projekta je zmanjšati povprečni čas uvajanja za 30 %, povečati usposobljenost zaposlenih ter izboljšati uporabniško izkušnjo usposabljanja. Projekt se izvaja v podjetju ELVEZ, ki deluje na področju predelave plastike in proizvodnje kabelskih snopov v sodelovanju s podjetjem Art Rebel 9..

1 UVOD

Industrijsko okolje se vse hitreje digitalizira, podjetja pa se soočajo z izzivom neučinkovitega uvajanja (onboardinga) novih zaposlenih v kompleksnih proizvodnih okoljih. Tradicionalni postopki uvajanja so pogosto dolgotrajni, neprilagojeni posamezniku in močno odvisni od razpoložljivosti izkušenih mentorjev. Poleg tega novi zaposleni pogosto vstopajo v dinamične delovne pogoje, kjer se zahteve, orodja in postopki hitro spreminjajo.

Projekt ONBOARDING-AI, ki ga izvajamo v sodelovanju med industrijo in raziskovalnimi institucijami, odgovarja na ta izziv z razvojem umetno-inteligenčnega sistema za prilagojeno, kontekstualno in interaktivno podporo uvajanju novih zaposlenih v proizvodnjo.

2 PREDSTAVITEV PROBLEMA NA PRIMERU IZ PRAKSE

Projekt ONBOARDING-AI je bil preizkušen v podjetju s serijsko proizvodnjo mehanskih komponent, kjer novozaposleni delavci pogosto potrebujejo več tednov, da samostojno in kakovostno obvladajo ključne delovne naloge.

Glavni izzivi so bili:

- Dolgi časi uvajanja (več kot 4 tedne),
- Nizka ponovljivost znanja med različnimi mentorji,
- Visok kognitivni napor novincev pri učenju postopkov in orientaciji v prostoru,
- Omejena razpoložljivost mentorjev zaradi kadrovskih obremenitev.

Ti izzivi so vodili v povečano število napak, slabšo produktivnost v začetni fazi in večjo fluktuacijo zaposlenih.

3 PREDSTAVITEV METODE DELA

Uporabljeni metodi: prepoznavanje govora in sinteza govora v projektu ONBOARDING-AI. V okviru projekta, ki ga izvajamo kot del evropske pobude WASABI, so ključni gradniki digitalnega inteligentnega asistenta (DIA) tudi tehnologije za pretvorbo govora v besedilo (speech-to-text, STT) in besedila v govor (text-to-speech, TTS). Te omogočajo naravno glasovno interakcijo med človekom in strojem, kar je še posebej pomembno v proizvodnem okolju, kjer ročna interakcija z digitalnimi vmesniki pogosto ni optimalna.

3.1 Pretvorba govora v besedilo oz. »Speech-to-Text« (STT)

STT tehnologija omogoča pretvorbo govorjenega jezika v digitalno besedilo. V okviru ONBOARDING-AI projekta se uporablja odprtokodna platforma OpenVoiceOS (OVOS), ki vključuje podporo za različne STT motorje (npr. Vosk, DeepSpeech). Sistem je zasnovan tako, da omogoča lokalno ali oblačno obdelavo, s čimer zagotavlja večjo prilagodljivost glede na zahteve eksperimenta ali podjetja.



Slika 1: Delovno načelo digitalnega asistenta za industrijo [1]

V projektu ONBOARDING-AI se STT uporablja za zajem glasovnih ukazov operaterjev strojev ali delavcev v proizvodnji. Prepoznana besedila se nato uporabljajo za sprožanje specifičnih funkcij ali kot vnos za nadaljnjo obdelavo znotraj digitalnega asistenta.

3.2 Pretvorba besedila v govor oz. »Text-to-Speech« (TTS)

Nasprotno STT-ju, TTS tehnologija omogoča, da digitalni asistent odgovarja uporabniku v obliki govorjenega jezika. OVOS uporablja različne TTS rešitve (npr. Mimic3), ki podpirajo več jezikov in različne glasove. V projektu ONBOARDING-AI je ta komponenta posebej pomembna za sprotno podajanje navodil, opozoril ali potrditve ukazov. TTS tako bistveno pripomore k ustvarjanju bolj naravne in intuitivne uporabniške izkušnje, saj omogoča takojšnjo in razumljivo povratno informacijo uporabniku, tudi v okoljih, kjer je vizualni prikaz omejen ali nepregleden.

3.3 Integracija z ostalimi komponentami

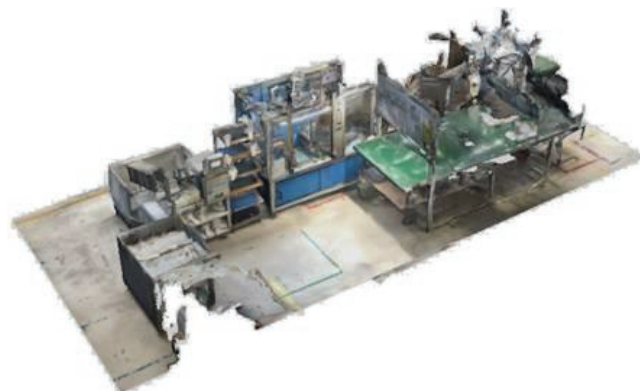
Tako STT kot TTS sta v okviru projekta integrirana preko OVOS asistentov, ki delujejo

znotraj Docker Compose okolja. Uporabniški vmesnik (npr. COALA aplikacija na Android napravi) omogoča prikaz dialogov, medtem ko zaledni sistemi (Hivemind, Keycloak) skrbijo za povezljivost, avtentikacijo in usmerjanje sporočil.

S tem pristopom se v projektu ONBOARDING-AI zagotavlja robusten, prilagodljiv in odprtokoden sistem za glasovno interakcijo, ki je primeren tudi za zahteva okolja, kot je proizvodnja.

4 DIGITALNA PRIPRAVA DELOVNEGA MESTA ZA VR USPOSABLJANJE

Za potrebe razvoja učinkovitega sistema usposabljanja z uporabo virtualne resničnosti (VR) smo v okviru projekta ONBOARDING-AI izvedli 3D skeniranje realnega delovnega okolja (Slika 2). Tako pridobljeni prostorski podatki služijo kot osnova za prenos delovnega mesta v digitalno obliko, kar omogoča realistično in varno učno izkušnjo v simuliranem okolju.



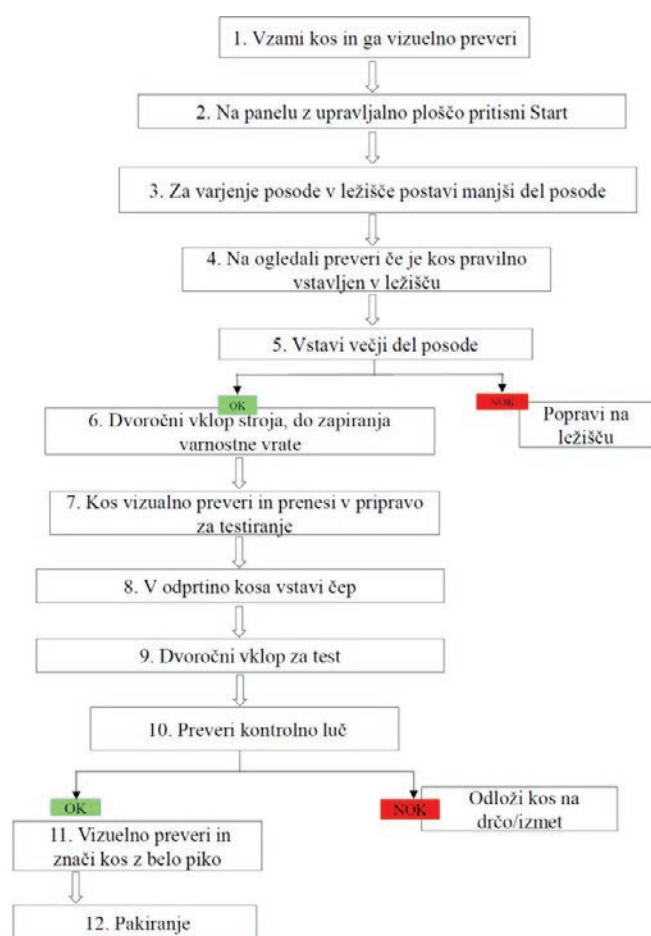
Slika 2: 3D skeniranje delovnega okolja za pripravo na izdelavo programa usposabljanja v VR

Za pripravo na razvoj VR usposabljanja smo najprej izdelali diagrame poteka vseh izbranih delovnih operacij, ki so služile kot temelj za modeliranje delovnih nalog. Primer je prikazan na sliki 3.

Ti diagrami predstavljajo zaporedje korakov, ki jih mora uporabnik slediti pri izvajanju določenih nalog, kar omogoča natančno simulacijo realnega okolja. Pravilnost delovne operacije je odvisna od odločitev posameznikov. To so tisti, ki so bili usposobljeni v VR okolju za

delo po specifičnem postopku in med usposabljanjem pokazali sistematičen in pravičen pristop k operacijam. Poleg tega so se, ko je bila operacija odvisna od njihove odločitve, samozavestno pravilno odločili.

Preizkušanje usposabljanja v VR je omogočilo boljše razumevanje posledic napačnih odločitev, ne da bi to povzročilo materialno škodo ali ogrožalo varnost delavcev. VR okolje omogoča ponavljanje nalog in zagotavlja takojšnjo povratno informacijo, kar pripomore k hitrejšemu učenju in večji usposobljenosti posameznikov.



Slika 3: Primer diagram poteka operacij

Pri ustvarjanju delovnih operacij v VR je diagram poteka pomagal orisati vse korake procesa, kar je udeležencu usposabljanja pomagalo sistematično se naučiti in si zapomniti potek operacije.

Pri posameznikih, ki so bili tradicionalno usposobljeni za delo na nekaterih procesih, smo kasneje med delovnim procesom bili priča, da se

v nekaterih kritičnih situacijah ne morejo pravilno odločiti o naslednjih korakih procesov.

Njihove odločitve so temeljile na ugibanju o tem, kako se odzvati, da bi nadaljevali s pravim korakom v operaciji. To je privedlo do dodatne poraba časa pri odpravljanju napak.

Ugotovili smo, da usposabljanje v VR omogoča in pomaga posamezniku, razumeti in prepoznati posledice tudi ob napačni odločitvi, brez dodatne materialne izgube in časovne neučinkovitosti.

4.1 Testiranje učinkovitosti VR usposabljanja

Za preizkus funkcionalnosti in učinkovitosti sistema ONBOARDING-AI smo izvedli eksperiment v štirih različnih skupinah:

- Novozaposleni z VR usposabljanjem,
- Novozaposleni brez VR usposabljanja,
- Zaposleni, ki že obvladajo delovne procese, vendar niso seznanjeni z določenimi procesi, z VR usposabljanjem,
- Zaposleni, ki niso seznanjeni z določenimi procesi, brez VR usposabljanja.

Pri preizkusu smo spremljali več ključnih dejavnikov učinkovitosti:

- Gibanje in telesna orientacija udeležencev pri izvajanju nalog,
- Število zahtevane pomoči s strani sistema med izvajanjem naloge,
- Sledenje očem (eye-tracking), kar omogoča analizo pozornosti in zaznavanja informacij s strani udeležencev,
- Čas izvedbe nalog, kar omogoča analizo hitrosti in učinkovitosti izvedbe nalog,
- Zaporedje operacij, da se preveri pravilno izvedbo nalog v skladu s standardi,
- Upoštevanje normativov, vključno z zahtevami glede kakovosti in časovne učinkovitosti.

Zbrane podatke smo analizirali za primerjavo med različnimi pristopi in ugotovili, da je uporaba VR usposabljanja pripomogla k boljši izvedbi nalog, hitrejšemu učenju ter manjšemu številu napak v začetnih fazah usposabljanja.

5 REZULTATI

Testiranje sistema ONBOARDING-AI v industrijskem okolju je pokazalo dobljene rezultate predstavljene v tabeli 1.

Tabela 1: Primerjava učinkov učenja z in brez VR

Skupina	Novo zaposleni	Zaposleni, seznanjeni z delom, a ne z vsemi procesi
Število udeležencev	4	4
Usposabljanje z VR	2 (z VR)	2 (z VR)
Usposabljanje brez VR	2 (brez VR)	2 (brez VR)
Skrajšanje časa uvajanja (%)	30-40%	30-40%
Zmanjšanje napak (%)	50%	50%
Povečanje motivacije (%)	20%	30%
Razbremenitev mentorjev (% zmanjšanje časa)	35%	35%

Skrajšanje časa uvajanja (%): Pomerjen je čas, potreben za uvedbo novih zaposlenih na delovno mesto, kjer so udeleženci z VR usposabljanjem potrebovali 30–40 % manj časa kot tisti, ki so bili usposobljeni po tradicionalnem pristopu.

Zmanjšanje napak (%): Zmanjšanje števila napak v prvih dneh dela za 50 % pri uporabnikih z VR usposabljanjem v primerjavi z uporabniki brez VR usposabljanja.

Povečanje motivacije (%): Povečanje motivacije novozaposlenih je bilo ocenjeno preko anket, kjer so udeleženci z VR usposabljanjem pokazali večjo motivacijo kot tisti brez VR.

Razbremenitev mentorjev (%): Zmanjšanje neposrednega časovnega vložka mentorjev za več kot 35 %, saj je VR usposabljanje omogočilo bolj samostojno izvajanje nalog s strani zaposlenih.

5 SKLEP

Projekt ONBOARDING-AI je v okviru evropskega projekta WASABI razvijal inovativne tehnologije za izboljšanje usposabljanja v industriji, z uporabo prepoznavanja govora (STT), sinteze govora (TTS) in virtualne resničnosti (VR). Sistem omogoča učinkovito, glasovno interakcijo med zaposlenimi in digitalnim asistentom, kar povečuje uporabniško izkušnjo ter olajša uvajanje novih zaposlenih v proizvodne procese.

Testiranja so pokazala, da uporaba VR zmanjšuje čas uvajanja novih zaposlenih za 30–40 %, zmanjša napake za 50 %, povečuje motivacijo in razbremeni mentorje. VR omogoča varno prepoznavanje napak brez tveganja materialne škode, kar pripomore k večji produktivnosti in manj napakam v realnih delovnih situacijah.

Z uporabo STT in TTS tehnologij je interakcija z digitalnim asistentom bolj naravna in enostavna, kar pripomore k hitrejšemu in učinkovitejšemu učenju.

V prihodnosti se ONBOARDING-AI osredotoča na nadaljnji razvoj personaliziranega usposabljanja in naprednejše VR vsebine za bolj realistično simulacijo delovnih nalog. Podjetje bo širilo sistem na druge industrijske panoge ter optimiziralo obstoječe delovne procese, da bi še povečalo produktivnost, zmanjšalo napake in izboljšalo varnost v industriji..

Viri:

- [1] BIBA – Bremer Institut fuer Produktion und Logistik GmbH (2020)
- [2] <https://github.com/OpenVoiceOS>

Zahvala

This project has received funding from the Horizon Europe programme under the Grant Agreement No. 101092176

AN EXAMPLE OF RFID TECHNOLOGY APPLICATION IN INDUSTRY

Miroslav GOJIĆ
EVOKS

SUMMARY

RFID (Radio-Frequency Identification) is a technology that enables automatic identification and tracking of objects using radio waves, offering significant improvements in process efficiency, accuracy, and traceability. This paper explores a real-world application of RFID in an industrial manufacturing environment, where precise inventory management and control of internal material flow were essential. The implemented solution utilized passive RFID tags and fixed readers strategically placed throughout the facility to automate data collection and monitor logistics processes in real time. Through seamless integration with the existing information systems, the company gained full transparency of material movement, reduced inventory discrepancies, and accelerated operational workflows. The results demonstrate how RFID technology, when deployed with a tailored and system-integrated approach, can deliver substantial benefits in industrial automation, decision-making, and resource optimization.

1 INTRODUCTION

Radio-Frequency Identification (RFID) is a wireless technology that enables the automatic identification and data capture of objects using radio waves. At its core, an RFID system consists of tags attached to objects, readers that emit radio signals to detect those tags, and a backend system that processes and interprets the collected data. Unlike line-of-sight technologies, RFID can identify multiple items simultaneously and at varying distances, even in challenging environments.

Originally developed during World War II for military applications, RFID has evolved significantly over the decades. From early use in security and access control, it has expanded into mainstream commercial and industrial sectors. The introduction of passive RFID tags in the late 20th century, combined with decreasing costs and advances in standardization, enabled large-scale deployment across supply chains, manufacturing plants, retail, and healthcare. Today, RFID plays a crucial role in digital transformation initiatives, contributing to the automation and transparency of operations.

Compared to conventional identification technologies such as barcodes, RFID offers several advantages. While barcodes require optical scanners and direct line-of-sight, RFID can

function without visual contact and is more resistant to dirt, damage, and harsh environmental conditions. Furthermore, RFID enables bulk reading and real-time updates, making it more suitable for dynamic and high-volume industrial environments.



This paper presents a practical case of RFID deployment across three strategic sectors—industry, transport and logistics, and oil and gas—where process visibility, operational speed, and regulatory compliance are critical. By examining this implementation, the paper aims to highlight how tailored RFID solutions can address sector-specific challenges and significantly improve efficiency and control in complex systems.

2 RFID SYSTEM COMPONENTS

An RFID system is composed of several critical components that work together to enable the automatic identification and tracking of objects. At the core of the system are RFID tags, which store data and are attached to the items being tracked. These tags can be categorized into three main types: active, passive, and semi-passive. Active tags have an internal power source, allowing for long-range communication and frequent data transmission. Passive tags, on the other hand, rely entirely on the energy transmitted by the RFID reader, making them more cost-effective but suitable for shorter read ranges. Semi-passive tags combine features of both by using an internal battery to power the circuitry but still relying on the reader to initiate communication.



RFID readers are devices that emit radio frequency signals to detect and communicate with the tags. These readers can be fixed, often mounted at key control points such as entry gates or

conveyors, or handheld, offering mobility and flexibility for manual scanning. Readers vary in performance, with some capable of reading hundreds of tags simultaneously, depending on their frequency and antenna configuration.

To transmit and receive signals, both tags and readers rely on antennas. Antennas determine the range and directionality of the communication and are essential to achieving efficient coverage in the monitored area. RFID systems operate across different frequency bands, including Low Frequency (LF), High Frequency (HF), and Ultra-High Frequency (UHF). LF systems offer shorter read ranges but are less sensitive to metal and water, making them suitable for certain industrial environments. HF systems are often used in applications like smart cards and library systems. UHF systems provide the longest read range and are ideal for large-scale tracking in logistics and manufacturing.

Another vital component of an RFID ecosystem is the middleware, which acts as a bridge between hardware and enterprise software. Middleware filters, aggregates, and interprets data collected by readers before sending it to the appropriate business systems. Seamless integration with ERP (Enterprise Resource Planning) or MES (Manufacturing Execution Systems) ensures that real-time RFID data supports operational decision-making and process automation. Proper configuration of middleware is crucial to avoid data overload and ensure meaningful insights are derived from raw RFID inputs.

The efficiency of an RFID system depends not only on hardware quality but also on how well these components are configured and integrated. A successful deployment considers environmental conditions, data flow requirements, and compatibility with existing IT infrastructure. Overall, each component plays a unique role in delivering the full potential of RFID technology.

4. INDUSTRIAL ENVIRONMENT AND APPLICATION SCENARIO

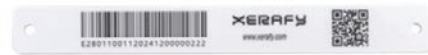
This case study focuses on the **manufacturing sector**, specifically a production facility within the **oil and gas industry**, where tracking and managing materials in a hazardous environment presented significant operational challenges. The

facility handles various equipment components, many of which are made of **metal** and operate in areas with **high temperatures** and **exposure to aggressive chemicals**. Additionally, many zones within the plant are classified as **ATEX/IECEX hazardous areas**, requiring specialized equipment that meets explosion protection standards.



Prior to the implementation of RFID, the plant relied on manual data entry and barcode scanning for inventory and asset tracking. This approach was prone to errors, caused frequent delays, and lacked real-time visibility into the movement of critical components. Tracking the location, condition, and movement of thousands of assets, especially those frequently used in hazardous zones, was cumbersome and inefficient. Human errors, such as incorrect entries or missing documentation, led to stock discrepancies and process bottlenecks.

Furthermore, barcode labels were not suitable for the harsh environment. Many were damaged or rendered unreadable due to **chemical exposure**, **abrasion**, or **high ambient temperatures**. The client needed a **durable, non-contact identification method** that could function reliably in extreme conditions and ensure accurate tracking of equipment and material.



To address these issues, a **custom RFID solution** was designed and deployed. The project began with a detailed analysis of the production environment and a risk assessment of all areas where RFID would be implemented. Special attention was paid to **equipment certification**, especially in explosive atmospheres, requiring **intrinsically safe (Ex-certified) RFID readers and antennas**. **UHF passive RFID tags** capable of withstanding high temperatures and chemical exposure were selected, some embedded directly into metal components or mounted in protective housings.

The main **objective** of the project was to achieve **real-time inventory control**, with complete traceability of equipment usage, movement, and maintenance history. Another goal was to enhance **asset tracking**, particularly for critical components moving between hazardous and non-hazardous areas. RFID was also used to support **process automation**, enabling automatic logging of equipment movement through key checkpoints.

Fixed RFID readers were installed at strategic locations such as warehouse exits, production lines, and maintenance zones. These readers provided continuous monitoring of tagged items, reducing the need for manual scanning. In parallel, **mobile RFID handhelds** were used by maintenance personnel to identify components on-site and retrieve relevant inspection or service records.

The system was integrated into the plant's existing **MES (Manufacturing Execution System)**, allowing real-time synchronization of data and alerts when anomalies were detected. For example, if a component scheduled for maintenance was moved into a hazardous area without prior inspection, the system would notify the operator and restrict further action. This contributed to improved **safety compliance** and **regulatory traceability**.

Moreover, the solution enabled **predictive maintenance** by tracking usage cycles and wear rates, which were historically difficult to quantify. The RFID system also proved valuable for **incident response**, offering quick access to equipment location and service history during safety audits or inspections.

The implementation led to measurable improvements, including a **60% reduction in inventory errors**, **40% faster asset retrieval**, and enhanced coordination between departments. Additionally, the RFID data provided management with detailed reports for **resource optimization** and **workflow planning**.

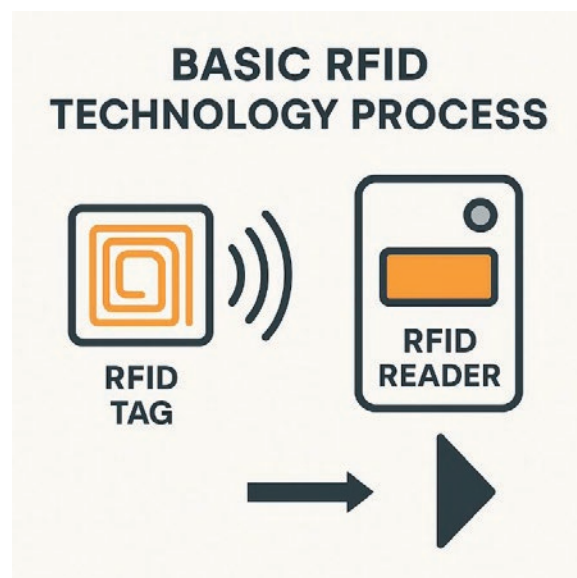
Overall, the deployment demonstrated that RFID can be successfully implemented in complex, **high-risk industrial environments**, provided that equipment is properly certified and adapted to environmental conditions. The ability to track critical equipment in real-time under **harsh operating conditions** helped the facility improve both **operational efficiency** and **worker safety**. This case underlines the importance of selecting RFID components based on specific industrial needs and ensuring system compatibility with **explosive atmospheres** and **harsh material handling processes**.

5. IMPLEMENTATION PROCESS

The implementation of the RFID system began with a detailed assessment of the facility layout, operational workflow, and environmental constraints. Based on this analysis, the system design was tailored to meet the specific needs of the manufacturing plant operating in hazardous zones. Particular attention was given to **tag placement strategy**, ensuring optimal read performance even on **metal surfaces**, within **high-temperature zones**, and areas exposed to

chemicals. Specialized **UHF passive tags**, resistant to harsh conditions, were embedded into or mounted on critical components using industrial-grade adhesives or protective housings.

The hardware infrastructure included **fixed RFID readers** installed at key transition points such as loading docks, storage areas, and production lines. These were complemented by **handheld RFID readers**, allowing mobile tracking during maintenance, inspections, and inventory checks. **Explosion-proof enclosures** and **ATEX-certified components** were used in all hazardous areas to ensure compliance with safety regulations. RFID **antennas** were carefully oriented to eliminate signal blind spots and maximize detection accuracy.



On the software side, middleware was configured to filter, validate, and aggregate raw data from multiple readers. This middleware served as a bridge between the RFID network and existing enterprise systems, enabling **real-time data integration with the ERP and MES platforms**. The integration allowed seamless updates on material status, location, and usage, which enhanced decision-making and process automation.

During deployment, several **challenges** were encountered, including **signal interference** caused by metal structures and machinery. Environmental noise and electromagnetic fields affected early reader calibration, requiring on-site adjustments. Another critical challenge was the certification and

safe installation of RFID devices in **ATEX zones** without halting production. Despite these complexities, the system was gradually commissioned in phases, minimizing operational disruption. Post-deployment testing ensured data reliability and system robustness under real working conditions, resulting in a fully functional RFID solution tailored to the client's industrial environment.

6 RESULTS AND BENEFITS

The RFID implementation led to significant quantitative improvements, including a 60% reduction in inventory errors and a 40% decrease in material search time. Operational workflows became faster and more reliable, with fewer delays caused by manual tracking or misplaced items. The system provided enhanced traceability, enabling real-time visibility into the movement and status of equipment, materials, and tools across the facility.

This improved data availability allowed managers to make more informed decisions based on accurate and up-to-date information. Real-time monitoring and reporting helped streamline logistics, automatically generating logs, alerts, and performance metrics without human intervention. The integration with ERP and MES systems ensured that all departments had access to consistent and synchronized data.

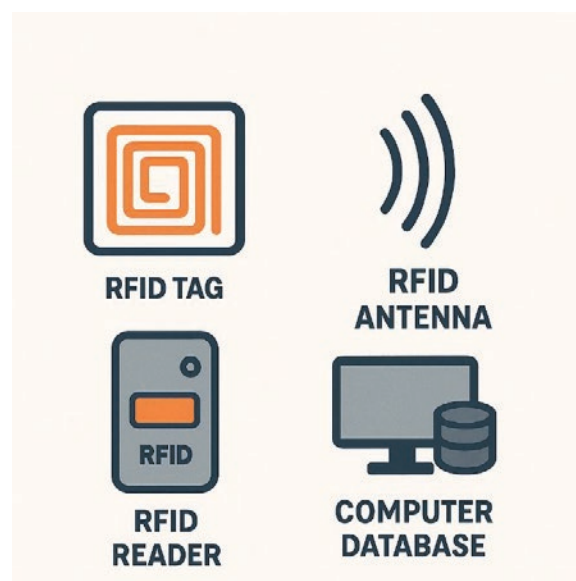
Additionally, the system supported predictive maintenance by tracking usage patterns and maintenance cycles, further reducing downtime. Compliance with safety regulations was improved through automated controls and audit-ready records. In hazardous zones, the RFID solution ensured that only certified and inspected equipment entered restricted areas, enhancing worker safety. The reliable identification process also minimized the risk of using expired or faulty components. Overall, the RFID system brought measurable benefits in efficiency, transparency, and operational control, establishing a scalable platform for future digitalization initiatives.

7. CHALLENGES AND LIMITATIONS

Despite the successful deployment, the RFID system faced several challenges and limitations

inherent to industrial environments. One of the primary issues was environmental interference, particularly with metal surfaces and liquid containers, which can reflect or absorb radio waves, reducing read accuracy. In some areas, tags mounted on metallic equipment required special positioning or insulation techniques to ensure consistent detection. Similarly, materials with high moisture content caused signal attenuation, necessitating additional calibration of reader antennas.

Another limitation was related to tag durability and read range. While passive UHF tags were chosen for their cost-effectiveness, they offered shorter read ranges compared to active tags and were more sensitive to environmental stress. In high-temperature zones, only a limited selection of industrial-grade RFID tags could withstand the heat and chemical exposure, which slightly reduced the flexibility of placement.



Cost was also a significant consideration, especially for high-specification ATEX-certified readers and explosion-proof enclosures. While the long-term ROI was positive, the initial investment in rugged hardware and integration services was substantial and required careful justification. Budget constraints limited full coverage in certain non-critical zones, which had to be monitored manually.

From a data management perspective, security and privacy concerns emerged as the volume of collected information increased. Ensuring secure

transmission and access control became essential to protect sensitive operational data from unauthorized use. Additionally, there was a need to comply with internal IT policies and external standards regarding data handling and system integrity.



Maintenance of the RFID infrastructure also posed logistical challenges, particularly in hazardous areas where access is restricted and device servicing requires special procedures. Regular checks and firmware updates had to be planned in accordance with safety protocols. Lastly, staff training was essential to ensure proper use of handheld readers and interpretation of system alerts, without which the system's effectiveness could be reduced. These challenges highlighted the importance of ongoing technical support, adaptive planning, and stakeholder involvement throughout the RFID lifecycle.

8 DEFECT ANALYSIS

The future of RFID technology lies in its seamless integration with IoT (Internet of Things) ecosystems, enabling real-time data exchange between RFID-tagged assets and interconnected smart systems. Cloud-based RFID platforms are becoming increasingly popular, offering scalable storage, remote monitoring, and centralized analytics accessible from any location. These systems reduce infrastructure costs and simplify deployment across multiple sites.

The application of AI and machine learning is expected to further enhance RFID capabilities, enabling predictive analytics for maintenance, inventory optimization, and process automation. Intelligent systems will be able to detect patterns, forecast disruptions, and support faster decision-making. Continued progress in standardization and

compliance with global regulatory frameworks will ensure better interoperability between devices and systems across industries. Moreover, these trends will help improve data security, governance, and transparency in RFID applications. As technology evolves, RFID will play a central role in the digital transformation of industrial operations.

9 CONCLUSION

The case study confirms that RFID technology significantly improves operational efficiency, traceability, and safety in complex industrial environments. The implementation demonstrated strong ROI through reduced errors, time savings, and enhanced process control, proving the solution's scalability across similar facilities. Its successful integration with existing systems highlights RFID's adaptability and long-term value. For industries facing challenges in asset tracking and process automation—especially in hazardous or high-demand settings—RFID presents a reliable and future-ready solution.

Sources:

- [1]. International Organization for Standardization. (2014). *ISO/IEC 18000-6:2014 - Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz*. Geneva: ISO. <https://www.iso.org/standard/61434.html>
- [2]. Finkenzeller, K. (2010). *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication* (3rd ed.). Wiley.
- [3]. Want, R. (2006). An introduction to RFID technology. *IEEE Pervasive Computing*, 5(1), 25–33. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2006.2>
- [4]. Sarma, S., Brock, D. L., & Engels, D. W. (2001). Radio-frequency identification and the electronic product code. *IEEE Micro*, 21(6), 50–54. <https://doi.org/10.1109/40.977758>
- [5]. Leong, K. S., & Ng, M. L. (2009). RFID applications: An overview and summary. In *2009 4th International Conference on Industrial and Information Systems* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2009.5429915>
- [6]. Angeles, R. (2005). RFID technologies: Supply-chain applications and implementation issues. *Information Systems Management*, 22(1), 51–65. <https://doi.org/10.1201/1078.10580530/45565.22.1.20051201/85711.6>
- [7]. Floerkemeier, C., Langheinrich, M., Fleisch, E., Mattern, F., & Sarma, S. E. (2008). *The Internet of Things: First International Conference, IOT 2008* (Vol. 4952). Springer.
- [8]. Xerafy. (n.d.). *Industrial RFID Tags and Solutions for Harsh Environments*. Retrieved from <https://www.xerafy.com>

INOVACIJE V RAZVOJU HMI/SCADA SISTEMOV: SODOBNI PRISTOPI S PLATFORMO FACTORYTALK OPTIX

Peter SKOPEC
ControlTech d.o.o.

IZVLEČEK

Predstavljamo inovativno platformo za vizualizacijo industrijskih sistemov, ki izstopa po modernosti, prilagodljivosti in univerzalnosti. Gre za moderno rešitev, ki presega tradicionalne pristope. Njena glavna prednost je popolna prilagodljivost in zmožnost povezovanja z različnimi krmilnimi sistemi vodilnih proizvajalcev. Integrirani gonilniki omogočajo najrazličnejše možnosti povezovanja in nemoten pretok podatkov, tudi preko protokolov OPC UA ali MQTT. Platforma deluje neodvisno od operacijskega sistema, kar omogoča uporabo na različnih napravah, vključno z mobilnimi. Brezplačno razvojno okolje olajša ustvarjanje aplikacij, medtem ko naprednejša različica ponuja dodatne funkcionalnosti, kot je skupinski razvoj projektov in verzioniranje preko platforme GitHub.

Vključuje vse potrebne elemente za učinkovito upravljanje proizvodnih procesov, kot so sistem alarmiranja, shranjevanje podatkov in upravljanje receptur. Možnost prilagajanja s pomočjo C# skript omogoča fleksibilnost že v fazi razvoja ali v fazi izvajanja aplikacije. Licenciranje temelji na funkcionalnostih, kar omogoča prilagodljivost glede na potrebe organizacije. S to platformo, poleg spreminjanja proizvodnih procesov, odpirate tudi vrata za razvoj in rast vašega podjetja.

1 UVOD

V industrijski avtomatizaciji se dnevno srečujemo z vizualizacijo proizvodnih procesov. Na trgu je pestra ponudba raznolikih orodij, sistemov, platform,... Katero platformo izbrati za vaš sistem, pa včasih ni enostavna naloga. Izbiramo lahko glede na različne kriterije, npr. povezljivost s krmilnimi sistemi, omejitve glede števila zaslonov oz. števila »tagov«, raznorazne funkcionalnosti kot npr. logiranje podatkov, prikazovanje trendov, izdelava poročil, povezovanje »v oblak«, povezovanje mobilnih naprav, itd.

Večino sodobnih orodij za vizualizacijo omogoča izvedbo prej navedenih funkcionalnosti, vendar je kljub vsemu bistvena razlika med orodji in načinom izdelave, nenazadnje pa je med orodji na trgu tudi bistvena cenovna razlika, zato je pred odločitvijo smiselno pregledati aktualno ponudbo tovrstnih orodij na trgu.

V množici raznoraznih orodij za vizualizacijo vam predstavljamo sodobno, v mnogih pogledih izredno odprto in cenovno ugodno, orodje za vizualizacijo, ki v industrijsko okolje uvaja nekatere napredne, lahko rečemo tudi vizionarske pristope.

2 PLATFORMA FACTORYTALK OPTIX

Predstavljamo vam platformo FactoryTalk Optix, novo, napredno orodje za vizualizacijo, ki ga je v svoj prodajni program s prevzemom italijanskega podjetja Asem, vključilo podjetje Rockwell Automation.



Slika 1: FactoryTalk Optix – nova, odprta platforma za vizualizacijo in digitalizacijo

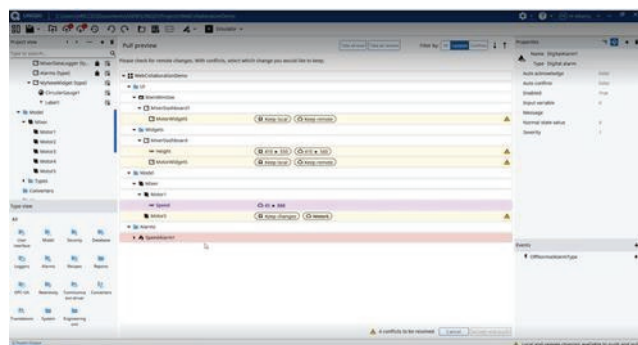
To orodje za vizualizacijo utira nove pristope na mnogih področjih, izstopa pa predvsem v funkcionalnostih, ki vplivajo na cenovno ugodne in prilagodljive rešitve.

Že v fazi razvoja aplikacij imamo možnost uporabe brezplačnega razvojnega orodja. Razvojno orodje lahko prenesete s spletne strani in ga namestite na vaš računalnik ali pa uporabite razvojno orodje v oblaku FactoryTalk Design Hub kjerkoli, kadarkoli, le z vpisom v vaš račun.



Slika 2: Prilagodljivost razvojnega okolja

Uporaba tovrstnih orodij je pogosto v uporabi na IT področju. Na t.i. OT področju pa se ta praksa šele uveljavlja, tudi zaradi nekaterih dodatnih funkcij, kot je sodelovanje večjega števila programerjev na istem projektu in verzioniranje oz. spremljanje izvedenih sprememb, kot smo vajeni v sistemu Git Hub.



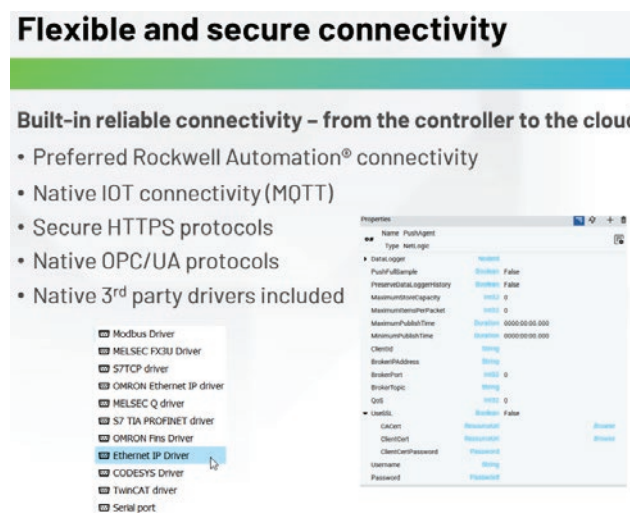
Slika 3: Razvojno okolje v oblaku – interakcije med lokalnimi in oddaljenimi verzijami.

Funkcionalnosti, ki bi jih radi posebej izpostavili pa so vezane na prilagodljivost, odprtost in povezljivost z ostalimi sistemi.

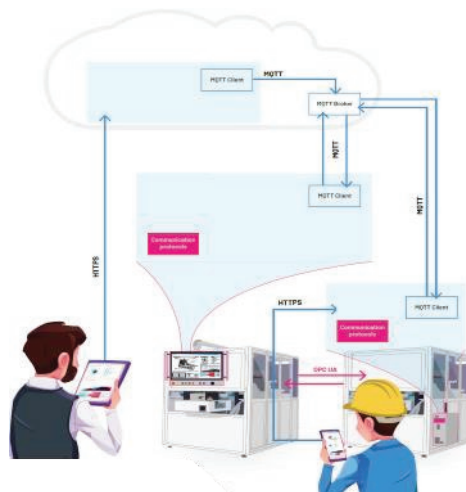
Prilagodljivost je izražena na različnih področjih. Najprej se izraža s tem, da ob razvoju aplikacije ni potrebno določiti, kje se bo aplikacija izvajala (industrijski panel, IPC, spletni odjemalec,...) in kakšna bo ločljivost prikazovalnika te naprave. Poleg tega je ta

platforma popolnoma neodvisna od operacijskega sistema, saj se aplikacija lahko izvaja na Windows ali Linux napravah.

Ta platforma izstopa tudi na področju povezljivosti. Za sisteme vizualizacije je bistvenega pomena povezljivost s krmilnimi sistemi in platforma FactoryTalk Optix že v osnovi zajema gonilnike za povezovanje z vsemi boljše znanimi proizvajalci krmilnih sistemov.



Poleg tega ta platforma že v osnovi omogoča povezovanje preko standardnega, univerzalnega protokola OPC UA (kot strežnik ali odjemalec) in tudi MQTT komunikacijo za IoT naprave.



Slika 4: Povezovanje z različnimi komunikacijskimi protokoli (OPC UA, MQTT, HTTPS)

Poleg navedenih naprednih funkcionalnosti pa je potrebno omeniti še napredne možnosti

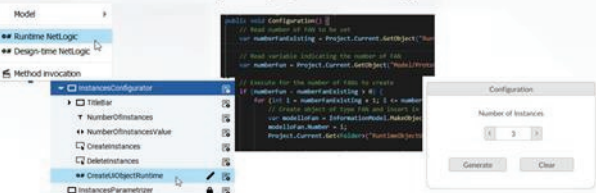
uporabe programskega jezika C#, ki običajno orodje za izdelavo nadzornih aplikacij dvigne na povsem drugo raven. Z uporabo C# skript lahko funkcionalnosti SCADA sistema nadgradite z vašimi, lastnimi rešitvami.

Pomembno je poudariti tudi to, da C# skripte lahko uporabite že v fazi razvoja aplikacije in na tak način C# skripta generira določeno število objektov, z vsemi pripadajočimi vhodno izhodnimi parametri.

Open interfaces with scripting capabilities

Unlimited customizations and automatic generation

- Open API available to all aspects of a project available by C# scripting
- Create application logic for customized functionality
- Automatically generate parts of the project at design time and runtime
- Customize the visual style of graphics instantly



Slika 5: Možnost uporabe C# skript tudi v fazi razvoja

Eden od ključnih parametrov nove platforme za vizualizacijo pa je vsekakor tudi cena. Običajno so orodja za vizualizacijo omejena glede na število točk ali pa število zaslonov. Pri platformi FactoryTalk Optix tovrstnih omejitev ni. Sistem temelji na »žetonih«, ki odklepajo funkcionalnosti kot npr. alarmiranje, logiranje, recepture, OPC UA povezljivost, spletni odjemalci, itd. Žetoni se kupujejo kot paketi z različnim številom žetonov, od XS (5 žetonov) pa vse do XXL (28 žetonov).

By feature package	
Feature packages can easily be upgraded	
Feature packages	Feature tokens included
XS	5
S	8
M	11
L	15
XL	21
XXL	28

Slika 6: Paketi žetonov XS... XXL

3 SKLEP

V primeru, da želite vašo aplikacijo izvajati na industrijskem računalniku, morate kupiti primeren paket z žetoni. V kolikor pa se odločite, da boste aplikacijo poganjali na industrijskem zaslonu OptixPanel, pa vam to predstavlja cenovno ugodno rešitev, saj v paketu dobite zanesljiv industrijski monitor in v naprej nameščeno določeno število žetonov. V vsakem primeru pa se platforma FactoryTalk Optix izkaže za eno cenovno ugodnejših rešitev na trgu.

OptixPanel™ graphic terminals 2800C & 2800S

- OptixPanel™ Compact terminals (2800C)
 - Small formats: starting from 4.3" LCD
 - Single-touch resistive or multitouch PCAP screens
 - More cost-effective
- OptixPanel™ Standard terminals (2800S)
 - High-end performance
 - Four types of bezels available - three with resistive touch, one with PCAP touch screen
 - Stainless-steel IP69K hygienic bezel available
 - Nine LCD sizes
 - Three sizes in 4:3 aspect ratio
 - Six sizes in widescreen
 - AT&T certified configurations available
- Brandless units available for all product versions



Slika 6: Compact in Standard OptixPanel-i

Novo platformo FactoryTalk Optix odlikuje cenovna učinkovitost, vsestranska odprtost in prilagodljivost glede krmilnih sistemov in operacijskih sistemov. Predstavljena platforma omogoča izvedbo enostavnih, cenovno ugodnih aplikacija za nadzor sistemov, lahko pa je tudi zmogljiva platforma za digitalizacijo vaše proizvodne linije in povezovanje na praktično vseh nivojih s sodobnimi protokoli kot npr. OPC UA in MQTT.

Viri:

- [1] <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/factorytalk/optix.html>
- [2] <https://github.com/FactoryTalk-Optix>
- [3] <https://www.aseautomation.com/en/products/251/factorytalk-optix.html>

ŠTUDIJA PRIMERA NAPREDNEGA TERMINIRANJA V KOMPLEKSNI MALOSERIJSKI PROIZVODNJI

Peter KORENČAN, Boštjan MALAVAŠIČ, Andraž ŽERTEK, Dušan BOŽIČ
Inden, informacijske rešitve, d.o.o.

IZVLEČEK

V kompleksni maloserijski proizvodnji, kjer se podjetja soočajo z visoko variabilnostjo naročil in omejenimi viri, je učinkovito planiranje in terminiranje ključnega pomena za doseganje konkurenčne prednosti. Ta prispevek predstavlja študijo primera uvedbe napredne rešitve Planska tabla v proizvodno podjetje. Rešitev je pripomogla k bistveni izboljšavi preglednosti proizvodnega procesa, večji prilagodljivosti na spremembe in optimalni izrabi proizvodnih virov. V nadaljevanju predstavljamo ključne izzive obstoječega planiranja v Excelu, tehnično izvedbo razvrščanja z uporabo kombinatorične optimizacije ter izzive in koristi uvedbe novega sistema.

1 UVOD

V sodobni proizvodnji, še posebej v maloserijskih okoljih z veliko variabilnostjo in nizkimi serijami, se podjetja vse pogosteje soočajo z izzivom, kako učinkovito planirati in terminirati proizvodnjo. Tradicionalni pristopi, kot je ročno planiranje v Excelu, pogosto ne zadoščajo več za kompleksnost, ki jo prinašajo dinamična naročila, omejeni viri in nenehne spremembe. V tem kontekstu se pojavlja potreba po naprednih digitalnih rešitvah, ki omogočajo optimizacijo razporejanja nalog, večjo preglednost ter hitro odzivanje na motnje v proizvodnem procesu.

V tem prispevku predstavimo rešitev Planska tabla, ki temelji na sodobnih algoritmih za razvrščanje in vizualnem vmesniku za planiranje, ter analizo učinkov, ki jih je uvedba takega orodja prinaša v podjetje.

2 IZZIVI PRI PLANIRANJU V EXCELU

V številnih proizvodnih podjetjih, zlasti v maloserijski proizvodnji, je še vedno pogosto prisotno planiranje z uporabo preglednic, najpogosteje Excela. Čeprav je Excel vsestransko in prilagodljivo orodje, se v kontekstu dinamičnega in kompleksnega proizvodnega okolja hitro pokažejo njegove omejitve. Ena od glavnih težav je, da Excel ni zasnovan za obvladovanje kompleksnih nalog optimizacije, ki

vključujejo številne odvisnosti med nalogami, virami in časovnimi okviri. Ko podjetje raste ali se proizvodni procesi povečajo v kompleksnosti, Excel postane neučinkovit zaradi težav pri obvladovanju velikih količin podatkov, natančnem razporejanju nalog ter sinhronizaciji med različnimi oddelki in sistemi.

Poleg tega Excel ni primeren za avtomatizacijo nalog, kot je na primer optimizacija razporedov ali avtomatsko prilagajanje proizvodnih kapacitet na spremembe v realnem času, kar je nujno v sodobnem proizvodnem okolju.

Za te izzive so potrebna naprednejša orodja, ki omogočajo boljšo obvladovanje kompleksnosti, večjo natančnost in hitrejše prilagajanje spremembam v realnem času, kot so napredne optimizacijske rešitve, ki se pogosto uporabljajo v industrijskih sistemih.

Omejitve Excel-a v proizvodnem okolju so lahko precejšnje, zlasti v dinamičnih in kompleksnih proizvodnih procesih. Nekatere ključne omejitve so:

- **Omejena sledljivost sprememb:** Excel ne omogoča enostavnega sledenja spremembam naročil, zamudam ali odpovedim, kar povzroča težave pri komunikaciji med oddelki in povečuje možnost napak.
- **Ročno planiranje:** Vnos in usklajevanje podatkov poteka ročno, kar ne le povečuje

možnost napak, temveč tudi zmanjšuje odzivnost na spremembe v proizvodnem procesu. Ročno delo se izkaže kot neučinkovito, ko so potrebni hitri popravki in prilagoditve.

- **Pomanjkanje vizualizacije:** Excel ne omogoča celostnega vizualnega vpogleda v stanje proizvodnje in obremenjenost virov, kar otežuje hitro sprejemanje odločitev in prilagoditve v realnem času.
- **Težko prilagajanje:** Excel zahteva ročne popravke ob vsakršni spremembi v zaporedju nalog ali kapacitetah, kar povečuje delovno obremenitev planerjev in zmanjšuje fleksibilnost sistema.
- **Zmanjšana učinkovitost:** Ob obdelavi večjih količin podatkov se zmogljivost Excela bistveno zmanjša, kar vodi v počasnejše delovanje in slabšo uporabniško izkušnjo. To še posebej postane problematično v večjih proizvodnih okoljih, kjer so podatki obsežni in kompleksni.

Te omejitve kažejo potrebo po naprednejših orodjih za optimizacijo proizvodnje, ki omogočajo boljše sledljivost, avtomatizacijo nalog, vizualizacijo in hitrejšo prilagajanje spremembam.

Zaradi navedenih izzivov se podjetja odločijo za implementacijo naprednih rešitev. V našem primeru gre za napredno orodje za planiranje (Advanced Planning and Scheduling – APS) Planska tabla, ki temelji na algoritmih za razvrščanje (angl. scheduling) in omogoča večjo avtomatizacijo, preglednost in prilagodljivost proizvodnega načrtovanja.

ŠT.	ŠIFRA (IZDELEK - INVALIDI)	OPERACIJA	ŠIFRA (IZDELEK - POZ.)	NAZIV POZICIJE	ŠT. KODNO	TRD. ČAS (-)	IZVOD V ENH. (ali presk)	ZAČETEK D.N. (ali presk)	LETO
3	14.3.25.00489	Prilagoditve	007	002002	3	32,58	"25004690371"	25	
4	14.3.25.00489	Prilagoditve	007	002002	3	0,79	"25004690531"	25	
5	14.3.25.00489	Prilagoditve	007	002002	3	0,27	"25004690301"	25	
6	14.3.25.00489	Prilagoditve	007	002002	3	0,68	"25004690445"	25	
7	14.3.25.00489	Prilagoditve	007	002002	3	0,60	"25004690445"	25	
8	14.3.25.00489	Prilagoditve	002	002002	1,1	0,88	"25004690321.1"	25	
9	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,1	0,41	"25004690681.1"	25	
10	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,1	0,36	"25004690341.1"	25	
11	14.3.25.00489	Prilagoditve	007	002002	1,10	0,06	"25004690321.10"	25	
12	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,10	0,03	"25004690341.10"	25	
13	14.3.25.00489	Prilagoditve	002	002002	1,12	0,11	"25004690321.11"	25	
14	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,12	0,01	"25004690341.11"	25	
15	14.3.25.00489	Prilagoditve	007	002002	1,12	0,02	"25004690321.12"	25	
16	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,12	0,01	"25004690341.12"	25	
17	14.3.25.00489	Prilagoditve	002	002002	1,13	0,06	"25004690321.13"	25	
18	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,13	0,06	"25004690341.13"	25	
19	14.3.25.00489	Prilagoditve	002	002002	1,14	0,06	"25004690321.14"	25	
20	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,14	0,01	"25004690341.14"	25	
21	14.3.25.00489	Prilagoditve	002	002002	1,15	0,11	"25004690321.15"	25	
22	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,15	0,01	"25004690341.15"	25	
23	14.3.25.00489	Prilagoditve	002	002002	1,15,1	0,24	"25004690321.15.1"	25	
24	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,15,1	0,23	"25004690341.15.1"	25	
25	14.3.25.00489	Prilagoditve	007	002002	1,15,1	0,23	"25004690321.15.1"	25	
26	14.3.25.00489	Prilagoditve	008	002002	1,15,1	0,06	"25004690341.15.1"	25	

Slika 1: Excel dokument

3 IZVEDBA RAZVRŠČANJA

3.1 KOMBINATORIČNA OPTIMIZACIJA IN CP ALGORITMI

Problem razvrščanja v proizvodnji spada med klasične probleme kombinatorične optimizacije, kjer gre za iskanje optimalnega zaporedja nalog na omejenih virih, ob upoštevanju različnih omejitev. V našem primeru govorimo o problemu z omejitvami (Constraint Programming, CP), ki omogoča izražanje kompleksnih pravil in relacij med entitetami (npr. vrstni red operacij, kapacitete strojev, delovni časi) [1][3].

CP algoritmi so še posebej primerni za kompleksne, diskretne in težko napovedljive naloge, saj omogočajo elegantno definiranje problema in učinkovito iskanje rešitev s pomočjo algoritmov za iskanje v prostoru rešitev.

3.2 OR - TOOLS IN CP - SAT SOLVER

Za implementacijo razvrščanja smo uporabili odprtokodno knjižnico OR-Tools podjetja Google [4]. Gre za eno najbolj razširjenih orodij za operacijsko raziskovanje, ki omogoča reševanje problemov linearnega programiranja, celostnega programiranja in razvrščanja.

Podpira različne metode za reševanje optimizacijskih problemov, kot so linearno programiranje (LP), celoštevilsko linearno programiranje (MILP), omejitveno programiranje (CP), problemsko usmerjanje vozil (VRP) ter urniške in druge kombinatorične naloge. OR-Tools izstopa po svoji zmogljivosti, široki podpori programskim jezikom (npr. Python, C++, Java, .NET) in enostavni uporabi v industrijskih in raziskovalnih okoljih.

Uporabljamo CP-SAT (Constraint Programming SAT solver), ki je sodoben in zelo učinkovit algoritem [5], ki rešuje kombinatorične probleme, kjer je treba najti vrednosti spremenljivk, ki zadoščajo danim omejitvam.

Gre za visoko optimiziran solver, ki je del knjižnice OR-Tools in je namenjen reševanju problemov z omejitvami z diskretnimi domenami. Temelji na integraciji tehnik z metodami omejitvenega programiranja, kar omogoča reševanje težkih nelinearnih problemov [1][3].

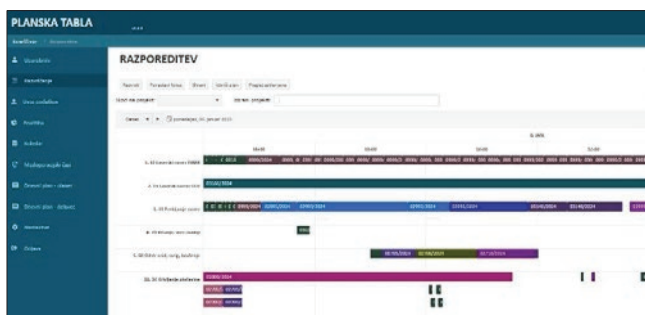
CP-SAT vključuje napredne algoritme za propagacijo omejitev, razvejanje in iskanje rešitev ter podporo za globalne omejitve in ciljno optimizacijo. Zaradi paralelizacije in domenskih heuristik velja za enega najučinkovitejših odprtokodnih CP solverjev.

3.3 PRIPRAVA OMEJITEV

Model razvrščanja smo zasnovali s pomočjo naslednjih ključnih omejitev:

- **Zaporedje operacij:** določene operacije morajo biti izvedene v točno določenem vrstnem redu.
- **Kapacitete virov:** vsak vir (stroj, delovno mesto) ima določeno kapaciteto, vsaka kapaciteta (delavec) opravlja samo eno operacijo, dokler je ne zaključi (skok iz ene operacije na drugo je potrebno narediti ročno).
- **Časi obdelave:** vsakemu opravilu je dodeljen določen čas izvajanja.
- **Koledar dela:** vsako delovno mesto ima določen koledar delovnih dni in ure začetka ter konca dela.

Te omejitve so definirane v obliki "constraints" in parametrov znotraj modela, kar omogoča avtomatizirano in konsistentno generiranje razporedov.



Slika 2: Planska tabla - Gantt.

3.4 OPTIMIZACIJSKE MOŽNOSTI

Rešitev omogoča dve stopnji optimizacije:

- **Osnovna optimizacija:** cilj je minimizacija skupnega časa proizvodnje, tj. čim hitrejša izvedba vseh nalog [2].
- **Napredna optimizacija:** poleg minimizacije skupnega časa proizvodnje, upoštevamo še druge kazalnike, kot so:
 - skupna vsota zamud naročil,
 - raztegnjenost posameznih virov,
 - zapolnjenost delovnega časa,
 - menjavam barv (npr. pri prašnem lakiranju izdelkov), ki jih želimo minimizirati.

Na ta način sistem omogoča fleksibilno optimizacijo glede na konkretne cilje podjetja.

4. UVEDBA REŠITVE IN IZZIVI PREHODA

Uvedba rešitve poteka v več fazah: priprava podatkovnih modelov, definicija algoritma, testiranje na zgodovinskih podatkih ter končna integracija v delovni proces. Med ključne izzive uvajanja sodijo:

- **Sprememba miselnosti uporabnikov:** prehod iz Excela v vizualno in algoritmično podprto orodje zahteva čas in učenje. Uporabniki so pogosto navajeni na preprostost Excela, zato je nujno, da so ustrezno usposobljeni in podprti med prehodom na nove sisteme.
- **Integracija z obstoječimi informacijskimi sistemi (ERP):** za popolno učinkovitost je bilo treba zagotoviti avtomatiziran prenos naročil, statusov in povratnih informacij. Integracija z ERP sistemi pogosto vključuje izzive v zvezi s prenosom podatkov, usklajevanjem sistemov in prilagajanjem obstoječih procesov novim zahtevam.
- **Potreba po sprotnem prilagajanju:** v praksi se je izkazalo, da se nekatere omejitve pojavijo šele pri uporabi v realnih pogojih, kar terjaja sprotno prilagajanje modela. Pomembno je, da je sistem dovolj fleksibilen za hitro prilagajanje spremembam, ki jih prinašajo

novi podatki in nepredvidene situacije v proizvodnji.

- **Pomanjkanje zgodovinskih podatkov:** brez zadostnih zgodovinskih podatkov, ki so ključni za prepoznavanje vzorcev in natančno napovedovanje, je težko razviti natančne modele za optimizacijo proizvodnje. V takih primerih je nujno zbiranje podatkov skozi čas ter izboljšanje kvalitete in obsega podatkov.
- **Težave pri komunikaciji med ekipami:** uspešna implementacija naprednih rešitev zahteva tesno sodelovanje med različnimi oddelki, kot so proizvodnja, IT in menedžment. Brez ustrezne komunikacije in usklajenosti lahko pride do napačne interpretacije potreb in funkcionalnosti sistema.

Kljub predvidenim začetnim težavam podjetja z implementacijo napredne rešitve že takoj na začetku dosežejo večjo preglednost nad proizvodnim procesom, hitrejše odločanje, boljše upravljanje z viri ter večjo sposobnost odzivanja na spremembe v realnem času.

5 SKLEP

Rešitve za napredno planiranje proizvodnje predstavlja pomemben korak k digitalizaciji in optimizaciji maloserijske proizvodnje. S kombinacijo sodobnih algoritmov [1][2], uporabniku prijaznega vmesnika in integracije z obstoječimi sistemi omogoča učinkovito planiranje tudi v zelo kompleksnih proizvodnih okoljih. Študija primera dokazuje, da je možno z relativno nizkim vložkom doseči pomembne izboljšave, predvsem na področju terminiranja, odzivnosti in transparentnosti.

Viri:

- [1] Apt, K. R.: *Principles of Constraint Programming*, Cambridge University Press, 2003.
- [2] Pinedo, M.: *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, Springer, 2012.
- [3] Rossi, F., van Beek, P., & Walsh, T.: *Handbook of Constraint Programming*. Elsevier, 2006.

[4] Google OR-Tools, *Operations Research Tools*, (<https://developers.google.com/optimization>), objavljeno na spletu (20.4.2025).

[5] Krupke, D.: *CP-SAT: Introduction and Example*, (<https://d-krupke.github.io/cpsat-primer/>), objavljeno na spletu (20.4.2025).

RAZVOJ MERILNEGA SISTEMA ZA UMERJANJE PRECIZNIH SENZORJEV POMIKA

Luka ČAS, Bojan AČKO, Rok KLOBUČAR
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo,
Laboratorij za tehnološke meritve

IZVLEČEK

V sodobnih industrijskih in raziskovalnih okoljih je moč opaziti vedno širšo uporabo preciznih senzorjev pomika, ki predstavljajo pomembno vlogo v vseh vidikih dimenzionalnega meroslovja. V industrijskih podjetjih in meroslovnih laboratorijih se takšni senzori, zaradi svoje submikrometrске točnosti, običajno uporabljajo za umerjanje različnih etalonov in merilnih instrumentov. Vzporedno z vedno večjo uporabo preciznih senzorjev pomika naraščajo tudi zahteve po njihovem umerjanju, ki je nujno za doseg sledljivih meritev, ki jih je mogoče povezati na enoto SI (meter). Kljub široki uporabi takšnih senzorjev še vedno ni komercialno dostopnega sistema, ki bi omogočal njihovo umerjanje z zahtevano meroslovno zmogljivostjo. V Laboratoriju za tehnološke meritve Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru v ta namen razvijamo unikatni namenski merilni sistem, ki bo omogočal popolnoma avtomatizirano umerjanje preciznih senzorjev pomika za merjenje dolžin do 150 mm. Predlagan sistem temelji na linearno pomični mikrometrski postaji, ki je vertikalno vpeta na osnovno ploščo. Vzporedno s postajo je postavljen konzolni nosilec s vpenjali na katerega vpenemo senzor, ki je predmet kalibracije. Poseben poudarek smo namenili analizi in validaciji kosinusnega pogreška tipala pred kalibracijo. V ta namen je bil razvit algoritem, ki s pomočjo metode strojnega vida omogoča natančno poravnavo merilne osi senzorja na os vodil translacijske postaje. Kot referenčni senzor bo v sistemu uporabljen laserski interferometer, ki temelji na sodobni diodni laserski tehnologiji. Opisani razvoj predstavlja pomemben znanstveni in aplikativni prispevek na področju meroslovja in zadovoljevanja potreb napredne slovenske industrije po sledljivosti nepreciznejših instrumentov za merjenje dimenzij.

1 UVOD V PODROČJE IN PREDSTAVITEV PROBLEMA

V sodobnih industrijskih in raziskovalnih okoljih je moč opaziti vedno širšo uporabo preciznih senzorjev pomika, ki predstavljajo pomembno vlogo v vseh vidikih dimenzionalnega meroslovja. Gre za različne tipe v večini primerov kontaktnih senzorjev, ki delujejo na induktivni, kapacitivni ali inkrementalni način. V industrijskih podjetjih in meroslovnih laboratorijih se takšni senzori, zaradi svoje podmikronske točnosti, običajno uporabljajo za umerjanje različnih etalonov in merilnih instrumentov. Največkrat se jih uporablja za umerjanje končnih meril oz. kladic [1], merjenje hrapavosti površine [2], njihovo uporabo pa je možno zaslediti tudi pri spremljanju deformacij, premikov in vibracij v strukturah kot so mostovi in zidovi [3].

Z vse širšo uporabo predstavljenih senzorjev pa vzporedno narašča potreba po njihovem

umerjanju. Kot nosilci državnega etalona za dolžino smo v Laboratoriju za tehnološke meritve (LTM) Univerze v Mariboru dolžni zagotavljati sledljivost dolžinskih meritev na najvišji ravni v državi. Izhodišče za raziskavo tako predstavlja potreba slovenske industrije in predvsem slovenskih akreditiranih kalibracijskih laboratorijev po zelo preciznem umerjanju elektronskih senzorjev pomika za merjenje dolžin do 150 mm, ki smo jo tekom zadnjih let zasledili v LTM.

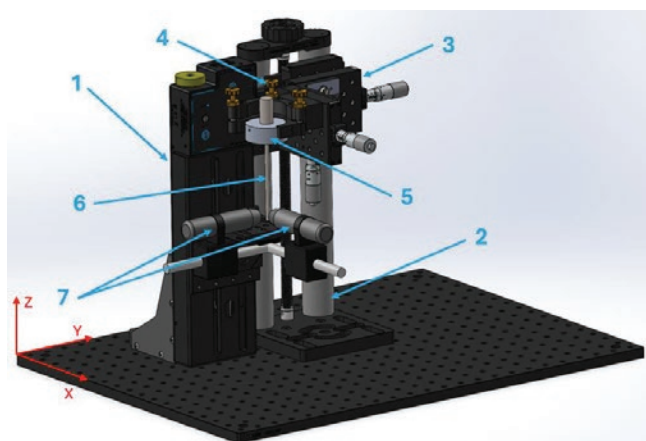
Po ugotovitvah [4] in pregledu trga smo prišli do zaključka, da komercialnega merilnega sistema za predvidene merilne naloge z ustrežno točnostjo na svetovnem trgu ni mogoče dobiti. Vsi vrhunski meroslovni inštituti, ki izvajajo tovrstna umerjanja, so v ta namen razvili lastne, unikatne merilne sisteme.

V prispevku je predstavljen razvoj unikatnega merilnega sistema namenjenega umerjanju preciznih senzorjev pomika z merilnim dosegom

do 150 mm, ki trenutno poteka v našem laboratoriju. Opisana je zasnova prototipnega sistema, ki temelji na izdelavi CAD modela, izbiri mehatskih komponent in dejanski postavitvi. V prispevku je posebna pozornost namenjena predstavitvi razvoja algoritma, ki s pomočjo metode strojnega vida omogoča natančno poravnavo merilne osi senzorja na os vodil translacijske postaje. V zaključku je predstavljen še referenčni senzor, ki je predviden za uporabo v merilnem sistemu, ter izzivi zagotavljanja njegove sledljivosti, s katerimi se soočamo.

2 ZASNOVA MERILNEGA SISTEMA

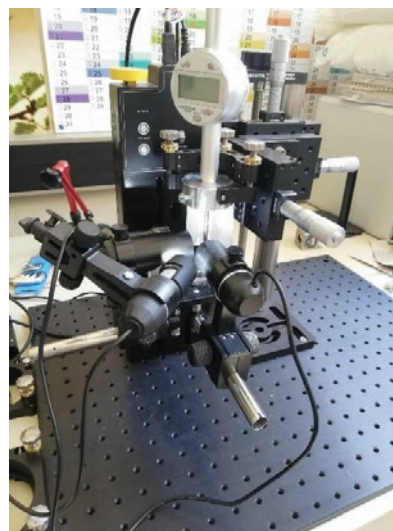
Delo smo začeli z izdelavo CAD modela prototipne konstrukcije merilnega sistema, ki ga prikazuje *slika 1*.



Slika 1: CAD model prototipne konstrukcije

Osnovo konstrukcije, predstavlja linearno pomična mikrometerska postaja s koračnim motorjem LTS150 (1) proizvajalca Thorlabs, Inc. [5], ki je vertikalno vpeta na osnovno ploščo. Vzporodno s postajo je postavljen vertikalni translacijski nosilec (2), na katerega je vpet mikropozicionirnik (3), ki omogoča mikrometersko translacijsko premikanje v treh oseh. Na slednjega je vpeto prijemalo (4), namenjeno izvajanju rotacije tipala v treh oseh ($\pm 5^\circ$). Vanj je vpet nosilec valjaste oblike (5) s skožnjo luknjo, v katerega s pomočjo pritrdilnega vijaka vpneemo tipalo (6), ki predstavlja predmet kalibracije. Na pomično postajo sta preko nosilcev vpeti dve kameri (7), njun namen je podrobneje predstavljen v poglavju 3.

Zamišljena procedura deluje tako, da senzor, ki ga želimo umeriti pritrđimo na umeritveno platformo, ki jo je preko pogonskega mehanizma (1) mogoče premikati v želenem območju umerjanja. Ko je senzor premaknjen, se zabeleži zaznan premik, istočasno pa se odčita vrednost referenčnega senzorja. Realno postavitev trenutne različice sistema prikazuje *slika 2*.



Slika 2: Realna postavitev prototipne konstrukcije

V konstrukcijo trenutno še ni implementiran laserski interferometer, ki se bo v merilnem sistemu uporabljal kot referenčni senzor. Slednji bo vpet soosno s senzorjem, ki ga kalibriramo, tako da bo zaznan premik meril z druge strani umeritvene platforme.

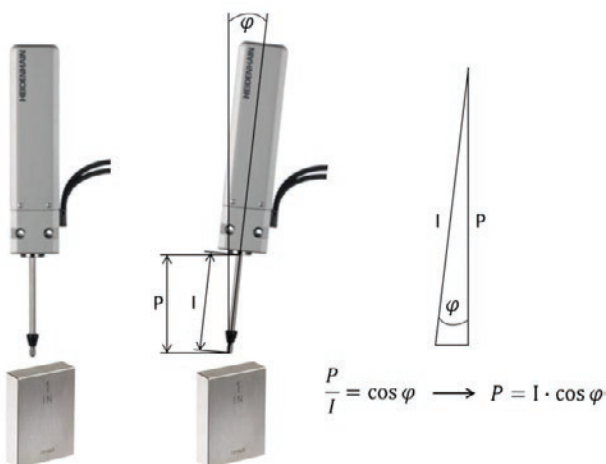
Sistem smo zasnovali tako, da se umerjanje izvaja v vertikalni smeri, saj sklepamo, da se tako izognemo pogreškom, do katerih bi prišlo zaradi povesa tipala. Prav tako je večina preciznih senzorjev namenjena merjenju v vertikalni smeri in v skladu s tem je priporočljivo, da se v enaki smeri izvaja tudi umerjanje.

3 RAZVOJ SISTEMA ZA VALIDACIJO KOSINUSNEGA POGREŠKA TIPALA

Precizni senzorji pomika lahko dandanes dosejajo točnosti tudi na podmikrometerski ravni. Zaradi dejstva, da je potrebno umerjanje izvajati na ravni, ki je vsaj 5 krat točnejša od senzorja, ki je predmet umerjana je bistvenega pomena, da pred tem identificiramo vsak sistematični

pogrešek meritve. Eden izmed slednjih je tudi kosinusni pogrešek tipala.

Problem kosinusnega pogreška je pogost izziv, s katerim se sooča večina študij, ki se ukvarjajo z izvajanjem preciznih meritev dolžin [6, 7]. Gre za sistematični pogrešek, ki se pojavi zaradi nepravilnosti osi merilnega instrumenta na merjeno površino. Na *sliki 3* je prikazano odstopanje, ki nastane zaradi kotnega zamika tipala. S simbolom I je označena izmerjena vrednost, s simbolom P pa prava vrednost merjene veličine. Razmerje med pravo in izmerjeno vrednostjo je enako kosinusu kota med njima, zato ta pogrešek imenujemo kosinusni pogrešek



Slika 3: Kosinusni pogrešek tipala

Glede na prikazan problem smo se odločili razviti metodo namenjeno redukciji kosinusnega pogreška tipala, ki je potrebna pred začetkom kalibracije. Sistem temelji na principu strojnega vida, s katerim ovrednotimo odstopanje osi tipala od osi linearne postaje. Za tehnologijo merjenja z uporabo strojnega vida smo se odločili zaradi njenih številnih prednosti, med katerimi so predvsem enostavnost uporabe, visoka stopnja natančnosti, brezkontakten pristop in relativno ugodna implementacija.

3.1 Izbira slikovnih senzorjev

Uporabili smo slikovna senzorja (*slika 4*) z resolucijo 2592x1944 tipa USB Digital Microscope, ki preko nastavljive optike omogočata 300-kratno povečavo. Kameri podpirata povezavo preko USB vmesnika kar

zagotavlja enostavno povezljivost in zajem slike v realnem času.



Slika 4: Uporabljen slikovni senzor

Dve kameri sta bili uporabljene z namenom, da s prvo izvajamo izravnavo tipala v x, z drugo pa v y smeri.

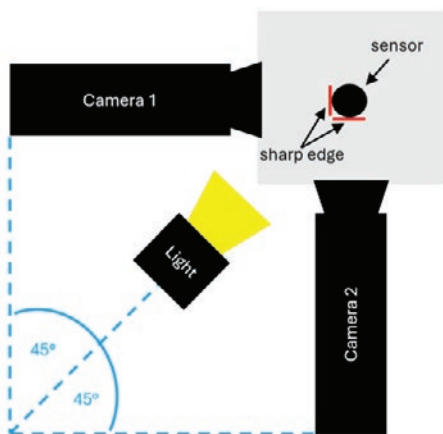
Za redukcijo kosinusnega pogreška tipala je potrebno os tipala poravnati z osjo premikanja linearnih vodil motorizirane postaje. V ta namen smo razvili dinamično metodo, ki poravnavo izvaja z uporabo dveh kamer, ki sta vpeti na delovno mizo motorizirane postaje, kot prikazujeta *sliki 1 in 2*. S takšnim vpetjem smo zagotovili, da kameri preko premikanja zajameta os linearnih vodil motorja. Pri izbiri kamer smo tako morali upoštevati dejstvo, da bosta le-ti vpeti na motorizirano postajo. Ključnega pomena je bilo, da uporabljene kameri s svojo težo ne presegeta dovoljene nosilnosti motorizirane postaje.

Ob vpetju smo izvedli fokusiranje obeh kamer. To smo storili s pomočjo fokusirnega sistema z ročnim nastavljanjem, ki je integriran v obe kameri. Fokusiranje izvedemo glede na rob tipala, ki ga želimo izravnati in ga izvajamo tako dolgo dokler vrednosti zajemanja roba ne odstopajo/nihajo za manj kot 0,3 piksla. Procesiranje slike izvajamo v okolju LabVIEW. Za doseg najnatančnejše zaznave roba tipala smo se odločili za procesiranje »grayscale« slike, ki nam omogoča zaznavanje roba z natančnostjo, ki je manjša od enega piksla

3.2 Izvedba osvetlitve in ozadja

Glavni cilj, ki smo ga želeli doseči z zastavljenim sistemom strojnega vida je, da ta čim boljše

zaznava rob tipala, saj celoten nadaljnji algoritem temelji na teh podatkih. Osvetlitev je bilo zato potrebno postaviti tako, da bo algoritem za iskanje roba najbolj točen in stabilen, to pa mora veljati za obe kameri hkrati. S poskusi smo prišli do zaključka, da je rob tipala v največjem kontrastu z ozadjem, če osvetlitev izvedemo pod kotom 45° glede na obe kameri, kot prikazuje *slika 5*. S takšno osvetlitvijo zagotovimo oster rob tipala, ki ga zaznata obe kameri. Pri kameri 1 je oster desni rob tipala, pri kameri 2 pa levi rob. Nasprotna robova sta zaradi takšne postavitve osvetlitve sicer zamegljena, vendar si takšen pristop lahko privoščimo, saj nas v našem primeru zanima le en rob tipala, ne pa njegova celotna širina.



Slika 5: Prikaz izvedbe osvetlitve

Osvetlitev smo izvedli z belo LED svetlobo, ki smo jo prav tako kot obe kameri vpeli na linearno pomično postajo. Vpetje smo izvedli na enaki višini kot kameri, za ozadje pa smo uporabili belo podlago, ki smo jo pritrdili pravokotno na nosilec (5). Z izvedeno kombinacijo osvetlitve in ozadja smo dosegli stabilnost zaznanega roba. Slednji ob mirovanju pomične postaje niha za manj kot 0,3 piksla.

3.3 Razvoj algoritma

Algoritem procesiranja slike je sestavljen iz dveh delov. S prvim delom se izvede validacija piksla obeh kamer, z drugim pa izravnava tipala.

Validacija velikosti piksla

Postopek izravnave se začne z validacijo piksla obeh kamer. To izvedemo z opazovanjem oz.

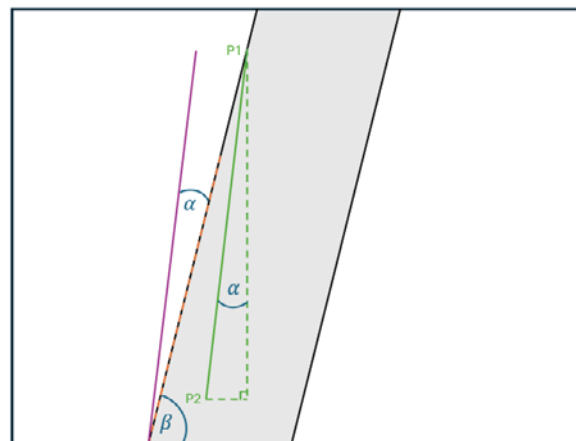
sledenjem (tracking) konice tipala. Najprej zabeležimo položaj konice na sliki, nato pa premaknemo translacijsko postajo, kar premakne tudi obe kameri. Na podlagi podatkov o premiku motorja in razliki v položaju konice pred in po premiku določimo velikost piksla.

Algoritem za izvedbo poravnave

Algoritem za izravnavo temelji na principu detekcije roba tipala, premikanju linearno pomične postaje in izvedbi matematičnih operacij na podlagi pridobljenih podatkov robov.

Postopek se začne z branjem vrednosti roba na skrajnem spodnjem delu tipala. Nadaljujemo s premikom motorja do skrajnega zgornjega dela tipala, kjer ponovno preberemo vrednosti roba tipala. Ko govorimo o vrednosti roba imamo v mislih podatke, kje v sliki se nahaja rob tipala. Govorimo torej o vrednosti pikslov, ki opisujejo pozicijo tipala v sliki. Ta se bo v primeru, da tipalo ni idealno poravnano pomikala levo ali desno v sliki. Po izvedbi obeh odtipkov izračunamo kot *alfa*, ki določa za koliko stopinj tipalo odstopa od zelene, idealne pozicije.

Med izvajanjem procesiranja slike prav tako zajemamo kot *beta*, ki opisuje odstopanje tipala od vertikale v sliki, torej za koliko stopinj je tipalo zamaknjeno v sami sliki. Vsota kotov *alfa* in *beta* nam poda idealni kot, pod katerim se mora nahajati tipalo v sliki, da bo to poravnano na os premikanja linearne postaje. Predstavljeni koti zajemanja so prikazani na *sliki 6*.



Slika 1: Kot *alfa* + kot *beta* = idealni kot poravnave

Z razvitim algoritmom na sliko iz spodnjega konca tipala sproti izrisujemo idealni kot (vijolična barva), kar nam je v pomoč pri izvedbi poravnave. Samo poravnavo izvajamo preko pozicionirnih vijakov prijemala, ki nam omogočajo rotacijo tipala. Z vijaki manipuliramo tako dolgo, dokler ni rob tipala v sliki pod izračunanim idealnim kotom, torej, da se prekriva z vijolično črto. Po izvedbi poravnave ponovno preberemo vrednosti roba na obeh koncih tipala. V primeru, da je bila poravnava uspešna bi morala biti vrednost kota *alfa* minimalna.

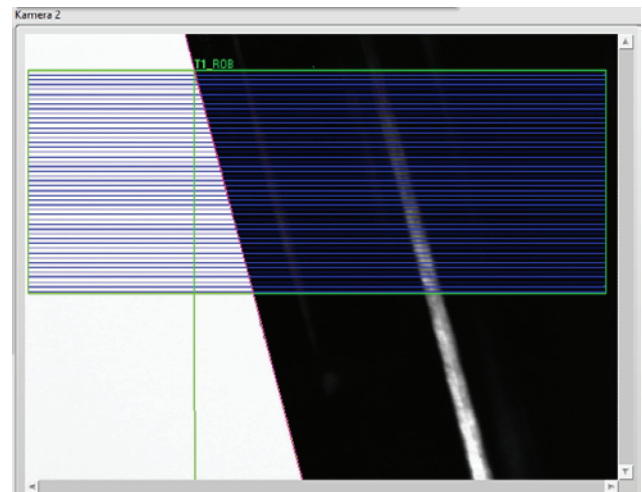
3.3 Rezultati razvitega algoritma

Ugotovili smo, da smo zmožni z uporabo algoritma, z enkratnim branjem vrednosti robov, tipalo poravnati na 10 μm natančno na razdalji 20 mm. Slednje predstavlja mejno vrednost, ki jo lahko dosežemo z uporabo algoritma. Boljše rezultate je z algoritmom težko doseči, saj so ti odvisni od kakovosti zaznavanja robov.

Za izvedbo boljše poravnave (znotraj 1 piksela) je potrebno izvesti ponovno tipanje zgornjega in spodnjega roba tipala ter opazovati razliko v pikslih, ki se pojavi. Razliko je potrebno nato zmanjšati z uporabo pozicionirnih vijakov in izvesti ponovno branje vrednosti roba. Postopek ponavljamo dokler ne dosežemo minimalne razlike. Število potrebnih ponovitev tipanja za dosego optimalne poravnave je odvisno predvsem od izkušenj uporabnika in natančnosti njegovega dela.

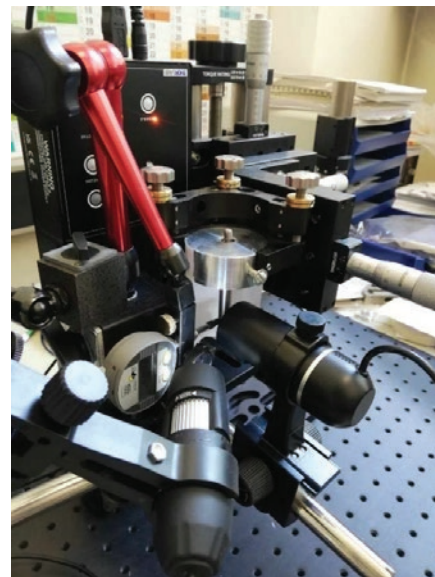
Na *sliki 7* je pod povečavo prikazan rob tipala, kot ga zaznava ena izmed kamer v programskem okolju LabVIEW, v katerem izvajamo vodenje sistema in analizo podatkov.

Za oceno učinkovitosti in natančnosti delovanja razvitega sistema smo izvedli primerjalni test poravnave. V tem testu smo primerjali rezultate, pridobljene z našim sistemom, z rezultati, pridobljenimi z uporabo uveljavljene metode poravnave z uporabo merilne urice, ki jo trenutno izvajamo v našem laboratoriju.



Slika 7: Prikaz slike z ene izmed kamer

Za izvedbo poskusa smo namesto tipala oz. senzorja, ki predstavlja predmet poravnave uporabili referenčni trn, prikazan na *sliki 8*. Za takšen pristop smo se odločili, ker referenčni trn napram senzorjem pomika ne vsebuje vodil in posledično zračnosti v vodilih, ki bi lahko vplivale na rezultat same meritve. Uporabili smo referenčni trn dolžine 200 mm in premera 12 mm.



Slika 8: Meritev odstopanja z merilno urico in kamero na referenčnem trnu

Za dokaz delovanja algoritma smo najprej izvedli poravnavo s kamero in izmerili odstopanje, ki ga je pokazala merilna urica. Nato smo poravnavo izvedli z urico in izmerili odstopanje kamere. V primeru, da razvit algoritem deluje pravilno pričakujemo, da bosta pridobljeni odstopanji izmerjeni z merilno urico in kamero enaki.

S kamero smo uspeli tipalo poravnati na manj kot 0,5 piksla, kar je pri velikosti piksla 1,68 μm znašalo manj kot 0,84 μm . Če ta podatek zaokrožimo lahko trdimo, da smo tipalo s kamero poravnali znotraj 1 μm . Izvedli smo 20 meritev. Povprečna vrednost odstopanj je znašala 20,2 μm .

Nadaljevali smo z izvedbo poravnave preko merilne urice in meritvijo odstopanja, ki ga je pokazala kamera. Tipalo smo z urico uspeli poravnati na ($< 1 \mu\text{m}$). Prav tako smo izvedli 20 meritev, njihova povprečna vrednost pa je znašala 20,0 μm .

Zaključili smo, da razvit sistem s kamero deluje pravilno, saj so odstopanja izmerjena z obema metodama zelo primerljiva. Po izvedenih 20 meritvah povprečna vrednost odstopanja izmerjenega z urico znaša 20,2 μm , s kamero pa 21,0 μm . Po pričakovanjih je nekoliko večje odstopanje, ki smo ga izmerili s kamero, kar je najverjetneje posledica dejstva, da z merilno urico nismo izvedli popolne poravnave znotraj 1 μm .

4 IZBIRA REFERENČNEGA SENZORJA

Kot referenčni senzor imamo v sistemu namen uporabiti diodni laserski interferometer, ki temelji na infrardeči svetlobi (1545 ± 15) nm in smo ga v LTM pridobili v okviru projekta RIUM.

Gre za novo, še neveljavljeno tehnologijo za katero »še« ni možno zagotoviti sledljivosti na primarni etalon s frekvenčnim umerjanjem. Trenutno takšnega umerjanja ne ponuja noben nacionalni inštitut na svetu. Zaradi cilja, da laser v merilnem sistemu predstavlja referenčni etalon, v LTM poteka raziskava, v kateri želimo sledljivost diodnemu interferometru zagotoviti preko metode primerjalnih laserskih meritev.

5 SKLEP

V prispevku je predstavljen razvoj unikatnega merilnega sistema namenjenega umerjanju preciznih senzorjev pomika z merilnim dosegom do 150 mm, ki trenutno poteka v našem laboratoriju. Posebna pozornost je namenjena predstavitvi razvoja algoritma, ki s pomočjo metode strojnega vida omogoča natančno poravnavo merilne osi senzorja na os vodil

translacijske postaje. V nadaljevanju raziskave bo pozornost usmerjena v podrobno analizo vseh virov pogreškov merilne negotovosti v posameznih komponentah ter določitev ustreznih metod za njihovo kompenzacijo.

Opisan razvoj predstavlja pomemben znanstveni in aplikativni prispevek na področju meroslovja in zadovoljevanja potreb napredne slovenske industrije po sledljivosti najpreciznejših instrumentov za merjenje dimenzij.

Viri:

- [1] Lipus, L.C., Acko B., Tompa J.: Experimental determination of influences on a gauge block's stack length, *Adv. Prod. Eng. Manag.*, vol. 17, no. 3, pp. 339–349, 2022
- [2] Haitjema H., Kotte G. J.: Dynamic probe calibration up to 10 kHz using laser interferometry, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 21, no. 3, pp. 107–111, 1997
- [3] Ma Z., Choi J., Sohn H.: Structural displacement sensing techniques for civil infrastructure: A review, *J. Infrastruct. Intell. Resil.*, vol. 2, no. 3, p. 100041, 2023
- [4] Hermann G., Rudas I.: Calibration system for tactile measuring probes, *SISY 2015 - IEEE 13th Int. Symp. Intell. Syst. Informatics, Proc.*, pp. 145–148, 2015
- [5] Thorlabs, LTS150 - 150 mm Translation Stage (<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LTS150>)
- [6] Castro M., Iglesias L., Sánchez J. A.: Vehicle speed measurement: Cosine error correction, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 45, no. 8, pp. 2128–2134, 2012
- [7] Guo X., Han J., Lee C. B.: Cosine Error Elimination Method for One-Dimensional Convex and Concave Surface Profile Measurements, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 142, no. 4, pp. 1–9, 2020

VPLIV ORIENTACIJE OBDELOVANCA NA PROCES PLAZEMSKEGA ELEKTROLITSKEGA POLIRANJA

Jithinraj EDAKLAVAN KOROTH, Joško VALENTINČIČ
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

IZVLEČEK

Plazemsko elektrolitsko poliranje (PEP) je učinkovita metoda poliranja kovinskih izdelkov kompleksnih oblik, še posebej primerna za naknadno obdelavo 3D-natisnjenih izdelkov, saj zagotavlja gladke in relativno refleksivne površine. Odnášanje materiala in posledična hrapavost površine na različnih mestih na poliranem vzorcu je odvisna od lokalne gostote toka. V tem prispevku ugotavljamo vpliv orientacije obdelovanca znotraj elektrolitske kopeli na kvaliteto površine poliranega nerjavečega jekla. Rezultati kažejo, da sta orientaciji 60° in 90° glede na gladino elektrolita zagotovili najboljšo površinsko obdelavo tako za ravne kot valjaste vzorce. Obdelava je bila dokaj enakomerna na vseh površinah. Valjasti vzorci polirani pri 60° so dosegli najbolj enakomerno kvaliteto površine zaradi ugodnega kroženja elektrolita, medtem ko je ravne najboljše polirati v orientaciji od 60° in 90°.

1 UVOD

Plazemsko elektrolitsko poliranje (PEP) je postopek končne obdelave površin za doseganje visokega sijaja, ki združuje običajno elektrolitsko poliranje z odnašanjem materiala s pomočjo plazme [1]. Obdelovanec (anoda) je potopljen v šibek elektrolit na vodni osnovi z dodatkom ustrezne soli. Rezervoar za elektrolit lahko služi kot katoda ali pa je katoda nameščena v rezervoarju. Za zagotovitev tvorbe plazme in učinkovitega poliranja je površina katode vsaj desetkrat večja od površine anode. Napetosti se gibljejo od 180 do 400 V, odvisno od materiala in prevodnost elektrolita je med 3 S/m in 40 S/m [2]. Pred poliranjem elektrolit segrejemo na vnaprej primerno temperaturo glede na material obdelovanca in elektrolit. Med obdelavo nastanejo okoli obdelovanca mehurčki, ki ustvarjajo plinsko parno ovojnico, ki deluje kot navidezna katoda in omogoča tvorbo plazme. Gibanje mehurčkov in spreminjanje debeline ovojnice vplivata na odnašanje materiala in kvaliteto površine, kar je tudi razlog, da smo raziskali vpliv orientacije obdelovanca v rezervoarju homogenost obdelave.

2 METODOLOGIJA DELA

Preizkuse smo izvedli na napravi PEPTopus moči 80 kVA PeP plant (AMTopus, GmbH, Nemčija), ki zagotavlja 150 A pri 380 V.

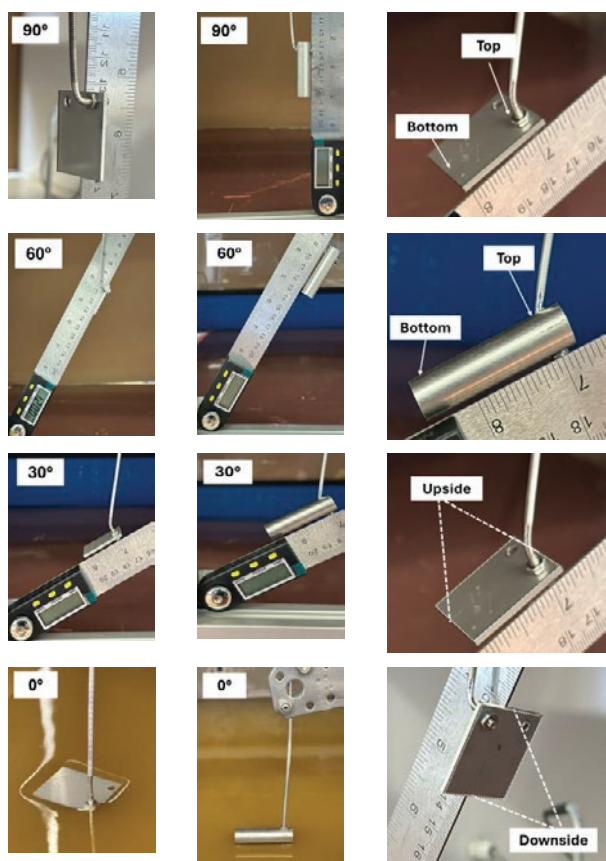
Vzorci so bili v obliki plošč in valjaste palice iz nerjavečega jekla. Ravni vzorci (27x30x2 mm) in valjasti vzorci (premer 12 mm, dolžina 45 mm) so bili polirani v štirih orientacijah (0°, 30°, 60°, 90°) (slika 1a) 2 in 4 minute. Plan eksperimenta je prikazan v tabeli 1. Uporabljen elektrolit je bila vodna raztopina amonijevega sulfata, katere pH vrednost je bila naravnana z dodajanjem žveplove kisline. Temperatura elektrolita je bila 75 °C in električna napetost 320 V.

Tabela 1: Plan eksperimentov za ravne in valjaste vzorce

Številka vzorca	Orientacija (glede na površino elektrolita v °)	Čas poliranja (min.)
1	90	2
2	90	4
3	60	2
4	60	4
5	30	2
6	30	4
7	0	2
8	0	4

Glede na položaj vzorca med poliranjem smo po obdelavi na vzorcih merili hrapavost na zgornji in spodnji površini in sicer na dveh mestih: zgoraj in spodaj (Slika 1b).

Hrapavost vzorcev pred in po poliranju smo izmerili z merilnikom hrapavosti MarSurf PS10, dimenzije pa z digitalnim mikrometrom BGS technic 8427. S tehtanjem pred in po obdelavi (tehtnica KERN 572) smo izmerili odvzem materiala. Debelina vzorcev je bila merjena približno 10 mm od zgornjega in spodnjega roba. Refleksivnosti površin smo merili z merilnikom refleksivnosti, angl. *glossmetre* (Zehntner, Nemčija).



(a) orientacija vzorcev med poliranjem (b) poimenovanje lokacije meritev na vzorcih

Slika 1: Vzorci (plošče in palice) med poliranjem

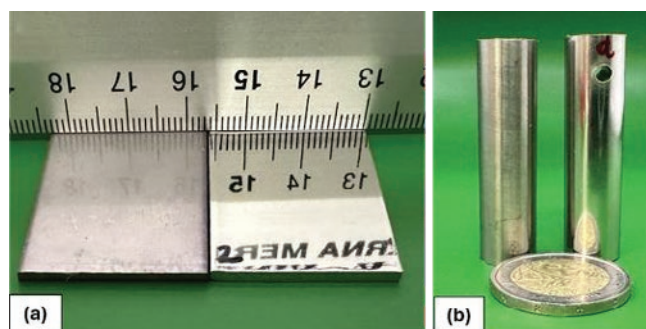
3 REZULTATI IN DISKUSIJA

S postopkom PEP smo znatno izboljšali hrapavost površin na večini vzorcev. Rezultati se razlikujejo glede na geometrijo in orientacijo vzorca. V nadaljevanju podrobno analiziramo hrapavost površine, hitrost odnašanja materiala, zmanjšanje debeline in sijaj površine.

3.1 Analiza hrapavosti površine

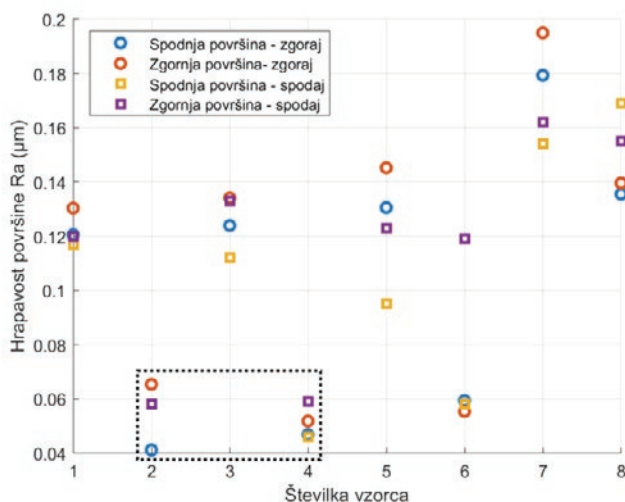
Vizualni pregled vzorcev pred in po obdelavi kaže bistveno izboljšanje kvalitete površine. Kot je prikazano na sliki 2, so vzorci prešli iz mat, hrapave površine v zrcalno površino, kar kaže na zmanjšanje hrapavosti površine.

Slika 3 prikazuje parametra hrapavosti R_a in R_z hrapavosti. Pred obdelavo imajo ravni vzorci hrapavost $R_a=0,23 \mu\text{m}$, $R_z=1,838 \mu\text{m}$ in valjasti vzorci $R_a=0,426 \mu\text{m}$, $R_z=3,325 \mu\text{m}$. Po obdelavi je znatna razlika med zgornjo in spodnjo površino, za nekatere orientacije tudi med »zgoraj« in »spodaj« na isti površini.

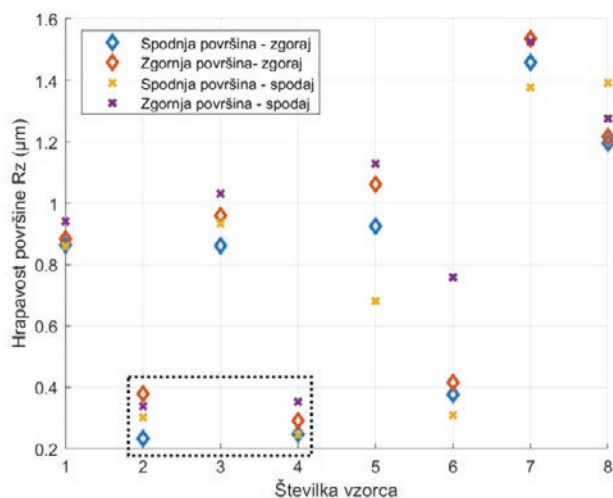


Slika 2: Izgled površine pred in po 4 min obdelave pri orientaciji 60°; (a) ravni vzorci (b) valjasti vzorci

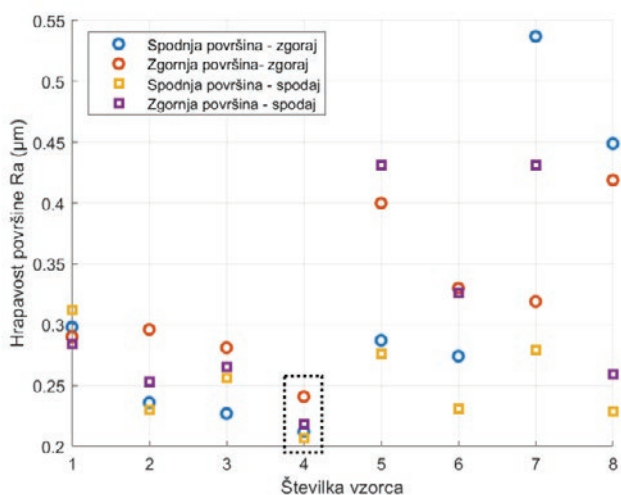
Najboljšo hrapavost na ravnih vzorcih smo dosegli pri orientacijah 90° in 60°. Na sliki 3 so te vrednosti obkrožene s črtkano črto. združevanje vrednosti R_a in R_z po površini pri teh orientacijah, kar kaže na zelo enakomerno poliranje. Za valjaste vzorce je orientacija 60° povzročila najboljšo končno obdelavo površine po poliranju. Porazdelitev vrednosti hrapavosti po površinah prav tako kaže, da če orientacija vzorca ne omogoča postopne spremembe površine, ki pospešuje gibanje pare in elektrolita, so razpršene in visoko neenakomerne površine.



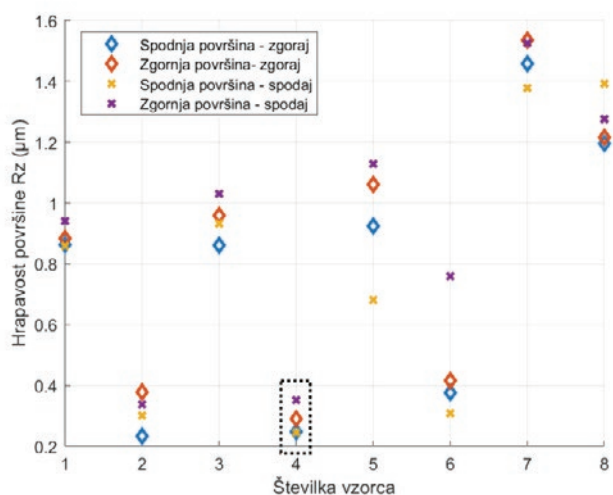
(a) Parameter hrapavosti Ra na ravnih vzorcih



(b) Parameter hrapavosti Rz na ravnih vzorcih



(c) Parameter hrapavosti Ra na valjastih vzorcih



(d) Parameter hrapavosti Rz na valjastih vzorcih

Slika 3: Izmerjene hrapavosti površin po obdelavi

3.2 Hitrost odnašanja materiala (MRR)

Rezultati kažejo, da je v primeru ravnih vzorcev najvišji MRR dosežen pri orientaciji 90° , medtem ko smo na valjastih vzorcih dosegli najhitrejšo odnašanje pri orientaciji 60° .

Medtem ko je pri valjastih vzorcih višjo MRR spremlja boljša površinska hrapavost, pri ravnih vzorcih to ni vedno tako. Orientacija 60° z nižjim MRR je na nekaterih delih površine dala primerljive ali hrapavosti površine. To kaže, da je najboljša orientacija vzorca v resnici odvisna od želenega cilja obdelave, čim hitrejšo odnašanje materiala ali boljšo hrapavost površine. Enak trend med MRR in hrapavostjo površine na

valjastih vzorcih je verjetno posledica enakomernejšega kroženja elektrolita zaradi oblike vzorca, kar vodi do boljše hrapavosti površine.

Tabela 2: MRR za raven in valjast vzorec pri različnih pogojih poliranja

Raven vzorec			Valjast vzorec		
Št.	Čas (min)	MRR (g/min)	Št.	Čas (min)	MRR (g/min)
1	2	0,15	1	2	0,04
2	4	0,16	2	4	0,04
3	2	0,04	3	2	0,18
4	4	0,04	4	4	0,17
5	2	0,04	5	2	0,04
6	4	0,04	6	4	0,04
7	2	0,03	7	2	0,04
8	4	0,03	8	4	0,04

3.3 Zmanjšanje debeline

Valjasti vzorci so podvrženi bolj enakomernemu zmanjšanju premera (d) med zgornjo in spodnjo površino v primerjavi z zmanjšanjem debeline (Δ) na ravnih vzorcih (Tabela 3). Ta ugotovitev podkrepi zgornje ugibanje, da valjaste oblike spodbujajo boljši pretok elektrolita in porazdelitev električnega po površini vzorca, kar vodi do bolj enakomernega odnašanja materiala. Ravni vzorci kažejo večje zmanjšanje debeline na spodnji površini, vendar razlike niso velike.

3.4 Refleksivnost

Refleksivnosti so bile izmerjene pri vpadnem kotu svetlobe 20° , kar je primerno za površine z visokim sijajem. Pred poliranjem so ravni vzorci

imeli vrednosti GU 94 na zgornji in 79,2 na spodnji površini. Kot je bilo pričakovano, so se z daljšim časom poliranja vrednosti sijaja povečale (tabela 4), najmanjše izboljšanje pa je bilo opaziti pri orientaciji poliranja 0° . Razlika med lokacijo »zgoraj« in »spodaj« je verjetno posledica različne debeline plinsko parne ovojnice. Plinsko parni mehurčki namreč potujejo navzgor in zgoraj se tvori debelejša ovojnica, ki ima večjo električno upornost, posledično je tam gostota toka nižja in zato je tam tudi manjša hitrost odnašanja materiala in manj stika površine stika s svežim elektrolitom. Če primerjamo zgornjo in spodnjo površino je na splošno spodnja površina bolj reflektivna. To je verjetno posledica boljše izpostavljenosti elektrolitu in manj motenj v plinsko parnem ovoju.

Tabela 3: Zmanjšanje debeline in premera ravnih in valjastih vzorcev

Št.	Zmanjšanje debeline (mm)		Zmanjšanje premera (mm)	
	Spodaj	Vrh	Spodaj	Vrh
Št.	Δ	Δ	d	d
1	0,01	0,01	0,02	0,01
2	0,02	0,02	0,03	0,02
3	0,02	0,01	0,02	0,02
4	0,02	0,01	0,02	0,03
5	0,02	0,02	0,01	0,01
6	0,02	0,01	0,02	0,02
7	0,01	0,01	0,01	0,01
8	0,01	0,02	0,02	0,02

Tabela 4: Meritve refleksivnosti (v GU) pri vpadnem kotu 20° za ravne vzorce

Št.	Čas (min)	Orientacija (°)	Zgornja površina		Spodnja površina	
			spodaj	zgoraj	spodaj	zgoraj
1	2	90	479,9	308,7	614,3	460,6
2	4	90	1131,8	936,4	1071,4	994,2
3	2	60	737,7	449,1	820,0	618,6
4	4	60	1130,6	716,9	1104,8	929,3
5	2	30	598,3	449,5	718,7	480,8
6	4	30	1067,7	657,1	1093,0	803,3
7	2	0	232,6	208,5	149,0	102,3
8	4	0	337,5	225,5	198,9	274,1

4 SKLEP

Ta študija je pokazala pomemben vpliv orientacije vzorca na odstranjevanje materiala in kakovost površine med postopkom PEP. Podajamo sledeče ugotovitve:

- Geometrija in orientacija vzorca pomembno vplivata na hrapavost in refleksivnost površine ter MRR. Učinkovito obdelavo in izboljšano hrapavost površine smo dosegli tako na ravnih tudi na valjastih vzorcih orientiranih pod kotom 60° in 90°.
- Pri ravnih vzorcih smo pri 60° in 90° zagotovili gladke površine in izboljšali enakomernost odnašanja, medtem ko smo pri valjastih vzorcih dosegli najboljše rezultate pri orientaciji 60°, zelo verjetno zaradi optimiziranega pretoka elektrolita in porazdelitve električnega toka.
- Bolj enakomerno zmanjšanje debeline oz. premera smo dosegli na valjastih vzorcih, kar je posledica enakomernega odnašanja materiala po celotni površini vzorca. Tudi na ravnih vzorcih opažamo dokaj enakomerno odnašanje materiala, še posebej »spodaj«. Opazen je le majhen vpliv orientacije.

- Največjo refleksivnost opazimo pri ravnih in valjastih vzorcih poliranih pri orientaciji 60° in 90°. Na lokacijah »spodaj« so izmerili večjo refleksivnost zaradi boljše izpostavljenosti elektrolitu. Pri orientaciji 0° smo dosegli žijo refleksivnost zaradi zmanjšane učinkovitosti poliranja.

V prihodnje bomo raziskali poliranje bolj zapletenih oblik in uporabili prisilni pretok elektrolita, da bi povečali učinkovitost poliranja za širši nabor geometrij vzorcev.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo za dragoceno pomoč Dipl.-Ing. Toniju Böttgerju s Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Financiranje

Avtorji se zahvaljujejo podpori Evropske raziskovalne agencije v okviru Obzorja Evropa: Širjenje sodelovanja in širjenje odličnosti (SEAMAC, 101079481) in Agencije za raziskovalno dejavnost RS v okviru Raziskovalnega programa Inovativni proizvodni sistemi in procesi, Grant P2-0248.

Viri:

- [1] K. Nestler, F. Böttger-Hiller, W. Adamitzki, G. Glowa, H. Zeidler, a A. Schubert, "Plasma Electrolytic Polishing – An Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range", *Procedia CIRP*, roč. 42, s. 503–507, 2016
- [2] H. Zeidler in F. Böttger - Hiller, »Plazemsko - elektrolitsko poliranje kot tehnologija naknadne obdelave za aditivno izdelane dele«, *Chemie Ingenieur Technik*, roč. 94, č. 7, s. 1024–1029, jul. 2022

MBJ TEHNOLOGIJA V INDUSTRIJI: LAŽJI IN NAPREDNEJŠI PROPORCIONALNI POTNI VENTIL

David HOMAR¹, Jan BARTOLJ², Domen STRENČAN¹, Franc MAJDIČ²,
Jernej LOKOVŠEK¹

¹Solid World d. o. o.

²Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

IZVLEČEK

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je bil v Laboratoriju za fluidno tehniko (LFT) razvit nov proporcionalni potni ventil, zasnovan z mislijo na funkcionalno integracijo in aditivno izdelavo. Avtorja rešitve, Jan Bartolj in prof. dr. Franc Majdič, sta v konstrukcijo vključila integrirane pretočne kanale, ki izboljšujejo hidravlično učinkovitost ter omogočajo znatno zmanjšanje mase in števila sestavnih delov. Ventil je bil izdelan s tehnologijo Metal Binder Jetting (MBJ), ki omogoča tisk kompleksnih kovinskih geometrij brez podpor in s tem večjo svobodo pri načrtovanju. Tisk je izvedlo podjetje Solid World d.o.o. Rezultat sodelovanja med raziskovalno ustanovo in industrijo je delujoč prototip, ki odpira nove možnosti za razvoj kompaktnjših, lažjih in energetsko učinkovitih hidravličnih komponent.

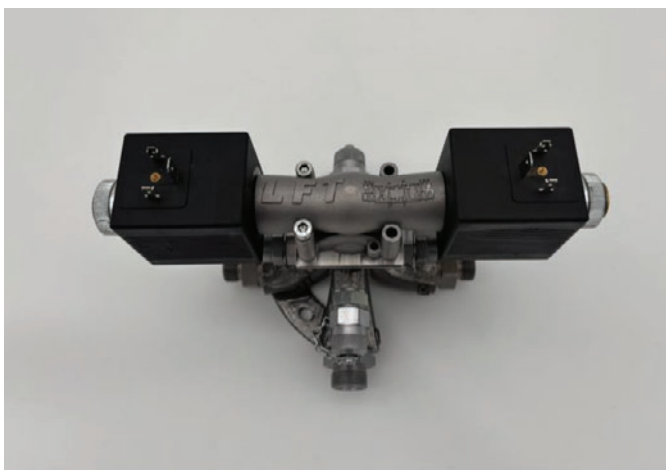
1 UVOD

Sodobna industrija, zlasti na področju mobilne in vodne hidravlike, se vse bolj usmerja k energetski učinkovitosti, zmanjševanju mase komponent ter izboljšanju pretočnih karakteristik. Klasične tehnologije, kot so CNC obdelava iz polnega materiala ali tlačno litje, pogosto predstavljajo omejitvev pri kompleksnejših geometrijah ali zahtevah po večji integraciji funkcij.

Aditivna proizvodnja kovin, zlasti tehnologija Metal Binder Jetting (MBJ), ponuja priložnost za konstrukcijsko svobodo, hitrejši razvoj in boljše optimizacijo mehanskih ter pretočnih lastnosti. V tem članku predstavljamo razvoj proporcionalnega potnega ventila (slika 1), ki je bil v celoti zasnovan in izdelan z uporabo MBJ tehnologije.

2 TEHNOLOGIJA MBJ

Metal Binder Jetting (MBJ) je aditivna tehnologija za kovine, ki združuje visoko produktivnost z izjemno oblikovno svobodo in primernostjo za serijsko izdelavo. Proces temelji na nanašanju kovinskega prahu v tankih plasteh, vezavi želenih delov s pomočjo tekočega veziva in kasnejšem sintranju za utrditev materiala. Tehnologija se je razvila kot nadaljevanje znanj iz injekcijskega brizganja kovinskih prahov (ang. Metal Injection Molding – MIM), pri čemer uporablja podobne prahove in sintranje, a brez potrebe po brizganju v kalupe.



Slika 1: 3D-tiskani proporcionalni ventil – pogled od zgoraj

2.1 Procesni koraki MBJ

Priprava materiala: uporablja se sferični kovinski prah z granulacijo 15–45 µm. V tem projektu je bil uporabljen material 17-4 PH (EN 1.4542 / X5CrNiCuNb16-4) – nerjavno jeklo z dobro trdnostjo in korozijsko odpornostjo, združljivo s sintranjem.

Tiskanje: prah se nanaša v plasteh debeline 50–100 µm. Inkjet glava selektivno nanese tekoče vezivo na območja tiskanega modela.

Utrjevanje zelenih kosov: po tiskanju grejo kosi v postopek toplotne utrditve (crosslink), kjer se vezivo mehansko in kemično stabilizira pri temperaturi 170 °C. To omogoči varno manipulacijo z zelenimi deli.

Depowdering (razpraševanje): odvečna količina prahu, ki ni bila vezana z vezivom, se ročno odstrani s pomočjo komprimiranega zraka, čopičev in krtačk. Ta postopek omogoča nežno čiščenje tudi kompleksnih geometrij brez poškodb. Pri MBJ postopku se več kot 98 % nesprijetega prahu preseje in ponovno uporabi v naslednjih ciklih tiskanja. Ta visoka stopnja ponovne uporabe bistveno prispeva k materialni učinkovitosti in zmanjšanju stroškov proizvodnje.

Termični debinding in sintranje: odstranjevanje veziva in sintranje potekata zaporedno v isti peči. Najprej se vezivo termično razgradi (debinding), nato se kovinski delci sintrajo pri temperaturi do 1350 °C. Končna gostota dosega nad 99 % teoretične gostote.



Slika 2: Stroji za postopek MBJ (od leve proti desni): sušilec za aktivacijo veziva, mešalec prahu, 3D tiskalnik, peč za sintranje, enota za razpraševanje

2.2 Primerjava z drugimi tehnologijami

MBJ se pogosto primerja z drugimi kovinskimi AM tehnologijami, zlasti s selektivnim laserskim taljenjem (SLM).

SLM ponuja boljšo natančnost in trdnost za zelo obremenjene dele, vendar je počasnejši, dražji in zahteva odstranitev podpor. MBJ pa je bolj primeren za izdelavo več kosov hkrati, z manj omejitvami pri geometriji in boljšo učinkovitostjo v serijah. V tabeli 1 so prikazane razlike med tehnologijo MBJ in tehnologijo SLM.

Tabela 1: Primerjava tehnologije MBJ in SLM

Lastnost	MBJ	SLM
<i>Vir energije</i>	brez (vezivo + sintranje)	laser
<i>Hitrost</i>	zelo visoka	počasnejša (točkovno taljenje)
<i>Podporne strukture</i>	niso potrebne	obvezne
<i>Napetosti v materialu</i>	zelo nizke	visoke (toplotni gradienti)
<i>Površinska hrapavost</i>	mat, fina	bolj groba
<i>Mehanske lastnosti</i>	primerljive z MIM	zelo dobre, odvisno od nastavitvev
<i>Priporočena uporaba</i>	serijska proizvodnja, orodja, funkcionalni prototipi	deli visoke natančnosti ali kompleksne notranjosti

2.3 Materiali in uporaba

Najpogosteje uporabljeni materiali v MBJ so: 17-4 PH (nerjavno jeklo) – kombinacija trdnosti in korozijske odpornosti,

316L (avstenitno jeklo) – za biomedicinske in prehranske aplikacije,

H13 (orodno jeklo) – za tlačna orodja,

Inconel 625/718 – za visoko temperaturne aplikacije.

MBJ je zaradi možnosti tiskanja več kosov hkrati, brez potreb po podpornih strukturah in s konkurenčnimi materiali, primeren za uporabo v različnih industrijah, kot so recimo: avtomobilska, orodjarska in hidravlična industriji.

2.4 MBJ v kontekstu razvoja ventila

V okviru tega projekta je bila tehnologija MBJ uporabljena za izdelavo proporcionalnega ventila, ki vključuje kompleksne notranje kanale in funkcionalno optimizirano obliko ohišja. Ključna prednost MBJ je bila možnost:

- neposrednega tiskanja toroidnih komor brez podpor,
- konsolidacije več komponent v en sam funkcionalen kos,
- znatnega zmanjšanja mase in proizvodnega časa.

Tisk brez podpornih struktur je omogočil uporabo topološko optimiziranih oblik, ki z drugimi tehnologijami (npr. CNC) ne bi bile izvedljive ali bi bile časovno in stroškovno neučinkovite.

3 RAZVOJ VENTILA

Razviti proporcionalni ventil (4/3) je bil dimenzijsko skladen s standardom CETOP 6 in ISO 4401. Ključna cilja sta bila zmanjšanje mase in izboljšanje pretočnih lastnosti ob enaki funkcionalnosti.

Za notranjo geometrijo so bile uporabljene toroidne komore, povezane z elipsastimi prehodi (slika 3), ki zagotavljajo nizek tlačni padec in zmanjšujejo turbulenco.



Slika 3: Prerez 3D natisnjene proporcionalnega ventila

Zunanja geometrija je bila topološko optimizirana z numeričnimi metodami (FEM),

kar je omogočilo zmanjšanje mase brez kompromisov pri mehanski stabilnosti (slika 4).



Slika 4: 3D-tiskani proporcionalni ventil – pogled od zgoraj

Stene ohišja so bile definirane s konstantno debelino 2,8 mm, konstrukcija pa je bila prilagojena za tisk brez podpor.

4 PRIPRAVA ZA TISK

Ventil je bil tiskan iz materiala 17-4 PH (EN 1.4542 / X5CrNiCuNb16-4). Tiskanje je potekalo brez podpor, kar je omogočilo krajši čas priprave in lažjo naknadno obdelavo.

Po sintranju je bil ventil peskan s steklenimi perlicami velikosti 600 μm , kar je zagotovilo enakomerno površinsko strukturo.

Sledila je mehanska obdelava:

- vrtanje priključkov,
- vrezovanje navojev,
- poravnava vpenjalnih ploskev,
- honanje drsnih površin (toleranca $\pm 3 \mu\text{m}$).

Tiskalni čas za en ventil: približno 5 ur.

5 NUMERIČNE ANALIZE

Numerične analize so bile razdeljene na FEA in CFD simulacije. Prva je potrdila mehansko ustreznost, druga pa hidravlični odziv ventila v različnih pogojih pretok

5.1 FEA analiza

Uporabili smo tetraedrične elemente drugega reda. Maksimalne napetosti so znašale 240 MPa (pod mejo tečenja), pomiki drsnih ploskev so znašali $\pm 5 \mu\text{m}$, kar je bilo znotraj dovoljenih toleranc.

5.2 CFD analiza

Simulirani pretoki: 10, 30, 50, 80 l/min.

Δp pri 50 l/min: MBJ = 45 bar, klasični = 75 bar.

Geometrija kanala je bila optimizirana, reakcijski moment na bat je bil zanemarljiv (τ moment odpravljen z optimizacijo P-kanala).

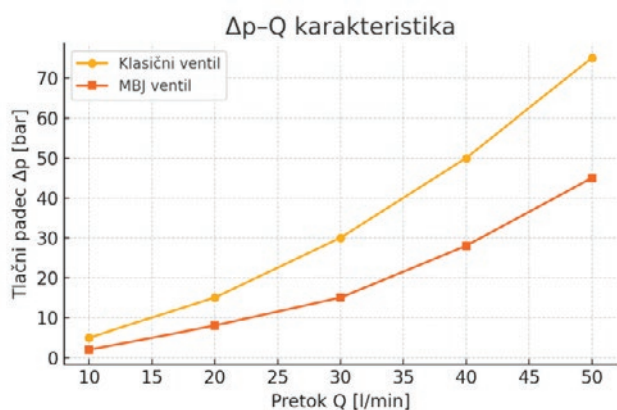
6 EKSPERIMENTALNE MERITVE

Testi so potekali pri tlaku 300 bar. Puščanje je bilo v dovoljenih mejah. Δp - Q karakteristike so bile potrjene z eksperimentalnim grafom (slika 5).

Masa MBJ ventila: 0,38 kg, klasičnega: 1,14 kg. Δp razlika pri 50 l/min: 30 barov. Tiskalni čas: 5 ur/kos.

Tabela 2: Rezultati meritev

Meritev	Klasični ventil	MBJ ventil	Razlika
Masa ohišja	1,14 kg	0,38 kg	-67 %
Δp pri $Q = 50 \text{ l/min}$	75 bar	45 bar	-30 bar
Interno puščanje	v mejah	v mejah	skladno z analizo
Tiskalni čas	–	5 h/kos	–



Slika 5: Δp - Q karakteristika proporcionalnega ventila

7 RAZPRAVA IN INDUSTRIJSKI POTENCIAL

MBJ omogoča proizvodnjo optimiziranih funkcionalnih delov z manjšo maso, večjo učinkovitostjo in hitrejšo izvedbo.

Naš primer dokazuje:

- 67 % manj mase,
- 30 barov manjši tlačni padec,
- Združitev (konsolidacija) več delov v en element.

Te prednosti so ključne pri razvoju prototipov, maloserijskih komponent in visoko optimiziranih izdelkov brez potrebe po tradicionalnem orodju.

8 SKLEPI

Metal Binder Jetting omogoča proizvodnjo komponent z visoko stopnjo integracije funkcij, mehansko trdnostjo in optimizirano pretočnostjo.

Primer proporcionalnega ventila potrjuje, da je MBJ že danes zrela tehnologija za industrijsko uporabo.

V prihodnje bo MBJ ključna tehnologija v razvoju lahkih, učinkovitih in prilagodljivih rešitev v industrijski hidravliki.

Viri:

- [1] Bartolj, J.: Razvoj 4/3 proporcionalnega potnega ventila za izdelavo s postopkom 3D tiska kovin, diplomsko delo, Fakulteta za strojništvo, UL, 2022.
- [2] Bartolj, J., Majdič, F., Čelik, A.: Development of metallic 3D-printed water hydraulic proportional directional control valve, Fluid Power 2021, Maribor.
- [3] Bartolj, J., Trajkovski, A., Majdič, F., Čelik, A.: Proporcionalni potni ventili – razvoj, izdelava in testiranje verige 3D-tiskanih kovinskih komponent s topološko optimizacijo, Ventil, 3/2022.
- [4] Desktop Metal Inc.: Material Data Sheet – 17-4PH Stainless Steel, 2023.
- [5] Digital Metal AB: Design Guidelines and Technical Data, 2022.

DIGITALNE STORITVE NA PODROČJU OBDELAVE KOVIN

Zoran SVENŠEK
SECO TOOLS SI d.o.o.

IZVLEČEK

V današnjem svetu sta dostopnost in hitrost informacij bistvenega pomena. V podjetju Seco Tools smo razvili digitalne storitve, ki poenostavljajo naša vsakodnevna opravila pri obdelavi kovin. Te storitve vključujejo izdelavo orodja po meri v nekaj minutah s preprostim in enostavnim vmesnikom, ustvarjanje celotnih sklopov standardnih orodij ter avtomatiziran izbor orodij iz 3D modelov.

1 UVOD

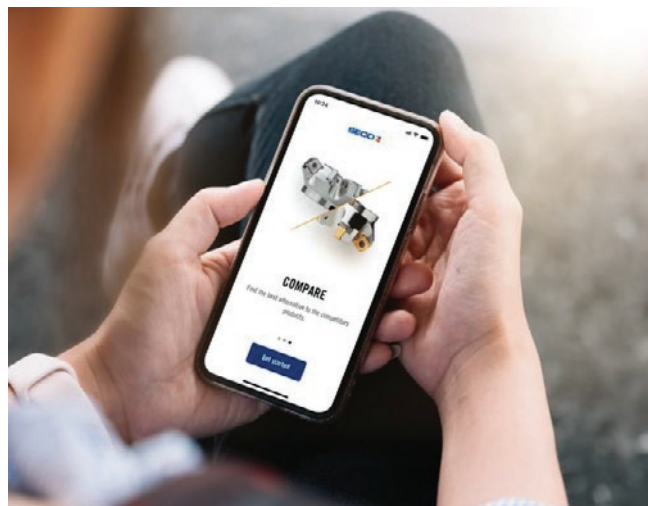
Na splošno je digitalna storitev vsaka storitev, ki se zagotavlja elektronsko prek interneta in do katere lahko stranke dostopajo v samopostrežnem načinu prek spletnega ali mobilnega vmesnika.

V podjetju Seco Tools AB širimo nabor digitalnih storitev. K obstoječim storitvam Suggest, Material in Machine Library, Thread Turning Helix Calculator in Tool Comparison smo dodali nove - Seco Assistant, My Design, Tool Assembly in Component Guidance.

2 SECO ASSISTANT: PRAKTIČNA POMOČ NA POTI

Seco Assistant nam omogoča, da so informacije o izdelkih in orodja, ki jih resnično potrebujete, na doseg roke brez iskanja po internetu ali katalogih, tudi ko ste brez povezave.

Aplikacija je razvita za kar največje udobje in enostavnost uporabe, saj ima majhno velikost prenosa podatkov ter čist in jasan vmesnik. Če nimate internetne povezave, lahko izdelke Seco iščete ali podatkovne kalkulatorje uporabljate tudi brez povezave.

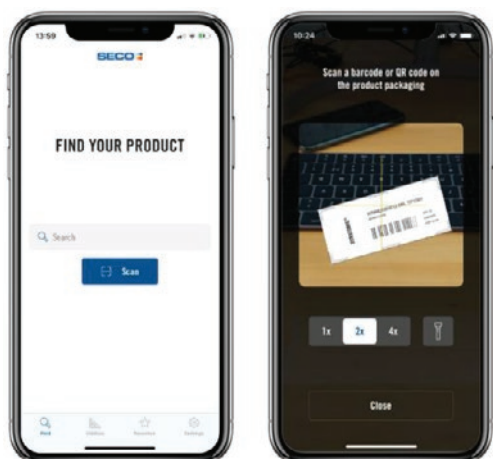


Slika 1: Seco Assistant

2.1 Iskanje izdelkov

Izdelke lahko iščemo po številki izdelka, oznaki, kvaliteti ali preprosto skeniramo kodo na embalaži.

Na strani najdenega izdelka so na voljo informacije kot so dimenzije, rezalni parametri, kompatibilnost z ostalimi izdelki in v nekaterih primerih tudi optimizacija.



Slika 2: Iskanje izdelkov

2.2 Kalkulator za strojno obdelavo

Kalkulator za strojno obdelavo Seco Assistant nam ponuja podatke o struženju, rezkanju navojev, rezkanju in izdelavi lukenj za katero koli blagovno znamko, vključno s podajalnimi in rezalnimi hitrostmi ter stopnjo odvzema materiala.

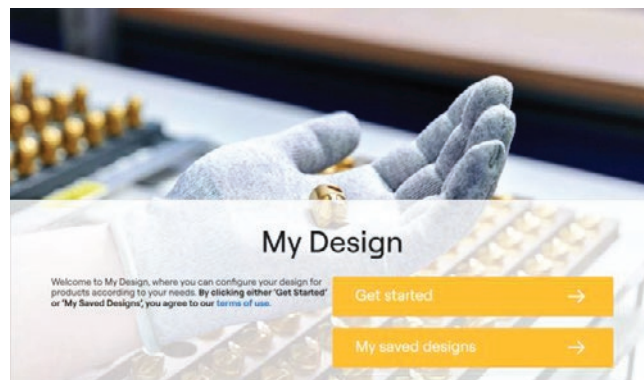


Slika 3: Kalkulator

2.3 Storitvi Tool Comparison in Suggest

Funkcija Tool Comparison nam ponuja priporočila za orodja Seco in alternative za ploščice drugih proizvajalcev, funkcija Suggest pa nam pomaga najti pravo možnost orodja in strategije rezanja za določena opravila.

3 MY DESIGN: ORODJA PO MERI



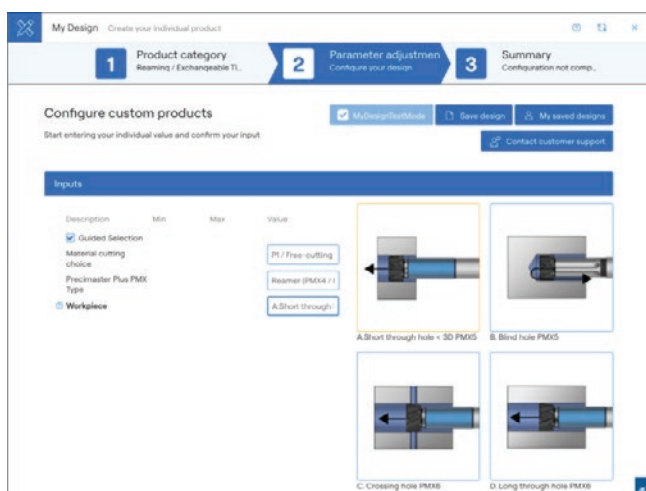
Slika 4: My Design

Za čim hitrejšo obdelavo delov s posebnimi zahtevami glede orodij si proizvajalci ne morejo privoščiti večtedenskega čakanja na oblikovanje orodja po meri.

Kot zmogljiva prihajajoča nova funkcija v okviru My Pages nam My Design omogoča konfiguriranje orodij po meri na kateri koli mobilni napravi ali namiznem računalniku.

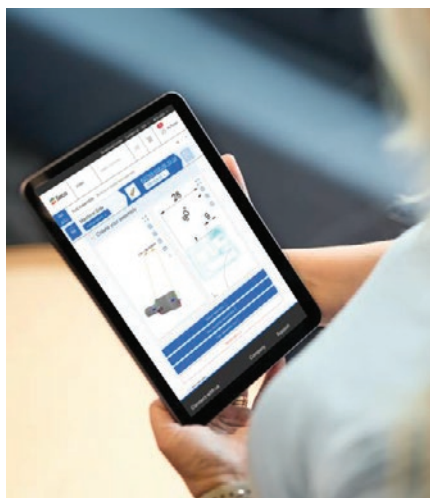
Po izbiri aplikacije v razdelku My Pages izberemo kategorijo izdelka, vrsto orodja in material dela ter začnemo z delom. Z vodenim postopkom po korakih, ki vključuje opisne slike in preprosto navodilo, vnesemo različne parametre orodja in v nekaj klikih pripravimo končno zasnovo.

Ko dokončamo orodje s programom My Design, ga lahko shranimo v svoj račun ali prek I2Q (Inquiry to Quotation) zahtevamo ponudbo za zahtevano število orodij in prenesemo 2D datoteke DXF, poenostavljene 3D modele in/ali predlogami risb.



Slika 5: Primer konfiguriranja povrtala Precimaster

4 DIGITAL TOOL ASSEMBLY: USTVARJANJE CELOTNIH SKLOPOV



Slika 6: Digital Tool Assembly

Z uporabo Digital Tool Assembly lahko brez težav konfiguriramo in izvažamo celotne sklope orodij za vse potrebe strojne obdelave z enostavnim dostopom do 2D in 3D datotek za integracijo v lasten sistem CAM.

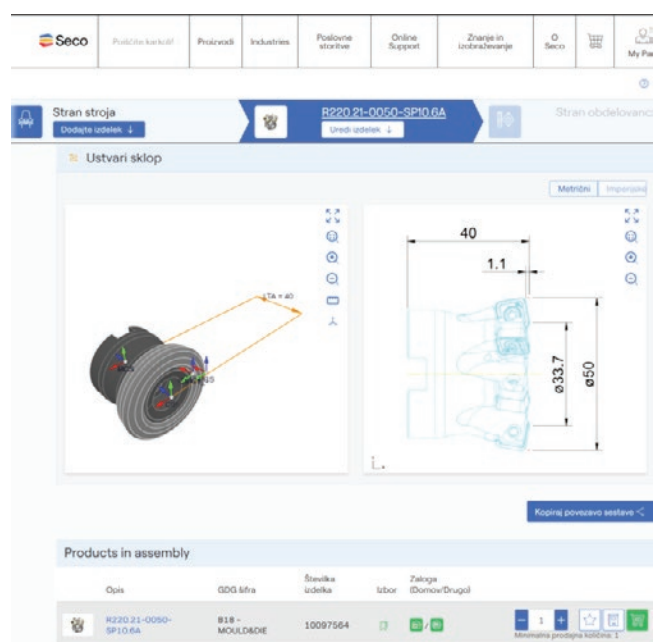
Omogoča nam interaktivni način vizualizacije rešitve za orodja, ki vsebuje več izdelkov, z nekaj kliki. S tem je zagotovljen popoln digitalni dvojček v podatkovnem paketu, ki uporabniku omogoča natančnejšo, hitrejšo in priročnejšo potrditev odločitve o nakupu.

Je spletna rešitev, ki omogoča združevanje naših standardnih orodij.

V nadaljevanju si oglejmo, kako v nekaj korakih konfiguriramo sklop orodij.

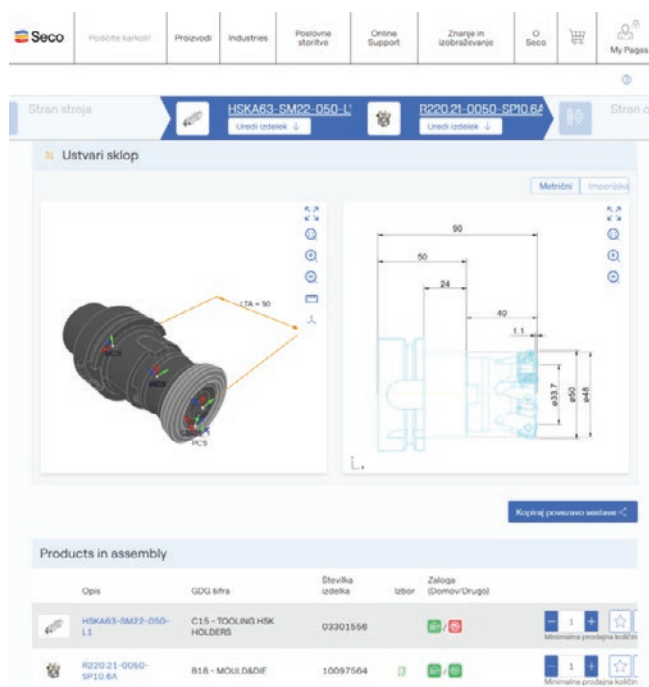
V večini primerov je sklop orodij sestavljen iz treh delov - telesa orodja, kateremu sledita izdelka na strani stroja (vpenjalni del orodja) in na strani obdelovanca (izmenljivi rezalni del orodja).

Prvi izbran izdelek je rezkalna glava High Feed z oznako R220.21-0050-SP10.6A.



Slika 7: Telo orodja - High Feed rezkalna glava

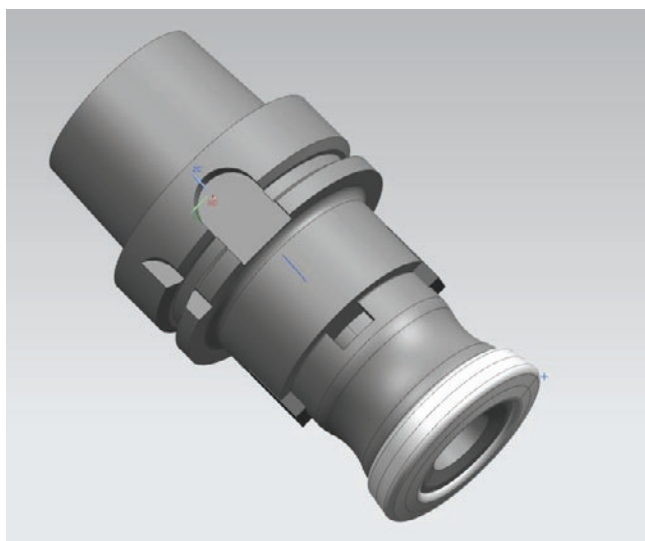
Dodamo izdelek na strani stroja - v našem primeru je vpenjalni trn HSK-A63 z oznako HSKA63-SM22-050-L1. Pomagamo si lahko z uporabo filtrov, kot so vrsta in velikost priključka ter ostale dimenzije.



Slika 8: V sklop dodan vpenjalni trn

Ker je z izbiro telesa orodja že tudi določena geometrija izmenljivega rezalnega dela orodja, nam ni potrebno dodajati izdelka na strani obdelovanca. Oziroma nam aplikacija ne ponudi te opcije.

Ustvarjen sklop lahko sedaj tudi izvozimo v formata DXF in STP.



Slika 9: 3D pogled sklopa orodja

5 COMPONENT GUIDANCE: OD 3D MODELA DO PAKETA ORODIJ

5.1 Kaj je Component Guidance?

Component Guidance je spletna aplikacija podjetja Seco Tools, ki poenostavlja strojno obdelavo 2,5-osnih prizmatičnih komponent. Z nalaganjem datoteke STEP dobimo takojšnje zaznavanje elementov, priporočila za optimalno orodje in podatke o rezanju, izračunane na strani strežnika, brez namestitve programske opreme.

Ključne prednosti:

- Avtomatizirano zaznavanje elementov: Prepozna značilnosti, ki jih je mogoče obdelovati, kot so luknje in žepi, neposredno iz datoteke STEP, kar odpravlja ročno programiranje.
- Prilagojena priporočila za orodja: Na podlagi materiala, geometrije in velikosti serije predlaga najprimernejša orodja za vsak element - izboljša natančnost in učinkovitost.
- Vključeni so podatki o rezanju: Zagotavlja optimizirane podajanja in hitrosti za vsako priporočeno orodje, kar zmanjšuje ugibanja in skrajšuje čas nastavitve.
- Manj menjav orodja: Če je mogoče, združuje orodja in priporoča vsestranska orodja, ki lahko delujejo pri več elementih - zmanjša število menjav orodij in poveča zmogljivost.
- Spletno podprto in brez strojne opreme: Deluje v katerem koli sodobnem brskalniku brez namestitve in zahtev glede zmogljivosti uporabnikovega računalnika. Idealno za oddaljen dostop ali uporabo na poti.

5.2 Kako začeti?

- Pojdite na www.secotools.com
- Prijavite ali registrirajte se v My Pages
- Kliknite ikono Component Guidance
- Aplikacija bo nato odprla nov zavihek v vašem brskalniku

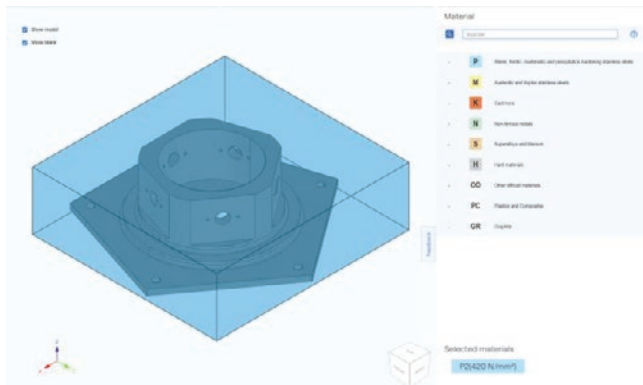
5.3 Definiranje obdelovanca

Naložite 3D model obdelovanca. Podprti so samo .stp formati datotek. Sistem bo poizkušal

popraviti poškodovane modele, v kolikor obstajajo. Modeli več teles bodo združeni.

Ko je model naložen, bo sistem prikazal dimenzije obdelovanca ter samodejno dodal mere surovca. Opcijsko lahko spreminjamo dimenzijske vrednosti surovca.

Vnesemo še material obdelovanca z izbiro ISO skupin materialov ali vnosom oznake.

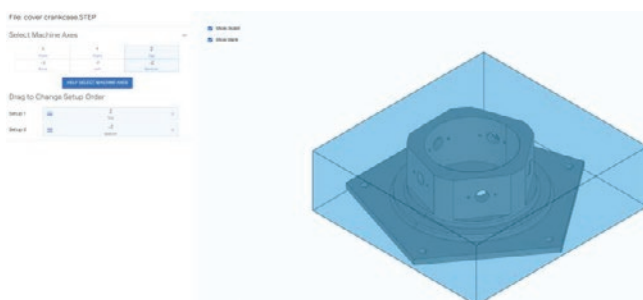


Slika 10: Naložen 3D model obdelovanca

5.4 Planiranje delovnih operacij

Component Guidance zahteva, da definiramo vsaj eno obdelovalno os, vendar lahko po potrebi izberemo zaporedje do 6 osi.

Zaznavanje elementov je omejeno na vnaprej določene osi in lahko traja od nekaj sekund do nekaj minut.

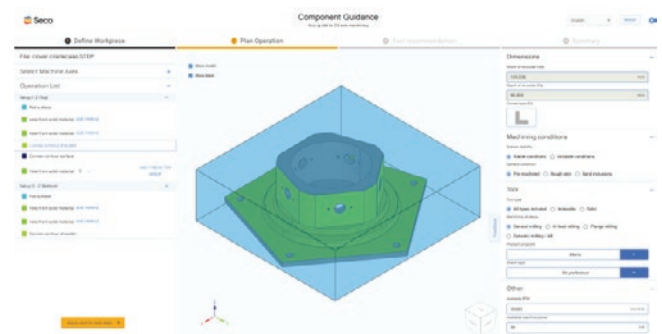


Slika 11: Določitev obdelovalnih osi

Prikaže se seznam operacij, katerih vrstni red lahko poljubno spreminjamo. To bo zahtevalo novo skeniranje za posodobitev vseh dimenzij elementov.

Za vsak posamezen element lahko po potrebi določimo različne možnosti:

- za luknje lahko izberemo toleranco in hrapavost,
- za rezkanje lahko izbiramo med rezkarji z izmenljivimi ploščicami ali polnimi rezkarji, dinamičnim rezkanjem, High Feed rezkanjem itd.
- za vse elemente nastavimo omejitve glede na razpoložljivo moč, navor in število vrtljajev na minuto.



Slika 12: Pregled zaznanih elementov

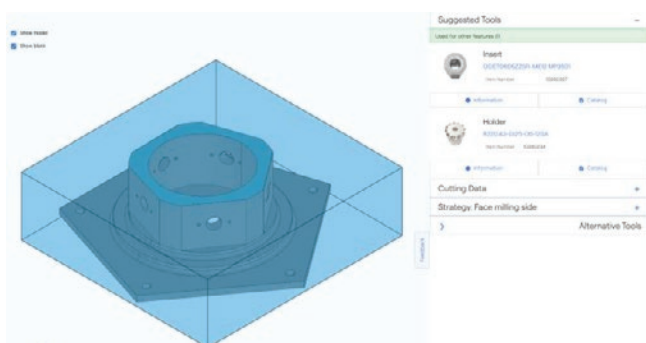
Preden nadaljujemo s priporočili za orodje, bo sistem zahteval vnos za nadaljnjo prilagoditev priporočil:

- Večja velikost serije: Prvotni predlagani postopek razvrščanja, ki daje prednost zmogljivostim orodij
- Manjša velikost serije: predlagana bodo fleksibilnejša orodja

5.5 Priporočila orodij

Component Guidance bo iskal orodja, ki se lahko uporabijo na čim več elementih. Vsako priporočilo vsebuje izbrana orodja (s povezavami do spletne strani in kataloga), podatke o rezanju in strategijo obdelave.

Priporočeno orodje lahko tudi spremenimo na seznamu alternativnih orodij.



Slika 13: Povzetek operacije obdelave

Zadnji korak je povzetek, ki nam omogoča pregled števila najdenih elementov in števila najdenih orodij.

V povzetku dobimo tudi pregled nad tem, katera orodja se uporabljajo za posamezen element. Ob kliku na seznam elementov se na modelu osvetli ustrezna površina, na seznamu orodij pa se osvetlijo uporabljena orodja.

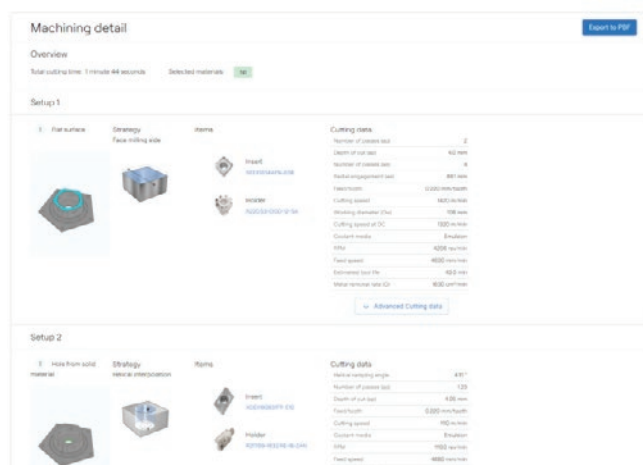
To deluje tudi s klikom neposredno na model ali s klikom neposredno na orodja na seznamu, pri čemer se z vsakim klikom osvetlijo ustrezna ujemanja.

Če se na strani s povzetkom pomaknemo navzdol, lahko najdemo tudi razdelek Podrobnosti o strojni obdelavi.

Tu je vsak korak strojne obdelave predstavljen s posnetkom elementa, ki ga je treba obdelati, strategije, ki jo je treba uporabiti, orodij in podatkov o rezanju.

Razdelke s podatki o rezanju je mogoče razširiti, da se prikažejo naprednejši podatki o rezanju

To poročilo je mogoče prenesti v obliki PDF s klikom na gumb Izvozi v PDF.



Slika 14: Podrobnosti o strojni obdelavi

6 SKLEP

Namen prispevka je bil predstaviti nabor aplikacij za strojno obdelavo in prikaz enostavnosti uporabe le-teh. Digitalnim storitvam v podjetju namenimo vse večji pomen, zato obstoječe posodabljam in razvijamo nove.

Uporaba teh storitev je brezplačna, potrebna je le registracija na naši spletni strani www.secotools.com.

Viri:

- [1] <https://learn.servitly.com/docs/what-is-a-digital-service>
- [2] Interno gradivo podjetja Seco Tools AB

RAZVOJ IN IZDELAVA VISOKOTEMPERATURNE NAPRAVE Z ZAŠČITENO VROČO PLOŠČO

Rok MARKEŽIČ, Tomaž KASTELIC, Gašper CAFUTA
CAFUTA, inženiring, simulacije in svetovanje. d.o.o.

IZVLEČEK

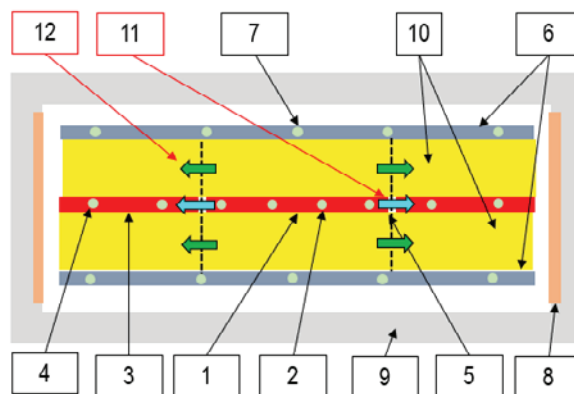
V številnih aplikacijah so visokotemperaturni toplotnoizolacijski materiali ključni za energetsko učinkovitost, varno delovanje in optimalno zmogljivost, zato je poznavanje njihovih toplotnih lastnosti zelo pomembno. Metoda zaščitene vroče plošče (angl. Guarded Hot Plate, v nadaljevanju GHP) je standardizirana metoda za merjenje toplotne upornosti materialov pri različnih temperaturah. Študija predstavlja razvoj in izdelavo GHP naprave, namenjene merjenju toplotne upornosti materialov v temperaturnem območju od 50 °C do 800 °C. Razvoj se je začel s 3D konceptualnim načrtovanjem v programskem paketu Catia in termo-električnimi simulacijami v programskem paketu Abaqus z namenom določitve potrebne moči grelcev in optimizacije oblike le teh za enakomerno temperaturno porazdelitev na vroči in hladni plošči. Vodilo pri načrtovanju osrednjega dela GHP naprave so bile analize prenosa toplote v Abaqusu, upoštevajoč toplotno prevodnost, konvekcijo in sevanje. Sledila je izdelava detajlne 3D konstrukcije v Catii, izbor materialov in standardnih komponent. Ocena največje deformacije plošč pod termo-mehanskimi obremenitvami za optimalno izbiro materialov je bila izvedena s statično analizo v Abaqusu. Na koncu bo predstavljen še postopek izdelave GHP naprave ter razvoj krmilnega sistema in uporabniškega vmesnika.

1 UVOD

Meritve stacionarnih lastnosti toplotne prevodnosti materialov se lahko izvajajo s številnimi standardiziranimi merilnimi metodami. V našem primeru bomo obravnavali metodo zaščitene vroče plošče (GHP) z dvema vzorcema. Natančneje, osredotočili se bomo na meritve pri povišanih temperaturah, in sicer med 50 °C in 850 °C. Komercialno dostopnih naprav za tovrstne meritve je zelo malo, večinoma gre za namensko razvite naprave po specifičnih zahtevah [1-5].

Princip delovanja GHP naprave z dvema vzorcema bomo predstavili s pomočjo Slike 1. Jedro naprave predstavlja vroča plošča, ki je razdeljena na merilno ploščo (oznaka 1) in zaščiteno ploščo (oznaka 3), ter 2 hladnih plošč (oznaka 6). Med vročo in hladni plošči sta vstavljena 2 enaka vzorca (oznaka 10). Na vseh ploščah se vzdržuje določena konstantna temperatura s pomočjo grelcev plošč (oznake 2, 4, 7). Merilna in zaščitna plošča sta med seboj ločeni z zračno režo (oznaka 5). Naloga grelnih plošč je ustvariti temperaturno razliko med obema ploskvama posameznega vzorca (ena stran

vzorca je v stiku z vročo ploščo, druga s hladno ploščo) in v sredinskem delu vzorca (ločen s črtkanima črtama) ustvariti enodimenzionalni prevod toplote. Med testom se izvajajo meritve temperature na posamezni ploskvi vzorcev ter dovedeni toplotni tok z grelcem merilne plošče. Na podlagi predhodno izmerjene debeline vzorca, temperaturne razlike med obema ploskvama vzorca in dovedenega toplotnega toka, se ob predpostavljenih pogojih enodimenzionalnega prevoda toplote izračuna toplotna prevodnost vzorca pri določeni temperaturi.



Slika 1: Shematski prikaz GHP naprave z dvema vzorcema.

Odstopanje od enodimenzionalnega prevoda toplote predstavljajo režne toplotne izgube med merilno in zaščitno ploščo (oznaka 11) ter robne toplotne izgube znotraj vzorca (oznaka 12). Te zmanjšujemo s pomožnimi grelci na robu vzorcev (oznaka 8) in izolacijsko komoro (oznaka 9), ki loči jedro GHP naprave od okolice in omogoča vzdrževanje konstantnih temperaturnih pogojev.

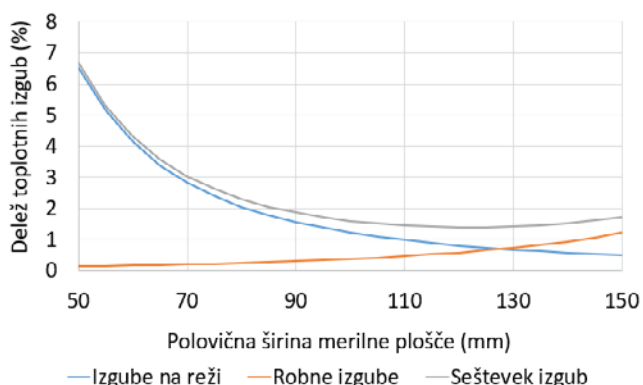
2 KONCIPIRANJE NAPRAVE Z UPORABO NUMERIČNIH SIMULACIJ

Zahteve za GHP napravo so bile:

- temperaturno merilno območje med 50 °C in 750 °C (opcijsko 850 °C),
- debelina vzorcev med 30 mm in 110 mm,
- toplotna prevodnost vzorcev med $0,03 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ in $0,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Dodatne zahteve so izhajale iz standarda SIST ISO 8302:1997 in tehnične smernice SIST-TS CEN/TS 15548-1:2014.

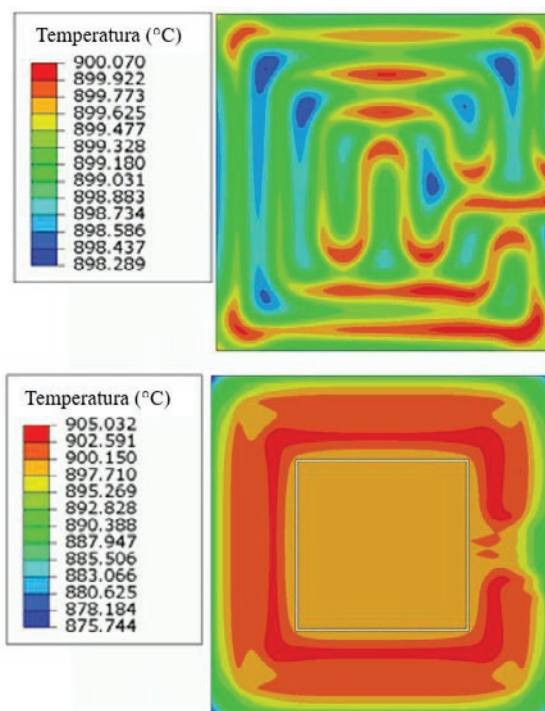
V prvem koraku smo na podlagi zahtev in preliminarnih analitičnih izračunov določili zunanje dimenzije vzorcev oz. plošč ter velikost merilne plošče. Na Sliki 2 so prikazani rezultati analitičnega izračuna deleža toplotnih izgub za kritični primer vzorca. Na podlagi rezultatov so bile določene zunanje dimenzije vzorcev 500 x 500 mm (priporočilo standarda) in velikost merilne plošče 250 x 250 mm (minimalen delež toplotnih izgub).



Slika 2: Delež toplotnih izgub v odvisnosti od polovične širine merilne plošče za primer vzorca debeline 110 mm, toplotne prevodnosti $0,03 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ in temperaturne razlike 30 °C.

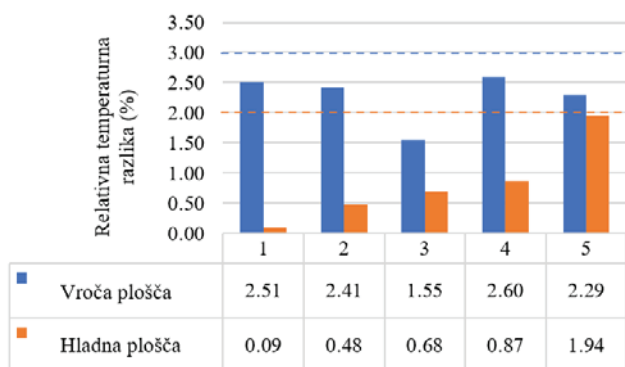
Sledila je določitev oblike grelcev merilne, zaščitne in obeh hladnih plošč s ciljem doseganja

enakomerne temperaturne porazdelitve na ploskvah v stiku z vzorcema. Grelno telo je mineralno izoliran grelni kabel, ki omogoča krivljenje v željeno obliko. Za določitev optimalnih oblik in moči grelcev smo uporabili stacionarne termo-električne numerične simulacije v programskem paketu Abaqus. Pri numeričnih izračunih smo upoštevali prevod toplote znotraj posameznih komponent, konvekcijo toplote med komponentami in zrakom (v komori, z okoliškim zrakom), sevanje toplote (med komponentami, z okolico). Upošteevane so bile temperaturno odvisne materialne lastnosti in določeni temperaturno odvisni robni pogoji. Na grelnem elementu je bila predpisana Joulova generacija toplote. Optimizacije oblik grelcev so se izvajale iterativno s ciljem doseganja enakomerne temperaturne porazdelitve in minimiziranja izgub na reži in robnih izgub pri najkritičnejših pogojih (toplotna prevodnost vzorca, merilna temperatura, temperaturna razlika ...). Na Sliki 3 je prikazana temperaturna porazdelitev na merilni in zaščitni plošči pri kritičnih pogojih s končno obliko grelcev.

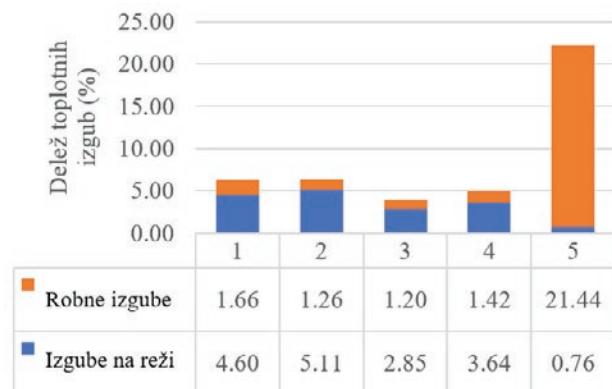


Slika 3: Temperaturna porazdelitev na merilni plošči (zgoraj) in sestavi merilne in zaščitne plošče (spodaj) pri merilni temperaturi 850 °C in temperaturni razliki 100 °C.

Po določitvi oblik grelcev se je preverilo ustreznost le teh pri različnih pogojih. Na Sliki 4 je prikazana relativna temperaturna razlika na vroči in hladni plošči pri različnih pogojih, ki predstavlja razmerje med temperaturno razliko na eni ploskvi vzorca in temperaturno razliko skozi vzorec. Črtkane črte predstavljajo dovoljene vrednosti po standardu. Na Sliki 5 je prikazan delež toplotnih robnih izgub in izgub na reži pri različnih pogojih, ki predstavlja razmerje med toplotnim tokom izgub in toplotnim tokom skozi vzorec. Pogoji numeričnih izračunov so predstavljeni v Tabeli 1.



Slika 4: Relativna temperaturna razlika na vroči in hladni plošči pri različnih pogojih.

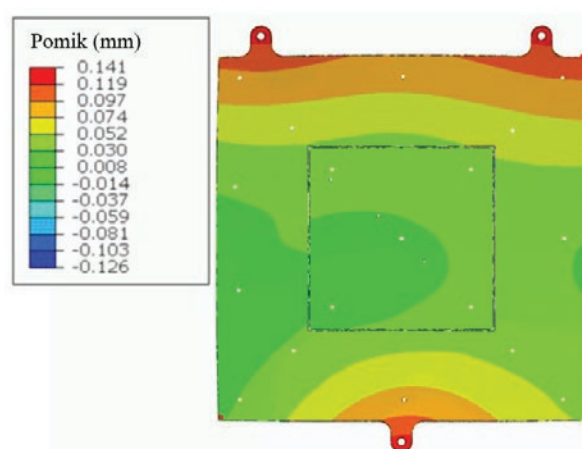


Slika 5: Delež toplotnih robnih izgub in izgub na reži pri različnih pogojih.

Tabela 1: Pogoji numeričnih izračunov.

Oznaka	Debelina vzorca (mm)	Pozicija vzorca	Merilna temp. (°C)	Temp. razlika (°C)
1	50	Spodaj	550	100
2	50	Zgoraj	550	100
3	50	Spodaj	100	30
4	50	Spodaj	550	30
5	100	Spodaj	550	100

Na Sliki 6 so prikazani rezultati pomikov termo-mehanske numerične analize vroče plošče. Prikazani so pomiki vroče plošče v smeri pravokotno na ravnino v stiku z vzorcema. Pri analizi so bile za ploščo predpisane temperaturno odvisne materialne lastnosti izbranega jekla. Predpostavljeno je bilo nedeformirano stanje pri temperaturi 20 °C. Prikazani rezultati predstavljajo deformirano stanje plošče pri predpisanem temperaturnem polju, pridobljenem iz termo-električnih analiz pri pogojih 1 in 2 iz Tabele 1.

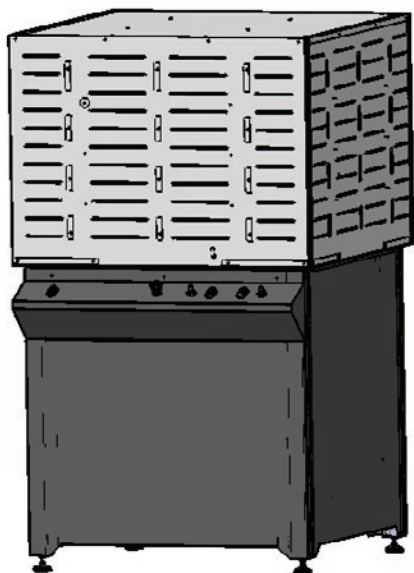


Slika 6: Pomiki vroče plošče v smeri pravokotno na ravnino v stiku z vzorcema.

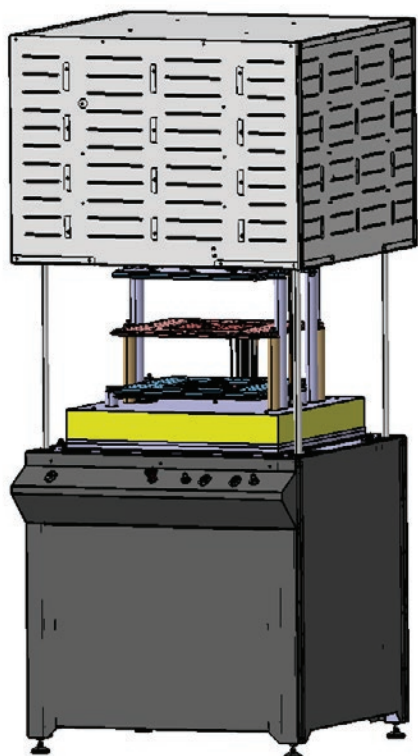
3 KONSTRUKCIJA NAPRAVE IN IZBOR MATERIALOV

Celotna 3D konstrukcija naprave je bila izdelana v Catii. Slika 7 in Slika 8 prikazujeta konstrukcijo naprave. Za material grelnih plošč in nekaterih komponent, izpostavljenih visokim temperaturam, je bilo izbrano ustrezno toplotno odporno jeklo. Nosilni stebri grelnih plošč so izdelani iz keramike, ki ima dobro odpornost na visoke temperature in nizko toplotno prevodnost in je tako ustrezna za vez med toplimi in hladnimi deli. Premična grelna komora ima standardno obliko zvonca, izdelana pa je iz grelnih modulov z integriranimi žičnimi grelci, ki omogočajo segrevanje do temperature 1260 °C. Premik grelne komore je izvedeno z linearnimi aktuatorji. Prav tako je z linearnimi aktuatorji izveden premik grelnih plošč za prilagajanje različnim debelinam vzorcev. Mehanizem za prilagajanje debelinam vzorcev se nahaja v spodnjem delu naprave. Večina ostalih komponent, ki niso

izpostavljene visokim temperaturam, je izdelana iz konstrukcijskega jekla in aluminija. Veliko je uporabljenih tudi standardnih delov.



Slika 7: Konstrukcija GHP naprave – grelna komora v zaprtem položaju.



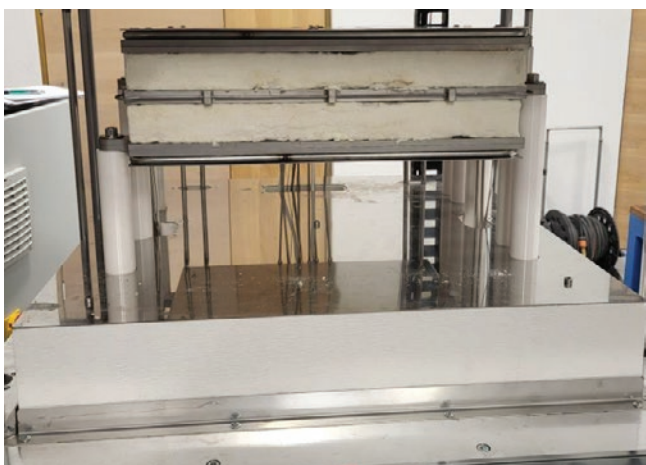
Slika 8: Konstrukcija GHP naprave – grelna komora v odprtem položaju

4 IZDELAVA NAPRAVE

Nestandardne komponente GHP naprave so bile izdelane z različnimi tehnološkimi postopki: mehanska obdelava, žična erozija, struženje, laserski razrez pločevine, krivljenje pločevine, varjenje in toplotna obdelava. Posebna pozornost je bila posvečena izdelavi grelnih plošč s ciljem doseganja zahtevane končne ravnosti le teh. Za ustrezno delovanje naprave in natančnost meritev je bilo ključno zagotoviti dobro toplotno izoliranost jedrnega dela naprave z ustrezno zatesnitvijo stikov med posameznimi komponentami. Na Sliki 9 in Sliki 10 so je prikazana GHP naprava med postopkom sestavljanja in testiranja.



Slika 9: GHP naprava – grelna komora v zaprtem položaju.



Slika 10: GHP naprava – jedrni del z vstavljenima testnima vzorcema.

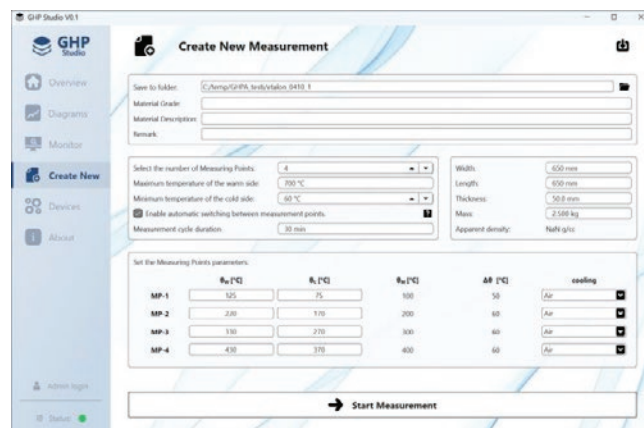
5 KRMILNO-MERILNI SISTEM IN UPORABNIŠKI VMESNIK

Jedro krmilno-merilnega sistema GHP naprave je strojna oprema NI Data Acquisition (v nadaljevanju NI-DAQ) proizvajalca National Instruments. NI-DAQ sistem skrbi za zajem merilnih signalov ter krmiljenje grelcev, linearnih aktuatorjev, pnevmatskih in ostalih komponent. Temperaturne meritve za potrebe krmiljenja grelcev in meritve toplotne prevodnosti vzorcev se izvajajo z MIMS (Mineral insulated metal sheathed) termoelementi. Meritve toplotnega toka na merilni plošči se izvajajo posredno prek meritve električnega toka in napetosti na grelcu merilne plošče. Meritev debeline vzorcev je izvedena z merilnima letvama.

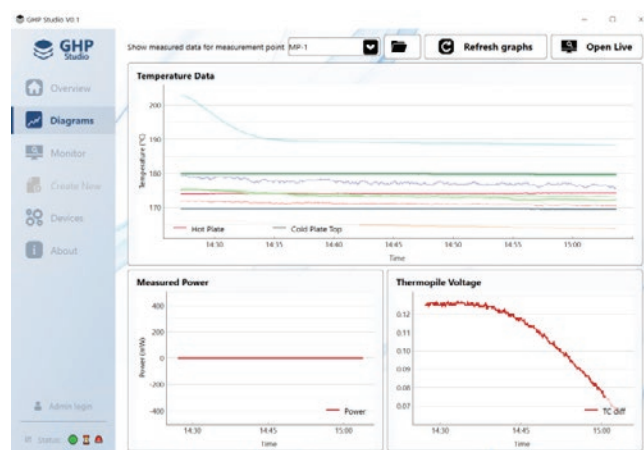
Skupaj z napravo je bil razvit tudi uporabniški vmesnik (*GHP Studio*), ki omogoča upravljanje z napravo. Program je spisan v programskem jeziku Python in osnovan na knjižnicah PySide, ki omogoča izgradnjo uporabniškega vmesnika, in nidaqmx, ki je namenjen komunikaciji z NI-DAQ sistemom. Glavni namen programa je samodejno vodenje meritev toplotne prevodnosti ter regulacija grelcev za doseganje in vzdrževanje nastavljenih temperatur. Regulacija posameznega grelca je izvedena s PID zanko (*Proportional-Integral-Derivative*).

Uporabniku so na voljo zavijki z informacijami o statusu naprave (prikaz temperatur posameznih sestavnih delov, opozorila in informacije), podatki o trenutni meritvi, grafični prikaz časovnega poteka temperatur in

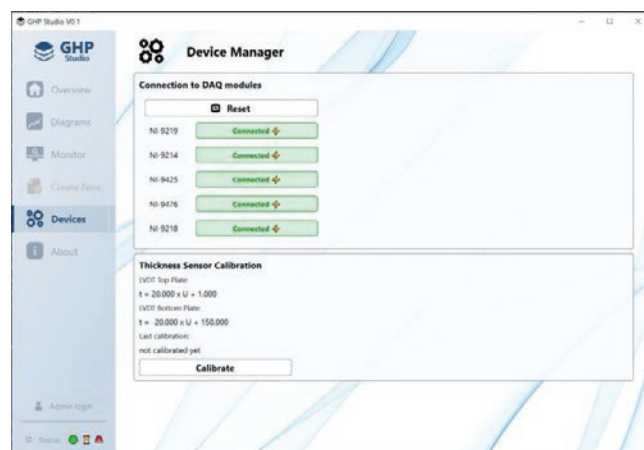
ostalih merjenih veličin. Celoten program je zgrajen tako, da uporabniku omogoča enostavno meritev toplotne prevodnosti željenega vzorca. Na Slikah 11-13 so prikazani posamezni deli uporabniškega vmesnika.



Slika 11: Uporabniški vmesnik GHP Studio – nastavitve parametrov za izvedbo nove meritve



Slika 12: Uporabniški vmesnik GHP Studio – grafi merjenih veličin.



Slika 13: Uporabniški vmesnik GHP Studio – stanje povezave in kalibracija senzorjev.

Viri:

- [1] Reddy, K.S., Jayachandran, S.: Investigations on design and construction of a square guarded hot plate (SGHP) apparatus for thermal conductivity measurement of insulation materials, *International Journal of Thermal Sciences* 120 (2017), str. 136-147.
- [2] Salomon, D.: Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials, *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001), str. 89-98.
- [3] Schindler, A., Neumann, G., Stobitzer, D., Vidi, S.: Accuracy of a guarded hot plate (GHP) in the temperature range between -160°C and 700°C, *High Temperatures-High Pressures* 45 (2016), str. 81-96.
- [4] Scoarnec, V., Hameury, J., Hay, B.: A New Guarded Hot Plate Designed for Thermal-Conductivity Measurements at High Temperature, *Int J Thermophys* 36 (2015), str. 540-556.
- [5] Yang, I., Daeho, K., Sanghyun, L.: Construction and preliminary testing of a guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurements at high temperatures, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 122 (2018), str. 1343-1352.

DIGITALNI DVOJČEK LABORATORIJSKEGA MEHATRONSKEGA ŠTANČNEGA ORODJA

Uroš ŠTUKLEK¹, Ema STEFANOVSKA², Albin SIRC³, Dejan ROŽIČ¹, Jure PETERNEL³,
Tomaž PEPELNJAK²

¹Dafra kontakt tehnologija d.o.o.

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

³Egasi d.o.o.

IZVLEČEK

V projektu »Pametno mehatronsko progresivno orodje za štančanje tipskih izdelkov« Dafra kontakt tehnologije d.o.o. za optimizacijo delovanja mehatronskega progresivnega štančnega orodja vzpostavlja prilagajanje delovanje mehatronskega orodja skladno z zahtevami oblik izdelka. Cilji delovanja razvitega mehatronskega orodja so:

- Proizvodnja več izdelkov v enem samem orodju,
- Izdelava štančanih geometrijsko podobnih komponent z minimiziranim odpadom ob menjavi tipa komponente na izbranem orodju,
- Nadzor procesa in dvig kakovosti štančanja z vzpostavitvijo digitalnega dvojčka preoblikovalnega procesa.

Za zadostitev navedenih ciljev je bila neobhodna sodelava industrijskih partnerjev Dafra kontakt tehnologije d.o.o. in Egasi d.o.o. ter znanstveno - raziskovalnega partnerja Fakultete za strojništvo v Ljubljani.

V prispevku je predstavljena prva razvojna faza projekta, v kateri se je na testnem orodju verificiralo zastavljene cilje razvijanega štančnega orodja na enem mehatronskem mestu, na katerem se je z razvitim aktuatorjem podjetja Egasi vzpostavljalo zahtevane nastavitve rezalnega pestiča za izdelavo izbrane geometrije izdelka. Vzporedno smo kakovost delovanja orodja spremljali z digitalnim dvojčkom orodja in vzpostavili ustrezno povratno zanko nadzora in obratovanja orodja.

1 UVOD

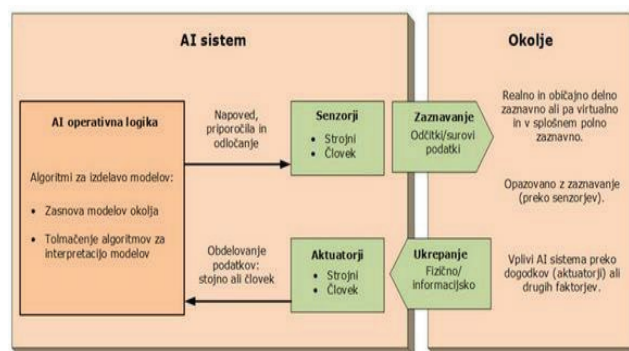
V RRI projektu z naslovom »Pametno mehatronsko progresivno orodje za štančanje tipskih izdelkov« pridobljenem v okviru javnega razpisa »Spodbude za raziskovalno razvojne projekte NOO« nosilec projekta Dafra kontakt tehnologije d.o.o. za optimizacijo delovanja mehatronskega progresivnega štančnega orodja (v nadaljevanju mehatronskega orodja) vzpostavlja prilagajanje delovanje mehatronskega orodja skladno z zahtevami oblik izdelka.

Kot digitalni dvojček opisujemo CAD model izdelka, v katerem so poleg dimenzij in opredeljenih materialov zajeti tudi potrebni podatki o uporabljenih senzorjih in aktuatorjih, ki na fizičnem izdelku spremljajo njegovo delovanje ter skrbijo, da izdelek deluje v opredeljenih delovnih pogojih.

Digitalni dvojček predstavlja tudi izhodišče za simulacijski model izdelka, s katerim se v digitalnem okolju nato predvidi, kako bi ob različnih pogojih sistem deloval v prihodnosti.

Stopnja natančnosti v digitalnem okolju izvedenih simulacij je zelo odvisna od kakovosti vhodnih parametrov in izvedbe samih simulacij – bolj so te kakovostne več časa rabimo za njihovo izvedbo.

Za kakovostno delovanje digitalnega dvojčka mora ta omogočati interakcijo z uporabnikom ter implementacijo ustreznih logičnih modelov za delovanje sistema – slika 1.



Slika 1: Delovanje digitalne dvojčka in interakcije z okoljem [1].

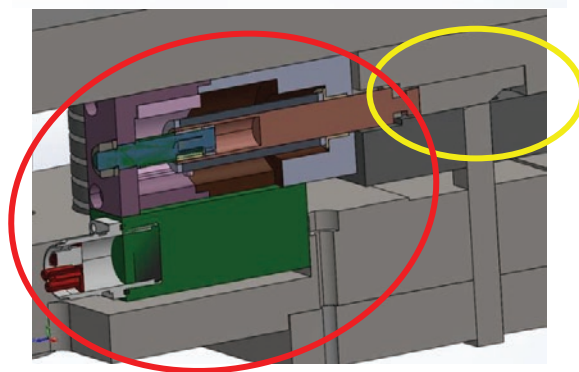
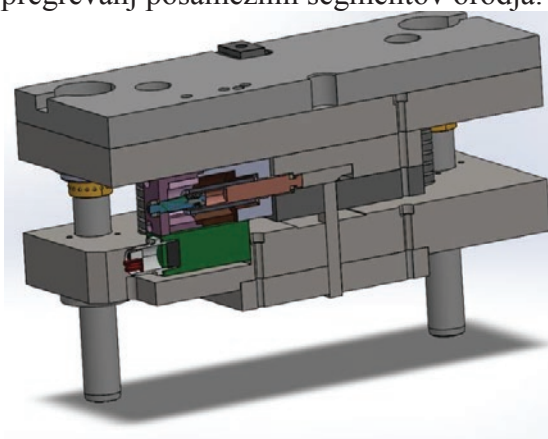
2 DIGITALNI DVOJČEK MEHATRONSKEGA ŠTANČNEGA ORODJA

V dosegljivi strokovni in znanstveni literaturi digitalni dvojčki štančnih procesov niso poznani, zato smo morali za razvijano mehatronsko štančno orodje koncept razviti popolnoma na novo. V specifičnem kontekstu preoblikovanja pločevine tehnologija digitalnega dvojčka predstavlja virtualno podobo samostojnega procesa, ki se osredotoča na preoblikovanje kovinskih surovcev (v našem primeru traku pločevine). Zaradi fleksibilnosti mehatronskega preoblikovalnega orodja se fokusiramo na delovanje aktivnih delov orodja in njihove preklape za zagotavljanje različnih oblik izdelkov izdelanih z istim orodjem.

V delovanju izbranega tipa mehatronskega štančnega orodja imajo ključno vlogo preklopni aktuatorji [2] – slika 2, 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 so bili izvedeni na testnem orodju z le enim aktuatorjem. Slednji je omogočal vklapljanje in izklapljanje pestiča za prebijanje izbrane oblike.

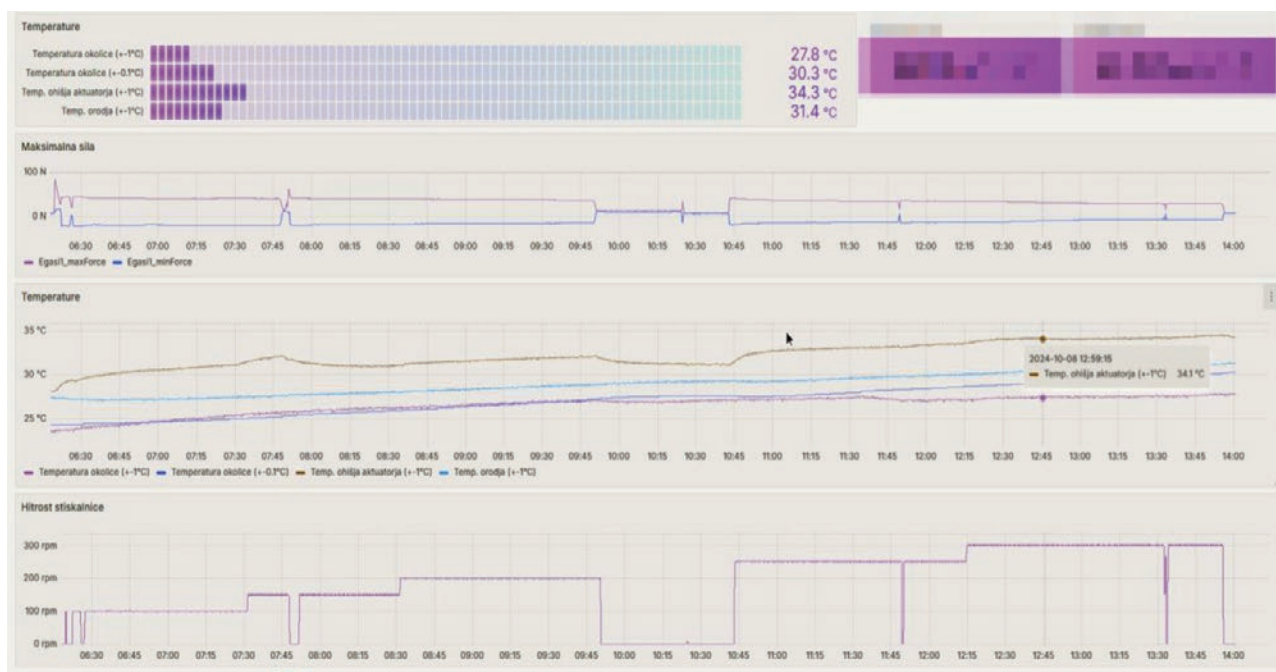
Za zagotavljanje premikanja preklopnega mehanizma lahko uporabljamo pnevmatske ali hidravlične pogone ter elektromotorje. Vsi navedeni sistemi morajo v primeru štančnega orodja delovati v okolju, ki zaradi delovanja stroja močno vibrira. Ker so se v preteklosti pnevmatski pogoni izkazali za preveč kompleksne in manj zanesljive pri hitrotekočih preoblikovalnih orodjih, smo se odločili za razvoj cevastega linearnega elektromotorja v okolju s konstantnim virom vibracij. Slednjega je za potrebe projekta razvilo podjetje Egasi d.o.o., ki je poseben poudarek podalo na ustrezno uležajenje gibajočega se dela magnetne cevke aktuatorja. Upoštevati je treba, da se celoten aktuator giblje skupaj z gornjim delom orodja s takti do 300 giba na minuto – slika 2 (spodaj), v nadaljnjih razvojnih projektih pa se namerava mehatronska preoblikovalna orodja vgraditi na stroje, ki zmorejo do 1000 gibov na minuto. Zaradi navedenih dinamičnih obremenitev gibajočih se delov orodja je optimalno uležajenje aktuatorja ključnega pomena.

Sistem digitalnega dvojčka je opremljen s senzorji v fizičnem orodju za spremljanje fizičnega procesa – v našem primeru aktuatorja za zagotavljanje vklapljanja in izklapljanja delovanja pestiča. Senzorji pošiljajo podatke v digitalni svet prek komunikacijskih vmesnikov. Digitalni dvojček nato analizira prejete podatke s pomočjo algoritmičnih simulacij in vizualizacij, kar omogoča generiranje bistvenih vpogledov v delovanje orodja. Za boljši vpogled v delovanje orodja so bili v ohišje aktuatorja, v aktivni del orodja, v ohišje orodja ter v okolico orodja vgrajeni tudi temperaturni senzorji [3]. Vsi navedeni temperaturni senzorji skrbijo, da ne pride do pregrevanj posameznih segmentov orodja.



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

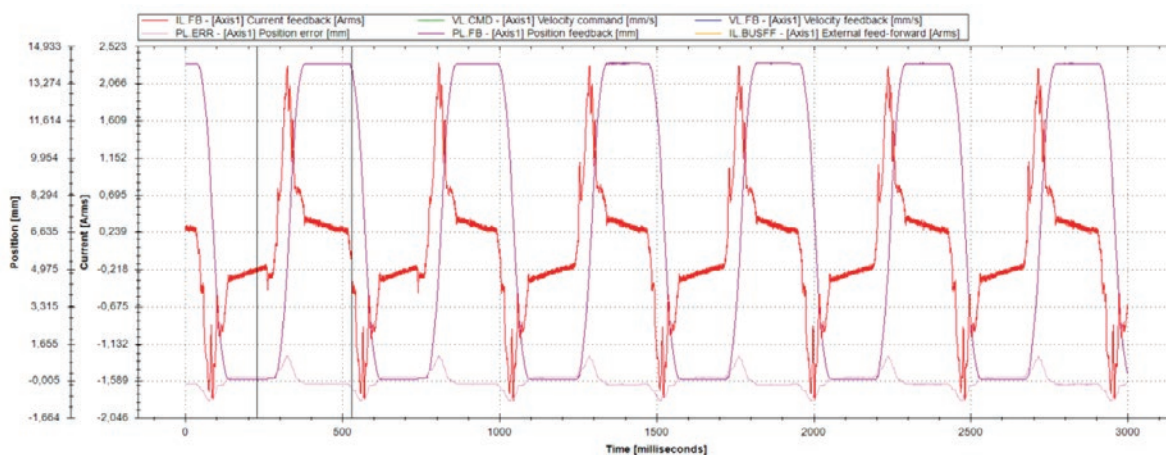
Poleg tega se je v samem aktuatorju tudi meril tok potreben na premikanje magnetne cevke s katero se nastavlja lega preklopnega mehanizma za uravnavanje višine pestiča v orodju.



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

Glede na izhodne signale pozicije aktuatorja, njegovega toka in vseh merjenih temperatur se je s pomočjo digitalnega dvojčka v orodju spremljalo stanje delovanja mehatronskega štančnega orodja [4]. Primer beleženja temperatur prikazuje slika 3, medtem ko so na sliki 4 prikazani merjeni tokovi potrebni za premikanje aktuatorjeve magnetne cevke.

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



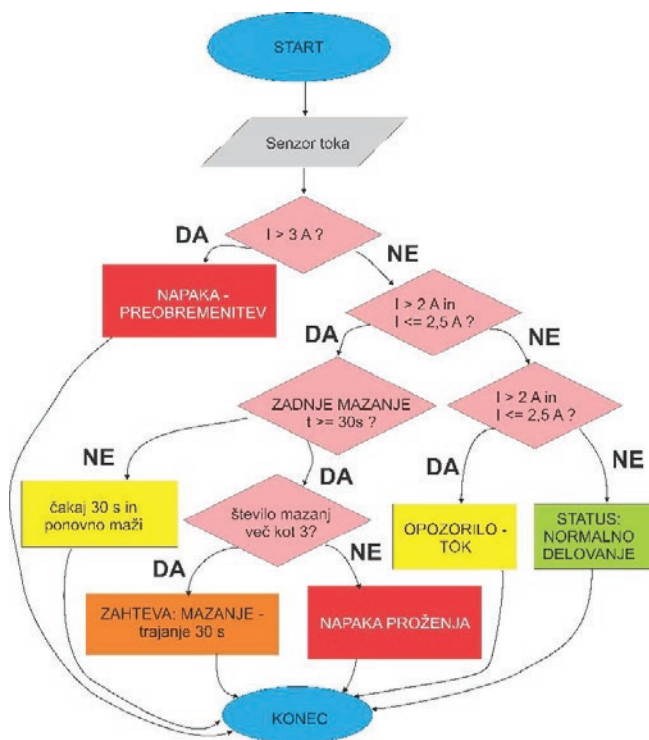
Slika 4: Tokovi na aktuatorju, potrebni za premikanje preklonnega mehanizma.

3 LOGIČNE SCHEME DIGITALNEGA DVOJČKA

Za delovanje digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja smo morali opredeliti

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

analizira posamezne vplive temperatur na delovanje aktuatorja in preklopnega sistema za nastavljanje lege pestiča.



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

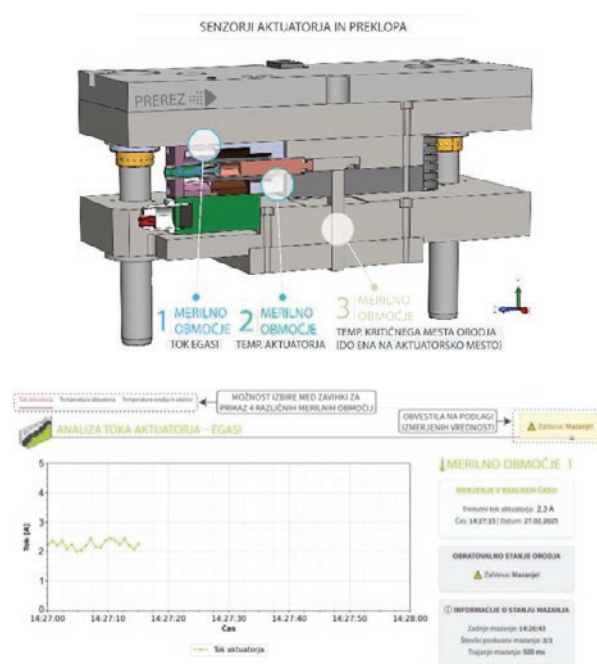
V drugem delu programskega okolja se spremlja in vrednoti vplivne parametre preklopnega sistema na velikost sile, ki jo slednji povzročata na aktuatorju. Na ta način se lahko že pred konstrukcijo preklopnega mehanizma ugotovi, kateri parametri najbolj vplivajo na obremenitve aktuatorja v mehatronskem orodju. Okolje digitalnega dvojčka za spremljanje dela aktuatorja prikazuje slika 6.

4 SKLEP

Digitalni dvojček mehatronskega štančnega orodja predstavlja prvo razvojno fazo v osvajanju koncepta digitalnih dvojčkov in proizvodnji s prilagodljivimi štančnimi orodji. Slednja predstavljajo revolucionaren pristop k minimizaciji odpada pri menjavi proizvodnji

skupine različnih izdelkov, poleg tega pa se drastično skrajša tudi čas potreben za menjavo izdelave serij geometrijsko podobnih izdelkov. V predstavljeni razvojni fazi smo zasnovali digitalnega dvojčka, ki skrbi za kakovostno delovanje orodja, slednjega po potrebi maže in javlja kritične napake delovanja orodja v primeru, da se te pojavijo.

V nadaljevanju razvoja se pridobljeno znanje prenaša na realno industrijsko orodje, ki bo v kratkem testirano v realnih pogojih obratovanja štančanja velikoserijskih izdelkov.



Slika 6: Digitalni dvojček štančnega orodja.

Viri:

- [1] Pepelnjak, T., Stefanovska, E., Sevšek, L. Razvoj digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja – izhodiščno stanje. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024.
- [2] Pepelnjak, T. Analize aktuatorskega pestičnega sklopa za mehatronsko preoblikovalno orodje. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024.
- [3] Pepelnjak, T., Stefanovska, E., Sevšek, L. Rupnik Poklikar D., Razvoj digitalnega dvojčka mehatronskega štančnega orodja – optimizacija sistema. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2024.
- [4] Štuklek U., Poročilo projekta pametno mehatronsko štančno orodje za štančanje tipskih izdelkov, Dafra d.o.o., Žalec 2024.

IZBOLJŠANJE PRODUKTIVNOSTI PRI REZANJU Z OPTIČNIM LASERJEM: METODA VERIŽNIH POVEZAV IZDELKOV

Marko SIMONIČ, Kristijan ŠKET, David POTOČNIK, Jernej HERNAVS, Tadej PERŠAK, Simon KLANČNIK, Mirko FICKO

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

IZVLEČEK

Laserski razrez izdelkov manjših dimenzij v velikih serijah otežuje ročno ločevanje in manipulacijo, kar povzroča ozka grla v proizvodnji. Predstavljena je inovativna metoda verižnih povezav, pri kateri so izdelki zaporedno povezani v verigo. Eksperimentalno preizkušanje na jekleni plošči (debeline 3 mm, material 1.0038), razrezani z laserskim strojem Bodor i7 (3 kW) je bilo izvedeno za optimizacijo treh parametrov romboidnih povezovalnih členov: razdalje med kosi (A), širine stičnega področja (B) in kota člena (C). Z modelom strojnega učenja naključnih gozdov je bil napovedan minimalni ostanek: 0,086 mm za dolžino ($A=4,0$ mm, $B=0,2$ mm, $C=53,3^\circ$), 0,301 mm za širino ($A=3,0$ mm, $B=0,2$ mm, $C=30,0^\circ$) in 0,019 mm za debelino ($A=3,0$ mm, $B=0,356$ mm, $C=30,0^\circ$). Predlagana metoda povečuje učinkovitost manipulacije po razrezu, zmanjšuje fizične obremenitve delavca in omogoča avtomatizacijo v preciznih industrijskih aplikacijah.

1 UVOD

Pri laserskem rezanju z optičnimi vlakni se za rezanje materialov uporablja visokozmogljiv laserski žarek, ki ga ustvarja in prenaša optični kabel [1]. Laserski žarek je mogoče usmeriti na zelo majhno točko, kar omogoča natančne reze [2]. Za ogljikovo jeklo so optični laserji primerni zaradi visoke hitrosti rezanja, nizkih obratovalnih stroškov in minimalnih toplotnih deformacij [3]. Postopek je brezkontakten, prilagodljiv in enostaven za avtomatizacijo, kar je idealno za industrijske aplikacije z velikim obsegom proizvodnje [4]. Ključne tehnološke prednosti so: visoka natančnost za zapletene oblike (primerno za majhne sestavne dele), hitri časi obdelave, kar povečuje produktivnost pri velikih serijah, majhno toplotno vplivano področje in manjša poraba energije, napram sorodnim tehnologijam termičnega razreza [5]. Navkljub vsem prednostim tehnologije laserskega razreza pri obdelavi materialov, zlasti pri velikih serijah, pa manipulacija majhnih izdelkov, ki vključuje njihovo ločevanje, zbiranje in transport, predstavlja kompleksen izziv, saj zahteva natančno organizacijo in pogosto ročno posredovanje, kar lahko znatno upočasni celoten proizvodni proces.

2 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Raziskovalno delo se osredotoča na laserski razrez in manipulacijo majhnih izdelkov pri velikih serijah. Postopek ne vključuje le samega rezanja, temveč tudi ločevanje in zbiranje posameznih kosov, kar je zaradi majhnih dimenzij še posebej delovno intenzivno. Izdelki se zlahka izgubijo ali pa jih je treba ročno odstraniti z mize stroja ali iz posode za zbiranje izdelkov. Zamudno zbiranje in transport majhnih izdelkov lahko postane vzrok ozkega grla v procesu.

2.1 Trenutna rešitev: mikro-spoji

Najpogostejša rešitev za rokovanje je uporaba mikro-spojev, bolje znanih pod angleško besedno zvezo micro-joint. Gre za majhne nerazrezane dele vzdolž obrisa kosa, ki držijo razrezane izdelke na plošči. Pristop preprečuje, da bi majhni kosi med rezanjem padli v stroj ali se zagodili, zlasti pri visokotlačnih tokovih plina (običajno 5-25 barov pri rezanju z dušikom). Mikro-spoji, ki so običajno široki 0,1-1 mm, so zasnovani tako, da jih je mogoče med naknadno obdelavo zlahka zlomiti, tako da lahko posluževalci stroja ročno ločijo izdelke od plošče. Vendar ima ta metoda svoje omejitve: pri velikih serijah je lahko

postopek ročnega ločevanja dolgotrajen in fizično zahteven, zlasti če gre za več sto majhnih delov.

2.2 Predlagana rešitev

Za premagovanje teh izzivov je predlagan nov pristop: modeliranje izdelkov kot verige zaporedno povezanih elementov. Namesto da bi vsak izdelek posebej povezali s ploščo preko mikro-spojev, so izdelki zasnovani tako, da so povezani zaporedno in tvorijo neprekinjeno verigo. To verigo je mogoče zlahka premakniti z rezalne mize na bolj ergonomično mesto, kot je delovna miza, kjer je mogoče posamezne izdelke ločiti z odlomom povezovalnih členov. Cilj te metode je racionalizirati postopek rokovanja, saj omogoča rokovanje s celotno verigo kot zgolj z eno enoto, kar zmanjšuje potrebo po odstranjevanju vsakega kosa posebej direktno na stroju.

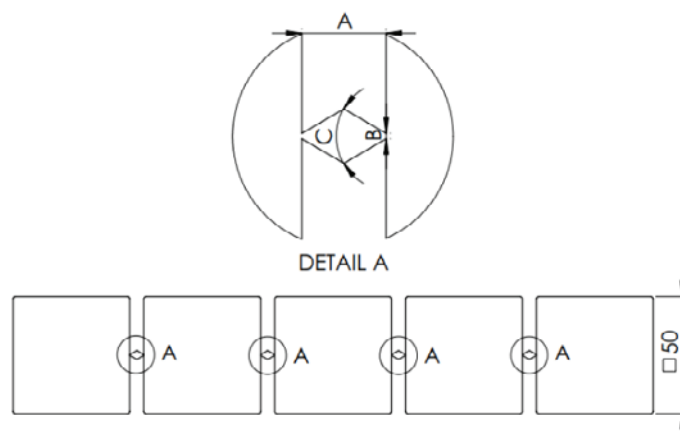
3 METODE DELA

Pri oblikovanju povezovalnih členov med posameznimi izdelki je ključen izziv doseči ravnovesje med zadostno mehansko robustnostjo, enostavno odstranitvijo in minimalnim ostankom materiala. Členi morajo zagotoviti manipulacijo z verigo brez tveganja za predčasno pretrganje, hkrati pa morajo biti dovolj šibki, da se izdelki enostavno ločijo z minimalnim vplivom na kvaliteto izdelka. Z namenom določitve optimalnih geometrijskih lastnosti povezovalnih členov je bilo izvedeno eksperimentalno preizkušanje treh kombinacij parametrov povezovalnih členov v obliki romba:

- Razdalja med posameznimi kosi (A),
- širina stičnega področja (B) in
- kot povezovalnega člana (C).

Vzorci so bili izrezani iz 3 mm debele plošče jekla 1.0038 dimenzij 3000×1500 mm. Skupno je bilo pripravljenih 27 različnih kombinacij parametrov ($3 \times 3 \times 3$), pri čemer je bil za vsako kombinacijo izdelan en vzorec verige s petimi zaporedno povezanimi členi. To pomeni, da je bilo skupno razrezanih 27 verig oziroma 135 členov, kar je predstavljalo osnovo za analizo mehanskih odzivov in ostankov po ločitvi. Vzorci

so bili razrezani z laserskim strojem Bodor I7 moči 3 kW. Kot zaščitni plin je bil uporabljen dušik (čistosti 99,999 %), kar omogoča čisto rezalno površino brez oksidacije. Kompenzacija premera laserskega žarka je bila nastavljena na 0,1 mm, s čimer je bila zagotovljena skladnost med načrtovano in realno geometrijo verige. Ločevanje členov je potekalo s kombiniranimi kleščami in torzijsko obremenitvijo, kjer je moment deloval v osi verige. Merjenje ostankov po ločitvi je bilo izvedeno z digitalnim pomičnim merilom Mitutoyo 500-706-20. V primerih, kjer je bilo možno izvesti dve ločeni meritvi na istem členu (npr. na nasprotnih robovih), je bila za nadaljnjo obdelavo uporabljena povprečna vrednost ostankov, s čimer smo zmanjšali vpliv lokalnih odstopanj ali morebitnih merilnih napak. Slika 1 prikazuje verigo izdelkov, povezano s predlaganim členom. Na detajlu A je predlagan člen romboide oblike z jasno definiranimi geometrijskimi parametri.



Slika 1: Geometrijski parametri povezovalnega člana.

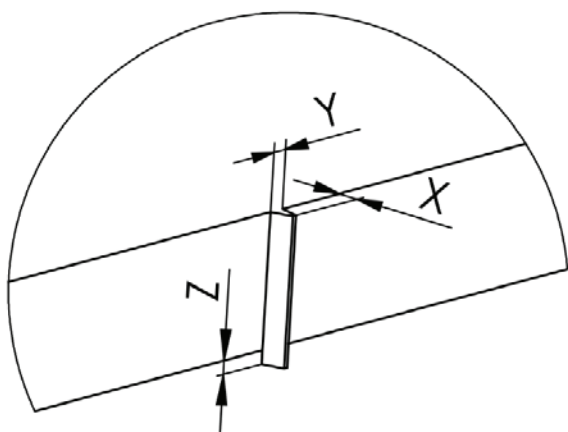
Tabela 1 prikazuje preizkušane geometrijske parametre povezovalnih členov in pripadajoče vrednosti, uporabljene v eksperimentalnem delu. Vsak izmed treh parametrov je bil testiran pri treh različnih vrednostih, kar je omogočilo sistematično kombinatorično analizo.

Tabela 1: Pregled preizkušenih vhodnih geometrijskih parametrov povezovalnih členov.

Parameter	Spremenljivka	Testirane vrednosti		
		3	4,5	6
Razdalja med komadi [mm]	A	3	4,5	6
Širina stičnega področja [mm]	B	0,2	0,3	0,4
Kot [°]	C	30	45	60

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

Za analizo vpliva vhodnih geometrijskih parametrov (A – razdalja med komadi, B – širina stičnega področja, C – kot povezovalnega člena) na ostanke po ločitvi izdelkov je bila uporabljena metoda več izhodne regresije na osnovi naključnih gozdov (angl. Multi-output Random Forest). Model je bil optimiziran z iskanjem hiperparametrov (angl. Grid Search), kar je omogočilo robustnejšo napoved treh izhodov: dolžina (X), širina (Y) in debelina (Z) ostanka (slika 2). Povprečni rezultati meritev so predstavljeni v Tabeli 2.



Slika 2: Prikaz meritev ostanka

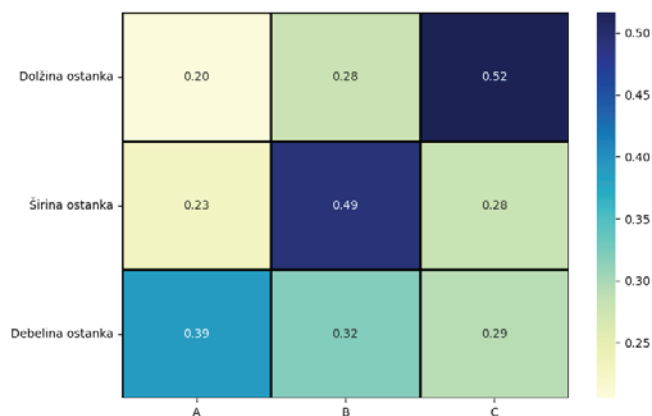
Tabela 1: povprečni rezultati meritev.

Zap. št.	A	B	C	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	3	0,2	30	0,229	0,283	0,189
2	4,5	0,2	30	0,204	0,341	0,248
3	6	0,2	30	0,232	0,323	0,138
4	3	0,3	30	0,122	0,407	0,3
5	4,5	0,3	30	0,166	0,389	0,164
6	6	0,3	30	0,146	0,506	0,437
7	3	0,4	30	0,126	0,541	0,033
8	4,5	0,4	30	0,142	0,488	0,166
9	6	0,4	30	0,174	0,521	0,201
10	3	0,2	45	0,184	0,394	0,225
11	4,5	0,2	45	0,145	0,384	0,188
12	6	0,2	45	0,178	0,535	0,197
13	3	0,3	45	0,116	0,636	0,209
14	4,5	0,3	45	0,208	0,551	0,192
15	6	0,3	45	0,22	0,497	0,093
16	3	0,4	45	0,166	0,528	0,113
17	4,5	0,4	45	0,192	0,617	0,114
18	6	0,4	45	0,146	0,63	0,283
19	3	0,2	60	0,098	0,352	0,306
20	4,5	0,2	60	0,092	0,424	0,11
21	6	0,2	60	0,108	0,315	0,227
22	3	0,3	60	0,134	0,443	0,198
23	4,5	0,3	60	0,134	0,473	0,252
24	6	0,3	60	0,152	0,371	0,262
25	3	0,4	60	0,136	0,545	0,129
26	4,5	0,4	60	0,114	0,516	0,105
27	6	0,4	60	0,11	0,529	0,179

4.1 Pomembnost vhodnih spremenljivk

Na osnovi pomembnosti spremenljivk (angl. feature importances) je bila izvedena ocena vpliva vsake vhodne spremenljivke (A, B, C) na posamezen izhod modela (dolžina, širina in debelina ostanka). Rezultati so prikazani v obliki toplotne karte (Slika 2), kjer višja vrednost pomeni večji vpliv določene vhodne spremenljivke na posamezen izhod. Toplotna karta je bila normalizirana po posameznem izhodu (tj. po vrsticah/horizontalno), tako da vsota vplivov vhodnih parametrov A, B in C za vsak izhod znaša 1. Na ta način je omogočena primerjava notranjih strukturnih razmerij med

spremenljivkami znotraj vsakega izhoda posebej, ne glede na absolutne razlike.



Slika 3: Toplotna karta pomembnosti vhodnih parametrov na posamezne izhode modela.

Dolžina ostanka

Največji vpliv na dolžino ostanka ima parameter C z vrednostjo 0,52, kar potrjuje predpostavko, da geometrijska orientacija stične ploskve pomembno vpliva na način porušitve materiala. Preostala parametra imata manjši, a še vedno opazen vpliv: B z vrednostjo 0,28 in A z vrednostjo 0,20.

Širina ostanka

V tem primeru, kot pričakovano izrazito izstopa parameter B z vrednostjo 0,49, kar je skladno z logičnim pričakovanjem – širša stična površina vodi v večji ostanek materiala po ločitvi.

Parametra C in A imata nekoliko manjši vpliv, z vrednostma 0,28 in 0,23, vendar še vedno prispevata k oblikovanju širine ostanka.

Debelina ostanka

Pri debelini ostanka je vpliv vhodnih spremenljivk razmeroma bolj izenačen, a še vedno izstopa parameter A z največjo vrednostjo 0,39. Sledi parameter B z vrednostjo 0,32, medtem ko ima C najnižjo relativno pomembnost (0,29).

Pri interpretaciji rezultatov je treba upoštevati tudi možne napake zaradi toplotnega vpliva laserskega rezanja. Na nekaterih členih se je pojavila žlindra, kar je lahko povzročilo lokalno povečanje debeline ostanka, neodvisno od vhodnih parametrov. Takšni vplivi so posledica fizikalnega odziva materiala in lahko delno pojasnijo opaženo variabilnost.

4.2 Ocena napovednega modela in optimizacija vhodnih parametrov

Naučeni model je bil kvantitativno ocenjen z uporabo standardnih regresijskih metrik na testnem podatkovnem naboru. V Tabeli 3 so prikazane vrednosti MSE (Mean Squared Error), RMSE (Root Mean Squared Error) in MAE (Mean Absolute Error) za posamezne izhode modela – dolžino, širino in debelino ostanka.

Rezultati kažejo, da model dosega najboljšo napovedno zmogljivost pri dolžini ostanka, kjer so vse tri metrike bistveno nižje v primerjavi z ostalima izhodoma. To kaže, da model najbolje prepoznava vzorce in odvisnosti, povezane s tem izhodom. Kljub nekoliko višjim vrednostim napak pri napovedi širine in debeline ostanka so rezultati še vedno tehnično sprejemljivi in potrjujejo uporabnost modela za nadaljnje analize.

Tabela 3: Regresijske metrike za napoved dolžine, širine in debeline ostanka.

Metrike	MSE	RMSE	MAE
Dolžina ostanka	0,0022	0,047	0,036
Širina ostanka	0,010	0,1	0,072
Debelina ostanka	0,015	0,124	0,1

Optimizacija vhodnih parametrov predstavlja pomemben korak v procesu izboljšave kakovosti spojev, saj omogoča aktivno prilagajanje vhodnih nastavitev z namenom doseganja čim bolj enotnih in natančnih rezultatov. Tako lahko na podlagi naučenega modela napovemo kvaliteto spoja, hkrati pa vnaprej določimo optimalne pogoje za izdelavo, kar pomembno prispeva k povečanju učinkovitosti proizvodnega procesa.

4.3 Optimizacija vhodnih parametrov

Za optimizacijo je bil uporabljen zvezni prostor vrednosti znotraj eksperimentalno zajetih območij parametrov, kot je prikazano v Tabeli 3. Vrednosti so bile generirane z enakomerno porazdelitvijo, kar je omogočilo analizo širšega nabora kombinacij, ne le tistih, ki so bile neposredno testirane v eksperimentu. Poleg minimizacije posameznih ostankov je bila

dosežena uravnotežena kombinacija, ki zmanjšuje povprečni ostanek vseh treh izhodov (dolžina, širina, debelina), kar je ključno za praktično uporabo v proizvodnji.

Tabela 4: Kvantitativna ocena napovednega modela po posameznih izhodih

Optimizacijski cilj	Najboljša kombinacija (A, B, C)	Napovedani ostanek [mm]
Min. dolžina ostanka	(4,0; 0,2; 53,3°)	0,086
Min. širina ostanka	(3,0; 0,2; 30,0°)	0,301
Min. debelina ostanka	(3,0; 0,356; 30,0°)	0,019

Rezultati so pokazali, da kombinacija ($A=4,0$ mm, $B=0,2$ mm, $C=53,3^\circ$) rezultira v najmanjši dolžini ostanka (0,086 mm), kar je skladno z visoko pomembnostjo parametra C (0,52) za ta izhod. Za širino ostanka je optimalna kombinacija ($A=3,0$ mm, $B=0,2$ mm, $C=30,0^\circ$) z ostankom 0,301 mm, kjer prevladuje vpliv parametra B (0,49). Pri debelini ostanka je najugodnejša kombinacija ($A=3,0$ mm, $B=0,356$ mm, $C=30,0^\circ$) z ostankom 0,019 mm, pri čemer je ključni parameter A (0,39). Za uravnotežen rezultat, ki upošteva vse tri ostanke, je bila identificirana kombinacija ($A=3,5$ mm, $B=0,25$ mm, $C=45,0^\circ$), ki zagotavlja povprečni ostanek približno 0,150 mm. Ta kombinacija omogoča dober kompromis med kakovostjo ločevanja in mehansko trdnostjo povezovalnih členov.

5 ZAKLJUČEK

Predlagana rešitev predlaga spremembo rokovanje z majhnimi lasersko izrezanimi deli v velikih serijah. Z omogočanjem lažje manipulacije in ločevanja bi lahko zmanjšala čas in energijo, ki ju potrebujejo posluževalci stroja in s tem povečala produktivnost. Predlog je v skladu s trendom avtomatizacije in ergonomskega oblikovanja v proizvodnji, saj zmanjšuje fizične zahteve za delavce in je lahko posebej koristen v panogah, kjer so pogosti majhni in zapleteni deli v večjih količinah. Optimizacija parametrov povezovalnih členov je pokazala, da je mogoče

doseči ravnovesje med trdnostjo in enostavnim ločevanjem, kar odpira pot do učinkovitejših proizvodnih procesov.

Za nadaljnji razvoj metode bi bilo smiselno preizkusiti alternativne oblike povezovalnih členov, kot so zaobljene ali stopničaste geometrije, ki bi lahko dodatno zmanjšale ostanke ali izboljšale mehansko stabilnost. Smiselno je določiti vpliv različnih materialov in debelin plošč na učinkovitost verižnih povezav. Prednost bi lahko predstavljali namensko razviti avtomatizirani sistemi za ločevanje verig, npr. z uporabo robotskih rok ali vibracijskih miz, kar bi še dodatno zmanjšalo ročno delo. Uporaba naprednih optimizacijskih tehnik, kot so genetski algoritmi ali strojno učenje z ojačitvijo, bi lahko omogočilo še natančnejše prilagajanje parametrov za specifične industrijske aplikacije. Nazadnje bi bilo smiselno preučiti ekonomsko upravičenost metode, v primerjavi z obstoječimi pristopi, da bi potrdili njeno širšo uporabnost.

Viri:

- [1] A. Mahrle, E. Beyer, Theoretical aspects of fibre laser cutting, *J Phys D Appl Phys* 42 (2009) 175507. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/17/175507>.
- [2] R. Sołtysiak, P. Wasilewski, A. Sołtysiak, A. Troszyński, P. Maćkowiak, The Analysis of Fiber and CO₂ Laser Cutting Accuracy, *MATEC Web of Conferences* 290 (2019) 03016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929003016>.
- [3] G. V. Ermolaev, P. V. Yudin, F. Briand, A. V. Zaitsev, O.B. Kovalev, Fundamental study of CO₂- and fiber laser cutting of steel plates with high speed visualization technique, *J Laser Appl* 26 (2014). <https://doi.org/10.2351/1.4895563>.
- [4] Naresh, P. Khatak, Laser cutting technique: A literature review, *Mater Today Proc* 56 (2022) 2484–2489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.250>.
- [5] T. Muangpool, S. Pullteap, Reviews on laser cutting technology for industrial applications, in: T. Mayteevarunyoo (Ed.), *Third International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017)*, SPIE, 2018: p. 34. <https://doi.org/10.1117/12.2300955>.

IZBOLJŠANJE PRODUKTIVNOSTI PRI REZANJU Z OPTIČNIM LASERJEM: METODA VERIŽNIH POVEZAV
IZDELKOV

Marko SIMONIČ, Kristijan ŠKET, David POTOČNIK, Jernej HERNAVS, Tadej PERŠAK, Simon KLANČNIK, Mirko
FICKO; Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

PODALJŠANJE UPORABNE DOBE HIDRAVLIČNEGA OLJA IN VPLIV NA ENERGETSKO UČINKOVITOST

Aleš HROBAT, Jošt MOHORKO, Vito TIČ, Milan KAMBIČ
Olma d.o.o.

IZVLEČEK

Na uporabno dobo hidravličnega olja imajo velik vpliv pogoji uporabe, prav tako pa njegova sestava. Proizvajalci imamo za proizvodnjo hidravličnih olj na voljo različne skupine baznih olj. Zaradi različnih lastnosti posameznih skupin je tudi uporabna doba končnega izdelka različna.

Prispevek obravnava hidravlična olja na osnovi različnih skupin baznih olj, njihove osnovne značilnosti in razlike med njimi. V nadaljevanju pa predstavlja novo serijo hidravličnih olj Energolubric z vidika podaljšanja uporabne dobe v primerjavi s klasičnimi hidravličnimi olji na mineralni osnovi. Prikazani bodo rezultati primerjalnega testiranja oksidacijske stabilnosti različnih olj. Prav tako bo obravnavan vidik energetske učinkovitosti obratovanja hidravličnega sistema, na katerega vpliva tudi hidravlično olje.

1 UVOD

Bazna olja so osnovna sestavina maziv in hidravličnih olj ter se delijo v več skupin glede na način njihove proizvodnje in lastnosti. Ločimo jih na pet glavnih skupin:

- skupina I: Mineralna bazna olja, pridobljena s tradicionalnimi rafinerijskimi postopki, ki vključujejo destilacijo in obdelavo s topili. Imajo nižjo oksidacijsko stabilnost in večjo vsebnost nečistoč v primerjavi z višjimi skupinami.
- skupina II: Bolj prečiščena mineralna olja, pridobljena s hidrokrekingom, kar jim zagotavlja boljše lastnosti, kot so višja odpornost proti oksidaciji in daljša uporabna doba.
- skupina III: Visoko prečiščena mineralna olja, ki so pridobljena s procesom hidrokrekinga in izomerizacije, zaradi česar se po kakovosti približujejo sintetičnim oljem.
- skupina IV: Sintetična olja na osnovi polialfaolefinov (PAO), ki imajo odlično oksidacijsko stabilnost, nizko hlapnost in širok temperaturni razpon uporabe.
- skupina V: Različna olja, ki niso vključena v skupine I-IV (npr. estrska olja), ki se uporabljajo v specifičnih uporabah zaradi izjemnih mazalnih lastnosti in odpornosti proti staranju.

Vsaka skupina baznih olj ima svoje prednosti in slabosti, ki vplivajo na končne lastnosti hidravličnih olj. Izbira ustreznega baznega olja je ključna za doseganje optimalne zmogljivosti in dolge uporabne dobe hidravličnih sistemov [1], [2], [3], [4].

Podaljšanje uporabne dobe mineralnega hidravličnega olja je tesno povezano z njegovo oksidacijsko stabilnostjo. Oksidacija povzroča nastanek kislin, lakov in drugih škodljivih produktov, ki lahko poslabšajo delovanje sistema. Uporaba visoko prečiščenih mineralnih olj ali sintetičnih alternativ s posebej formuliranimi antioksidanti lahko znatno upočasni ta proces, kar podaljša intervale menjave olja in zmanjša stroške vzdrževanja [2], [4].

Poleg tega ima hidravlično olje pomemben vpliv na energetske učinkovitost hidravličnega sistema. Njegova sestava in viskoznost vplivata na trenje, izgube energije in temperaturo delovanja. Hidravlična olja z nižjo viskoznostjo pri nizkih temperaturah ter stabilnimi viskoznostnimi lastnostmi pri visokih temperaturah prispevajo k zmanjšanju porabe energije ter izboljšanju učinkovitosti sistema.

Zaradi teh razlogov se v industriji vse bolj uveljavljajo hidravlična olja, ki temeljijo na baznih oljih višjih skupin in vsebujejo napredne aditive, ki izboljšujejo oksidacijsko stabilnost in

energetsko učinkovitost. Takšen primer so v zadnjih letih tudi stroji za brizganje plastike.

Stroji za brizganje plastike so energetsko intenzivni, saj vključujejo segrevanje materiala, delovanje hidravličnih pogonov in hlajenje. Merjenje električne porabe nam omogoča [5]:

- spremljanje porabe v realnem času: tako lahko ugotovimo, kdaj stroj porablja največ energije (med zagonom, delovanjem, stanjem pripravljenosti ali ob izklopu).
- analizo ciklov brizganja: primerjava porabe med različnimi orodji ali izdelki razkrije, kateri programi ali postopki so bolj (ali manj) energetsko učinkoviti.
- ocenjevanje stroškov na izdelek: če poznamo porabo na cikel, lahko izračunamo, koliko električne energije porabimo za posamezen kos – to je koristno za kalkulacijo stroškov in določanje cen.
- prepoznavanje odstopanj in napak: nenadna povečanja porabe lahko kažejo na mehansko okvaro, neustrezno vzdrževanje ali spremembe v obratovalnih pogojih.
- Iskanje možnosti za optimizacijo: na primer, če opazimo visoko porabo v času mirovanja, lahko razmislimo o samodejnem preklopu v varčni način ali zmanjšanju tlaka v hidravličnem sistemu.

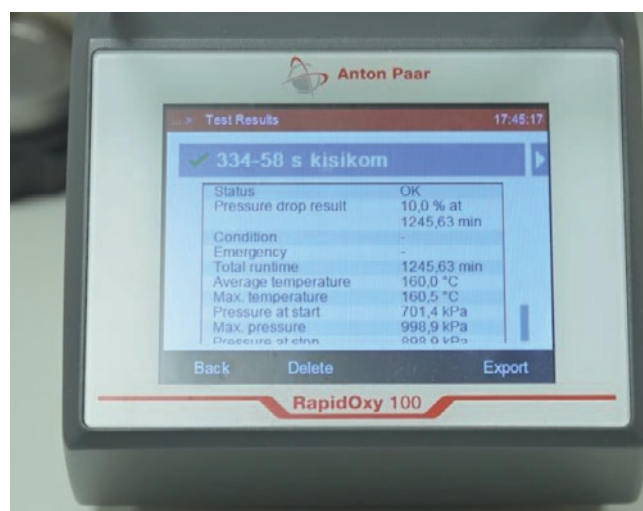
2 VPLIV OKSIDACIJSKE STABILNOSTI NA UPORABNO DOBO OLJA

Oksidacijska stabilnost je ena ključnih lastnosti olja za zanesljivo in dolgotrajno delovanje hidravličnih sistemov. Oksidacija je naraven kemijski proces, pri katerem olje reagira s kisikom – še posebej pospešeno pri višjih temperaturah, v prisotnosti kovinskih delcev ali vode. Posledica so nastanek organskih kislin, lakov, muljev in drugih škodljivih produktov razgradnje, ki povzročajo obrabo, mašijo filtre, zmanjšujejo učinkovitost ventilov ter vplivajo na viskoznost olja. Ti razgradni produkti poslabšajo delovanje hidravličnega sistema, dolgoročno pa lahko povzročijo tudi okvare komponent in višje stroške popravil. Zato je izbira ustreznega hidravličnega olja izjemnega pomena. Uporaba visoko prečiščenih mineralnih olj, izdelanih z modernimi postopki (npr. hidrokreking), ali prehod na sintetična olja z večjo toplotno in kemijsko

odpornostjo, omogoča bistveno boljšo zaščito pred oksidacijo. Še dodatno učinkovitost zagotavljajo posebej formulirani antioksidanti, ki upočasnjujejo razgradnjo baznega olja in ohranjajo njegove lastnosti skozi daljše časovno obdobje.

Zaradi teh izboljšav se podaljšajo servisni intervali, zmanjša se pogostost menjav olja in količina odpadnega olja ter stroški povezani z vzdrževanjem in zamenjavami filtrov. Poleg tega se poveča zanesljivost delovanja celotnega sistema in zmanjša tveganje za nenačrtovane izpade. Skratka, pravilna izbira olja in razumevanje njegove oksidacijske stabilnosti imata neposreden vpliv na učinkovitost, varnost in ekonomiko delovanja hidravličnih naprav.

Oksidacijsko stabilnost različnih hidravličnih olj viskoznostnega razreda ISO VG 46 smo merili z instrumentom RapidOxy 100, prikazanim na sliki 1.



Slika 1: Instrument RapidOxy 100 za merjenje oksidacijske stabilnosti olj

Oksidacijsko stabilnost smo določili tako, da smo merili čas od začetka testiranja, pa do trenutka, ko se je tlak kisika ali sintetičnega zraka v napravi znižal za 10 % glede na začetno vrednost. Rezultati meritev so prikazani v tabeli 1. Vidimo lahko, da je oksidacijska stabilnost olj Energolubric neprimerno višja kot pri vseh drugih oljih. V nekaterih primerih celo več kot dvakrat višja. Glede na to ni presenetljivo, da se ta olja pri praktični uporabi ob enakih obratovalnih pogojih odlikujejo z daljšo uporabno dobo kot nekatera

druga olja. To pa seveda pomeni nižje skupne stroške ne glede na nekoliko višjo ceno teh olj.

Tabela 1: Oksidacijska stabilnost različnih olj

Naziv olja	Metoda	Vrednost [min]
Energolubric 3046 ZF	ASTM D8206	1310
Energolubric 2046 ZF	ASTM D8206	1300
Energolubric 4046 ZF	ASTM D8206	1220
Energolubric 2046	ASTM D8206	1067
Hydrolubric VG 46	ASTM D8206	664
Hydrolubric HD 46	ASTM D8206	570
Hydrolubric HLP 46	ASTM D8206	529
Hydrolubric VGS 46	ASTM D8206	672
Hydrolubric HVLP 46	ASTM D8206	787
Hydrolubric VG 46 D	ASTM D8206	536

3 VPLIV HIDRAVLIČNEGA OLJA NA ENERGETSKO UČINKOVITOST

Stroji, kjer smo merili, oziroma še merimo porabo električne energije, so stroji za brizganje plastike Krauss Maffei 1100 MX, Krauss Maffei 1150 MX in Kraus Maffei KM 1000. Na prvem stroju smo meritev najprej opravili s klasičnim hidravličnim oljem Hydrolubric VG 46, potem pa polnitev zamenjali z vrhunskim, energetsko varčnim oljem Energolubric 2046 in ponovili meritev. Na drugem stroju smo meritev najprej opravili z oljem Hydrolubric VG 46 HC nato pa z oljem Energolubric 2046.

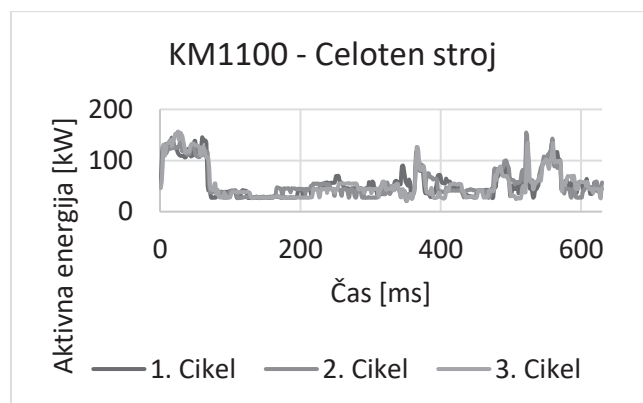
Na obeh strojih bile opravljene meritve porabe električne energije najprej na glavnem dovodu električne energije v stroj, ki zajema vse električne porabnike stroja, pri čemer največje porabnike energije predstavljajo elektromotor hidravlične črpalke ter grelniki plastične mase.

Meritve so bile opravljene s strojno in programsko opremo Beckhoff, pri čemer se je uporabil modul za merjenje električne energije EL3443 v kombinaciji s SCT6421 – 500 A tokovniki z natančnostnim razredom 0,5. Omenjena strojna in programska oprema omogoča zajemanje in beleženje številnih električnih veličin, kot so napetosti, tokovi, aktivna električna moč in energija, ter druge, s frekvenco 50 Hz oziroma vsakih 20 ms.

V sklopu vsake meritve porabe električne energije na posameznem stroju ob uporabi

klasičnega in energetsko varčnega olja so bile opravljene po 3 meritve z namenom preverjanja ustreznosti in ponovljivosti meritev kakor tudi samega delovanja stroja.

Analiza posameznih meritev je žal pokazala, da merjenje in zajemanje porabe električne energije na glavnem dovodu električne energije v stroj ni bila smiselna in pravilna izbira, saj je praktično nemogoče doseči ponovljivosti delovanja stroja v posameznih ciklih. Stroj namreč vsebuje mnoge regulacijske kroge, kot npr. za vzdrževanje temperature plastične mase, kjer se grelci vklopljajo v različnih frekvencah in intervalih. To je razvidno iz slike 2, ki prikazuje meritev aktivne električne energije na stroju KM 1100 MX z uporabo olja Energolubric 2046 v treh zaporednih ciklih delovanja, pri čemer je čas trajanja cikla 63,0 sekunde. Vidimo, da se poraba energije v posameznem ciklu zelo razlikuje, zato je s tem načinom meritve praktično nemogoče doseči ponovljivost in primerljivost meritev.



Slika 2: Primerjava meritev treh zaporednih ciklov na glavnem dovodu električne energije

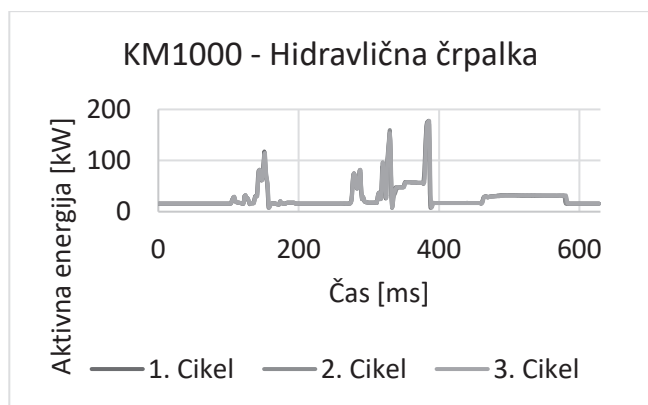
Čeprav podrobna analiza aktivne energije v posameznih ciklih kaže močno neponovljivost vklopa grelcev, pa smo kljub temu opravili številčno analizo povprečne aktivne električne energije v polurnem intervalu delovanja stroja, pri čemer je vpliv delovanja grelnikov do neke mere odstranjen, saj takšna meritev vsebuje njihovo povprečno porabo v omenjenem polurnem intervalu. Tabela 2 prikazuje povprečno aktivno energijo pri delovanju stroja KM 1100 MX v 30 minutnem intervalu pri uporabi klasičnega hidravličnega olja Hydrolubric VG 46 ter energetsko varčnega hidravličnega olja

Energolubric 2046. Kljub temu da se zavedamo, da tovrstna meritev porabe na glavnem dovodu električne energije v sam stroj ni popolnoma merodajna, pa prve analize porabe električne energije pri uporabi energetske varčnega hidravličnega olja Energolubric 2046 kažejo na določene prihranke v višini 4,3 %.

Tabela 2: Primerjava poprečne aktivne energije

KM MX 1100 (30 min interval)	Poprečna aktivna energija [kW]	
Hydrolubric VG 46 – 1. meritev	53,3	53,35
Hydrolubric VG 46 – 2. meritev	53,4	
Energolubric 2046 – 1. meritev	50,7	51,05
Energolubric 2046 – 2. meritev	51,4	

Ker izvedene meritve na prvih dveh strojih kažejo obetavne rezultate, zdaj nadaljujemo z izvedbo meritev na samem pogonskem elektromotorju hidravlične črpalke, s čimer se bodo izločili vplivi drugih porabnikov energije, kot so grelniki ter ostali. Meritve nadaljujemo na tretjem stroju KM 1000, pri katerem je načrtovana menjava trenutno uporabljanega klasičnega hidravličnega olja Hydrolubric VG 46 z energetske varčnim oljem Energolubric 2046.



Slika 3: Primerjava meritev treh zaporednih ciklov na pogonskem elektromotorju

Meritve še niso zaključene. Kljub temu pa lahko prikažemo prve analize meritev, ki potrjujejo, da so zdaj rezultati meritev treh

zaporednih ciklov mnogo bolj ponovljivi in primerljivi, kar prikazuje slika 3.

4 SKLEP

Z raziskavo smo pokazali, da ima izbira ustreznega hidravličnega olja pomemben vpliv tako na podaljšanje njegove uporabne dobe kot tudi na energetske učinkovitost hidravličnih sistemov. Primerjalne meritve oksidacijske stabilnosti jasno kažejo, da olja višjih kakovostnih razredov, kot je tudi olje Energolubric 2046, omogočajo bistveno daljše čase uporabe, kar neposredno vpliva na daljše servisne intervale, manjše stroške vzdrževanja ter zmanjšano količino odpadnega olja.

Poleg tega preliminarne meritve porabe električne energije pri delovanju strojev za brizganje plastike nakazujejo na opazne energetske prihranke pri uporabi energetske varčnega hidravličnega olja, tudi do 4,3 %, čeprav je zaradi kompleksnosti sistema natančna analiza zahtevna. Meritve, osredotočene na sam pogonski elektromotor hidravlične črpalke, pa že kažejo večjo ponovljivost in zanesljivost rezultatov, kar bo omogočilo še bolj natančno oceno energetske učinkovitosti v nadaljevanju.

Zato lahko zaključimo, da je uporaba naprednih hidravličnih olj z večjo oksidacijsko stabilnostjo in izboljšanimi viskoznostnimi lastnostmi smiselna tako z vidika tehnične učinkovitosti kot tudi z ekonomskega in okoljskega vidika.

Viri:

- [1] Kambič, M.: *Mala šola mazanja*, Profidtp, Škofljica, 2022.
- [2] Kambič, M.: Razvoj in praktična uporaba vrhunskega hidravličnega mineralnega olja, *Ventil* 28(2022)4, str. 268–275.
- [3] Kambič, M.: Mineralna bazna olja, *IRT3000* 16(2021)6, str. 128-130
- [4] Kambič, M.: Premium quality hydraulic oils, *Fluidna tehnika* 2021, str. 231-241
- [5] O. AI, »Open AI« 2025 (<https://openai.com>).

UPOŠTEVANJE RAZPOLOŽLJIVOSTI SOLARNE ENERGIJE PRI NAPOVEDOVANJU OBRATOVALNE ZMOGLJIVOSTI AVTOMATIZIRANEGA OBDELOVANJA KMETIJSKIH POVRŠIN

**Domen ŠERUGA, Primož POREDOŠ, Dominik KOZJEK,
Aleš GOSAR, Marko NAGODE, Jernej KLEMENC**
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Želja po avtomatizaciji zahteva natančno poznavanje dejavnikov, ki vplivajo na obravnavani proces. Ena izmed možnosti trajnostnega obdelovanja kmetijskih površin v okviru zelenih urbanih skupnosti prihodnosti je mogoča z uporabo avtomatizirane flote obdelovalnih robotov, ki glede na razpoložljive vire solarne energije optimirano skrbijo za dodeljen prostor. Ker se vir razpoložljive energije spreminja s spreminjanjem letnih časov, je pri zasnovi in razvoju velikosti napajalnih sistemov in optimizacijskih algoritmov obratovanja avtomatizirane flote obdelovalnih robotov potrebno upoštevati več dejavnikov. V tej študiji obravnavamo vprašanje, kako razpoložljiva solarna energija v Sloveniji na območju mesta Ljubljana vpliva na možnost napajanja izbranega Li-ionskega baterijskega paketa in kakšne so posledice tega nihanja na razpoložljivost obratovalnih zmogljivosti avtomatizirane flote obdelovalnih robotov. Izbran baterijski paket je sestavljen iz 7 osnovnih Li-ionskih celic kapacitete 20 Ah, kar daje 24 V nominalne obratovalne napetosti. Pri tipični uporabi z močjo 100 W lahko takšen baterijski paket zagotavlja približno 4 ure obratovanja stroja. Ugotovili smo, da medtem ko v oblačnem januarskem dnevu z izbrano velikostjo fotovoltaičnih panelov napolnimo v enem dnevu zgolj 1 baterijski paket, se zaradi nihanja razpoložljive solarne energije ta številka v sončnem januarskem dnevu vzpne na 20, v sončnem junjskem dnevu pa na kar 55 baterijskih paketov.

1 UVOD

Zelene skupnosti prihodnosti so zasnovane tako, da spodbujajo trajnostni način življenja, zmanjšujejo vpliv na okolje in izboljšujejo kakovost življenja prebivalcev [1-5]. Prvi ključen dejavnik vključuje načrtovanje in izvajanje trajnostnih strategij s povezovanjem lokalnih oblasti, prebivalcev, podjetij in nevladnih organizacij. Naslednji ključen dejavnik je zelena infrastruktura oz. vključevanje naravnih elementov (parkov, vrtov in dreves) v urbana naselja za izboljšanje kakovosti zraka, vode in življenja prebivalcev. Nadvse pomembna sta skrb in urejanje javnih zelenih površin, kar prispeva k ohranjanju biotske pestrosti. Zadnji ključen dejavnik je uporaba obnovljivih virov energije, ekološko ozaveščenega prevoza in pametnih tehnologij za zmanjšanje emisij ogljika in ohranjanje naravnih virov. Cilj zelenih skupnosti prihodnosti je zagotovitev odpornega lokalnega okolja pri spopadanju s podnebnimi spremembami, močno vzpodbudo pa imajo tudi v okviru UNESCOvih partnerstev [1], direktiv

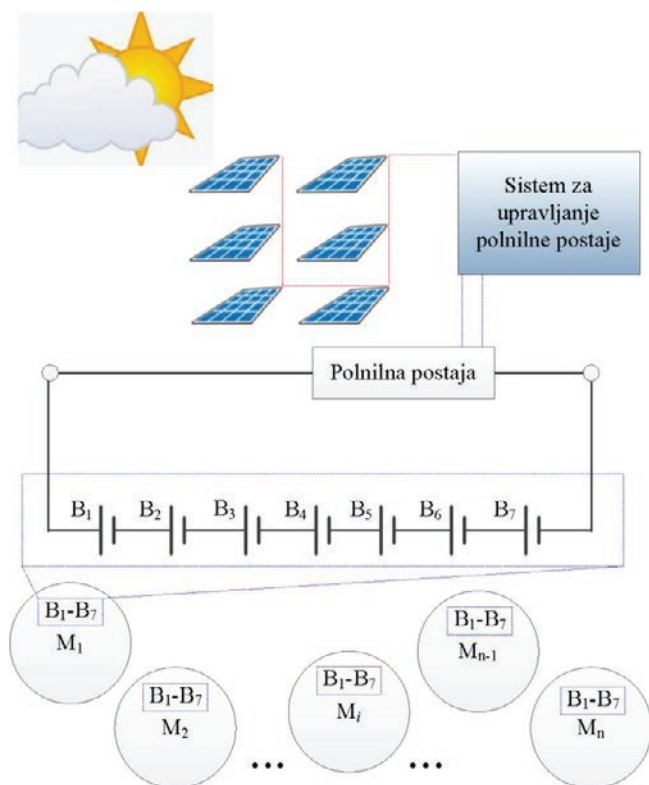
Evropske komisije [2] in nacionalnih strategij [3-5]. Trajnostno obdelovanje zelenih površin v okviru zelenih skupnosti prihodnosti je mogoče z uporabo avtomatizirane flote obdelovalnih robotov, ki glede na predviden prostor skrbijo za okopavanje in pletje tal. Omenjena želja poleg izdelovalnih možnosti vseh sklopov sistema s tehničnega vidika zahteva in spodbuja iskanje razvojno-raziskovalnih rešitev za zagotovitev energije za obratovanje, pretvorbo energije pri spremenljivih solarnih pogojih in njeno shranjevanje v (recikliranih) baterijskih paketih, ter optimizacijo polnjenja flote obdelovalnih robotov glede na ciljno funkcijo izrabe energije ali časa polnjenja. Obstajajo že primeri dobre prakse, kjer je življenjska doba baterijskih paketov, prvotno namenjenim uporabi v transportnih sredstvih, podaljšana z uporabo v stacionarnih aplikacijah za pokrivanje energijskih potreb zelenih skupnosti [6].

V tem prispevku smo analizirali razmere polnjenja in praznjenja baterijskih paketov na območju mesta Ljubljana v treh različnih časovnih obdobjih in pri štirih različnih

obratovnih karakteristikah flote obdelovalnih robotov.

2 METODA

V analizi je bil uporabljen tip Li-ionske baterijske celice LiNiMnCoO₂ (NMC) z nazivno kapaciteto 70 Wh in napetostjo med 3.0 V za izpraznjeno stanje in 4.15 V za napolnjeno stanje [7-9]. Baterijski paket je bil nato sestavljen iz 7 zaporedno vezanih baterijskih celic B₁-B₇, kar da nazivno napetost paketa 24 V in nazivno kapaciteto okrog 500 Wh – *Slika 1*. Predpostavili smo, da bi vsak robot v obdelovalni floti imel omenjen baterijski paket, ki bi zagotavljal njegovo premikanje in koristno delo.



Slika 1: Solarno napajanje baterijski paket B₁-B₇ za zagotavljanje energije flote obdelovalnih robotov M_i; i = 1, ..., n.

Glede na tri različne vremenske pogoje (oblačen januarski dan (*min januar*), sončen januarski dan (*max januar*) in sončen junijski dan (*max junij*)) smo definirali tri tipične polnilne karakteristike fotovoltaičnih panelov. Odločili smo se, da izberemo 6 fotovoltaičnih panelov, kar je v najslabšem možnem polnilnem primeru (*min*

januar) zagotovilo ravno dovolj energije, da v enem dnevu napolnimo 1 paket baterij. Posledično se je seveda glede na razpoložljivo solarno energijo čas polnjenja v ostalih vremenskih pogojih (*max januar in max junij*) skrajšal. Celoten čas za delovanje fotovoltaičnih panelov se na izbrani lokaciji iz 10 ur v januarju podaljša na 16 ur v juniju. V vseh preostalih delih leta je časa za polnjenje med 10 in 16 urami. Zamik začetka polnjenja se je izkazal za najbolj vpliven faktor sistema, zato smo generirali različne karakteristike polnjenja glede na zamik polnjenja od sončnega vzhoda.

Glede na tipično porabo flote obdelovalnih robotov (*Slika 1*) smo generirali štiri tipične praznilne karakteristike za 100, 200, 400 in 700 W porabe. Najnižja poraba je predstavljala povprečno porabo obdelovalnega robota, ki vključuje premikanje po obdelovalnih tleh in koristno delo. 200 W porabe je vključevalo tipično premikanje in obdelovanje bolj zahtevnih tal. 400 W porabe je zahteval obdelovalni robot pri obdelovanju najzahtevnejšega terena brez premikanja, najvišja poraba pa je predstavljala samo premikanje po zelo zahtevnem terenu.

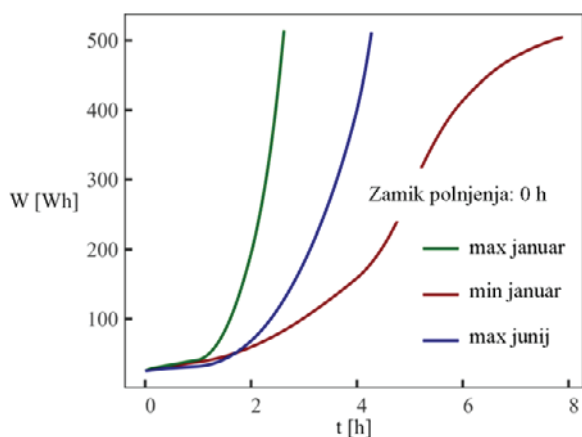
3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Rezultati simuliranih polnilnih časov glede na različne vremenske pogoje in zamike začetka polnjenja baterijskih paketov so zbrani v *Tabeli 1* ter na *Slikah 2, 3 in 4*.

Vidimo, da 7 baterijskih celic v paketu, ki je polnjen s 6 fotovoltaičnimi paneli, zagotavlja, da lahko v najslabših pogojih napolnimo vsaj 1 porabnika iz flote obdelovalnih robotov. V dobrem vremenu januarja bi lahko napolnili 20 paketov, v dobrem vremenu junija pa celo 55, seveda ob predpostavki, da lahko polnimo z maksimalnim tokom, ki ga dobimo iz fotovoltaičnega panela. Dejanska vrednost je odvisna od maksimalnega polnilnega toka, ki ga dovoljuje posamezen tip baterijske celice. Na podlagi takšnega sistema bi lahko predvideli optimalno število obdelovalnih robotov v floti, bi pa seveda bili dnevi, ko se vsi porabniki ne bi mogli napolniti, v nekaterih dnevih pa bi obstajal tudi višek energije, ki bi ga bilo potrebno porabiti drugače.

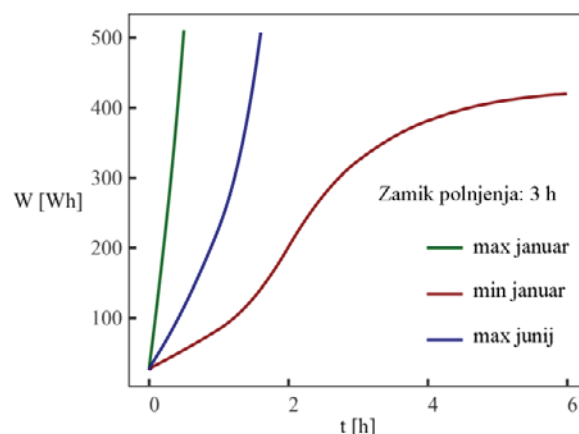
Tabela 1: Potencialni polnilni časi glede na različne vremenske pogoje in zamike začetka polnjenja

Polnilni pogoj	Nazivna napetost [U]	Nazivna kapaciteta [Wh]	Zamik [h]	Čas za polnjenje [h]
Min januar	24	500	0	8
Max januar	24	500	0	2.5
Max junij	24	500	0	4.2
Min januar	24	500	3	∞
Max januar	24	500	3	0.5
Max junij	24	500	3	1.6
Min januar	24	500	6	∞
Max januar	24	500	6	0.32
Max junij	24	500	6	0.17



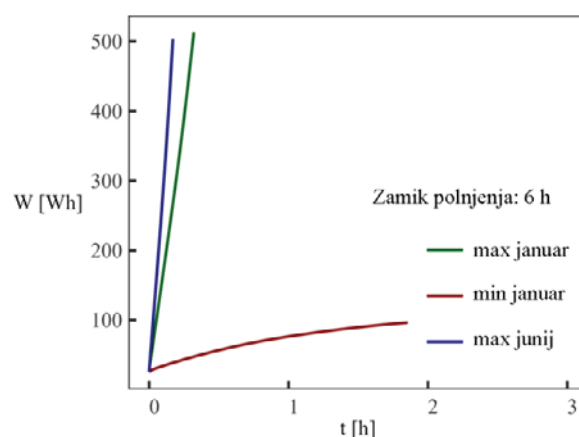
Slika 2: Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju različnih osvetljenosti fotovoltaičnih panelov s takojšnjim začetkom polnjenja.

Zanimivo je, da je na začetku sončnega januarskega dneva (brez zamika začetka polnjenja – Slika 2 oz. nekaj ur zamika – Slika 3) mogoče baterijski paket napolniti hitreje kot na začetku sončnega junijskega dneva.



Slika 3: Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju različnih osvetljenosti fotovoltaičnih panelov s triurnim zamikom polnjenja.

Kasneje (šesturni zamik polnjenja – Slika 4) se solarna moč v junijskem sončnem dnevu močno poveča glede na sončen januarski dan, hkrati pa je dan junija daljši, kar omogoča večkratno polnjenje baterijskih paketov. Zaradi kratke dolžine dneva in majhne osvetljenosti fotovoltaičnih panelov v oblačnem januarskem dnevu ni pri zamiku začetka polnjenja mogoče napolniti niti enega baterijskega paketa s predpostavljenim sistemom (Sliki 3 in 4).

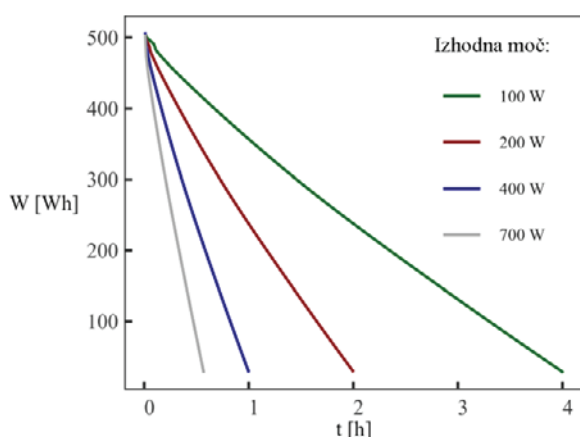


Slika 4: Polnilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju različnih osvetljenosti fotovoltaičnih panelov s šesturnim zamikom polnjenja.

Analiza praznilnih časov glede na obratovalne karakteristike flote obdelovalnih robotov pokaže, da se analiziran baterijski paket pri maksimalni porabi izprazni po približno 0.6 urah uporabe,

medtem ko povprečna poraba obdelovalnega robota zagotavlja približno 4 ure obdelovalne avtonomije – *Slika 5*. Ker karakteristika baterijskega paketa ni linearna, tudi razpoložljiva kapaciteta s časom pada nelinearno – *Slika 5*.

Optimizacijski algoritem izbiranja posameznih robotov v obdelovalni floti in pripadajočega časa polnitve mora upoštevati njihovo gibanje oz. trenutne pozicije glede na preostalo energijo v baterijskih paketih in vremenske pogoje polnjenja.



Slika 5: Praznilni pogoji baterijskega paketa pri upoštevanju različnih obratovalnih pogojev obdelovalnih robotov.

4 SKLEP

Avtomatizirano obdelovanje tal kot sestavni del zelenih skupnosti prihodnosti bo mogoče optimirati glede na razpoložljivo število fotovoltaičnih panelov, število baterijskih paketov, številčnost flote avtomatiziranih obdelovalnih robotov ter velikost in namen obdelovalnih površin. Vsak del celotnega sistema bo predstavljal tudi pomemben del storitev ali proizvodnih možnosti novih podjetij, ki bodo predstavljala integralni del novih skupnosti.

ZAHVALA

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

Viri:

- [1] Greening Education Partnership Pillar 4: *Greening Communities Guidance*, UNESCO, 2024.
- [2] Evropska komisija: Industrijski načrt v okviru zelenega dogovora za neto ničelno dobo, *EUR-Lex* (2023), 62.
- [3] HM Government: A Green Future: Our 25 Year Plan to Improve the Environment, *OGL* (2018), 1–151.
- [4] Costigan, S, Salmon, B. : Green Communities Canada, *Strategic plan* (2022), 1–12.
- [5] Ljubljanski urbanistični zavod: Strategija varstva in razvoja zelene infrastrukture v Ljubljanski urbani regiji, *Regionalna razvojna agencija Ljubljanske urbane regije* (2019), 1–79.
- [6] Somerville, M.: How 208 Hybrid Car Batteries Changed Yellowstone National Park Forever, *earth911.com* (2015).
- [7] Nagode, M, Gosar, A, Sweeney, C-A, Jaguemont, J, Van Mierlo, J, Šeruga, D.: Mechanistic modelling of cyclic voltage-capacity response for lithium-ion batteries, *Energy* (2019), 186, 115791.
- [8] Goutam, S, Timmermans, J-M, Omar, N, Bossche, Pvd, Van Mierlo, J.: Comparative Study of Surface Temperature Behavior of Commercial Li-Ion Pouch Cells of Different Chemistries and Capacities by Infrared Thermography, *Energies* (2015), 8(8), str. 8175–8192.
- [9] Šeruga, D, Gosar, A, Nagode, M, Klemenc, J.: Odziv baterijskih paketov na spremenljive obratovalne pogoje mehanskih sistemov, *Akademija strojništva 2024* (2024), str. 116–117.

ŠTUDIJA DISPERZIJE NANODELCEV ZLATA ZA UPORABO V TISKANIH VEZJIH

Lan KRESNIK¹, Peter MAJERIČ^{1,2}, Darja FEIZPOUR³, Rebeka RUDOLF^{1,2,4}

¹Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

²Zlatarna Celje d.o.o.

³Inštitut za kovinske materiale in tehnologije (IMT)

⁴Pomursko znanstveno-inovacijsko središče

IZVLEČEK

V tej študiji smo razvili stabilno disperzijo AuNPs, namenjeno plazemskemu tiskanju na keramične podlage za uporabo v tiskanih elektronskih vezjih. AuNPs smo sintetizirali z USP in stabilizirali s polivinilpirolidonom PVP, ter liofilizirali, nato pa jih dispergirali v etanolu. Karakterizacija s pomočjo ICP-OES, SEM/TEM/EDS, UV-Vis, DLS, TGA in reoloških meritev je potrdila homogeno morfologijo delcev, kristalinično strukturo, koloidno stabilnost in tiksotropno vedenje disperzije. Tiskanje s plazmo je omogočilo nanos enakomernih in dobro definiranih linij na Al₂O₃ s povprečno hrapavostjo površine pod 2,8 μm, kar izpolnjuje pogoje za radiofrekvenčne aplikacije. Rezultati dokazujejo, da je tako pripravljena disperzija primerna za uporabo v naprednih funkcionalnih materialih za elektroniko, specifično za tiskana vezja.

1 UVOD

Tiskana vezja so ključen gradnik sodobnih elektronskih naprav, saj omogočajo prenos in obdelavo signalov med posameznimi komponentami. Posebej v satelitski tehnologiji služijo kot nosilci signalov in komunikacijski elementi, kjer so zahteve po zanesljivosti izjemno visoke [1], [2].

Pri delovanju na visokih frekvencah se pojavi učinek kože (angl. "skin effect"), zaradi katerega se električni tok koncentrira na površini prevodnika. Posledično tok ne teče po celotnem preseku, temveč le po površini vodnika, kar vodi do povečane upornosti in izgub signala. Površinska hrapavost je zato izredno pomembna – višja hrapavost povečuje upornost in izgube, nižja pa zmanjšuje izgube signala ter izboljša delovanje tiskanega vezja [3].

Eden izmed pristopov za izboljšanje površinske hrapavosti tiskanih vezij je uporaba naprednih prevodnih materialov, kot so nanodelci zlata (AuNPs). Zaradi izjemne električne prevodnosti, kemične stabilnosti in odpornosti proti oksidaciji so AuNPs obetavna alternativa tradicionalnim materialom, kot sta baker in srebro. Ključen izziv

pri njihovi uporabi pa je oblikovanje stabilne disperzije, ki omogoča natančen in ponovljiv nanos nanodelcev v želeni geometriji [4]–[6].

Tehnologija plazemskega tiskanja se je v zadnjem času uveljavila kot perspektiven pristop za nanos prevodnih materialov, saj omogoča selektiven in natančen nanos pri nizkih temperaturah brez potrebe po dodatni termični obdelavi. Plazma izboljša adhezijo materiala na podlago, omogoča funkcionalizacijo površine in delno sintranje nanodelcev, kar je posebej pomembno pri uporabi občutljivih substratov [7]–[10]. Zaradi teh prednosti smo v tej raziskavi izbrali plazemsko tehnologijo za nanos disperzije AuNPs.

V tej študiji smo sintetizirali AuNPs, jih stabilizirali s PVP ter pripravili disperzijo, primerno za plazemski tisk na substrat iz aluminijevega oksida (Al₂O₃). Izvedli smo različne metode karakterizacije za določitev lastnosti AuNPs, disperzije in tiskanih linij. Namen raziskave je bil razviti stabilno disperzijo AuNPs, ki omogoča nanos s plazemsko tehnologijo na Al₂O₃ in pridobiti tiskane linije z nizko hrapavostjo.

2 MATERIALI IN METODE

2.1 Sinteza AuNPs

AuNPs smo sintetizirali z ultrazvočno razpršilno pirolizo (USP). Prekurzor za sintezo je bila klorovodikova kislina zlata (HAuCl₄), raztopljena v deionizirani vodi (koncentracija 2 g/L HAuCl₄). Kot stabilizator smo uporabili PVP, ki preprečuje aglomeracijo AuNPs. Nastalo suspenzijo AuNPs smo koncentrirali z rotacijskim izparevanjem in nato liofilizirali.

2.2 Priprava disperzije

Za pripravo disperzije za tiskanje smo posušene AuNPs dispergirali v etanolu. Posušene nanodelce smo postopoma dodajali v 500 mL etanola in disperzijo ves čas mešali za zagotavljanje homogenosti. Nastala disperzija je bila homogena, brez vidne sedimentacije, in primerna za nadaljnjo uporabo.

2.3 Tiskanje s plazmo

Za nanos disperzije smo uporabili tehnologijo plazemskega tiskanja, s katero smo ustvarili linijske vzorce na substrat iz Al₂O₃ s čistino 96 %. Plazemska metoda omogoča natančno lokalizacijo materiala in dobro adhezijo na keramični nosilec. Nanos smo izvedli s sistemom FG5001S PCU-M. Natisnjene so bile tri linije, dolge 50 mm, široke 0,55 mm in debele 0,008 mm.

2.4 Karakterizacija

Za določitev lastnosti AuNPs, disperzije in tiskanih linij smo uporabili naslednje metode:

- ICP-OES: induktivno sklopljena plazemska optična emisijska spektrometrija za določanje elementne sestave.
- SEM: vrstična elektronska mikroskopija za analizo površinske morfologije in topografije.
- TEM: transmisijska elektronska mikroskopija za opazovanje oblike, velikosti in notranje strukture nanodelcev.
- UV-Vis spektroskopija: za določanje optičnih lastnosti in prisotnosti AuNPs (plazmsonski absorpcijski vrh).

- DLS: dinamično sipanje svetlobe za določanje hidrodinamične velikosti in porazdelitve velikosti v disperziji.
- Zeta potencial: za oceno stabilnosti koloidnih disperzij.
- TGA: termogravimetrična analiza za določitev temperature degradacije posameznih komponent.
- Viskoznost: za določanje reoloških lastnosti disperzije.
- Profilometrija: za meritve površinske hrapavosti tiskanih linij.

3 REZULTATI

3.1 ICP-OES

Z ICP-OES analizo smo določili vsebnost AuNPs po sintezi in v disperziji z etanolom. Po končani USP je koncentracija Au znašala 2,81 mg/mL, v disperziji z etanolom pa 0,245 mg/mL.

3.2 SEM/EDS

Primerjalne SEM in EDS analize posušenih ter ponovno dispergiranih AuNPs so potrdile, da metoda USP dosledno proizvaja nanodelce zlata s primerljivo morfologijo in velikostjo. AuNPs so bili pretežno sferične oblike, z nekaj več nepravilnosti pri večjih delcih. Povprečna velikost in razpon premerov sta bila podobna v obeh vzorcih, v disperziji pa je bila zaznana nekoliko širša porazdelitev, kar nakazuje delno aglomeracijo po redisperziji. Prisotnost PVP kot stabilizatorja je prispevala k dobri disperzibilnosti in omejila aglomeracijo.

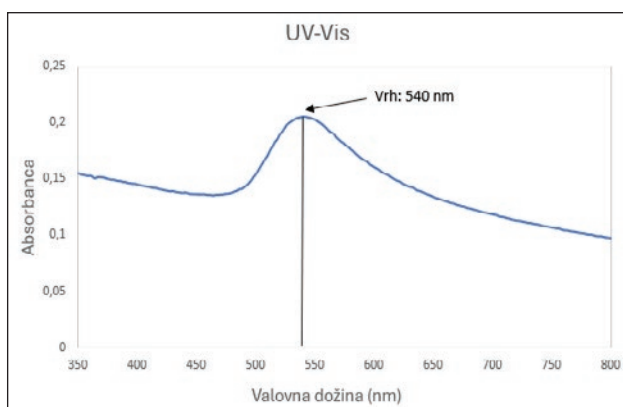
3.3 TEM/SAED in STEM/EDS

Analize s TEM, SAED in STEM/EDS so potrdile strukturno in elementarno celovitost sintetiziranih AuNPs. TEM je pokazal širok razpon velikosti delcev (5–150 nm) in raznolikost morfologij, vključno s sferičnimi, trikotnimi in mnogokotnimi oblikami. Kristalinična struktura nanodelcev je bila potrjena s SAED in FFT, posebej izražena je bila prisotnost (111) kristalografske ploskve, značilne za zlato. EDS mapiranje je potrdilo elementno sestavo, z izrazitimi signali zlata ter dodatnimi vrhovi,

pripisanimi ostankom sinteznih reagentov in TEM mrežici.

3.4 UV-VIS

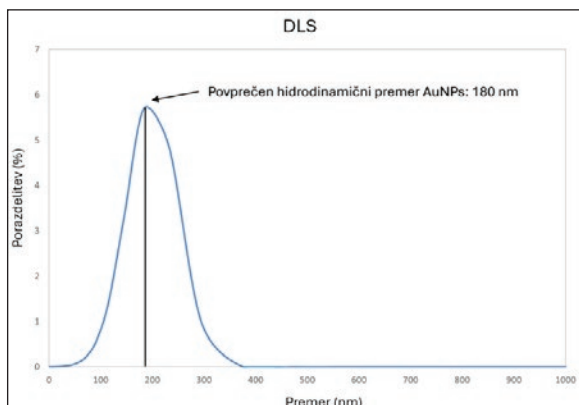
Na UV-Vis spektru AuNPs v deionizirani vodi je viden izrazit vrh med 500 in 600 nm, značilen za površinsko plazmnsko resonanco AuNPs, kar potrjuje uspešno tvorbo nanodelcev (slika 1).



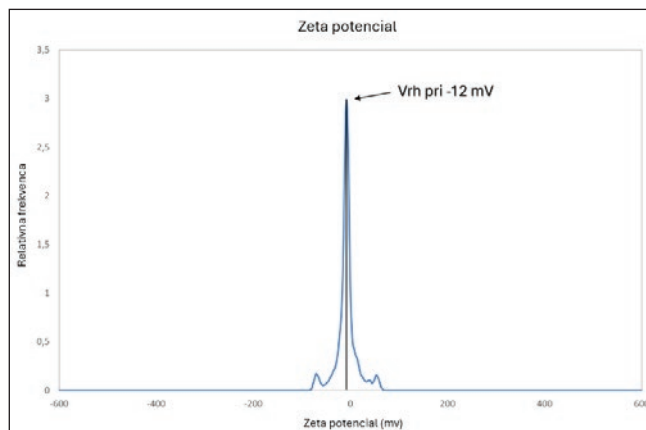
Slika 1: UV-Vis spekter AuNPs v deionizirani vodi

3.6 DLS IN ZETA potencial

DLS analiza je pokazala povprečni hidrodinamični premer 180 nm s 25-odstotno polidisperznostjo in standardnim odklonom 2,93 nm (Slika 2). Zeta potencial je znašal $-12,4$ mV (Slika 3), kar nakazuje zmerno koloidno stabilnost disperzije. Nizka negativna vrednost kaže, da elektrostatska stabilizacija ni izrazita, saj PVP deluje kot sterični stabilizator in mehansko preprečuje aglomeracijo.



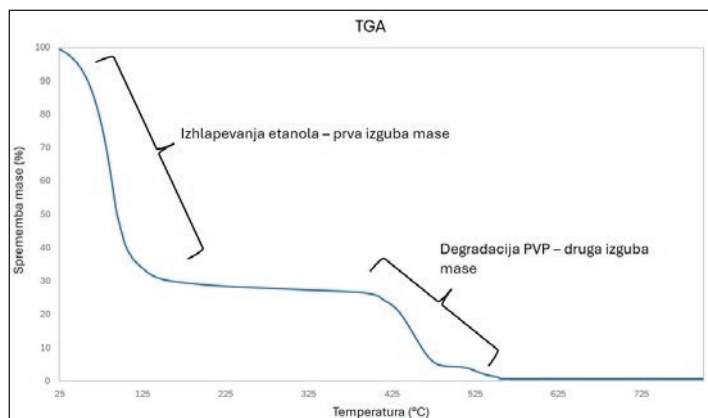
Slika 2: DLS AuNPs v deionizirani vodi



Slika 3: Zeta potencial AuNPs v deionizirani vodi

3.5 TGA

TGA analiza je pokazala hitro izgubo mase do ~ 120 °C zaradi izhlapevanja etanola in preostale vode, nato postopno izgubo mase med 150 in 400 °C (razgradnja PVP) in stabilizacijo mase nad 500 °C, kar ustreza anorganski vsebnosti (AuNPs), ki pri teh temperaturah ne degradirajo (Slika 4).



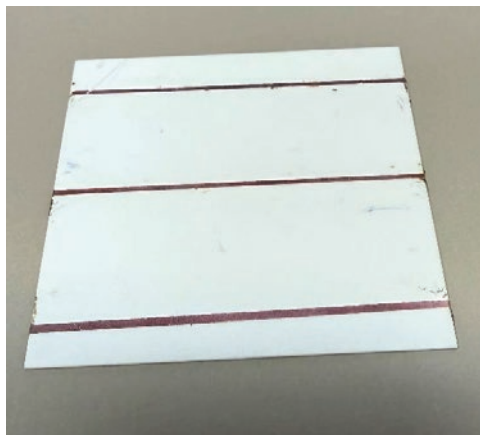
Slika 4: TGA disperzije

3.6 REOLOŠKE MERITVE

Reološka analiza je pokazala, da disperzija AuNPs izkazuje tiksotropno obnašanje – pod vplivom strižnih sil se viskoznost začasno zmanjša, nato pa se ob mirovanju ponovno vzpostavi. Takšno vedenje je ugodno za tiskanje, saj omogoča gladek nanos in hitro stabilizacijo vzorca.

3.7 Tiskanje s plazmo

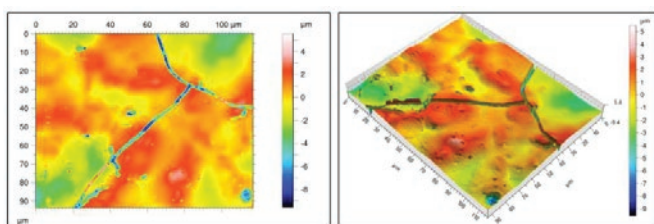
Tiskanje z uporabo plazemske tehnologije je bilo uspešno izvedeno; nanešene linije (dolžina 50 mm, širina 0,55 mm) so bile dobro definirane in brez vidnega razlivanja, kar potrjuje primerno reološko obnašanje disperzije in dobro adhezijo na podlago (Slika 5).



Slika 5: Tiskane linije na Al₂O₃

3.8 Površinska hrapavost

Konfokalna optična mikroskopija je pokazala nizko hrapavost in enakomeren nanos nanodelcev na keramično podlago. Izmerjene vrednosti Sa so se gibale med 1,28 in 2,12 μm, kar kaže na gladko in homogeno tvorbo filma brez vidnih aglomeracij (Slika 6).



Slika 6: višinski profil (levo) in 3D prikaz površine linije (desno).

4. SKLEP

Na podlagi izvedenih analiz in eksperimentalnih rezultatov ugotavljamo, da je pripravljena disperzija AuNPs ustrezna za uporabo v tehnologiji plazemskega tiska. Postopek je omogočil uspešen nanos enakomernih linij AuNPs na Al₂O₃ z debelino okoli 8 μm. Površinska hrapavost linij (1,28–2,12 μm) izpolnjuje zahteve za uporabo v radiofrekvenčnih aplikacijah, kjer je pogoj hrapavosti manj kot 2,8 μm. Gladkost površine je posebej pomembna za uporabo v tiskanih vezjih, zlasti pri visokofrekvenčnem prenosu signalov, kjer kakovost površine bistveno vpliva na izgube.

SEM in TEM analiza sta potrdili homogeno morfologijo in kristalinično naravo AuNPs. EDS je potrdil prisotnost zlata in stabilizatorja PVP. DLS je pokazal zmerno polidisperznost in hidrodinamični premer okoli 180 nm, zeta potencial pa učinkovito, a zmerno stabilizacijo zaradi PVP. TGA je potrdila sestavo disperzije (etanol, PVP, zlato) in omogočila oceno njene stabilnosti.

Celovita karakterizacija je potrdila, da imajo sintetizirani AuNPs zaželeno strukturno, kemijsko in koloidno lastnosti. Uspešna uporaba disperzije v plazemsko-jet tiskanju dokazuje njen praktičen potencial za napredne funkcionalne materiale in tiskane elektronske naprave. Nadaljnje raziskave bodo osredotočene predvsem na določitev električnih lastnosti natisnjenih plasti, kot so prevodnost, impedanca in vpliv površinskega efekta pri visokofrekvenčnih signalih.

Viri:

- [1] Norman, A., Das, S., Rohr, T., & Ghidini, T. (2023). Advanced manufacturing for space applications. *CEAS Space Journal*, 15(1), 1–6.
- [2] Lockwood Estrin, F., Hagger, O. S. J., Sener, M. E., & Caruana, D. J. (2024). Metal Painting by Plasma Jet. *Advanced Materials Interfaces*.
- [3] Coonrod, J. Insertion Loss Comparisons of Common High Frequency PCB Constructions.
- [4] Kamyshny, A., & Magdassi, S. (2014). Conductive nanomaterials for printed electronics. *Small*, 10(17), 3515–3535.
- [5] Rao, C. H., Avinash, K., Varaprasad, B. K. S. V. L., & Goel, S. (2022). A Review on Printed Electronics with Digital 3D Printing: Fabrication Techniques, Materials, Challenges and Future Opportunities. *Journal of Electronic Materials*, 51(6), 2747–2765.
- [6] Lemarchand, J., Bridonneau, N., Battaglini, N., Carn, F., Mattana, G., Piro, B., Zrig, S., & Noël, V. (2022). Challenges, Prospects, and Emerging Applications of Inkjet-Printed Electronics: A Chemist's Point of View. *Angewandte Chemie - International Edition*, 61(20).
- [7] Le Porcher, B., Rieu, M., & Viricelle, J. P. (2024). Development of Gold Inks for Inkjet Printing of Gas Sensors Electrodes on Plastic Support. *Electronics (Switzerland)*, 13(11).
- [8] Gandhiraman, R. P., Singh, E., Diaz-Cartagena, D. C., Nordlund, D., Koehne, J., & Meyyappan, M. (2016). Plasma jet printing for flexible substrates. *Applied Physics Letters*, 108(12).
- [9] Gandhiraman, R. P., Jayan, V., Han, J. W., Chen, B., Koehne, J. E., & Meyyappan, M. (2014). Plasma jet printing of electronic materials on flexible and nonconformal objects. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 6(23), 20860–20867.
- [10] Ramamurti, R., Gandhiraman, R. P., Lopez, A., Doshi, P., Nordlund, D., Kim, B., & Meyyappan, M. (2020). Atmospheric pressure plasma printing of nanomaterials for IoT applications. *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, 1(1), 47–56.

ŠTUDIJA DISPERZIJE NANODELCEV ZLATA ZA UPORABO V TISKANIH VEZJIH

Lan KRESNIK¹, Peter MAJERIČ^{1,2}, Darja FEIZPOUR³, Rebeka RUDOLF^{1,2,4}

¹Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, ²Zlatarna Celje d.o.o., ³Inštitut za kovinske materiale in tehnologije (IMT),

⁴Pomursko znanstveno-inovacijsko središče

SPAJANJE NEZDRUŽLJIVIH POLIMEROV PREKO DINAMIČNIH KOVALENTNIH MREŽ NA PRIMERU PREBRIZGAVANJA IN VARJENJA ABS IN PP

Rebeka LORBER, Janez SLAPNIK, Irena PULKO
Fakulteta za tehnologijo polimerov

IZVLEČEK

Prispevek predstavlja aplikativni potencial in aktualne izzive na področju spajanja polimerov z dinamičnimi kovalentnimi mrežami, kot novega pristopa za varjenje inherentno nezdržljivih polimerov, na primeru akrilonitril butadien stirena (ABS) in polipropilena (PP). Konvencionalne tehnike spajanja običajno odpovejo pri različnih polimernih sistemih zaradi termodinamične nemešljivosti in slabe adhezije na vmesnih površinah. Z vključitvijo dinamičnih kovalentnih vezi istega tipa, v oba polimera, lahko preko teh vezi med polimeroma dobimo povezavo na kemijskem nivoju. Omenjena polimera smo prebrizgavali in varili s tehniko ultrazvočnega varjenja, kakor tudi varjenja pri povišani temperaturi v konvencionalni pečici, saj je za vzpostavitev povezav med takimi polimeri ključno, da ima reakcija dovolj časa, da poteče v zadostnem obsegu. Rezultati kažejo, da dinamične kovalentne mreže ponujajo obetavno rešitev za spajanje različnih polimerov v industrijskih aplikacijah.

1 UVOD

Povezovanje različnih polimerov za ustvarjanje večdelnih komponent predstavlja pomemben izziv v sodobni industriji, saj omogoča kombinacijo lastnosti različnih materialov v enem izdelku. Na primer akrilonitril butadien stiren (ABS) in polipropilen (PP) sta polimera z različnimi lastnostmi, ki sta našla široko uporabo v avtomobilski, elektro, gospodinjski in drugih industrijah. Vendar pa konvencionalne tehnike spajanja, kot so lepljenje, mehansko povezovanje in različne tehnike varjenja, pri teh materialih pogosto ne dajejo zadovoljivih rezultatov zaradi njihove inherentne kemijske nezdržljivosti [1].

ABS je amorfni terpolimer z izvrstnimi mehanskimi lastnostmi, dobro kemijsko odpornostjo in visoko trdnostjo, medtem ko je PP delno kristaliničen termoplast z odlično kemijsko odpornostjo, nizko gostoto in dobro odpornostjo proti utrujanju. Zaradi različnih kemijskih struktur in termodinamične nezdržljivosti med njima ne pride do zadostne adhezije na mejni površini, kar onemogoča tvorbo močnih mehanskih spojev [1].

V zadnjih letih se je kot obetaven pristop za reševanje tega izziva pojavila uporaba prilagodljivih kovalentnih mrež (PKM) [5]. PKM predstavljajo omrežja, kjer so polimerne verige povezane s kovalentnimi vezmi, ki so reverzibilne

pod določenimi pogoji, kot sta povišana temperatura ali UV sevanje. Ta lastnost omogoča njihovo preoblikovanje, samozdravljenje in potencialno spajanje z drugimi materiali, ki vsebujejo komplementarne funkcionalne skupine [2].

Ta prispevek predstavlja raziskavo uporabe PKM za spajanje nezdržljivih polimerov ABS in PP z namenom razvoja učinkovitega pristopa za industrijsko proizvodnjo večdelnih izdelkov.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Prilagodljive kovalentne mreže

Prilagodljive kovalentne mreže (PKM) predstavljajo polimerne verige povezane z reverzibilnimi kovalentnimi vezmi. V nasprotju s tradicionalnimi duroplasti, kjer so vezi trajne, PKM omogočajo ponovno oblikovanje materiala pod ustreznimi pogoji. Ta lastnost izhaja iz dejstva, da lahko prilagodljive kovalentne vezi pod določenimi pogoji razpadejo in se ponovno tvorijo, kar omogoča reorganizacijo molekularne strukture [3].

Med najpogosteje uporabljenimi prilagodljivimi kovalentnimi vezmi so Diels-Alderjeve reakcije, zamenjave disulfidov, transesterifikacija, izmenjava karboksilnih skupin

in reakcije kondenzacije. V naših raziskavah smo se osredotočili na uporabo transesterifikacijskih reakcij, kjer pride do izmenjave esterskih skupin med različnimi polimeri ob prisotnosti katalizatorja in povišani temperaturi [4].

2.2 Mehanizmi spajanja nezdružljivih polimerov

Spajanje nezdružljivih polimerov predstavlja izziv zaradi različnih dejavnikov, vključno s slabo medmolekularno difuzijo, odsotnostjo specifičnih interakcij in nekompatibilnostjo površinskih energij. Tradicionalno se pri spajanju nezdružljivih polimerov uporabljajo različni pristopi:

1. Uporaba adhezivov
2. Modifikacija površin,
3. Uporaba kompatibilizatorjev in
4. Mehansko sidranje.

V primeru pristopa spajanja nezdružljivih polimerov s PKM gre za ustvarjanje kemijskih vezi med različnimi polimeri, kar potencialno omogoča močnejše spoje kot pri tradicionalnih metodah. Mehanizem temelji na prilagodljivi izmenjavi kovalentnih vezi med polimernimi verigami različnih materialov, kar vodi do tvorbe kovalentno povezanega vmesnega sloja [2,5].

3 INDUSTRIJSKE APLIKACIJE IN POTENCIAL

3.1 Avtomobilska industrija

Avtomobilska industrija predstavlja enega najpomembnejših sektorjev, kjer bi lahko tehnologija spajanja nezdružljivih polimerov s PKM našla široko uporabo. Različne komponente v avtomobilih zahtevajo kombinacijo mehanskih, toplotnih in kemijskih lastnosti, ki jih en sam polimer včasih težko zagotovi. Potencialne aplikacije v avtomobilski industriji vključujejo:

1. **Notranja oprema vozil:** Kombinacija v komponentah notranje opreme, kot so armaturne plošče, obloge vrat in konzole.
2. **Modularni sestavni deli:** Možnost izdelave kompleksnih sestavnih delov, ki združujejo različne materiale in njihove lastnosti v eni komponenti. To bi lahko

zmanjšalo število potrebnih delov in poenostavilo montažo.

3. **Povezovalni elementi:** Elementi, ki povezujejo različne dele avtomobila, bi lahko imeli izboljšano zmogljivost z uporabo tehnologije PKM.
4. **Sestavni deli okoli motorja:** Za večkomponentne dele, ki so izpostavljeni povišanim temperaturam in kemikalijam.

3.2 Potrošniška elektronika

V industriji potrošniške elektronike obstaja konstanten pritisk za zmanjšanje velikosti in teže naprav ob hkratnem izboljšanju njihove funkcionalnosti in trajnosti. PKM pristop za spajanje različnih materialov bi lahko prispeval k razvoju novih rešitev na teh področjih:

1. **Ohišja elektronskih naprav:** Ohišja pogosto zahtevajo kombinacijo različnih materialov za optimalno delovanje.
2. **Toplotno upravljanje:** Elektronske naprave proizvajajo toploto, ki jo je treba učinkovito odvajati. Kombinacija materialov z različnimi toplotnimi lastnostmi bi lahko izboljšala toplotno upravljanje v napravah.
3. **Vodotesni elementi:** Za vodotesna ohišja pametnih telefonov in drugih naprav je potrebna kombinacija materialov z različnimi lastnostmi, kjer bi PKM pristop lahko zagotovil izboljšano tesnjenje.
4. **Strukturni elementi:** Notranji strukturni elementi v elektronskih napravah, ki zahtevajo visoko trdnost in odpornost proti udarcem so prav tako potencialna aplikacija.

3.3 Gospodinjski aparati

Izdelovalci gospodinjskih aparatov se soočajo s podobnimi izzivi kot industrija potrošniške elektronike. Kombinacija materialov z različnimi lastnostmi je ključna za optimalno delovanje in trajnost aparatov:

1. **Velika bela tehnika:** Pralni stroji, hladilniki in pomivalni stroji že uporabljajo večdelne komponente, kjer bi PKM pristop lahko izboljšal trajnost

spojev ter omogočil tanjše in lažje konstruktivne elemente [21].

2. **Vodne povezave:** Za dele, ki so v stiku z vodo, je pomembna kombinacija materialov, ki zagotavljajo vodotesnost in odpornost proti koroziji. PKM pristop bi lahko izboljšal tesnjenje in trajnost teh spojev.
3. **Zunanji elementi:** Zunanje površine gospodinjskih aparatov morajo biti odporne proti praskam, udarcem in kemikalijam. Običajno imajo še kontrolno ploščo in gumbe, ki so iz različnih materialov.
4. **Ročaji:** Ti elementi so izpostavljeni pogosti uporabi in morajo biti odporni proti obrabi, kakor tudi njihova montaža enostavna in hitra. Tudi to je potencialna aplikacija, kjer bi lahko uvedli inovativne rešitve s PKM.

3.5 Embalaža

Industrija embalaže je vedno v iskanju novih rešitev za izboljšanje funkcionalnosti, trajnosti in okoljske prijaznosti embalaže:

1. **Večslojna embalaža:** Kombinacija različnih polimerov v večslojni embalaži.
2. **Zapiralni sistemi:** Zapiralni sistemi, kot so pokrovčki in zamaški.
3. **Trajnostna embalaža:** PKM pristop bi lahko prispeval k razvoju bolj trajnostne embalaže, ki bi bila lažje ločljiva in bolj reciklabilna.
4. **Aktivna embalaža:** Embalaža, ki aktivno reagira na okolje (npr. spremembe temperature ali vlage).

3.6 Izzivi pri implementaciji

Kljub obetavnim rezultatom in potencialnim aplikacijam, implementacija PKM pristopa za spajanje nezdružljivih polimerov v industriji še vedno predstavlja določene izzive:

1. **Procesni čas:** Za optimalno tvorbo PKM je potreben daljši reakcijski čas, kar lahko omejuje produktivnost v visoko avtomatiziranih proizvodnih linijah.
2. **Temperaturna stabilnost:** Dinamične kovalentne vezi imajo temperaturno

odvisno naravo, kar lahko vpliva na trajnost spojev pri višjih obratovalnih temperaturah.

3. **Skalabilnost:** Prenos laboratorijskih rezultatov v industrijsko proizvodnjo zahteva optimizacijo procesnih parametrov in morebitno prilagoditev opreme.
4. **Strošek:** Dodatni koraki modifikacije polimerov in za to potrebni materiali ter morebitna potreba po prilagoditvi opreme lahko povečajo stroške proizvodnje.
5. **Standardizacija:** Pomanjkanje standardov za testiranje in karakterizacijo spojev na osnovi PKM, lahko oteži primerjavo z obstoječimi metodami spajanja.

Kljub tem izzivom pa preliminarni rezultati kažejo, da je tehnologija primerna za industrijsko implementacijo.

4 SPAJANJE PKM NA PRIMERU PP IN ABS

Tekom projekta IPPT_TWINN smo pripravili transesterifikacijske vitrimere na PP in ABS osnovi. Varili smo jih z uporabo različnih tehnik spajanja, od prebrizgavanja, do ultrazvočnega in laserskega varjenja ter varjenja pri povišani temperaturi in obtežitvi za določen čas v pečici. Po vseh metodah med PP in ABS-om nismo dobili adhezije, delaminacija nastopi takoj po spajanju, medtem ko med PP vitrimerom in ABS vitrimerom z uporabo vseh omenjenih tehnologij dobimo merljivo adhezijo. Pomembno opažanje je tudi, da se ta adhezija vitimernih vzorcev zavarjenih z metodami s kratkimi cikli (ultrazvok, laser) poveča z naknadnim temperiranjem na povišani temperaturi, kar potrjuje hipotezo, da potrebujejo dinamične kovalentne mreže dovolj časa, da lahko tvorijo PKM med materialoma.

5 ZAKLJUČEK

V tem prispevku smo predstavili teoretične osnove in potencialne aplikacije novega pristopa za spajanje nezdružljivih polimerov, na primeru ABS in PP z uporabo prilagodljivih kovalentnih mrež. Pristop temelji na modifikaciji polimerov z reaktivnimi skupinami, ki lahko tvorijo prilagodljive kovalentne vezi, kar pripomore k

mehanski trdnosti spojev med nekompatibilnimi polimeri.

PKM pristop ponuja številne potencialne aplikacije v različnih industrijskih sektorjih, vključno z avtomobilsko industrijo, potrošniško elektroniko, gospodinjstvi, aparati, medicinsko opremo in embalažo. V vseh teh sektorjih bi kombinacija lastnosti ABS (mehanska trdnost, udarna žilavost) in PP (kemijska odpornost, nizka gostota) ali drugih dveh materialov lahko prispevala k razvoju novih, bolj učinkovitih in trajnostnih izdelkov, saj se da s PKM povezane komponente tudi ločiti.

Kljub določenim izzivom pri implementaciji, kot so procesni čas, temperaturna stabilnost in skalabilnost, preliminarni rezultati kažejo, da je tehnologija primerna za industrijsko uporabo. Nadaljnje raziskave je potrebno usmeriti v povečanje adhezije, optimizacijo procesnih parametrov za izboljšanje proizvodne učinkovitosti, testiranje dolgoročne trajnosti spojev in razvoj novih formulacij za druge kombinacije nezdružljivih polimerov.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Evropski uniji, ki je v okviru programa Horizon Europe Framework Programme in Twinning (HORIZON-WIDERA-2021-ACCESS-03) grant number 101079051 financira projekt IPPT_TWINN v okviru katerega se izvajajo opisane raziskave.

Viri:

- [1] Michel Biron: *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*;
- [2] Shi, Q.; Jin, C.; Chen, Z.; An, L.; Wang, T.: On the Welding of Vitrimers: Chemistry, Mechanics and Applications. *Adv Funct Mater* (2023), 33.
- [3] Zheng, J.; Png, Z. M.; Ng, S. H.; Tham, G. X.; Ye, E.; Goh, S. S.; Loh, X. J.; Li, Z.: Vitrimers: Current research trends and their emerging applications. *Materials Today*, **51**, 586–625 (2021). <http://doi:10.1016/j.mattod.2021.07.003>.
- [4] Kar, G. P.; Saed, M. O.; Terentjev, E. M.: Scalable upcycling of thermoplastic polyolefins into vitrimers through transesterification. *Journal of Materials Chemistry A*, **8**, 24137–24147 (2020). <http://doi:10.1039/d0ta07339c>.
- [5] Silva, L. R. R.; Marques, E. A. S.; da Silva, L. F. M.: Polymer joining techniques state of the art review. *Welding in the World*, **65**, 2023–2045 (2021). <http://doi:10.1007/s40194-021-01143-x>.

OJAČITVENI KOMPOZITNI DEL »FLEXPROTEC« - INOVATIVNEGA ZAŠČITNEGA ŠPORTNEGA ŠČITNIKA – IZ RECIKLIRANIH MATERIALOV

**Silvester BOLKA¹, Alen ŠAPEK², Marko VERČKOVNIK¹, Danijel GRACEJ²,
Sebastjan ZAVERLA¹, Edina LJAMI², Rajko BOBOVNIK¹, Blaž NARDIN¹**

¹Fakulteta za tehnologijo polimerov

²Additio d.o.o.

IZVLEČEK

V prispevku bomo predstavili uporabo mehansko recikliranih krakov vetrnih elektrarn v kombinaciji z reciklatom polipropilena podjetja TAB-IPM za ojačitveni del »FlexProtec« - inovativnega zaščitnega športnega ščitnika podjetja Additio. Na Fakulteti za tehnologijo polimerov smo za pripravo termoplastičnega kompozita uporabili recikliran polipropilen podjetja TAB-IPM, kateremu smo dodali zmleti odpad krakov vetrnih elektrarn. Da smo dosegli zahtevane lastnosti pripravljenega kompozita smo dodali še sveža steklena vlakna in ustrezen kompatibilizator, ki je zagotovil dobre medfazne interakcije med odpadnimi in svežimi vlakni in reciklirano polipropilensko matrico. Recikliranemu kompozitu smo izmerili mehanske in toplotne lastnosti. Rezultate teh analiz smo uporabili za določitev parametrov brizganja, kjer smo prve prototipe brizgali v 3D natisnjene gravurne vložke orodja za brizganje, ki so bili pripravljene v podjetju Additio. S takšnim pristopom smo validirali konstrukcijo ojačitvenega kompozitnega dela »FlexProtec« inovativnega zaščitnega športnega ščitnika še pred izdelavo kovinskih gravurnih vložkov. Za prihodnost imamo idejo razviti hibridne, kovinske gravurne vložke z izmenljivimi plastičnimi SLA tiskanimi 3D gravurami.

Izvedba je lep primer sodelovanja industrije in raziskovalne institucije na področju krožnega gospodarstva v okviru javnega razpisa projekta DeremCo. Pokazali smo, da lahko z lastnim znanjem na obstoječi opremi naredimo termoplastične kompozite za inovativne in hkrati zelo zahtevne aplikacije.

1 UVOD

Industrijski odpadki so na splošno bolj ločeni kot komunalni odpadki, zato se komunalni odpadki veliko pogosteje sortirajo kot industrijski. Enako velja za pranje, saj so komunalni odpadki običajno veliko bolj onesnaženi. Posledično je industrijsko odpadke lažje reciklirati. Kot rezultat tega se iz teh odpadkov proizvedejo reciklirani materiali bistveno višje kakovosti in z boljšimi – ali predvsem bolj homogenimi – lastnostmi (mehanskimi, kemičnimi, optičnimi) [1]. Glavna prednost duroplastičnih kompozitov je, da se ob kombinaciji duroplastične matrice z ojačitvenimi vlakni dosežejo odlične lastnosti, hkrati pa so proizvodni stroški nizki. Večji delež odpadkov duroplastičnih kompozitov se lahko uporabi kot ojačitev za termoplastično reciklirano polipropilensko matrico [2].

V zadnjem času je recikliranje PP zelo pomembna tema, predvsem zaradi naraščanja količine PP v termoplastičnih komunalnih

odpadkih. Velik del embalaže je namreč izdelan iz PP. Polipropilen graftiran z malein anhidridom kot kompatibilizator v kompozitih iz zmletega odpada duroplastičnih kompozitov in polipropilensko matrico omogoča boljše disperzijo zmletih duroplastičnih kompozitov v PP matrici in izboljša medfazno adhezijo odpada duroplastičnih kompozitov in recikliranega polipropilena. Odpadni duroplastični kompozit zviša togost in trdnost kompozitov na osnovi recikliranega polipropilena [3].

Cilj te študije je bil povišati togost in trdnost rPP z dodajanjem zmletega odpada duroplastičnih kompozitov v rPP matrico. Zmleti odpad duroplastičnih kompozitov je bil uporabljen brez predhodne obdelave. Izvedli smo študijo mehanskih, toplotnih in reoloških lastnosti in jih primerjali z nemodificirano rPP matrico.

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 novembra 2025 in vključuje 30 evropskih partnerjev iz Italije, Finske, Avstrije, Španije, Slovenije, Belgije in Portugalske. V okviru projekta je bil objavljen javni razpis, na katerem je po uspešno oddani prijavi pridobilo sredstva tudi podjetje Additio d.o.o. s projektom FlexProtec.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

Pri eksperimentalnem delu študije smo na podlagi predhodnih raziskav kompozitov ojačenih z zmletimi odpadnimi duroplastičnimi kompoziti uporabili optimalno količino dodatkov ter nastavitve parametrov pri kompavndiranju in brizganju.

3.1 Uporabljeni materiali

Materiali za termoplastični kompozit.

Komercialno dostopen reciklat polipropilena, nam je dobavilo podjetje TAB-IPM d.o.o., iz Slovenije (rPP). Kompatibilizator PP-g-MA (Graftabond PP-MAH 02025A CA) nam je dobavilo podjetje Graft Polymers iz Slovenije. Steklена vlakna (GF) smo kupili pri podjetju Johns Manville iz Poljske (ThermoFlow CS EC 13 636). Reciklirana steklena vlakna nam je dobavilo podjetje Centrocot (rGFRP). Bila so mehansko reciklirana in presejana s sitom z odprtini 2 mm. Antioksidant (AT 10) smo kupili pri AMIK ITALIA S.p.A iz Italije.

Za 3D tisk smo uporabili xMOLD, visoko zmogljivo topno smolo proizvajalca Nexa3D, razvito posebej za tehnologijo brizganja.

3.2 Priprava vzorcev

Za termoplastični kompozit smo izdelali 2 seriji vzorcev in sicer je bil vzorec 0 kot referenca, kjer smo uporabili le rPP, vzorec 1 je bil z dodatki za V tabeli 1 je prikazana sestava vzorcev.

Tabela 1: Sestava vzorcev za kompavndiranje

Vzorec	rPP (%)	PP-g-MA (%)	GF (%)	Antioksidant (%)	rGFRP (%)
0	100	0	0	0	0
1	68,5	4	7	0,5	20

Pred kompavndiranjem termoplastičnih kompozitov smo vse komponente osušili na vlažnost pod 0,1 %. Po kompavndiranju smo ekstrudiran granulat posušili na vlago pod 0,1 %. Sušenje smo izvedli v laboratorijskem sušilniku pri 80 °C.

Oba vzorca s termoplastično matrico smo najprej kompavndirali na dvopolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je bil 20 mm, L/D razmerje 44:1, obrati polžev 400 min⁻¹, temperature cilindra od 165 °C na vstopni coni do 190 °C na šobi. Šoba je imela dve odprtini premera 4 mm. Filamenta smo vodili preko vodne kopeli (15 °C) v granulator Scheer, kjer smo filamenta narezali na dolžino okoli 5 mm.

Brizgali smo na brizgalnem stroju Krauss Maffei KM 50-180 CX. Premer polža je bil 30 mm. Temperaturni profil od 175 °C (vstopna cona) do 190 °C (na šobi). Temperatura orodja je bila 25 °C, čas hlajenja 10 s. Slika 1 prikazuje zmleti odpad duroplastičnih kompozitov, kjer so prisotna steklena vlakna kot ojačevalo in epoksidna smola kot matica.



Slika 1: Uporabljena reciklirana steklena vlakna (rGFRP)

Za potrebe brizganja ščitnika je bil razvit sestavljiv vložek (Slika 2), sestavljen iz dolivne ter iz metalne strani ter posameznih gravur na obeh straneh. Zaradi lastnosti smole so namreč potrebni daljši časi ohlajanja, kar rešujemo z izdelavo več gravur, v katere brizgamo izdelke. Le te so hitro snemljive in jih po brizgu takoj zamenjamo z hladnimi, ter tako zagotavljamo ustrezni časovni cikel brizganja.

Vse komponente vložka so bile natisnjene na industrijskem 3D tiskalniku Nexa3D XiP. Ker gre za MSLA tehnologijo, čas tiska zavisi od višine 3D tiskanih kosov – za tisk obeh strani vložka in gravur smo skupno porabili 18 ur tiska in 2150 g smole XMOLD.



Slika 2: 3D natisnjeni gravurni vložki

3.3 Laboratorijski testi

Vse laboratorijske teste smo opravili v laboratorijih na Fakulteti za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu.

Upogibne in natezne teste smo izvedli na trgalnem stroju Shimadzu AG-X plus 10 kN. Upogibne teste smo izvedli skladno z ISO 178. Razmik spodnjih podpor je bil 64 mm, hitrost

testiranja pa 2 mm/min. Natezne teste smo izvedli skladno z ISO 527. Razmak čeljusti je bil 50 mm, hitrost testiranja do raztezka 0,25 % je bila 1 mm/min, nad 0,25 % do pretrga pa 50 mm/min.

Dinamične mehanske analize (DMA) smo izvedli na Perkin Elmer DMA 8000. Vzorce smo testirali na upogib z dvojno prižemo s frekvenco 1 Hz, amplitudo 0,02 mm in do 170 °C. Hitrost segrevanja je bila 2 °C/min.

Termogravimetrične analize (TGA) smo izvedli na instrumentu Perkin Elmer TGA 4000. Vzorec smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa izotermno držali pri 550 °C 5 min v kisikovi atmosferi (20 mL/min).

Diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) smo izvedli na kalorimetru Mettler Toledo DSC 2 skladno z ISO 11357. Hitrost segrevanja in ohlajanja je bila 10 °C/min. Vzorce smo segrevali od 0 °C do 180 °C, pri 180 °C je sledil izotermni segment 5 min. Potem smo jih ohlajali od 180 °C do 0 °C, kjer je sledil izotermni segment pri 0 °C 5 min. Potem so se vsi koraki še enkrat ponovili. Vrednotili smo temperaturo kristalizacije (T_c), entalpijo kristalizacije (ΔH_c), tališče (T_m) in talilno entalpijo (ΔH_m) iz ohlajanja in drugega segrevanja.

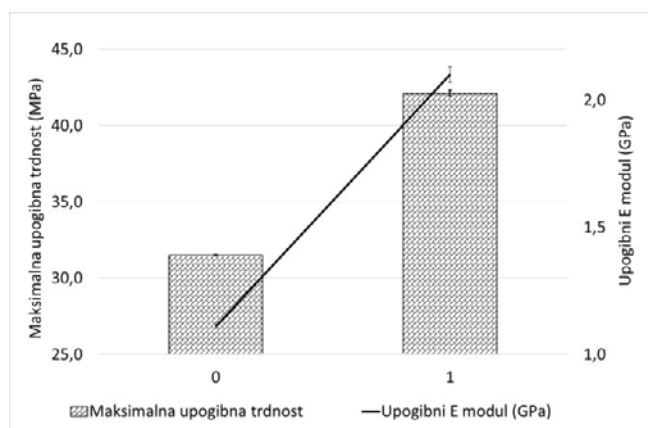
Preizkus udarne žilavosti smo izvedli po Charpy-ju na LY-XJJD5 s 5 J kladivom skladno z ISO 179. Vzorci so bili širine 10 mm in debeline 4 mm, razdalja med podporama je bila 60 mm. Pri vsakem vzorcu smo izmerili 10 paralelek in izračunali povprečje in standardni odmik.

Meritve indeksa tečenja taline smo izvedli na LIYI MFI LY-RR skladno z ISO 1133, pri temperaturi 200 °C z 2,16 kg utežjo. Pri vsakem vzorcu smo izmerili 3 paralelke in izračunali povprečje in standardni odmik.

Osnovni parametri smole XMOLD in mehanske lastnosti končnega izdelka so definirani v tehničnem listu proizvajalca, zato posameznih laboratorijskih testov nismo izvajali.

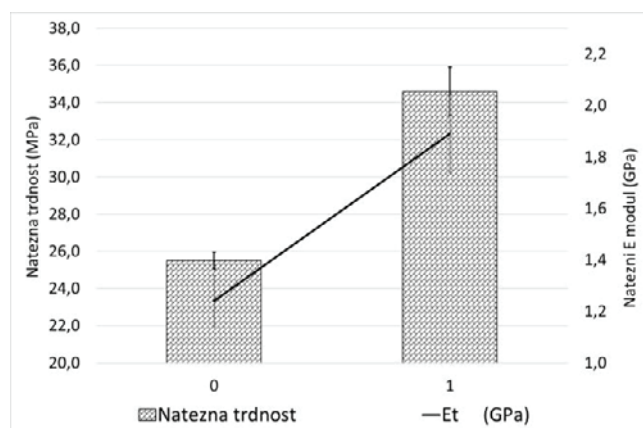
4 REZULTATI

Dodatki v rPP matrici (antioksidant, steklena vlakna, rGFRP in kompatibilizator) zvišajo upogibni E modul (E_f) in upogibno trdnost (σ_{fM}) (Slika 3) in hkrati znižajo raztezek pri upogibni trdnosti (ϵ_{fM}) iz 6,7 % na 5,7 %. Dodatki zvišajo upogibno togost za 89 % in upogibno trdnost za 34 %, kot posledica dobrih medfaznih interakcij med površino steklenih vlaken in površino delcev v rGFRP (steklena vlakna in epoksidna smola) in rPP zaradi kompatibilizatorja PP-g-MA. Hkrati se raztezek pri upogibni trdnosti zniža za 15 %.



Slika 3: Upogibni E modul in upogibna trdnost

Dodatki v rPP matrici zvišajo natezni E modul (E_t), natezno trdnost (σ_m) (Slika 4) in znižajo raztezek pri natezni trdnosti (ϵ_m) iz 5,0 % na 4,5 % in raztezek pri pretrgu (ϵ_{tb}) iz 36,7 % na 6,8 %, kot posledica dobrih medfaznih interakcij med površino steklenih vlaken in površino delcev v rGFRP (steklena vlakna in epoksidna smola) in rPP zaradi kompatibilizatorja PP-g-MA. Hkrati se raztezek pri pretrgu zniža za 81 %. Zelo dobre medfazne interakcije so se potrdile tudi pri DMA meritvah.



Slika 4: Natezni E modul in natezna trdnost

Dodatki v rPP matrici (antioksidant, steklena vlakna, rGFRP in kompatibilizator) zvišajo dinamični E modul (E') v celotnem temperaturnem intervalu. Zviša se tudi temperatura uporabe recikliranega termoplastičnega kompozita (HDT), hkrati pa je vrh faktorja izgub ($\tan \delta$) pri recikliranem termoplastičnem kompozitu nižji (Tabela 2). Rezultati potrjujejo rezultate upogibnih in nateznih testov, da dosežemo dobre medfazne interakcije med površino steklenih vlaken in površino delcev v rGFRP (steklena vlakna in epoksidna smola) in rPP zaradi kompatibilizatorja PP-g-MA.

Tabela 2: Rezultati DMA analiz

Vzorec	Dinamični E modul (GPa)	HDT (°C)	$\tan \delta$ (-)
0	1,24	78	0,164
1	2,03	115	0,118

TGA analiza (Tabela 3) prikazuje enostopenjski razpad vzorcev 0 in 1. Temperatura degradacije se poveča pri vzorcu 1 zaradi dodatkov (antioksidant, steklena vlakna, rGFRP in kompatibilizator). Tako rPP matrica kot vsi dodatki razpadejo pri prvem razpadu, dodatki pa zvišajo temperaturo razpada tudi pri rPP matrici. Ostanek pri vzorcu 0 predstavljajo anorganske nečistoče v rPP matrici (0,6 %), pri vzorcu 1 pa predstavljajo anorganske nečistoče in steklena vlakna, tudi iz rGFRP. Iz rezultatov lahko

zaključimo, da rGFRP vsebuje 60 % steklenih vlaken in 40 % duroplastične (epoksi) matrice.

Tabela 3: Rezultati TGA analiz

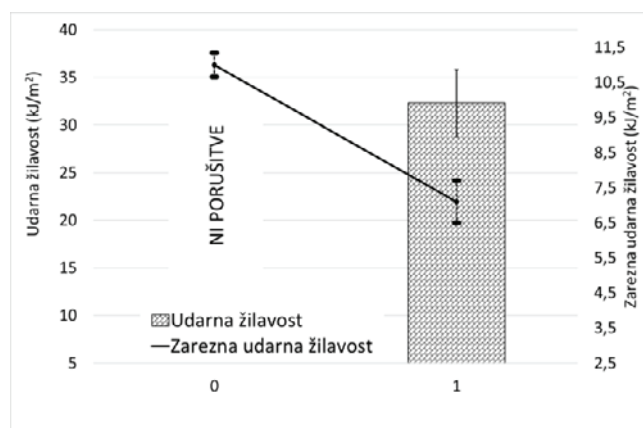
Vzorec	T _{d1} (°C)	Razpad (%)	Ostaneček (%)
0	435	99,4	0,6
1	466	80,9	19,1

Dodatki v rPP matrici (antioksidant, steklena vlakna, rGFRP in kompatibilizator) ne vplivajo na tališči niti PE frakcije niti PP frakcije, ki sta obe prisotni v rPP matrici. Dodatki pa zvišajo temperaturo kristalizacije, kar pomeni, da delujejo kot nukleacijska jedra. Iz talilnih entalpij in vsebnosti PP frakcije lahko zaključimo, da je stopnja kristaliničnosti pri rPP 38 %, pri termoplastičnem kompozitu pa se zniža na 32 % (Tabela 4). Iz teh rezultatov lahko zaključimo, da kljub temu, da dodatki delujejo kot nukleacijska jedra, pride do steričnih ovir (vlakna in zmleti koščki duroplastične matrice) pri kristalizaciji in s tem do zaustavitve rasti kristalov.

Tabela 4: DSC rezultati

Vzorec	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	T _c (°C)	ΔH _m (J/g)	ΔH _c (J/g)
0	126,9	165,7	123,8	78,4	68,0
1	127,3	167,0	127,2	45,1	43,4

Dodatki v rPP matrici (antioksidant, steklena vlakna, rGFRP in kompatibilizator) znižajo tako udarno kot zarezno udarno žilavost (Slika 5). Rezultat je pričakovan, saj rGFRP vsebuje le 60 % steklenih vlaken in 40 % zmletih delčkov duroplastične smole, ki delujejo kot polnilo in tako znižujejo tako udarno kot zarezno udarno žilavost recikliranemu termoplastičnem kompozitu.



Slika 5: Udarne žilavosti vzorcev

Indeks tečenja taline se pri vzorcu 1, ko dodamo dodatke (antioksidant, steklena vlakna, rGFRP in kompatibilizator) v rPP zniža iz 6,0 g/10 min. na 4,3 g/10 min.

3D tiskani vložki in gravure so omogočili hitro izdelavo prvih ojačitvenih delov za izdelavo ščitnikov, iz katerih smo prejeli pomembne informacije o obnašanju materiala in uspešno modificirali dizajn kovinskega orodja že med samo izdelavo le tega.

5 SKLEP

V okviru raziskave smo testirali kompozit, pripravljen iz rPP, steklenih vlaken, rGFRP in kompatibilizatorjem. Togost in trdnost recikliranega kompozita sta višji v primerjavi z rPP. Višja togost in trdnost potrjujeta dobre interakcije med sestavinami recikliranega termoplastičnega kompozita po zaslugi kompatibilizatorja PP-g-MA. Rezultati DMA analize potrjujejo izsledke nateznih in upogibnih testov. Toplotna stabilnost recikliranega termoplastičnega kompozita je višja v primerjavi z rPP. Temperatura kristalizacije se pri recikliranem termoplastičnem kompozitu glede na rPP zviša. Stopnja kristaliničnosti recikliranega termoplastičnega kompozita je nižja glede na rPP, prav teko udarna in zarezna udarna žilavost in MFI. Kljub nižjemu MFI je recikliran termoplastični kompozit še vedno primeren za brizganje kosov tudi z dolgimi potmi tečenja taline.

Novi reciklirani termoplastični kompozit je primeren za aplikacije, kot so tehnični izdelki, ki

zahtevajo višjo togost, trdnost in toplotno stabilnost kot jih ima polipropilen oz. reciklirani polipropilen.

Uporaba 3D tiskanih vložkov iz smol za brizganje plastike predstavlja inovativno in fleksibilno rešitev, zlasti v primeru maloserijske proizvodnje, hitrega prototipiranja ter razvoja izdelkov po meri. Ena glavnih prednosti te tehnologije je izjemno hitra izdelava orodij, ki omogoča bistveno krajši čas do trga, kot tudi znatno nižje stroške izdelave v primerjavi s klasičnimi kovinskimi vložki. Poleg tega 3D tisk omogoča večjo oblikovno svobodo, s čimer lahko izdelamo kompleksne geometrije, ki bi bile s klasičnim CNC postopkom težje izvedljive ali predrage.

Med pomembne slabosti pa štejemo nižjo mehansko in toplotno odpornost smol v primerjavi z jeklenimi vložki, kar omejuje njihovo uporabo na nižje temperaturne razrede in manjše serije (tipično do nekaj 100 kosov).

3D tiskani vložki iz smol so tako odlična izbira za razvojne faze, testiranje in maloserijsko proizvodnjo (Slika 6), pri čemer je treba skrbno oceniti zahteve procesa in izbrati ustrezno smolo glede na pričakovano obremenitev, temperaturo in število ciklov.



Slika 6: Flexprotec ščitnik sestavljen iz recikliranega termoplastičnega kompozita (črni

del) in 3D tiskanega fleksibilnega dela s celično strukturo (rumeni del)

Viri:

- [1] Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K.: *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. Waste Management. 2017; 69: 24–58.
- [2] Bream, C.E., Hornsby, P.R.: *Structure development in thermoset recycle-filled polypropylene composites*. Polymer Composites. 2000; 21(3)
- [3] Zhidan, L., Chao, C., Zixian, G., Shaozao, T., Xiuju, Z.: *A Compatibilized Composite of Recycled Polypropylene Filled with Cellulosic Fiber from Recycled Corrugated Paper Board: Mechanical Properties, Morphology, and Thermal Behavior*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 122 (2011) No.4, pp. 2789-2797.

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

INDUSTRIJSKI
FORUM
IRT
2025

Sodelujoči na
Industrijskem forumu IRT





GLAVNA POKROVITELJA



STROKOVNI POKROVITELJI



RAZVOJNA PARTNERJA



VSEBINSKI PARTNER



NACIONALNI POKROVITELJI DOGODKA



POKROVITELJI



RAZSTAVLJAVCI



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



Univerza v Mariboru
Fakulteta za strojništvo



VISOKA ŠOLA
ZA PROIZVODNO
INŽENIRSTVO



Fakulteta za
tehnologijo polimerov



PARTNERJI IZ INDUSTRIJE

ACRONI



FORVIA
HELLA

AKRAPOVIČ



Horta

B/S/H/

**TRI
MO**

IM

IskraMehanizmi

ENGINEERING
TOMORROW



Turana

Nadaljujemo tradicijo. Ustvarjamo prihodnost.

KOLEKTOR
55 let / years

DOMEL®

UNIOR®

INDUSTRIJSKI
FORUM
IRT
2025

Komercialni oglasi
podjetij







Opcija Ultra Accuracy za GoFa™ robote

Z dodano opcijo Ultra Accuracy postane ABB GoFa najbolj natančen sodelujoči robot na trgu. Postavljamo nov standard z 10-krat večjo natančnostjo od ostalih sodelujočih robotov: poleg vrhunske ponovljivosti pozicije 0,02 mm sedaj GoFa dosega tudi izjemno natančnost poti znotraj 0,03 mm. Ta vrhunska zmogljivost izpolnjuje zahteve aplikacij, kjer je natančno pozicioniranje ključno za ohranjanje kakovosti izdelkov in operativne učinkovitosti. GoFa sodelujočega robota lahko

uporabimo v aplikacijah, ki vključujejo lepljenje in tesnjenje v proizvodnji potrošniške elektronike, lasersko varjenje avtomobilskih delov z natančnimi tolerancami, sestavljanje kompozitnih materialov v letalski industriji in natančno lasersko rezanje pri obdelavi kovin. Prav tako je idealen za natančno pozicioniranje slojev v 3D tisku in izvajanje natančnih kontrol kakovosti v metrologiji. Funkcija Ultra Accuracy je na voljo tako za nove kot obstoječe sodelujoče robote ABB GoFa.

Mednarodni industrijski sejem

GRE V NOV RITEM!

Sejem MIS se pomika naprej – z jasnim fokusom, sodobnimi vsebinami in industrijo prihodnosti.

Leti 2026 in 2027 postavljata nova merila.

Ključne teme MIS 2026:

- Varjenje in rezanje
- Industrija 4.0
- Pametno vzdrževanje
- Industrijska elektronika
- Energetika v industriji
- Digitalizacija proizvodnih procesov
- Senzorika in avtomatizacija
- Reciklaža in industrijski odpadki
- Logistika in oskrbovalne verige

Ključne teme MIS 2027:

- Orodjarstvo in strojogradnja
- Industrijska avtomatizacija
- Robotika in elektronika
- Industrija polimerov
- CNC tehnologije, CAD/CAM sistemi
- Napredni materiali (kovine, kompoziti)

 Naslednji termin: 14. -17. april 2026

 Celjski sejem, Slovenija

Prijave za MIS 2026 – od junija 2025 dalje!

**Z vami
soustvarjamo
industrijo
prihodnosti.**



THE FACTORY AUTOMATION COMPANY

FANUC

Prvi sodelujoči robot za barvanje, odporen proti eksploziji CRX-10iA/L Paint



ZASNOVANO ZA
IZPOLNJEVANJE
STROGIH VARNOSTNIH
STANDARDOV PROTI
EKSPLOZIJAM



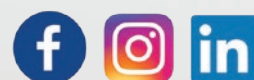
BREZPLAČNO
VZDRŽEVANJE 8 LET



10 KG NOSILNOST
1,418 MM DOSEG



ENOSTAVNO PROGRAMIRANJE ZA
USTVARJANJE POTI BARVANJA



FANUC EUROPE, FANUC ADRIA



Prilagodljiva avtomatizacija za več operacij barvanja in premazovanja

- majhen obseg gibanja in tehnologija zaznavanja sile omogočata varno delovanje v bližini ljudi
- funkcije za enostavno učenje, vključno s programiranjem »povleci in spusti« ter možnostjo »vodenja skozi učenje«, omogočajo hitro uporabo tistim z malo ali nič izkušnjami z robotiko
- najdaljši doseg v svojem razredu s 1418 mm in 10 kg nosilnosti z edinstvenim gibanjem prevračanja navzdol; lahka teža s 47 kg
- omogoča dostop do velikih obdelovancev in območij, ki predstavljajo ergonomske izzive za ljudi
- intuitivni ukazi ikon, specifični za barvo, za aplikacije barvanja
- popolne možnosti optimizacije z urejanjem poti in programsko opremo ROBOGUIDE
- enostavno se integrira z drugo opremo, ki se uporablja pri barvanju, prašnih, tekočih, premaznih in s steklenimi vlakni ojačanih plastikah (FRP CHOP/GEL) aplikacijah

SALES@FANUC.SI

WWW.FANUC.SI



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.



**Avtomatizacija.
Natančnost.
Kjerkoli je potrebno.**

- Avtomatizirajte meritve v proizvodnji za vaš ATOS Q ali GOM Scan 1.
- Z minimalnim usposabljanjem lahko vsakdo postane merilec – tudi v tretji izmeni.
- Rezultati meritev niso odvisni od operaterja.



TOPOMATIKA d.o.o.
Industrijska ulica 3, Novaki
HR-10431 Sveta Nedelja
www.topomatika.si

Za brezplačen demonstracijski projekt se obrnite na Topomatiko po e-pošti digitalizacija@topomatika.si ali pokličite tel. št. +385 1 349 60 10.



#HandsOnMetrology
PARTNER

SolidWorld
3D advanced solutions
ADITIVNE TEHNOLOGIJE

STORITVE 3D TISKANJA IN SKENIRANJA

Tiskanje rezervnih delov, prototipov in kosov po meri iz kovine ali plastike.



01 241 82 14



additive@solidworld.si

ČLANSTVO V DMS JE ODLOČITEV ZA VEČ ZNANJA



DRUŠTVO ZA MARKETING
SLOVENIJE

V hitro spreminjajočem se poslovnem in tehnološkem okolju je pomembno, da se zanesete na strokovno skupnost, ki vam prihrani čas in energijo. V **Društvu za marketing Slovenije (DMS)** vam pomagamo, da ostanete korak pred izzivi in trgom.

Kaj vam prinaša članstvo v DMS?

- » Dostop do vrhunskih predavateljev in strokovnjakov iz prakse.
- » Več kot 60 izobraževanj letno - znanje, ki ga lahko prenesete v svoje delo že naslednji dan.
- » **Certifikat znanja DMS**, kot potrditev vaše strokovne rasti in zavezanosti k kontinuiranemu učenju.
- » **Soustvarjajte največjo marketinško skupnost v Sloveniji!**

Za najbolj vedoželjne so tu tudi dogodki, kot je **Slovenska marketinška konferenca (SMK)**, osrednji letni dogodek stroke, ter **B2B konferenca** - dogodek za ambiciozne, ki želite rasti, inovirati in graditi uspešne znamke v zahtevnem B2B okolju.

Ugodneje na B2B dogodek leta!

Člani DMS se lahko B2B konference, 9. oktobra 2025 v Ljubljani, udeležite po ugodnejši ceni. Čaka vas 8 ur odličnega programa, konkretni primeri, interaktivne reševanje vaših izzivov in druženje z več kot 150 udeleženci.

Postanite član DMS!

Izkoristite posebno ponudbo in si zagotovite PRO paket članstva po ceni začetnega - **za samo 299 € + DDV**.

PROMO KODA: IRT2025



Več na
www.dmslo.si/clanstvo

YASKAWA



Weld4Me CE

Intuitivno programiranje kolaborativnega robota

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



VAKUUM ČRPALKE

Zanesljiva rešitev za vsako industrijo

BUSCH

VACUUM SOLUTIONS
AUTHORIZED RESELLER

Naše podjetje **CODE d.o.o.** že 30 let ponuja celovito podporo in prodajo vakuum črpalk **BUSCH**, vodilnega svetovnega proizvajalca vakuumske tehnologije. Ponudba vključuje širok spekter črpalk in puhal prilagojenih različnim industrijskim aplikacijam: pakiranje, farmacija, živilska industrija, kemija in avtomobilska industrija...

PRODAJA IN TEHNIČNO SVETOVANJE

- vakuum črpalk **BUSCH**
- puhal **BUSCH**
- vakuum sistemov **BUSCH**
- svetovanje in tehnična pomoč na terenu

SERVISNI POSEGI IN NADGRADNJE

- redni servisi na vaši lokaciji
- generalni servisi v našem servisnem centru
- preventivni pregledi za zanesljivo delovanje
- izvajanje meritev in analiz delovanja sistema

ORIGINALNI REZERVNI DELI BUSCH

- S katerimi se zagotavlja:
- nemoteno delovanje delovnega procesa
 - optimalno zmogljivost naprave
 - daljšo življensko dobo
 - nižjo porabo električne energije



Za dolgo življensko dobo in optimalno učinkovitost vakuum črpalk in sistemov **BUSCH**

CODE d.o.o tel.: 01 56 44 096 e-mail: info@code.si www.code.si

RAČUNALNIKI ZA PROFESIONALNE UPORABNIKE

ANNI DELOVNA POSTAJA

PC WORKSTATION

NOVO!



Technology
Provider
Gold

V podjetju Anni d.o.o. razumemo, da je zmogljiv in zanesljiv delovni računalnik ključnega pomena za učinkovito delo v arhitekturi, inženiringu, oblikovanju, razvoju programske opreme, podatkovni analitiki in drugih zahtevnih panogah. Zato vam ponujamo rešitev,

prilagojeno točno vašim potrebam in programski opremi, ki jo uporabljate – ne glede na to, ali delate z AutoCAD-om, SolidWorksom, Adobe Suite, Revitom, Blenderjem ali z naprednimi analitičnimi orodji.

Smo podjetje z več kot 35-letno tradicijo in v tem času smo postali zanesljiv partner mnogim podjetjem, samostojnim ustvarjalcem in organizacijam po vsej Sloveniji. Naša ekipa strokovnjakov vam pomaga od svetovanja pri izbiri prave konfiguracije, pa vse do podpore in nadgradenj v prihodnosti. Poleg prodaje imamo servisni oddelek, kjer skrbimo za hitro in učinkovito podporo uporabnikom. Tako zagotavljamo, da bo vaša delovna postaja vedno pripravljena na zahtevne naloge.

Za več informacij in naročilo se obrnite na Domen Podviz, 051 647 847, domen.podviz@anni.si



Anni d.o.o., Motnica 7a, IOC Trzin
Informacije 01/ 5800 800
info@anni.si, www.anni.si

Znanje, strokovnost, zaupanje in ... 35 let izkušenj.

I FEEL
SLOVENIA

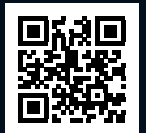
*Krepimo slovensko
gospodarstvo*

**ZELENA.
USTVARJALNA.
PAMETNA.**

ZNANJE ZA USTVARJANJE VREDNOSTI

S ponosom gledamo na raznolike izume naših prednikov, številne inovacije slovenskih strokovnjakov, ki so spremenile svet, visoko sposobnost industrijskega in tehničnega znanja zaposlenih, estetsko dovršenost in mojstrovino ustvarjanja končnih izdelkov ter globoko spoštovanje narave in uporabljenih materialov.

Na SPIRIT Slovenija s pomočjo finančnih spodbud in drugih podpornih storitev prispevamo h kreptvi inovacijske aktivnosti, ustvarjanju dodane vrednosti in mednarodne konkurenčnosti slovenskih podjetij. Ne spreglejte priložnosti. **Spemljajte nas!**



managerski kongres 2025

2. in 3. oktober,
GH Bernardin, Portorož

Prijave na naši
spletni strani:



www.zdruzenje-manager.si



**ZDRUŽENJE
MANAGER**

Discover the Future of Hydraulic Oils



Naziv izdelka	Protibrabni aditivi	Vsebuje cink	Odlična oksidacijska stabilnost	Visok IV	Detergentni aditivi
Hydrolubric HLP	•	•			
Hydrolubric HD	•	•			
Hydrolubric VG	•	•			
Hydrolubric VG D	•				•
Hydrolubric HVLP	•	•		•	
Hydrolubric VGS	•	•		•	
Hydrolubric VGS Plus	•	•		•	
Hydrolubric HVLPD	•			•	•
Hydrolubric VG BR	•				
Hydrolubric HEES	•			•	
Energolubric 20XY	•	•	•		
Energolubric 20XY S	•	•	•	•	
Energolubric 20XY ZF	•		•		
Energolubric 30XY	•	•	•	•	
Energolubric 30XY ZF	•		•	•	
Energolubric 40XY	•		•	•	



Koding Jet tisk visoke ločljivosti v industriji

V sodobni industriji je natančno in zanesljivo označevanje izdelkov ključnega pomena za sledljivost, kakovost in skladnost s predpisi. Med naprednimi rešitvami na tem področju izstopa tiskalni sistem Koding Jet, ki ga ponuja slovensko podjetje TIFT. Gre za visokoločljivostni brizgalni sistem (Piezoelectric Printing), zasnovan za učinkovito označevanje v različnih industrijskih panogah.

TIFT

Tiskalniki Koding Jet uporabljajo najnovejšo piezoelektrično tehnologijo brizgalnega tiskanja in omogočajo kakovostno označevanje na različnih materialih, od poroznih (karton) do neporoznih (plastika, kovina ...) podlag. Natančne piezoelektrične šobe omogočajo tiskanje z ločljivostjo v razponu od 300 DPI do 600 DPI. Ta visoka ločljivost zagotavlja izjemno natančnost tiskanja besedil, črtnih kod in grafike, kar je ključno za berljivost oznak in skladnost s standardi sledljivosti.

Še več, kakovost izpisa ostaja izjemna tudi pri visokih hitrostih proizvodnih linij. Tiskalniški sistemi podpirajo hitrosti tiskanja okoli 200 (celo 260) metrov na minuto, kar pomeni, da lahko sledijo tempu še tako hitre avtomatizirane proizvodnje brez izgube kakovosti tiska. Prilagodljivost je tudi pisana z veliko začetnico, saj so tiskalniki sistemi lahko opremljeni z modularnimi tiskalnimi glavami različnih dimenzij, ki

jih lahko podjetje poljubno kombinira za doseganje zelene višine izpisa. Na voljo je več modelov tiskalnih glav z višinami tiskanja 32,4 mm, 54,1 mm, 71,8 mm in 108 mm. Posamezen krmilnik Koding Jet lahko upravlja do štiri tiskalne glave hkrati. Modularnost sistema omogoča tudi večvrstični tisk. Tiskalne glave lahko razporedite tako, da natisnejo več vrstic besedila ali več različnih vsebin hkrati. Za dodatno prilagodljivost poskrbi možnost namestitve tiskalnih glav na različnih straneh – tako so lahko nameščene skupaj na eni strani izdelka ali pa na nasprotnih straneh za sočasno dvostransko označevanje. Poleg tega podpirajo tiskanje tako z zgornje strani kot s strani, kar zagotavlja fleksibilnost pri postavitvi znotraj proizvodne linije.

UV in oljna črnila

Kakovost in obstojnost tiska sta seveda zelo odvisni tudi od uporabljenih črnin in morebitne dodatne obdelave. Sistem Koding Jet podpira uporabo različnih vrst industrijskega črnila, prilagojenih posameznemu materialu in aplikaciji. Na voljo so črnila na osnovi olja ter UV-utrjujoča črnila. Oljno osnovana črnila so primerna predvsem za porozne materiale (na primer papirnata in kartonska embalaža, les), saj se hitro vpijejo v podlago in ne zahtevajo dodatnega sušenja. Takšna črnila so

Koding Jet na kratko

Vse, kar morate vedeti o tiskalnem sistemu Koding Jet, je to, da je zasnovan za visoko kakovostno označevanje na najrazličnejših materialih, kot so papir, karton, plastika, kovina in les. Njegove glavne prednosti vključujejo:

- ♦ **Visoka ločljivost tiskanja:** Omogoča jasno in natančno tiskanje črtnih kod, serijskih števil, datumov in drugih informacij.
- ♦ **Modularna zasnova:** Sistem omogoča uporabo do šestih tiskalnih glav, kar omogoča tiskanje več vrstic ali tiskanje na več mestih hkrati.
- ♦ **Visoka hitrost tiskanja:** Hitrost tiskanja lahko dosega do 200 metrov na minuto, kar ga naredi primernega tudi za hitro tekoče proizvodne linije.
- ♦ **Enostavna integracija:** Zaradi kompaktne zasnove in enostavnega upravljanja se sistem zlahka integrira v obstoječe proizvodne procese.
- ♦ **Uporabniku prijazen vmesnik:** Intuitiven uporabniški vmesnik omogoča hitro nastavitve in prilagajanje tiskalnih parametrov.



razvita za tisk visokokakovostnih in ostrih oznak, kot so črne kode, serijske številke, datumске in LOT-kode ter logotipi.

Za neporozne materiale (plastika, kovine, folije, steklo) pa Koding Jet uporablja UV-reaktivna črnila, ki se strdijo [utrjujejo] s pomočjo UV-svetlobe. Tiskalni sistem je namreč opremljen z integriranim utrjevalnim sistemom, ki z močnimi UV LED diodami neposredno po izpisu osvetli natisnjeno kodo in hipno utrdi črnilo. UV-črnila omogočajo tisk na površine, kjer oljna ali klasična črnila ne bi obstala ali bi se razmazala, saj UV-svetloba poskrbi za takojšnje sušenje in pritrjevanje črnila na material.

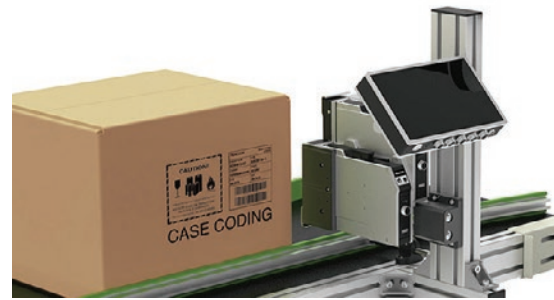
Kot se za industrijski tiskalni sistem spodobi, je Koding Jet opremljen s stabilnim centraliziranim sistemom za dovajanje črnila, ki skrbi za samodejno in neprekinjeno napajanje tiskalnih glav s črnilom iz večjih rezervoarjev. Prednost tega sistema je, da lahko črnilo dolivate brez zaustavitve tiskalnika in proizvodne linije, saj je sistem zaprt in omogoča sprotno dolivanje. Vgrajeni senzorji zaznajo nizko raven črnila in po potrebi sprožijo alarm ali samodejno dolivanje, kar preprečuje izpade označevanja zaradi praznih kartuš. Poleg tega sistem vključuje tudi dodatne funkcije, kot sta ogrevanje črnila in mešanje, kar zagotavlja konsistentno kakovost tiska skozi celoten

proces. Neprekinjena oskrba s črnilom skupaj z velikimi zalogovniki črnila pomeni tudi nižje stroške izpisovanja in manj posegov operaterja, s čimer je Koding Jet primeren za obsežne serije in neprekinjeno proizvodnjo.

Linajska integracija

Sistem Koding Jet je že v izhodišču zasnovan z mislijo na enostavno integracijo v obstoječe proizvodne procese. Z modularno zasnovo ga je mogoče hitro namestiti na tekoče trakove, pakirne stroje ali druge linijske transportne sisteme. Modularnost se kaže tudi v razširljivosti sistema – uporabnik lahko začne z eno tiskalno glavo in enostavnim krmilnikom, po potrebi pa sistem nadgradi z dodatnimi glavami in močnejšim krmilnikom [za do štiri glave]. S tem je Koding Jet skalabilna rešitev, ki raste skupaj s potrebami proizvodnje.

Tudi programska oprema je modularna in omogoča dodajanje novih funkcionalnosti [na primer podporo za dodatne vrste kod, povezave z novimi podatkovnimi viri, ipd.] brez zamenjave osnovne strojne opreme. Integracija se ne nanaša le na fizično vgradnjo, temveč tudi na povezljivost z industrijskimi krmilniki in informacijskimi sistemi. Tiskalniki Koding Jet podpirajo povezave z nadrejenimi sistemi, kot so



krmilniki proizvodnih linij in računalniški sistemi. Preko standardnih vmesnikov (na primer Ethernet, USB, serijski vmesnik) ali mrežnih protokolov lahko tiskalnik komunicira z drugimi napravami. To omogoča, da se tiskanje dinamično sproža ob pravem trenutku [na primer ko izdelek prispe na označevalno postajo] in da se vsebine za tisk [kode, serijske številke ...] posodobljajo v realnem času iz centralne baze podatkov. Oprema Koding Jet je združljiva tudi z obstoječimi sistemi ERP/MES, ki se uporabljajo v pametnih tovarnah, torej se tiskanje lahko proži in nadzira iz osrednjega informacijskega sistema.

Za več informacij obiščite stran www.tift-koding.com, delovanje sistema pa si lahko v živo ogledate v razstavnem prostoru podjetja TIFT.

Avtomatizacija proizvodnje Industrijske programske rešitve

Industrijske programske rešitve prinašajo večjo natančnost označevanja izdelkov, hitrejši čas izdelave ter manj napak v proizvodnem procesu.

Avtomatizacija delovnih postopkov z uvedbo programskih rešitev in novih tehnologij pomeni manj zamudnih ročnih postopkov, optimizacijo proizvodnega časa in zmanjšanje možnosti napak, kar posledično upliva na produktivnost ter ugled podjetja.



<https://www.tift-koding.com/sl/>

<https://www.tift-koding.com/sl/content/podpora/tift-koding-video.html>

TIFT

www.tift.si | dobrodosli@tift.si
01 600 10 20 | 031 665 144

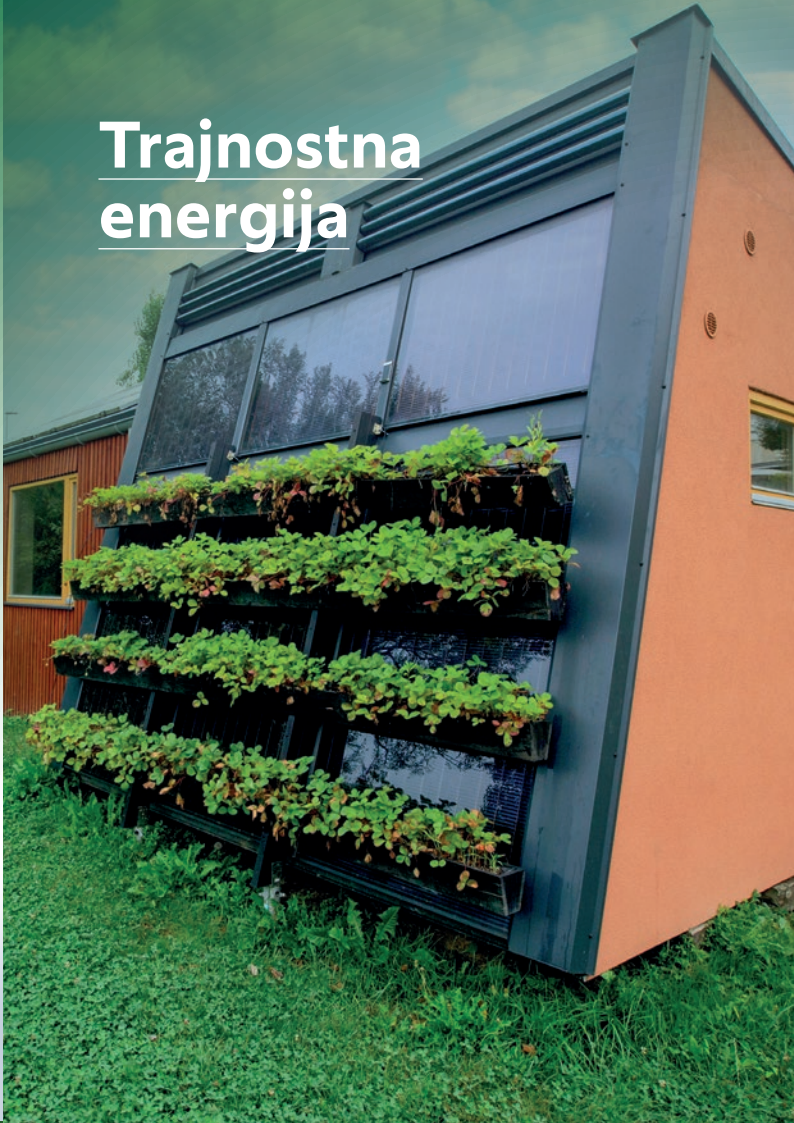
O podjetju:

V podjetju Tift razvijamo celovite rešitve industrijskega označevanja, avtomatizacije in digitalne integracije. S povezovanjem strojne opreme z informacijskimi sistemi in razvojem lastnih uporabniških aplikacij smo v koraku s tovarnami prihodnosti.

Tovarne prihodnosti



Trajnostna energija



Zelena in varna mobilnost



Zdravje



Rešimo vaše izzive skupaj!

www.fs.uni-lj.si rr@fs.uni-lj.si

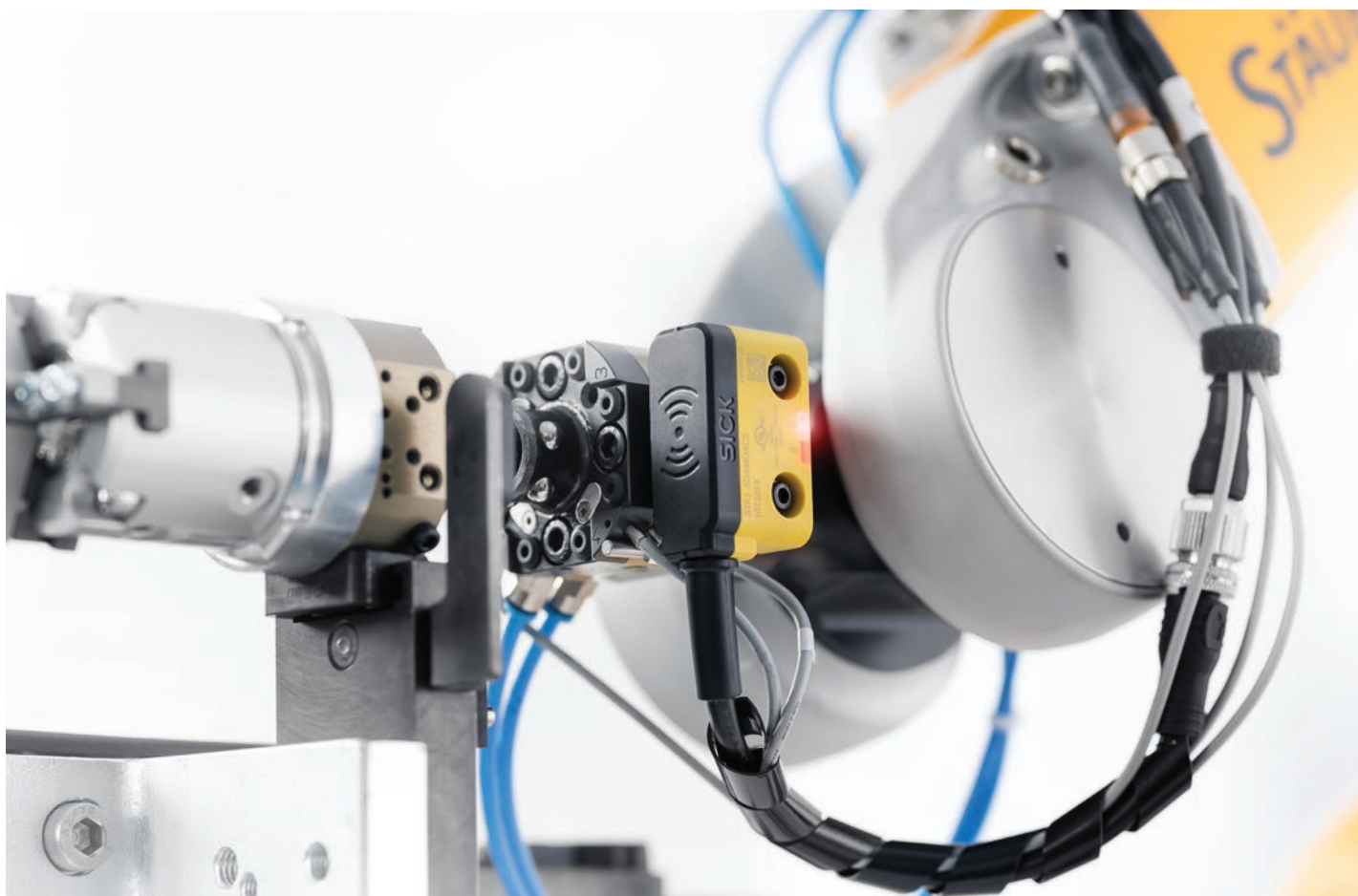
Sledite nam [f](#) [i](#) [t](#) [i](#) [v](#)



FS

UNIVERZA
V LJUBLJANI

Fakulteta
za strojništvo



STÄUBLI MPS SISTEMI ZA MENJAVO ORODIJ IN PRIJEMAL NA ROBOTU Dodatna varnost za ljudi in opremo

Varnost ljudi in opreme je vedno na prvem mestu. V celotnem življenjskem ciklu spreminjajočega se sistema mora vsaka sprememba orodja izpolnjevati to zahtevo. V skladu s standardom ISO 10218-2 je treba zagotoviti, da izguba energije ali napačna uporaba ne povzroči nevarnosti.

Zaščitne naprave, kot so varnostne ograje, pri tem ne zadostujejo vedno. Za vsakodnevno uporabo, vzdrževanje ali poučevanje z odprtim varovanim prostorom je potreben varnostni modul, ki preprečuje, da bi se orodje odklopilo zunaj predvidenih položajev za shranjevanje.

Enako velja povsod, kjer sodelujejo ljudje in roboti.

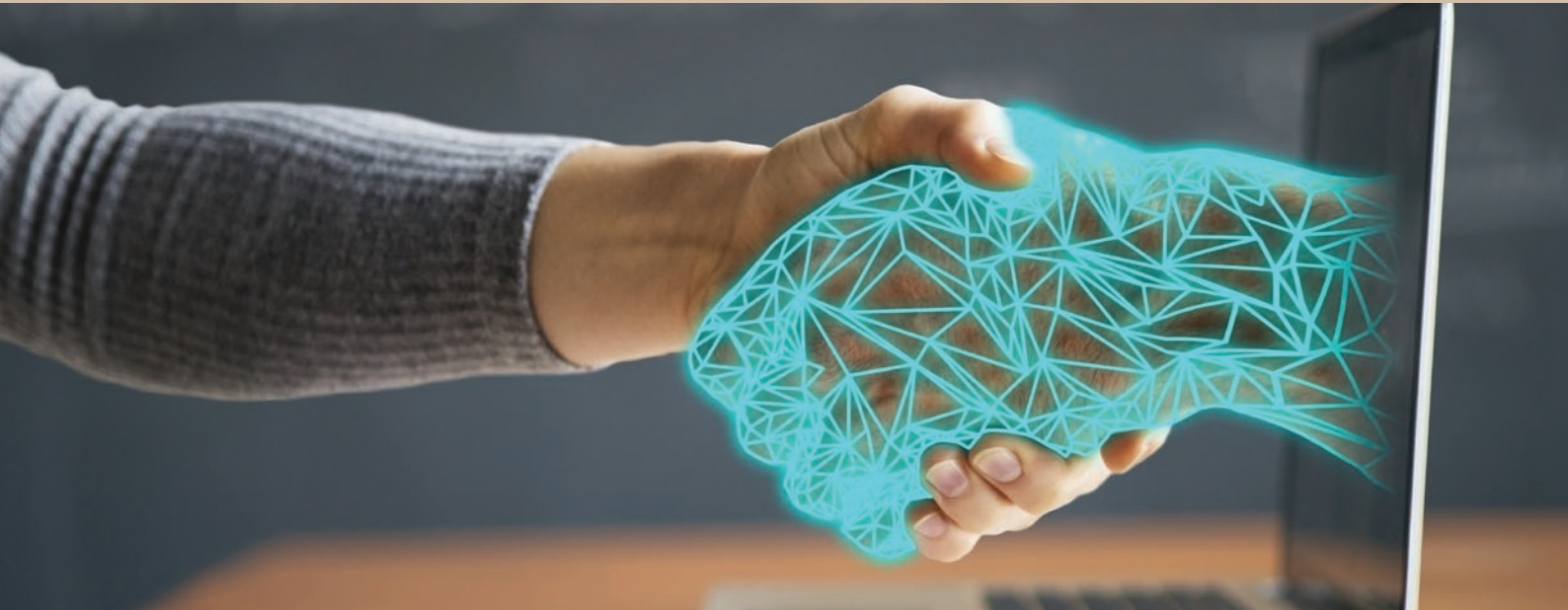
Sistem MPS Safety+ podjetja Staubli zagotavlja prav to varnost.



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 v razvoju in implementaciji digitalnih dvojčkov, v sodelovanju z laboratorijem LASIM, Fakultete za Strojništvo, Univerze v Ljubljani, oblikujemo in izboljšujemo proizvodne in logistične procese. To dosegamo z naprednimi aplikacijami in programskimi rešitvami, ki so plod našega internega razvoja in strokovnega znanja. Naša strast in znanje vodita podjetja do hitre in učinkovite optimizacije, kar postavlja DIGITEH v sam vrh digitalne transformacije v širši regiji.



NAŠE ZNANJE, VAŠ NAPREDEK:

10+ let naših izkušenj pri digitaliziranju industrije vam prinaša konkurenčno prednost in izjemno učinkovitost.

Celovita analiza procesov z digitalnimi dvojčki za natančno odkrivanje ozkih grl ter optimizacijo delovanja.

Napredni optimizacijski algoritmi, ki izkoriščajo moč podatkov za avtomatizacijo in izboljšanje proizvodnih ter logističnih procesov.

Integracija umetne inteligence za dinamično prilagajanje in sprotno odzivanje na proizvodne izzive.

DIGITEH D.O.O.
TRŽAŠKA CESTA 315, SI-1000 LJUBLJANA

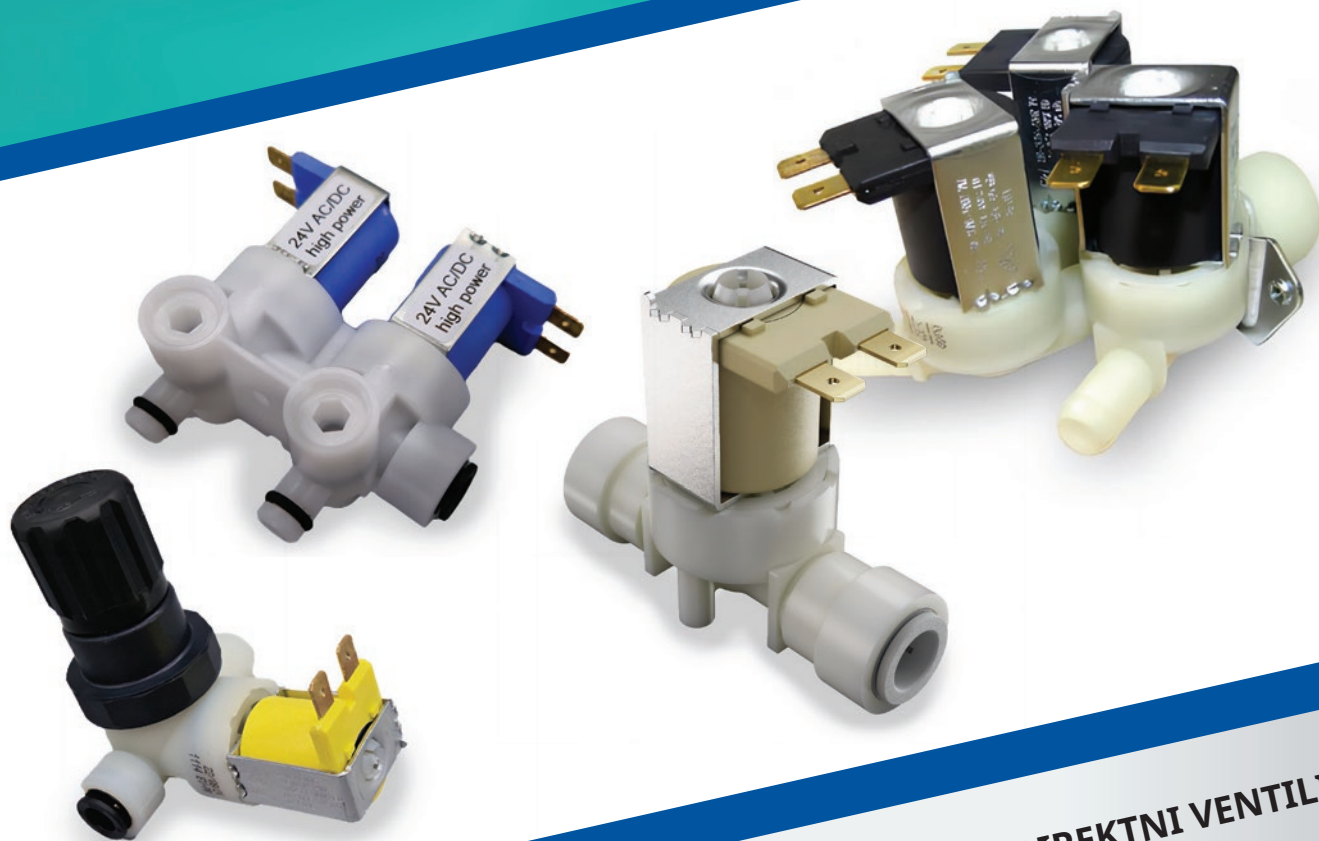


+386 (0)8 2055 621
INFO@DIGITEH.EU
WWW.DIGITEH.EU



Elektromagnetni ventili

Elektromagnetni ventili za gospodinjke aparate, kavne avtomate, sanitarno opremo in vse naprave, kjer je prisotna zahteva po krmiljenju vode in ostalih medijev



STANDARDNI NC ventili • BISTABILNI-Baterijski ventili • DIREKTNI VENTILI
PROPORCIONALNI VENTILI • SERVO VENTILI
VENTILI IZDELANI PO MERI (izdelki ustvarjeni v sodelovanju z našimi partnerji)



Vsi ventili izdelani po najvišjih standardih VDE in UL / CSA.

Z VAMI ŽE 30 LET.

E: eki@eki.si
T: 07/3053162
www.eki.si

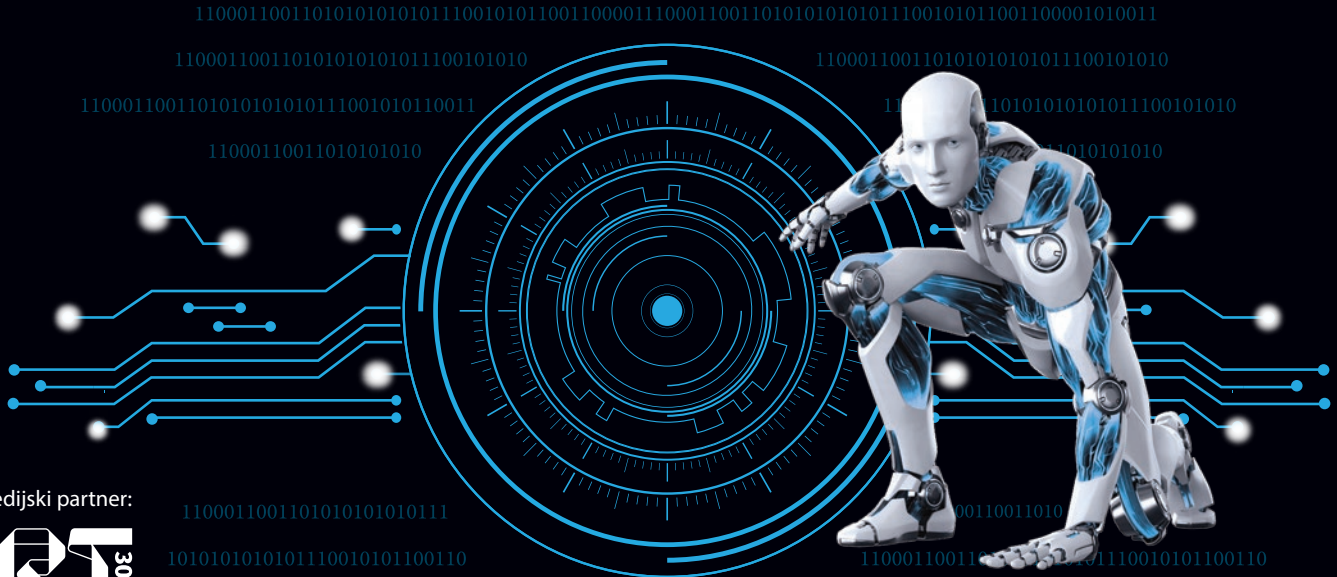
eki ELECTRO
MECHANICAL
COMPONENTS

iCm

IFAM-INTRONIKA-ROBOTICS

14.-16.10.2025

Novi Sad, Srbija



Medijski partner:



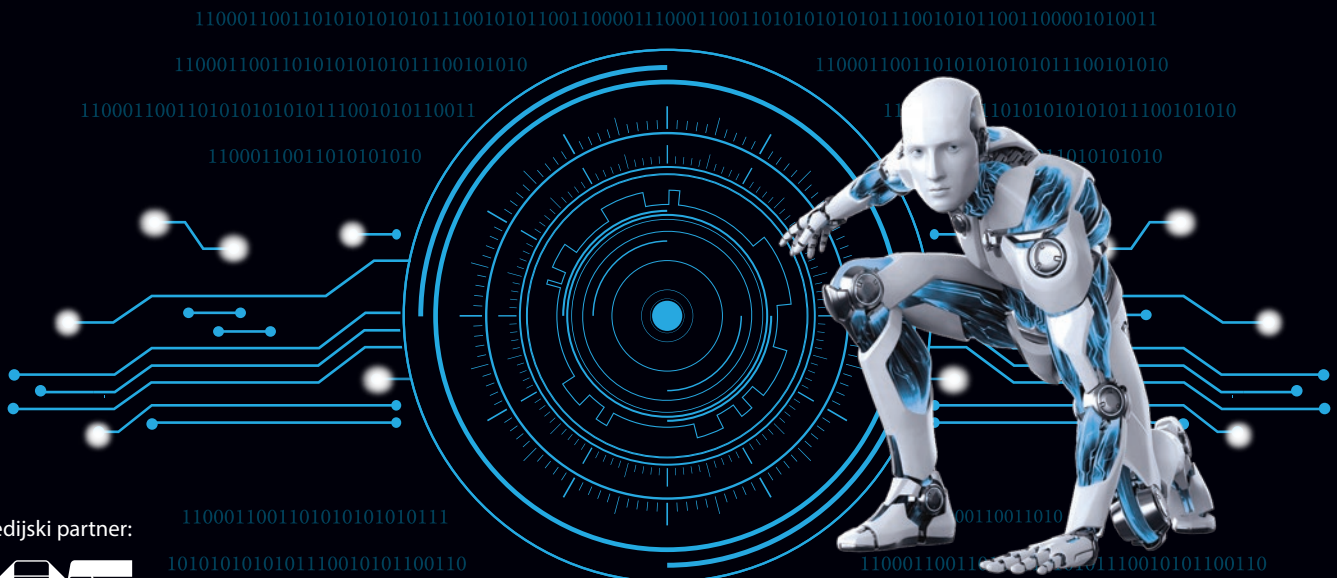
www.icm.si

iCm

IFAM-INTRONIKA-ROBOTICS

17.-19.2.2026

Ljubljana



Medijski partner:



www.icm.si

VIBRACIJSKI BRUSNI STROJ GARANT GMT 35

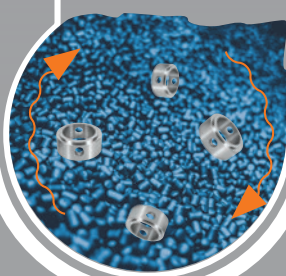
Naš odgovor na vaše potrebe brušenja.

Garant



NAŠE REŠITVE:

- Rešitev Plug & Play za hiter vstop v samodejno naknadno obdelavo.
- Mobilna rešitev, ki jo lahko uporabite, kjer jo potrebujete. (Odlagalna površina < 1,5 m²)
- Kakovostni brusilni mediji (različne oblike in mere, prilagojena intenzivnost brušenja za posnemanje zarobka in poliranje, obdelava kovin in umetnih mas).
- Delitev delovnega prostora – različni delovni koraki (posnemanje zarobka, poliranje) lahko potekajo vzporedno. S tem je možno tudi ločevanje občutljivih obdelovancev.
- Vse funkcije v eni napravi (od kroženja vode do ločevanja).
- Možna obdelava s časovnim zamikom.
- Majhni investicijski stroški.



Prikaz postopka vibracijskega brušenja.

PREPROSTA UPORABA, ŠTEVILNE PREDNOSTI

- popoln nadzor – namestitvev neposredno ob stroju
- prihranek časa - vzporedni programi
- brez ročne obdelave
- širok nabor možnosti uporabe
- vrhunska kakovost
- brez zunanjih izvajalcev
- samodejno ločevanje obdelovancev in brusnega medija.
- vgrajeno prečiščevanje vode.
- zvočna izolacija
- intuitivno, pametno krmiljenje
- enostaven transport

Hoffmann Group

www.hoffmann-group.com

INDUSTRIJSKI FORUM IRTADRIA25



Strokovni dogodek za industrijo

Industrijski forum IRT3000 je dvodnevni strokovni dogodek, ki že več kot 15 let ustvarja prostor za izmenjavo informacij, znanj, idej in pogledov na dosežke industrijske panoge. Revija IRT3000 ga je doslej organizirala v Sloveniji, z naslednjim letom pa se dogodek uveljavlja tudi na širšem področju Zahodnega Balkana.

Industrijski forum IRT 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 za večjo konkurenčnost podjetij.

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 se tesno povezujejo z vsebinami, o katerih piše revija IRT3000. Osrednja pozornost je namenjena primerom uspešno rešenih konkretnih izzivov iz prakse.

KAJ?

- Strokovni dogodek – 2 dni!
- predavanja, mreženje in izmenjava izkušenj
- več kot 80 strokovnih predavanj

ZA KOGA?

- za strokovnjake iz proizvodnih podjetij
- za predstavnike razvojnih in raziskovalnih institucij
- za akademike
- za odločevalce iz industrije
- za predstavnike branžnih združenj
- za vodje proizvodnje
- za raziskovalce in razvojnike
- za študente in dijake
- za vse, ki hočete biti v stiku z napredkom v svoji branži



RAZSTAVA



POSLOVNI DEL



STROKOVNA
PREDAVANJA



RAZISKOVALCI

15. in 16. 9. 2025

Zadar • Hotel KOLOVARE

Glavna pokrovitelja



Strokovni pokrovitelji



Pokrovitelj



Ekskluzivni 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.

7. FACTORY KONGRES & GEMBA WALK



8.12.2025.
Beograd,
Hotel Crowne Plaza

9.12.2025.
Gemba walk
u fabrikama

Najveći događaj za industriju u Srbiji

- 550 učesnika
- 70 panelista
- 18 panela
- 18 predavanja
- 9 fabrika koje obilazimo 1 dan u Gemba walk

Direktori fabrika

Organizator

MENADŽMENT CENTAR BEograd
mcb edukacija
Menadžment Centar Beograd
Beograd, Ustanička 189
+381 11 3047 126
+381 63 8500 991
office@mcb.rs; www.mcb.rs
www.factory-kongres.rs

Sponzori

Medijski sponsor



Zvanična voda



Zvanično osveženje



Zvanična hrana



Zvanična kafa



Zvanični sladoled



Pokrovitelji



WHY JOIN STAGE?



SMART ASSESSMENT & INSIGHTS

- Use online self-assessment tools covering ESG, Industry 4.0, production sustainability, business strategy, carbon footprint, and EU Taxonomy.
- Get data-driven feedback with key insights to identify strengths, weaknesses, next steps.

STRATEGIC PLANNING & INVESTMENT READINESS

- Access templates for financial and sustainability transition planning.
- Define clear goals and action plans for your investment strategy.



EXPERT GUIDANCE & ADVISORY SUPPORT

- Connect with 950+ sustainability and financial advisors.
- Get direct support from the STAGE Consortium.

TRAINING & CAPACITY BUILDING

- Access online training on sustainability, innovation, and business.
- Earn certifications from top institutions.



EXCLUSIVE NETWORKING & FUNDING OPPORTUNITIES

- Compete for a chance to present your project at the sustainable investment event in Berlin (June 2025).
- Get support in attracting private investments.

JOIN THE **STAGE PLATFORM** TO UNLOCK ALL THESE BENEFITS FOR FREE!



Funded by
the European Union



IZDELOVANJE BREMSKIH ŽIČNIH VRVI IN VERIG

Izdelujemo
DVIŽNA SREDSTVA
in opravljamo
PERIODIČNE PREGLEDE

Pokličite nas in svetovali vam bomo
glede vaše dvižne opreme!

Sto let leške verigarske tradicije!

IBV d.o.o.

Alpska cesta 43 • 4248 Lesce

T: +386 (0)4 530 20 60 M: +386 (0)41 725 153

E: info@ibv.si W: www.ibv.si



dvižni trakovi



brezkončni
trakovi



škopci



bremenske
verige in vrvi



prijemala



povezovalni trakovi

REVIIJA ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO

VENTIL

ISSN 1318 - 7279

Letnik 25

- ▮ Strokovni in znanstveni prispevki
- ▮ Iz prakse za prakso
- ▮ Ventil na obisku
- ▮ Novice - zanimivosti
- ▮ Aktualno iz industrije
- ▮ Novosti na trgu
- ▮ Podjetja predstavljajo
- ▮ Ali ste vedeli
- ▮ Dogodki



revija Ventil

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana
Tel.: 01/ 4771 704, Faks: 01/ 4771 772,
E-pošta: ventil@fs.uni-lj.si, Internet: www.revija-ventil.si

Spoštovani!

Ventil je znanstveno-strokovna revija in objavlja prispevke, ki obravnavajo razvojno in raziskovalno delo na Univerzi, inštitutih in v podjetjih s področja fluidne tehnike, avtomatizacije in mehatronike. Revija želi seznanjati strokovnjake z dosežki slovenskih podjetij, o njihovih izdelkih in dogodkih, ki so povezani z razvojem in s proizvodnjo na področjih, ki jih revija obravnava. Prav tako želi ustvariti povezavo med slovensko industrijo in razvojno in raziskovalno sfero ter med slovenskim in svetovnim proizvodnim, razvojnim in strokovnim prostorom. Naloga revije je tudi popularizacija področij fluidne tehnike, avtomatizacije in mehatronike še posebno med mladimi. Skrbi tudi za strokovno izrazoslovje na omenjenih področjih.

Revija Ventil objavlja prispevke avtorjev iz Slovenije in iz tujine, v slovenskem in angleškem jeziku. Prispevkom v slovenskem jeziku je dodan povzetek v angleščini, prispevki v angleščini pa so objavljeni z daljšim povzetkom v slovenskem jeziku. Člani znanstveno strokovnega sveta so znanstveniki in strokovnjaki iz Slovenije in tujine. Revijo pošiljamo na več naslovov v tujini in imamo izmenjavo z drugimi revijami v Evropi. Revija je vodena v podatkovni bazi INSPEC.

Štiriindvajsetletno izhajanje revije Ventil pomeni, da je v prostoru neprecenljiva za razvoj stroke. Uredništvo si skupaj z znanstveno strokovnim svetom prizadeva za visokokvalitetno raven in relevantnost objav, ki bosta v prihodnosti vse napore usmerila v to, da bo kvalitetna raven še višja. V ta namen vključuje v znanstveno strokovni svet priznane znanstvenike, raziskovalce in strokovnjake, ki s svojim znanjem vspodbujajo vsak na svojem področju objavljanje rezultatov razvojnega in raziskovalnega dela. Uredništvo spremlja razvoj stroke in znanstveno raziskovalno delo doma in vtujini preko konferenc, delavnic in seminarjev ter z izmenjavo tuje periodike.

Revija je priznana v tujini, še posebno na področju fluidne tehnike, kar želimo doseči tudi na področju mehatronike in avtomatizacije. Preko objav v reviji se promovirajo dosežki slovenske znanosti in industrijske proizvodnje. Revija je in bo tudi v prihodnje prostor za predstavljanje kvalitetnih razvojnih in raziskovalnih dosežkov slovenske industrije in raziskovalne sfere na področju fluidne tehnike, avtomatizacije in mehatronike.

Uredništvo



SPLAČA SE BITI NAROČNIK

IRT
3000

ZA SAMO 70€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 (10 številke)
- strokovne vsebine na več kot 140 straneh

IRT
3000
ADRIA

Revija v
hrvaškem
jeziku

ZA SAMO 28€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 ADRIA (4 številke)
- strokovne vsebine na več kot 200 straneh

IRT
3000
ADRIA

Revija v
srbskem
jeziku

ZA SAMO 28€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 АДРИА (4 številke)
- strokovne vsebine na več kot 200 straneh

• vsakih 14 dni e-novice IRT3000 na osebni elektronski naslov

DIGITALNA NAROČNINA



Na voljo je tudi digitalna različica revije, obogatena s povezavami in video vsebinami.

STROKOVNA LITERATURA

V naši spletni trgovini je na voljo širok nabor kakovostne strokovne literature.



Spletni nakup:



NAROČITE SE!



☎ 051 322 442
✉ info@irt3000.si
💻 www.irt3000.si/narocilo-revije





INDUSTRIJSKI
FORUM
IRT
2025
forum-irt.si

ISBN 978-961-95800-5-9



9 789619 580059 >