

ISSN 2831-1957
ISSN 2831-1981 (online)

• INFOKOM Science

ČASOPIS ZA SAVREMENA
PRIVREDNA KRETANJA

TEMA BROJA
OD INDUSTRIJE 4.0
DO INDUSTRIJE 5.0

Vol. 3 | 2025.



VANJSKOTRGOVINSKA KOMORA BOSNE I HERCEGOVINE
СПОЉНОТРГОВИНСКА КОМОРА БОСНЕ И ХЕРЦЕГОВИНЕ
FOREIGN TRADE CHAMBER OF BOSNIA AND HERZEGOVINA

INFOKOM SCIENCE

ČASOPIS ZA SAVREMENA PRIVREDNA KRETANJA
JOURNAL OF CONTEMPORARY ECONOMICS

Vol. 3, novembar/studeni 2025.

IZDAVAČ

Vanjskotrgovinska komora Bosne i Hercegovine
Спољнотрговинска комора Босне и Херцеговине
Branislava Đurđeva 10
71000 Sarajevo

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK

Prof. dr. Isak Karabegović, dopisni član
Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine
E-mail: isak1910@hotmail.com

GOST UREDNIK ČASOPISA

Prof. dr. Vidosav D. Majstorović
Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd, Srbija
E-mail: vidosav.majstorovic@gmail.com

REDAKCIJA

Elvir Ćizmić
Isak Karabegović
Zdenko Klepić
Dragica Ristić
Senad Softić
Sabrina Teskaredžić
Dragan Vojinović
Vjekoslav Vuković

SEKRETAR REDAKCIJE

Aida Kapičija

PREVODILAC

Danijela Kovač

GRAFIČKA OBRADA

Engin Mešanović

ISSN 2831-1981 (online)

ISSN 2831-1957 (print)

Sadržaj

Vidosav D. Majstorović, Isak Karabegović

OD INDUSTRIJE 4.0 KA INDUSTRIJI 5.0.....	7
<i>Abstract: FROM INDUSTRY 4.0 TO INDUSTRY 5.0.....</i>	<i>34</i>

Predrag Dramićanin, Goran Dramićanin, Vidosav Majstorović

PAMETNA METROLOGIJA U INDUSTRIJI	35
<i>Abstract: SMART METROLOGY IN INDUSTRY.....</i>	<i>51</i>

Isak Karabegović, Edina Karabegović, Mehmed Mahmić

INTEGRACIJA KOLABORATIVNIH ROBOTA (COBOT) U CNC OBRADU: PUT U AUTONOMNU OPTIMIZACIJU I POVEĆANU PRODUKTIVNOST.....	52
<i>Abstract: INTEGRATION OF COLLABORATIVE ROBOTS (COBOTS) IN CNCMACHINING: A PATH TOWARDS AUTONOMOUS OPTIMIZATION AND ENHANCED PRODUCTIVITY</i>	<i>72</i>

Vidosav D. Majstorović

PAMETNA PROIZVODNJA KAO INTEGRACIJA ČOVJEKA I TEHNOLOGIJE	74
<i>Abstract: SMART MANUFACTURING AS THE INTEGRATION OF MAN AND TECHNOLOGY...</i>	<i>93</i>

Isak Karabegović, Ermin Husak, Samir Vojić

EVOLUCIJA ROBOTSКИH PRIHVATNICA U KONTEKSTU INDUSTRIJE 4.0: TEHNOLOŠKI NAPREDAK I PRIMJENA U AUTOMATIZOVANOM SORTIRANJU I PALETIZACIJI.....	94
<i>Abstract: THE EVOLUTION OF ROBOTIC GRIPPERS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0: TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS AND APPLICATIONS IN AUTOMATED SORTING AND PALLETIZING</i>	<i>107</i>

Amina Radončić

EVOLUCIJA PRIHVATNICA U INDUSTRIJSKOJ ROBOTICI: OD RIGIDNIH MEHANIZAMA DO INTELIGENTNIH KOLABORATIVNIH RJEŠENJA	108
<i>Abstract: EVOLUTION OF GRIPPERS IN INDUSTRIAL ROBOTICS: FROM RIGID MECHANISMS TO INTELLIGENT COLLABORATIVE SOLUTIONS</i>	<i>122</i>

Emir Nezirić, Edin Džiho

TRANZICIJA OD INDUSTRIJE 4.0 KA INDUSTRIJI 5.0: PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE HIDROELEKTRANA	123
<i>Abstract: TRANSITION FROM INDUSTRY 4.0 TO INDUSTRY 5.0: PREDICTIVE MAINTENANCE OF HYDROPOWER PLANTS.....</i>	<i>129</i>

Vladimir Simeunović, Dragan Stošić, Sonja Dimitrijević, Vidosav Majstorović

KA PAMETNIM RUDNICIMA	130
<i>Abstract:TOWARDS SMART MINES.....</i>	<i>141</i>

Suad Sućeska

INTELIGENTNI TRANSPORTNI SISTEMI (ITS)	142
<i>Abstract: Intelligent Transport Systems (ITS).....</i>	<i>150</i>

OBIM I TEME

Vanjskotrgovinska/Spoljnotrgovinska komora Bosne i Hercegovine je pokrenula aktivnosti za izdavanje prvog interdisciplinarnog međunarodnog naučnog časopisa „Infokom Science”, zbornika naučnih i stručnih radova, prikaza i studentskih radova.

Glavni cilj časopisa je da stručnoj javnosti i akademskoj zajednici te širokoj publici i praktičarima predstavi originalna, visokokvalitetna, teorijska i primijenjena istraživanja u svim oblastima proizvodnog inženjeringa i upravljanja proizvodnjom. Kako bi se premostio jaz između teorije i prakse, posebno su dobrodošle aplikacije zasnovane na naprednoj teoriji i studijama slučaja.

Glavni faktori u procesu evaluacije teorijskih radova su njihova originalnost i istraživački doprinosi. Opći pristupi, formalizmi, algoritmi ili tehnike trebaju biti ilustrirani značajnim aplikacijama koje pokazuju njihovu primjenjivost na probleme u stvarnom svijetu.

Radovi podliježu anonimnoj recenziji i kategoriziraju se odlukom Redakcije i na prijedlog recenzenata u jednu od sljedećih kategorija:

- originalni naučni članak – sadrži neobjavljene rezultate izvornih naučnih istraživanja
- pregledni naučni članak – sadrži sažet i kritičan prikaz jedne oblasti, sa detaljnim pregledom literature, iz kojeg je vidljiv doprinos autora toj oblasti
- stručni članak – sadrži korisne stručne priloge

Prednost prilikom objavljivanja će imati originalni naučni članci, zatim pregledni naučni članci i nakon toga stručni članci.

Oblasti interesovanja uključuju, ali nisu ograničene na:

Industriju 4.0
Napredne proizvodne tehnologije
Umjetnu inteligenciju u proizvodnji
Montažne sisteme
Automatizaciju
Velike podatke u proizvodnji
Blok lanac u proizvodnji
Kompjuterski integrisanu proizvodnju
Procese aditivne proizvodnje
Procese rezanja i oblikovanja
Sisteme za podršku odlučivanju
Duboko učenje u proizvodnji
Diskretne sisteme i metodologiju
E-proizvodnju
Evolucijsko računanje u proizvodnji
Fuzzy sisteme
Inženjering ljudskog faktora, ergonomiju
Industrijski inženjering
Industrijske procese
Industrijsku robotiku
Inteligentne proizvodne sisteme
Upravljanje zalihama

Procese pridruživanja
Upravljanje znanjem
Logistiku u proizvodnji
Mašinsko učenje u proizvodnji
Nauku o materijalima, multidisciplinarnu
Ekonomiju u proizvodnji
Mehanički inženjering
Mehatroniku
Metrologiju u proizvodnji
Modeliranje i simulaciju
Numeričke tehnike
Operaciona istraživanja
Planiranje, zakazivanje i kontrolu operacija
Tehnike optimizacije
Upravljanje projektima
Upravljanje kvalitetom
Rizik i neizvjesnost
Samoorganizujuće sisteme
Pametnu proizvodnju
Upravljanje lancem nabavke
Virtuelnu stvarnost u proizvodnji

PREDGOVOR

Industrijska revolucija kroz historiju je oblikovala društva, ekonomije i tehnologije, postavljajući temelje za razvoj modernih industrijskih sistema. U posljednjih nekoliko decenija, pojava Industrije 4.0 označila je transformaciju proizvodnih i poslovnih procesa kroz digitalizaciju, robotizaciju, internet stvari (IoT), analitiku podataka i pametne fabrike. Ova revolucija nije samo tehnološka već je duboko utjecala na organizacione modele, kompetencije radne snage i globalne ekonomske tokove.

Specijalno izdanje časopisa „**Od Industrije 4.0 do Industrije 5.0**“ posvećeno je istraživanju ovog prelaznog perioda, fokusirajući se na perspektive koje vode ka Industriji 5.0. Dok Industrija 4.0 naglašava automatizaciju i povezanost sistema, Industrija 5.0 stavlja akcenat na saradnju čovjeka i mašine, personalizaciju proizvoda i održivi razvoj. Ova paradigma teži balansiranju efikasnosti i ljudskog potencijala, istovremeno odgovarajući na ekološke i društvene izazove savremenog svijeta.

Radovi objavljeni u ovom specijalnom izdanju pokrivaju različite dimenzije tehnološke transformacije – od implementacije naprednih proizvodnih tehnologija, robotike i vještačke inteligencije do strateških pristupa menadžmentu inovacija i prilagođavanju radne snage novim kompetencijama. Posebna pažnja posvećena je i ekonomskim, socijalnim i regulatornim aspektima koji omogućavaju ili ograničavaju primjenu novih tehnologija.

Kroz interdisciplinarni pristup, autori iz različitih regiona i industrija doprinose razumijevanju složenosti prelaska sa četvrte na petu industrijsku revoluciju. Njihova istraživanja pokazuju da je ključ uspjeha u ovoj tranziciji integracija tehnologije i ljudske kreativnosti, kao i kreiranje fleksibilnih i otpornijih sistema koji mogu odgovoriti na brze promjene tržišta i globalne izazove.

Ovo izdanje ima za cilj da pruži čitateljima uvid u aktuelne trendove, dobre prakse i naučne diskusije koje oblikuju budućnost industrije. Također, nudi inspiraciju istraživačima, praktičarima i donositeljima politika za daljnji razvoj strategija koje balansiraju inovacije, produktivnost i društvenu odgovornost.

Na kraju, posebno cijenimo doprinos svih autora i recenzenata čiji rad omogućava kvalitetnu razmjenu znanja i iskustava. Nadamo se da će ovo specijalno izdanje biti značajan resurs za razumijevanje dinamike industrijske transformacije i inspiracija za buduće inicijative usmjerene ka održivom i humaniziranom industrijskom razvoju.

Uredništvo

Časopis za savremena privredna kretanja / Journal of Modern Economic Movements

UVODNA RIJEČ GOSTUJUĆEG UREDNIKA

Industrijska evolucija od 18. vijeka do danas oblikovala je način na koji proizvodimo, radimo i živimo. Od mehanizacije i parnih mašina u Industriji 1.0, preko masovne proizvodnje i elektrifikacije (Industrija 2.0), automatizacije i IT revolucije (Industrija 3.0), sve do digitalne transformacije i umreženih sistema pametne proizvodnje u Industriji 4.0, čovječanstvo je napravilo ogroman tehnološki iskorak.

Danas ulazimo u novu eru – Industriju 5.0 – koja ne predstavlja samo nastavak digitalne integracije već radikalnu promjenu u načinu na koji razumijemo svrhu industrijskih sistema. Ova nova paradigma stavlja čovjeka ponovo u središte, promovirajući održivost, otpornost i etiku kao ključne principe i teži stvaranju industrijskih rješenja koja su u skladu sa društvenim i ekološkim vrijednostima.

Cilj ovog specijalnog broja časopisa jeste da osvijetli tranziciju između Industrije 4.0 i Industrije 5.0, analizirajući ne samo tehničke izazove i potencijale već i šire sistemske promjene koje uključuju:

- saradnju čovjeka i mašine (kobotika),
- vještačku inteligenciju orijentisanu ka korisniku,
- cirkularnu ekonomiju,
- digitalnu etiku i društvenu odgovornost.

Ovim izdanjem želimo da povežemo istraživače, inženjere, menadžere, inovacione lidere i donosiocje odluka, stvarajući prostor za interdisciplinarni dijalog, razmjenu znanja i zajedničko oblikovanje budućnosti proizvodnih sistema.

Vjerujemo da će prilozi u ovom broju doprinijeti boljem razumijevanju aktuelnih trendova, ponuditi relevantne primjere iz prakse i inspirisati dalji razvoj i saradnju na putu ka pametnijoj, humanijoj i održivijoj industriji.

U Beogradu, 30. 10. 2025. godine

Gostujući urednik specijalnog broja

Prof. dr. Vidosav D. Majstorović

Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

OD INDUSTRIJE 4.0 KA INDUSTRIJI 5.0

Prof. dr. Vidosav D. Majstorović¹, akademik, prof. dr. Isak Karabegović²

1 Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

E-mail: vidosav.majstorovic@gmail.com

2 Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Bistrik 7, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

E-mail: isak1910@hotmail.com

REZIME

Industrija 4.0, poznata kao četvrta industrijska revolucija, temelji se na digitalizaciji i automatizaciji proizvodnje kroz tehnologije poput interneta stvari (IoT), vještačke inteligencije (AI), robotike i analize velikih podataka (Big Data). Cilj je povećanje efikasnosti, fleksibilnosti i personalizacije proizvoda uz minimalnu ljudsku intervenciju. Međutim, Industrija 5.0 predstavlja evolutivni korak koji vraća fokus na ljudsku ulogu, održivost i društvenu odgovornost. Ključna razlika između ove dvije faze je u pristupu: dok se Industrija 4.0 usredsređuje na tehnološku efikasnost, Industrija 5.0 kombinuje napredne tehnologije sa humanocentričnim vrijednostima. Umjesto potpune automatizacije, ona promoviše kolaborativne robote (cobots) koji rade zajedno sa ljudima, ističući kreativnost i wellbeing radnika. Održivost postaje prioritet, sa naglaskom na zelenu energiju, cirkularnu ekonomiju i smanjenje otpada. Takođe, otpornost (resilience) sistema na krize, poput pandemija ili prekida u lancu snabdijevanja, dobija na značaju. Industrija 5.0 ne zamjenjuje prethodnu fazu, već je nadograđuje, vraćajući čovjeka u centar proizvodnog procesa. U kombinaciji sa AI-om i IoT-om, omogućava personalizovanije i održivije proizvode, uz poštovanje ekoloških i socijalnih vrijednosti. Ovaj pristup omogućava balans između tehnološkog napretka i ljudskih potreba, što ga čini ključnim za budućnost održivog i humanog razvoja industrije.

Ključne riječi: Industrija 4.0, Industrija 5.0, digitalizacija, automatizacija, evolucija

1. Uvod

Industrija 4.0 (četvrta industrijska revolucija) predstavlja digitalnu transformaciju proizvodnje kroz integraciju pametnih tehnologija: internet stvari (IoT) – povezivanje mašina i uređaja u realnom vremenu, vještačka inteligencija (AI) i robotika – automatizacija složenih procesa, big data analitika (BDA) – donošenje odluka na osnovu analize velike količine podataka, digitalni blizanci (DT) – virtuelne simulacije fizičkih sistema i cloud / edge computing – centralizovana obrada i skladištenje podataka. Razvija se od 2011. kao odgovor na potrebu za većom efikasnošću, bržom proizvodnjom i smanjenjem troškova. Glavni moto je - pametne fabrike su mjesto gdje mašine komuniciraju i optimizuju proizvodnju bez ljudske intervencije [1]. Ovaj model se danas najviše koristi u proizvodnji (automobilska industrija, elektronika), kao i logistici.

Industrija 5.0 je evolucija ka humanocentričnoj i održivoj proizvodnji, gdje se tehnologija koristi da: poveća kreativnu saradnju između ljudi i mašina (kolaborativni roboti – koboti), osmisli personalizovane proizvode (medicinski uređaji po mjeri, moda na zahtjev), promoviše ekološku održivost (cirkularna ekonomija, zelena energija). Javlja se nakon 2020. kao reakcija na nedostatke Industrije 4.0: previše fokusa na automatizaciju, a premalo na društvene vrijednosti, nezadovoljavajuća rješenja za klimatske izazove, strah od gubitka ljudskog identiteta u sistemima vođenim AI-om i podržana od Evropske komisije, kao dio strategije održivog razvoja. Ključna razlika konteksta ovih dvaju modela je data u Tabeli 1. [2]

Tabela 1. Poređenje konteksta modela Industrija 4.0 i Industrija 5.0

Kontekst	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Fokus	Tehnologija i automatizacija	Ljudi + tehnologija + održivost
Cilj	Efikasnost i profit	Socijalna ravnoteža i regeneracija
Primjer	Fabrika bez radnika	Fabrika gdje ljudi upravljaju robotima za personalizaciju

Industrija 5.0 ne negira tehnologije iz Industrije 4.0, već je nadograđuje humanim i ekološkim dimenzijama.

Zašto je potreban prelazak na novu fazu – Industriju 5.0?

Industrija 4.0 donijela je revolucionarne promjene kroz automatizaciju, digitalizaciju i umrežene pametne sisteme. Međutim, njeni nedostaci i novi društveno-ekonomski izazovi zahtijevaju prelazak ka humanizovanijem i održivijem modelu – Industriji 5.0, iz sljedećih razloga [3]:

- previše fokusa na tehnologiju, premalo na ljude, jer Industrija 4.0 zamjenjuje ljude robotima i AI-om, što dovodi do gubitka radnih mjesta u tradicionalnim sektorima i smanjenja kreativnosti i ljudskog doprinosa u proizvodnji. Industrija 5.0 tu ima sljedeći pristup: koboti (kolaborativni roboti) rade uz ljude, ne umjesto njih, i veći naglasak se stavlja na empatički dizajn i personalizaciju (proizvodi po mjeri),
- ekološka neodrživost, koja se održava kroz to da masovna automatizacija povećava potrošnju energije (data centri, IoT uređaji), stvara se elektronski otpad koga je teško reciklirati, a Industrija 5.0 se zasniva na cirkularnoj ekonomiji (CE), kroz ponovnu upotrebu sirovina i promoviše zelenu proizvodnju (obnovljiva energija, biodegradabilni materijali),
- društveni problemi i nejednakost, koji se ogledaju u rastu jaza između digitalno obrazovanih i ostalih, kao i monotoni poslovi koji uzrokuju nezadovoljstvo radnika. Industrija 5.0 zahtijeva reskilling radne snage za kreativne i upravljačke uloge te stavlja veći fokus na work-life balance i mentalno zdravlje,

- (d) ograničene mogućnosti masovne proizvodnje, koje proizilaze iz toga što je Industrija 4.0 efikasna, ali ne može da pruži individualizovane proizvode po pristupačnoj cijeni koji su brzo usklađeni sa promjenama želja potrošača. Industrija 5.0 realizuje koncept proizvodnje na zahtjev (3D štampana obuća ili automobili sa modulima koje bira kupac),
- (e) etika i kontrolisana upotreba AI-a, zato što AI donosi odluke koje nisu uvijek transparentne, čime nastaje rizik od zloupotrebe podataka i gubitka privatnosti. Zato Industrija 5.0 ima rješenje, human-in-the-loop AI, gdje čovjek ima konačnu riječ. Takođe, radi se na regulativi koja će štiti radnike i potrošače.

Možemo zaključiti da je Industrija 5.0 neophodna, jer ne odbacuje tehnologiju Industriju 4.0, već je usmjerava ka humanijem i održivijem društvu. Ako se stvari u vezi sa ova dva modela budu razvijale bez ovog prelaska, dalji razvoj bio bio neodrživ (ekološki i društveno), manje inovativan (samo automatizacija, bez kreativnosti) i povećavao bi nejednakosti (između onih koji kontrolišu tehnologiju i onih koje ona zamjenjuje).

Industrija 5.0 je odgovor na potrebu za ravnotežom između mašina, ljudi i prirode.

Osnovni cilj ovog rada je da se objasni evolucija i implikacija prelaska sa Industrije 4.0 na Industriju 5.0, sa sljedećih aspekata: kako se industrija razvijala – od mehanizacije (1.0) do digitalizacije (4.0) i humanizacije (5.0), zašto dolazi do promjene – kritička analiza ograničenja Industrije 4.0 i društvenih potreba koje nameće Industrija 5.0, kakve su posljedice – kako će nova faza uticati na: ekonomiju (novi poslovi, modeli poslovanja), društvo (kvalitet života, radna mjesta), okolinu (održivost). Ključne tačke za razumijevanje evolucije su: tehnološki iskorak, jer je Industrija 4.0 = pametne fabrike (AI, IoT, roboti bez ljudske intervencije), a Industrija 5.0 = pametna i humana fabrika (koboti, personalizacija, ekološka svijest). Drugi aspekt je promjena paradigme proizvodnje / poslovanja (Tabela 2.).

Tabela 2. Promjena paradigme proizvodnje

Aspekt	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Prioritet	Automatizacija i profit	Ljudi + održivost + inovacija
Uloga radnika	Smanjenje (zamjenjivanje)	Proširenje (kreativna saradnja)
Ekologija	Sporedna tema	Središnji faktor dizajna

Zato ovaj rad predstavlja i osnovu za istraživanja i ovih pitanja: ekonomska – kako će se promijeniti struktura poslova (manje rutinskih, više kreativnih uloga), kao i da li će personalizovana proizvodnja biti isplativa, zatim društvena – hoće li tehnologija povećati ili smanjiti nejednakost, kao i kako edukacija mora da se prilagodi (reskilling radnika), zatim tu dolaze i etičke i pravne norme, koje će trebati da regulišu odnose ljudi i AI-a u proizvodnji, kao i da spriječe zloupotrebu podataka. Najzad, tu je i pitanja ekologije, gdje se istražuje da li Industrija 5.0 može zaustaviti klimatske promjene kroz zelenu agendu (električna energija, projektovanje proizvoda, ugljenični otisak).

Stoga ova tema nije samo o tehnologiji – ona pokazuje kako društvo može oblikovati budućnost u kojoj će mašine služiti ljudima, a ne obrnuto. Osim toga, rast nije samo ekonomski već i socio-ekološki, a inovacije idu u korak sa humanim vrijednostima.

Industrija 5.0 nije samo „novi trend“ – to je neophodan korak ka održivoj i humanoj budućnosti.

2. Analiza literature

Želeći da čitaocima stavimo na uvid najznačajnije reference iz ove oblasti, izvršili smo široku pretragu referenci i koristeći PRISMA metodologiju [4] i prema definisanim kriterijumima došli do onih koje se detaljno analiziraju u tekstu koji slijedi.

Studija [5] definiše nove paradigme u industrijskom razvoju, naglašavajući potrebu za održivošću, humanocentričnošću i otpornošću (Tabela 3.):

Tabela 3. Pregled različitih modela relacija Industrije 4.0 i Industrije 5.0 (prilaz, modeli, primjena)

Prilaz	Ref./god.	Model	Cilj	Primjena
Politika EU za I 5.0	[5] ^{2021.}	Zelena proizvodnja	Evropski model	Privreda EU
WEF Bijela knjiga	[6] ^{2022.}	Poslovi budućnosti	Transformacija obrazovanja	Industrijski razvijene zemlje
Ključne tehnologije za I 5.0	[7] ^{2021.}	IoE	Integracija sa čovjekom u centru	IoT za ljude, procese i podatke
Socio-ekonomske prednosti I 5.0	[8] ^{2019.}	Kreativnost i inovativnost	AI + ljudska inteligencija	BCI (Brain-computer interfaces)
OECD studija	[9] ^{2023.}	Znanje za I 5.0	Digitalna pismenost	Digitalni majstori
Industrijska ekonomija	[10] ^{2021.}	Kulturološka transformacija	Održiva proizvodnja	Cjeloživotno učenje
Arhitektura I 5.0	[11] ^{2023.}	Pet nivoa	Integracija ljudi	DT za simulaciju scenarija
Pametna fabrika	[12] ^{2023.}	Kolaborativni roboti	HRI (Human robot Interaction)	AI koboti
Tesla model	[13] ^{2024.}	Personalizacija proizvodnje	AI optimizacija proizvodnih linija	DT
AI vođena fabrika	[14] ^{2021.}	IIoT	Interdisciplinarni pristup	NLP upravljanje zalihama
Sljedeći model proizvodnje	[15] ^{2024.}	Globalni trendovi	Poslovna revolucija	CEO preporuke
Održiva proizvodnja	[16] ^{2023.}	4F	Net zero ciljevi	ESG fokus
Budućnost proizvodnje	[17] ^{2023.}	I 5.0 sinergija ljudi i mašina	Fabrika za ljude	Siemens
Čovjek – mašina interakcija	[18] ^{2024.}	Kognitivna ergonomija	Zelena proizvodnja	AI (XAI)
Kreativnost i emocionalna inteligencija	[19] ^{2025.}	Sinergija	Empatija	Fabrika usmjerena na čovjeka

Dokument ističe da Industrija 4.0, iako je donijela digitalizaciju i automatizaciju, nije dovoljno riješila društvene i ekološke izazove. Industrija 5.0 nadograđuje ovaj koncept sa tri glavna stuba: održivost (smanjenje uticaja na okolinu), humanocentričnost (jačanje uloge radnika i društva) i otpornost (prilagođavanje krizama poput pandemija i poremećaja u lancima snabdijevanja). Održivost (sustainability) stavlja naglasak na zelenu tranziciju kroz cirkularnu ekonomiju (CE), smanjenje škarta i upotrebu obnovljivih izvora energije. Tu je i kritika trenutnog industrijskog modela koji je previše fokusiran na profit, a ne na dugoročne ekološke posljedice. Primjer za ovaj aspekt su pametna reciklaža, energetska efikasnost i ekološko projektovanje proizvoda. Humanocentričnost (human-centric approach) znači prilaz koji se suprotstavlja potpunoj automatizaciji pa se umjesto toga

promoviše saradnja između ljudi i robota (koboti). Ističe se važnost inovacija koje služe ljudskim potrebama, a ne samo produktivnosti. Takođe se insistira na pitanjima radničkih prava i edukaciji u inkluzivnosti u digitalnoj eri. Otpornost (resilience) insistira na tome da industrija mora biti spremna na globalne šokove (COVID-19, ratovi, klimatske promjene). Zato se predlažu diverzifikacija lanaca snabdijevanja, lokalna proizvodnja i fleksibilna proizvodnja. Posebno se naglašava važnost strategijske autonomije EU u kritičnim tehnologijama (poluprovodnici, baterije, AI) i sirovinama. Ovaj dokument ima sljedeće aspekte uticaja: EU fondovi trebaju podržati istraživanja u zelenim tehnologijama i socijalnim inovacijama, regulativni okvir mora podsticati održive prakse, ali i štititi radnike od negativnih uticaja automatizacije, a obrazovni sistema treba da se prilagoditi novim vještinama (digitalne kompetencije, rad s AI-om). Prednosti ovog dokumenta su realističan odgovor na nedostatke Industrije 4.0, uravnotežen pristup koji uključuje ekološke, ekonomske i socijalne aspekte te podudaranje sa EU ciljevima (European Green Deal, Digitalna agenda). Međutim, postoje i izazovi: primjena, koja zahtijeva velike investicije i promjenu korporativne kulture, zatim tu je i konkurencija sa globalnim tržištem, jer ako EU postavi previsoke standarde, preduzeća mogu gubiti konkurentnost. Najzad, tu je i rizik zloupotrebe, jer „human-centric“ pristup može postati samo marketinški termin bez stvarnih promjena. Možemo da zaključimo da Industrija 5.0 nije samo tehnološki pomak već društveni i ekološki imperativ. Dok je Industrija 4.0 fokusirana na povećanje produktivnosti, Industrija 5.0 želi redefinisati svrhu industrije, jer služi ljudima i planeti. EU ovim dokumentom pokazuje vođstvo u oblikovanju budućnosti industrije, ali ostaje pitanje hoće li države članice i privatni sektor imati dovoljno resursa i volje za njegovu primjenu.

U dokumentu [6] se daje globalna analiza tehnoloških, ekonomskih i društvenih trendova koji oblikuju tržište rada. Istražuju se promjene u potražnji za vještinama, uticaj automatizacije i prijelaz prema novim industrijskim modelima. Glavni trendovi koji oblikuju budućnost rada su: tehnološki napredak (AI, robotika, cloud computing, zelene tehnologije), ekološka tranzicija (povećanje tražnje za „zelenim poslovima“), geopolitičke i ekonomske promjene (globalne krize, relokacija proizvodnje) i društveni zahtjevi (fleksibilni rad, ravnopravnost, inkluzivnost). Najbrže rastuće potrebe za novim poslovima su: AI i ML stručnjaci, analitičari podataka, stručnjaci za održivost i stručnjaci za digitalnu transformaciju. Najbrže opadajući zahtjevi za postojećim poslovima su: administrativni poslovi (zbog automatizacije), rutinske manuelne pozicije i klasični bankarski službenici. Zbog svega navedenog, uočavaju se i sljedeći trendovi: do 2025. godine, 85 miliona poslova može biti ukinuto zbog automatizacije, ali će se istovremeno stvoriti 97 miliona novih radnih mjesta. Najviše će biti pogođeni niskokvalifikovani poslovi, dok će visokokvalifikovani radnici imati više prilika pa će se, na primjer, 44% radnih vještina morati promijeniti u sljedećih 5 godina. Lista od deset najvažnijih vještina za budućnost izgleda ovako: analitičko razmišljanje, aktivno učenje, rješavanje kompleksnih problema, kritičko razmišljanje, kreativnost, liderstvo i socijalni uticaj, korišćenje tehnologija, programiranje, otpornost na stres i emocionalna inteligencija. Međutim, postoje i prepreke za transformaciju radne snage: nedostatak kvalifikovanih radnika (skills gap), spora adaptacija obrazovnih sistema, nedovoljna ulaganja u reskilling, socio-ekonomske nejednakosti (digitalna podjela). Koristeći podatke od velikih kompanija i regiona, ova studija široko pokriva globalne trendove i daje jasne smjernice za edukaciju i politiku, naglašavajući potrebu za cjeloživotnim učenjem. Također, daje i realistične projekcije jer ne iznosi samo strah od gubitka poslova već i stvaranje novih prilika. Sa druge strane, nedostaci su: optimistička prognoza o novim poslovima, koja ne jamči da će svi radnici moći prijeći na nove pozicije, kao i neravnomjerna distribucija beneficija, jer će razvijene zemlje imati više prilika od zemalja u razvoju. I najzad, previše pažnje se usmjerava na korporativnu perspektivu, a manje pažnje je posvećeno radničkim pravima i sigurnosti. Obrazovni sistema se moraju brže prilagođavati (naglasak na STEM, ali i meke vještine), a vlade i kompanije moraju sarađivati u reskillingu (EU programi, recimo „Digital Europe“). Takođe, radnici moraju prihvatiti cjeloživotno učenje kako ne bi ostali marginalizovani.

Ovaj rad [7] predstavlja sistemski pregled ključnih i primijenjenih tehnologija u Industriji 5.0, sa posebnim naglaskom na prijelaz sa čisto tehnološki vođene industrije (Industrija 4.0) na Industriju

5.0 (humanocentrični, održivi i otporni model). Polazeći od ovih fakata, ključne, pokretačke tehnologije Industrije 5.0 su:

- (a) kognitivna računarska inteligencija (AI & ML), gdje se radi o naprednoj AI za prediktivnu analitiku i prilagodljive proizvodne sisteme. Primjer su DT i autonomni roboti sa mogućnošću učenja,
- (b) kolaborativni roboti (koboti), gdje imamo robote koji rade uz ljude, a ne umjesto njih. To su proizvodni koboti (universal robots) ili medicinski asistenti,
- (c) Internet of Everything (IoE), gdje imamo proširenje IoT-a na ljude, procese i podatke. To su pametni gradovi ili personalizovana proizvodnja,
- (d) biotehnologija i sinteza materijala, gdje imamo održive materijale (biodegradabilni polimeri), koji se koriste za 3D štampu tkiva u medicini,
- (e) energetska efikasnost, gdje spadaju obnovljivi izvori energije i pametne mreže. Ovdje su primjeri „zelene“ fabrike sa nultim emisijama CO₂,
- (f) blockchain i digitalna sigurnost podataka u distribuisanim sistemima, a primjer za ovo je praćenje proizvoda u lancima nabavke.

Primjeri primjene ovog modela su: personalizovana proizvodnja (mass customization), proizvodnja po narudžbi (adidas speedfactory), gdje imamo 3D štampu + AI projektovanje; pametna zdravstvena zaštita, gdje se koristi robotika u hirurgiji (da Vinci sistem), zatim personalizovana medicina (genomska analiza + AI dijagnostika); održiva proizvodnja, gdje imamo CE (recikliranje baterija, pametno upravljanje otpadom). Primjer za ovo je Teslin „closed-loop“ reciklažni sistem, agro-tech 5.0 ili precizna poljoprivreda (dronovi, AI za optimizaciju prinosa/roda). Primjer su vertikalne farme sa robotima (Infarm, Plenty) ili ljudsko-digitalna simbioza poput egzoskeleta u proizvodnji (Hyundai's H-WEX) i brain-computer interfacesa (BCI) za upravljanje mašinama. Industrija 5.0 nije samo evolutivni korak već revolucionarna promjena paradigme, jer kako inače integrisati ljudski faktor uz naprednu robotiku i postići održivost bez gubitka konkurentnosti.

U radu [8] se ističe da je automatizacija i hiperproduktivnost Industrije 4.0 dovela do dehumanizacije rada, pa se predlaže novi pristup koji kombinuje tehnološku napredak sa ljudskom kreativnošću i intuicijom. Nedostaci Industrije 4.0, prema ovom autoru, su: previše fokusa na efikasnost, zbog čega je Industrija 4.0 marginalizovala ljudsku ulogu, pretvarajući radnike u „nadzornike mašina“, zatim gubitak kreativnosti, jer potpuna automatizacija ubija inovativnost koja dolazi iz ljudske interakcije, i socijalna izolacija, jer radnici postaju zamjenjivi, što smanjuje njihovu motivaciju i angažman. Zato Industrija 5.0 nije samo tehnološki pomak već filozofija koja vraća ljude u središte proizvodnje, koristeći sljedeće principe: (a) human-centric design – tehnologija mora služiti ljudima, a ne obrnuto, (b) kolaboracija čovjek-mašina – koboti (kolaborativni roboti) rade sa ljudima, umjesto da ih zamjenjuju, (c) personalizacija umjesto masovne proizvodnje – proizvodi prilagođeni individualnim potrebama i (d) održivost kroz ljudsku kreativnost – rješenja za ekološke izazove dolaze iz kombinacije AI-a i ljudske inteligencije. Pregled podržavajućih tehnologija za Industriju 5.0 je prikazan u Tabeli 4.

Tabela 4. Podržavajuće tehnologije za Industriju 5.0

Tehnologija	Primjena u Industriji 5.0
Kolaborativna robotika (cobots)	Roboti koji rade uz ljude (universal robots)
AI + ljudska inteligencija	AI pruža podatke, ljudi donose kreativne odluke
Proširena stvarnost (AR)	Povećanje produktivnosti bez gubitka ljudskog dodira
DT + Human-in-the-Loop	Simulacije koje uključuju ljudske inpute
Biomehatronika	Egzoskeleti i BCI (Brain-computer interfaces)

Socio-ekonomske prednosti Industrije 5.0 se odnose na: povećanu kreativnost i inovativnost, jer ljudi donose jedinstvene ideje koje mašine (odnosno AI) još ne mogu, smanjenje nezaposlenosti, jer umjesto zamjene radnika dolazi do reskillinga, i veće radne satisfakcije, jer radnici imaju svoju jasnu ulogu i mjesto. Problemi u vezi sa primjenom ovog modela mogu biti visoki troškovi primjene ili problemi koje mala i srednja preduzeća mogu imati sa finansiranjem. Sljedeća su etička pitanja poput onog ko je odgovoran kada AI + čovjek donese lošu odluku? Tu je i potreba za kontinuiranim učenjem, jer radnici moraju stalno usvajati nove vještine. Na kraju se može postaviti i pitanje kako primijeniti Industriju 5.0 u zemljama u razvoju?

Ovaj OECD-ov izvještaj [9] istražuje socio-ekonomske implikacije Industrije 5.0, posebno uticaj na tržište rada, promjene vještina i nejednakosti. Dok se Industrija 4.0 fokusirala na produktivnost kroz automatizaciju, Industrija 5.0 uvodi humanocentrični pristup, ali uz nove izazove za radnike, poslodavce i kreatore politika. Ovaj model dovodi do promjena u strukturi zapošljavanja, koja se ogleda u rastu potražnje za hibridnim pozicijama koje kombinuju tehničke i meke vještine („digitalni majstori“ u fabrikama). Zato imamo smanjenje rutinskih poslova, ali rast poslova koji zahtijevaju kreativno rješavanje problema, upravljanje kolaborativnim robotima i ekološki orijentisanu proizvodnju. Takođe, imamo i polarizaciju radne snage, gdje se sve više traže visokokvalifikovani radnici (AI stručnjaci, inženjeri održivosti), dok će oni niskokvalifikovani bez reskillinga biti ugroženi. Tako OECD predviđa povećanje potražnje za poslovima u vezi sa cirkularnom ekonomijom (reciklaža, obnovljivi materijali), personalizovanom proizvodnjom (3D štampa, digitalno projektovanje) i zdravstvenom tehnologijom (humanoidni roboti). Deset najvažnijih vještina do 2030. godine, prema OECD-u su: kritičko mišljenje, kreativnost, emocionalna inteligencija, rad sa kolaborativnim robotima, upravljanje održivošću, rad u multidisciplinarnim timovima, digitalna pismenost, prilagodljivost, rješavanje etičkih dilema (upotreba AI-a) i kontinuirano učenje. OECD daje šest ključnih smjernica za prijelaz na Industriju 5.0: (i) investicije u cjeloživotno učenje (Finska inicijativa „right to Learn“), (ii) jaka saradnja između industrije i akademije (njemački „duale ausbildung“ – dualni sistem obrazovanja), (iii) podrška ugroženim grupama (niskokvalifikovani radnici, starija populacija – Kanada, ciljane obuke za digitalne vještine), (iv) promovisanje ravnopravnosti polova u STEM-u (švedski „girls in tech“ programi), (v) regulative za etičku upotrebu AI-a i robotike (EU – AI Act) i (vi) podrška otvaranju zelenih radnih mjesta (Holandija – subvencije za održivu proizvodnju). Industrija 5.0 donosi prilike, ali i rizike, pa bez pravilnih politika može povećati nejednakosti.

Knjiga [10] predstavlja sveobuhvatnu viziju Industrije 5.0, kombinujući tehničke, ekonomske i društvene aspekte ovog transformativnog modela. Industrija 5.0, kao industrijski model koji harmonizuje ljudsku kreativnost sa naprednom tehnologijom kako bi stvorio održivu i socijalno odgovornu ekonomiju, ima tri temeljna stuba: (i) human-centricity, jer tehnologija mora povećati ljudski potencijal, a ne zamijeniti radnike, (ii) sustainability, CE i sistemi sa „nula“ otpada i (iii) resilience, sposobnost prilagođavanja globalnim krizama (pandemije, klimatske, političke promjene). Kritika Industrije 4.0 je da je previše usmjerena na automatizaciju → gubitak ljudskog dodira u proizvodnji i da ima nedostatak fleksibilnosti, jer se fabrike sa ovim modelom teško prilagođavaju iznenadnim promjenama. Tu je i ekološka neodrživost zbog visoke potrošnje energije i linearnog proizvodnog modela. Tehnološki temelji Industrije 5.0 su dati u Tabeli 5.

Tabela 5. Ključne tehnologije koje pokreću Industriju 5.0

Tehnologija	Primjena	Primjer iz prakse
Kolaborativna robotika (cobots)	Robot koji sarađuje sa ljudima, a ne zamjenjuje ih	Universal robots u automobilskoj industriji
AI + ljudska inteligencija	AI pruža podatke, ljudi donose kreativne odluke	Siemens „Human-Augmented AI“
DT	Virtuelni modeli proizvodnje koji uključuju ljudske faktore	GE Digital Twin za održivu energetiku
Biotehnologija	Održivi materijali i personalizovana medicina	3D štampa organa u zdravstvu
Blockchain & Cybersecurity	Sigurnost podataka i transparentnost u lancima nabavke	IBM Food Trust za praćenje hrane

Industrija 5.0 nije samo tehnološka već i kulturološka revolucija. Da bi se pospješilo uvođenje Industrije 5.0, potrebno je intenzivnije raditi na: jačoj saradnji između industrije i obrazovnih institucija, subvencioniranju za održivu proizvodnju (poreske olakšice) i globalnim standardima za etičku upotrebu AI-a i robotike. Predlaže se da se u narednom periodu pažnja usmjeri na istraživanja integracije Industrije 5.0 i malih i srednjih preduzeća, kao i definisanje najboljeg modela cjeloživotnog učenja za radnike.

Industrija 4.0 fokusirala se na automatizaciju, IoT i pametnu proizvodnju, ali je zanemarila ljudski faktor. Industrija 5.0 vraća čovjeka u centar proizvodnje, naglašavajući: saradnju između ljudi i robota, održivost i otpornost (smanjenje otpada, energetska efikasnost) i poboljšanje radnih uslova (ergonomija, smanjenje stresa). Ovaj rad definiše arhitekturu koja omogućava efikasnu integraciju ljudi u digitalizovane fabrike, koja ima pet nivoa [11]: (i) fizički sloj – radnici, roboti, senzori, (ii) sloj podataka – prikupljanje i analiza podataka u realnom vremenu, (iii) DT – simulacija i optimizacija procesa, (iv) AI i analitika – prediktivno održavanje, prilagodljivi sistema i (v) interface čovjek-mašina (HMI) – AR/VR za intuitivnu interakciju. DT igra ključnu ulogu u simulaciji scenarija prije primjene u ovom modelu. Jedno poređenje Industrije 4.0 i Industrije 5.0 je dato u Tabeli 6.

Tabela 6. Poređenje Industrije 4.0 i Industrije 5.0

Aspekt	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Fokus	Automatizacija	Ljudsko-mašinska saradnja
Uloga radnika	Pasivna (nadzor)	Aktivna (odlučivanje, kreativnost)
Tehnologije	IoT, robotika, AI	AI + AR/VR + ergonomija
Cilj	Maksimalna efikasnost	Uravnotežen rad i produktivnost

Studija [12] se fokusira na integraciju kolaborativnih robota u pametne fabrike, kao ključni element Industrije 5.0. Ona kombinuje tehničke smjernice, studije slučaja i korporativnu strategiju za primjenu sistema u kojem ljudi i roboti rade u simbiozi. Prema Siemensu, pametna fabrika u eri Industrije 5.0 se karakteriše: besprijekornom komunikacijom čovjek-mašina (Human-Robot Interaction – HRI), adaptivnim proizvodnim linijama koje reaguju u realnom vremenu na promjene i cirkularnošću, gdje roboti optimizuju upotrebu resursa i reciklažu materijala. Jedan pregled razlika između tradicionalnih robota i kobota je dat u Tabeli 7.

Tabela 7. Razlika između robota u Industriji 4.0 i Industriji 5.0

Kriterijum	Industrijski roboti (Industrija 4.0)	Kolaborativni roboti (Industrija 5.0)
Sigurnost	Zahtijevaju ograde	Rade uz ljude bez zaštitnih ograda
Fleksibilnost	Namijenjeni masovnoj proizvodnji	Brzo reprogramiranje za male serije
Interakcija	Minimalna ljudska intervencija	Intuitivna saradnja (voice control)

Tehnološki temelji kobotske revolucije se baziraju na pet ključnih tehnologija koje omogućuju uspješnu primjenu: (i) AI-vođena percepcija, gdje koboti koriste senzore i mašinsko učenje da prepoznaju ljudske namjere (radnik pruža ruku – robot stane). Primjer za ovo je Siemensov „safe robotics“ koji radi u BMW-ovim fabrikama, (ii) DT za HRI optimizaciju, gdje se vrši simulacija ljudsko-robotskih scenarija prije stvarne primjene, (iii) edge computing, gdje koboti obrađuju podatke lokalno (bez kašnjenja), što je kritično za sigurnost, (iv) 5G i industrijski IoT (IIoT), koji omogućuje real-time komunikaciju između radnika, kobota i cloud sistema te (v) Natural User Interfaces (NUI), gdje se vrši upravljanje robotima kroz pokrete, glas ili AR naočare. Najbolji primjeri dolaze iz automobilske i elektronske i farmaceutske industrije. U automobilskoj industriji (Siemens + BMW) je nekada montaža enterijera zahtijevala naporan fizički rad. Sada koboti nose teške dijelove, dok radnici vrše preciznu montažu. Time je postignuto povećanje brzine proizvodnje za 30%, bez ozljeda. U elektronici (Siemens + Foxconn) je ručno lemljenje mikročipova uzrokovalo greške. Sada su uvedeni koboti sa AI-vizijom koji vrše lemljenje, a ljudi nadziru kvalitet. Ostvarena je tačnost od 99,98%. U farmaciji (Moderna x Siemens) koboti pomažu u personalizovanoj proizvodnji vakcina, omogućujući brže skaliranje. Ova studija je najsveobuhvatniji tehnički vodič za kobote u Industriji 5.0, ali otvara ključna pitanja: Hoće li koboti zaista poboljšati kvalitet rada ili samo povećati kontrolu nad radnicima? I, najzad, može li se ovaj model uspješno primijeniti u malim i srednjim preduzećima?

Ova studija [13] detaljno opisuje kako Tesla kompanija koristi AI i robotiku za revolucionarnu personalizaciju proizvodnje na bazi modela Industrija 5.0. Ovaj dokument kombinuje tehničke specifikacije, ekonomske analize i viziju budućnosti, gdje se svaki proizvod (od automobila do solarnih panela) može masovno prilagoditi korisniku, bez žrtvovanja efikasnosti proizvodnje. Ova kompanija definiše svoj model kao „beskompromisno spajanje personalizacije i industrijskih skaliranja“, gdje: (i) AI optimizuje proizvodne linije u realnom vremenu za svaku narudžbu, jer se linije rekonfigurišu u minutama (ne danima) zahvaljujući autonomnim robotima sa AI-om, (ii) roboti + radnici zajedno grade jedinstvene proizvode (automobile sa enterijerom po zahtjevu kupca); ovdje kupci koriste Tesla Design Studio AI za personalizaciju, a kupčev zahtjev se automatski provjerava na izvodljivost i (iii) u potpunosti se primjenjuje CE u projektovanju jer se gotovo svi materijali recikliraju. Svaki proizvod ima DT koji prati njegov životni ciklus i omogućuje reciklažu. Jedna analiza tehnologija koje podržavaju model Industrije 5.0 u ovoj kompaniji je prikazana u Tabeli 8.

Tabela 8. Model Industrije 5.0 u kompaniji Tesla

Tehnologija	Primjena u Tesli	Prednost
Autonomni robotski sistemi	Kuka roboti s AI percepcijom	Brza rekonfiguracija linija
Generativni AI	Projektovanje i optimizacija komponenti	Smanjenje otpada za 40%
Edge AI + 5G	Real-time analiza podataka u fabrici	Kašnjenje u odlučivanju od 0,1 sekunde
DT	Simulacija cijele proizvodnje prije realizacije	Smanjenje grešaka za 90%
Biomehatronika (egzoskeleti)	Povećanje produktivnosti radnika	Smanjenje umora za 50%

Ova studija definiše budućnost Industrije 5.0, gdje personalizacija, održivost i AI-driven automatizacija koegzistiraju. Međutim, nameće se pitanje hoće li ovaj model proizvesti društvene nejednakosti između „AI-imperija“ (Tesla, Siemens) i manjih igrača?

Rad [14] se fokusira na transformaciju tradicionalnih fabrika u pametne, prilagodljive proizvodne sisteme korištenjem AI-a. Glavni motiv je zahtjev za masovnom personalizacijom – sposobnošću da se proizvode jedinstveni proizvodi po niskim cijenama, uz efikasnost serijske proizvodnje. Autori predlažu „AI-Driven Customized Manufacturing Factory“ (AICMF) model koji integriše: (a) AI i ML (optimizacija procesa, prediktivno održavanje), (b) industrijski internet stvari (IIoT) (senzori, robotski sistemi, povezana oprema), (c) DT (simulacija i upravljanje u realnom vremenu), (d) Edge i cloud computing (obrada podataka u realnom vremenu) i (e) aditivnu proizvodnju (3D štampa) za fleksibilnu proizvodnju. Ključne tehnologije koje podržavaju ovaj model su:

- (a) AI u prilagodljivoj proizvodnji koja se koristi za generativno projektovanje, gdje AI algoritmi (GANs) projektuju optimizovane proizvode bazirane na zahtjevima korisnika, zatim reinforcement learning (RL) model, koji se koristi za dinamičko upravljanje robotskim linijama (adaptacija na promjene u narudžbama) i NLP za upravljanje zalihama (Chatbotovi i AI alati analiziraju narudžbe iz prirodnog jezika),
- (b) IIoT i praćenje u realnom vremenu, gdje se pomoću RFID-a i senzora prati status proizvoda kroz cio lanac snabdijevanja, i korišćenje 5G i Low-Latency Networksa, koja omogućava brzu komunikaciju između uređaja,
- (c) DT, gdje se vrši fizičko-digitalna sinhronizacija, čime se omogućavaju „what-if“ scenariji prije primjene. U automobilske industriji se vrši simulacija proizvodnje električnih vozila sa promjenljivim komponentama,
- (d) Edge AI za brze odluke, gdje se pomoću TinyML-a koriste AI modeli na embedded uređajima (kvalitet proizvoda se provjerava na liniji proizvodnje). Takođe, pomoću ovog sistema se vrši prekid proizvodnje ako se detektuje greška, uz korekciju procesa.

Neke od osnovnih karakteristika ovog istraživanja su: interdisciplinarni pristup (spaja AI, inženjerstvo, operacioni menadžment), jasna klasifikacija tehnologija (korisno za istraživače) i realistični izazovi (bezbjednost podataka, skalabilnost). Možemo da zaključimo da ova studija daje sveobuhvatan vodič za implementaciju AI-a u fabrikama, ali zahtijeva dalja istraživanja u scalability, kao i u čovjek-AI saradnji. Kompanije poput Tesle ili Foxconae već primjenjuju neke od ovih koncepata, ali još uvijek postoje nesavladane barijere.

Studija [15] istražuje kako globalni megatrendovi (digitalizacija, dekarbonizacija, geopolitički rizici) oblikuju budućnost proizvodnje, sa posebnim osvrtom na ekonomske posljedice i strategije prilagođavanja. Pet glavnih trendova koji redefinišu proizvodnju su: (a) globalizacija lanaca snabdijevanja, jer kompanije premještaju proizvodnju bliže potrošačima (nearshoring) radi smanjenja rizika pa, na primjer, 45% evropskih kompanija planira relokaciju u istočnu Evropu do 2030. godine, (b) AI i autonomna proizvodnja, gdje generativna AI smanjuje vrijeme projektovanja proizvoda za 30-50% (automobilska industrija), (c) net-zero proizvodnja, gdje je moguće za 40% postići manje emisije pomoću energije vjetra i sunca, zelenog vodnika i modela CE-a, (d) radna snaga 4.0, gdje će do 2035. godine 60% radnika morati da prođe obuku za rad sa AI-om i robotima i (e) servisizacija proizvoda, jer se prihodi sve više oslanjaju na usluge (prediktivno održavanje umjesto prodaje mašina). Kada se izvrši analiza elemenata Industrije 5.0 po geografskim regijama, dolazi se do sljedećih činjenica: EU je vodeća u svijetu u zelenoj tranziciji, ali spora regulativa koči inovacije, SAD ima snažne investicije u AI i čipove, ali manjak radne snage za visoke tehnologije, dok Azija ima jeftinu proizvodnju + digitalnu, ali veliku zavisnost o globalnim lancima snabdijevanja. Zato ova studija predlaže sljedeću strategiju za kompanije: (a) prvo digitalizovati proizvodnju kroz razvoj i primjenu DT-a, kao i AI za optimizaciju kapaciteta. Tako, na primjer, kompanije koje koriste AI, imaju 15-25% veću profitnu maržu, (b) agilne mreže snabdijevanja, kroz diversifikaciju dobavljača i just-in-case umjesto just-in-time i (c) obuka radne snage, kroz partnerstva sa vladama, školama i univerzitetom (njemački duale ausbildung). Ova studija je prikupila i analizirala podatke iz 1.000+

kompanija širom svijeta, a točnije je dala jasne preporuke za CEO-e (kako balansirati ulaganja u održivost i digitalizaciju). Na kraju možemo da zaključimo da Industrija 5.0 nije samo tehnološka promjena već poslovna revolucija koja zahtijeva redizajn: obrazovnih sistema (uskladiti kurikulare sa industrijskim potrebama) i regulatornih okvira (olakšati zelenu tranziciju bez gubitka konkurentnosti). Investirajte u AI i održivost, ali paralelno razvijajte ljudski kapital – inovacije bez kvalifikovane radne snage su bezvrijedne.

Studija [16] predstavlja operativni okvir za prelazak na održivu proizvodnju, kombinujući ekonomsku isplativost sa ekološkim odgovornošću. Fokusira se na praktične korake koje kompanije mogu poduzeti kako bi postigle net-zero ciljeve bez gubitka konkurentnosti. Ova studija daje sljedeće nalaze:

- (a) tri stuba održive proizvodnje – dekarbonizacija operacija, elektrifikacija (zelena energija u fabrikama) i korištenje alternativnih goriva (vodik, biomasa). Na primjer, švedska čeličana Hybrit je prva čeličana u svijetu na zeleni vodonik,
- (b) model CE se realizuje kroz projektovanje za reciklažu (modularni proizvodi). Na primjer, Philipsova usluga Light-as-a-Service (plaćanje prema korišćenju, a ne ukupno unaprijed),
- (c) digitalne tehnologije za održivost su date kao: AI za optimizaciju potrošnje energije i blockchain za praćenje ugljičnog otiska. Analize pokazuju da kompanije sa ESG fokusom imaju 10-20% veću profitnu maržu od konkurencije. One takođe ostvaruju štednju kroz održivost, tako da imaju 15-30% manje troškove energije kroz pametnu automatizaciju, kao i za 40% smanjenje otpada kroz primjenu CE modela. Okvir za primjenu ovog modela (4F) je dat u Tabeli 9.

Tabela 9. Model 4F – struktura

Faza	Akcije	Primjer iz prakse
Find	Analiza ugljičnog otiska	Nestlé: Mapiranje emisija u svakoj fazi proizvodnje
Focus	Izbor ključnih oblasti za smanjenje	Unilever: Fokus na plastiku i energiju
Fix	Implementacija rješenja	Tesla Gigafactory: Solar + baterijski sistemi
Foresee	Kontinuirano poboljšanje	Siemens: AI za prediktivno održavanje

Konačno, održivost ne treba shvatiti kao trošak već dobru investiciju, jer će kompanije koje rano počnu imati konkurentsku prednost. Počnite, recimo, sa „low-hanging fruit“ (energetska efikasnost) te tražite partnere (vlade, dobavljače) za dijeljenje troškova.

Studija [17] istražuje zašto Industrija 5.0 predstavlja kvalitativni skok u odnosu na Industriju 4.0, naglašavajući ljudsku kreativnost, održivost i otpornost kao ključne faktore budućnosti proizvodnje. Analiza se temelji na intervjuima sa vodećim industrijskim liderima i studijama slučaja inovativnih kompanija. Ključni nalazi studije su da je fokus Industrije 4.0 na automatizaciji i produktivnosti (fabrike bez ljudi), a Industrije 5.0 na sinergiji ljudi i mašina (fabrika za ljude). Ključni problem Industrije 4.0 je gubitak fleksibilnosti i previše fokusa na tehnologiju umjesto na ljudske potrebe. Revolucionarne promjene u Industriji 5.0 su:

- (a) human-centric factories, jer koboti rade uz ljude, ne umjesto njih. Na primjer, BMW koristi egzoskelete za radnike kako bi smanjio njihovo fizičko opterećenje,
- (b) mass customization pomoću AI-a i 3D štampe, koja omogućuje personalizaciju na industrijskoj skali. Tako, na primjer, Adidasov „Speedfactory“ proizvodi patike po mjeri u 24 sata,
- (c) resilient & sustainable production na bazi lokalnih proizvodnih ćelija umjesto globalnih lanaca snabdijevanja. Primjer za ovo je Siemensova modularna proizvodnja u Njemačkoj i SAD-u,
- (d) ekonomski pokazatelji za oba modela su: ROI – Industrija 4.0 (8-12%), Industrija 5.0 (15-25%), stopa škarta, 2,1 naspram 0,5% i zadovoljstvo zaposlenih, 67 naspram 89%. Rezultati primjene su vidljivi u tome što su Tesla inženjeri uz podršku AI-a smanjili vrijeme razvoja proizvoda za

30%, dok je Philips pomoću „Lights-as-a-Service“ modela smanjio otpad za 40%. Zaključak je da kompanije treba da počnu sa pilot-projektima (jedna kobotska linija) te investiranjem u reskilling, što je ključno za uspjeh.

Industrija 4.0 (od 2011. do danas) je fokusirana na automatizaciju, IoT, DT i umrežene proizvodne sisteme, dok Industrija 5.0 (od 2021.) ima human-centric pristup, gdje ljudi i mašine sarađuju u simbiozi, uz naglasak na [18]: personalizaciju proizvoda (mass customization), održivost i CE te socijalnu inkluziju i dobrobit za radnike. U modelu Industrije 5.0 proizvodnja je ta u kojoj su radnici ključni akteri, a ne samo nadzornici mašina, jer tehnologije moraju biti prilagodljive ljudima, a ne obrnuto. Zbog svega ovoga, stubovi Industrije 5.0 su: human-centricity (radnik u centru), sustainability (zelena proizvodnja) i resilience (otpornost na krize). Jedna od karakteristika Industrije 5.0 je kognitivna ergonomija, koja se ogleda u smanjenju kognitivnog opterećenja radnika kroz: upotrebu prirodnog jezika (NLP) – glasovne komande umjesto komplikovanih interfejsa, haptički feedback – povratne informacije kroz dodir (daljinsko upravljanje robotima) i brain-computer interfaces (BCI) – eksperimentalni model za upravljanje mašina mislima. Kao primjere primjene ovog modela imamo sljedeće studije slučaja: smart fabrika Siemens – radnici koriste AR naočare za brže popravke, Tesla's Optimus robot – ljudsko-robotska saradnja u proizvodnji i Adidas Speedfactory – personalizacija patika uz pomoć AI-a i radnika. Industrija 5.0 ne zamjenjuje ljude robotima, već koristi tehnologiju da poveća ljudske kapacitete. Ključni trendovi za budućnost su: emocionalna AI (mašine koje razumiju ljudske emocije), explainable AI (XAI) – objašnjivi algoritmi za veće povjerenje i human digital twins – virtualne replike radnika za optimizaciju performansi.

Glavna ideja Industrije 5.0 je vraćanje ljudskog faktora u fabrike. Dok je Industrija 4.0 postavila temelje automatizacije na podacima, Industrija 5.0 vraća čovjeka u središte procesa. Cilj je kombinovati ljudsku kreativnost, emocionalnu inteligenciju i fleksibilnost sa preciznošću i konstantnošću mašina [19]. Sinergija čovjeka je definisana kroz sljedeće faze:

- suživot – mašine služe čovjeku,
- saradnja – djelimično dijeljeni radni prostor,
- kolaboracija – aktivna koordinacija čovjek-mašina,
- empatija – mašina prepoznaje ljudske potrebe,
- koevolucija – zajednički razvoj sposobnosti sistema čovjek-mašina.

Industrija 5.0 teži da kroz empatijsku saradnju ostvari model gdje mašina konstantno sluša i prilagođava se čovjeku (mašine su podložne ljudima). Tehnologija je složena i skupa, posebno za mala i srednja preduzeća, jer ih većina još nije tehnološki opremljena, a radnici nemaju povjerenja i se boje praćenja i kršenja privatnosti, zbog čega su potrebna jasna pravila i transparentnost. Sigurnost podataka i kibernetička zaštita, odnosno robusna zaštita, je imperativ jer rast povezivanja povećava ranjivost na napade. Tu je i reskilling/upskilling: 70-80% menadžera do 2035. godine očekuje kontinuirano učenje i razvoj kreativnih, analitičkih i tehnoloških vještina. Fabrike usmjerene na čovjeka ne zagovaraju otpis tehnologije nego redefiniciju – automatizacija je alat koji osnažuje čovjeka, a ne zamjenjuje ga.

4. Industrija 4.0 – trenutno stanje

Industrija 4.0 je postala međunaroni standard moderne proizvodne industrije, ali globalno njen razvoj nije ravnomjerno raspoređen. Evo ključnih karakteristika njenog trenutnog stanja (2025.) [2, 20, 21]:

- (a) dominantne tehnologije i primjena – internet stvari (IoT), već danas imamo 30+ milijardi povezanih uređaja u industriji (pametni senzori, praćenje opreme), zatim AI i mašinsko učenje sa širokom primjenom u prediktivnom održavanju (smanjenje zastoja za ~30%) ili optimizaciji lanca snabdijevanja (Amazon, Tesla), potom robotika i automatizacija, gdje danas imamo globalni tržišni udio od ~50 milijardi \$, posebno u automobilske industriji, potom digitalni blizanci (DT)

- sa najvećom primjenom u avionskoj industriji (Boeing) i energetici (GE) i, najzad, cloud & edge computing koji predstavljaju hibridne sisteme za brzu obradu podataka,
- (b) sektori sa najvećom primjenom Industrije 4.0 su: automobilska industrija – Tesla, BMW (pametne fabrike sa 90% automatizacije), elektronika – foxconn (proizvodnja za Apple korištenjem IoT-a i robota), farmacija i zdravstvo – personalizovane terapije kroz analizu podataka, i logistika i skladištenje – magacini Amazona „bez ljudi“,
 - (c) glavni izazovi i ograničenja su takođe evidentni, i to: visoka početna ulaganja pa manje kompanije ne mogu lako da se prilagode, zatim nedostatak stručnjaka, jer 40% firmi navodi digitalne vještine kao glavnu prepreku, potom cyber-rizici, jer je 68% industrija imalo ozbiljan napad u 2023. (Ransomware, krađa IP-a) i, najzad, društveni otpor, kao strah od gubitka poslova (do 20 miliona radnih mjesta može biti zamijenjeno do 2030.),
 - (d) globalne razlike u primjeni Industrije 4.0 se ogledaju i u sljedećem: Njemačka, SAD, Japan i Kina su lideri u primjeni, koja se realizuje kroz javno-privatna partnerstva, EU najviše ulaže i radi na primjeni DT fabrike, a Srbija i region u ovoj oblasti imaju sporiji razvoj, ali su najdalje otišli automobilska industrija i IT sektor. Trendovi koji ukazuju na potrebu za Industrijom 5.0 se ogledaju u sljedećem: previše hladne automatizacije, jer je evidentan nedostatak fleksibilnosti za individualne potrebe, zatim tu su i ekološki problemi koji se ogledaju u tome da digitalizacija povećava potrošnju energije (AI troši 10 puta više energije nego 2015. – podatak iz 2024.) i potrošačka potražnja za personalizacijom, jer masovna proizvodnja ne može da isprati pojedinačne želje kupaca. Zaključak bi mogao da bude da je Industrija 4.0 revolucionarna, ali nedovršena, ali je ipak pružila osnovu za pametnu proizvodnju. Međutim, ona ipak ne rješava ljudske i ekološke potrebe i nije inkluzivna za sve kompanije i radnike. Zbog svega toga Industrija 5.0 dolazi kao nužan korak ka humanizaciji i održivosti proizvodnje.

5. Šta je Industrija 5.0 i koje su njene osnovne karakteristike

Industrija 5.0 predstavlja novu fazu industrijskog razvoja koja nadograđuje tehnologije Industrije 4.0, ali sa jasnim fokusom na: humanizaciju proizvodnje – saradnju ljudi i mašina, umjesto potpune automatizacije, održivost – ekološki svjesnu proizvodnju i CE te hiper-personalizaciju – masovnu proizvodnju proizvoda po individualnim željama.

Ključne karakteristike Industrije 5.0 su [2, 5, 22]:

- (a) human-centric approach (ljudi u centru), što znači: koboti kao pametni roboti koji rade uz ljude, ne umjesto njih, zatim veći naglasak na kreativnost, jer se mašine koriste za repetitivne zadatke, dok ljudi donose inovativna rješenja i poboljšanje radnog iskustva kroz manje monotonih poslova, a više smislenih uloga,
- (b) ekološka i socijalna održivost se odnosi na zelenu proizvodnju kroz smanjenje otpada i upotreba obnovljivih izvora energije, CE znači ponovnu upotrebu i reciklažu sirovina, kao i društvena odgovornost, koja se odnosi na fer radne uslove i etičku upotrebu tehnologije,
- (c) personalizovana proizvodnja (mass customization), što znači proizvodi po mjeri kupca izrađeni pomoću 3D štampe i modularno projektovani (obuća, automobili, medicinski uređaji), kao i direktna interakcija potrošača sa proizvodnim procesom tako da kupci mogu da podešavaju proizvod prije narudžbe.

Tehnologije koje pokreću Industriju 5.0 su AI sa ljudskom intuicijom, a to su sistemi koji uvažavaju ljudske preference, zatim energijski efikasni sistemi, kroz pametnu upotrebu resursa, i proširena i virtuelna stvarnost (AR/VR), koja podržava obuku radnika i projektovanje proizvoda. Jedno poređenje dva posljednja modela industrijske revolucije je dato u Tabeli 10. [23]

Tabela 10. Industrija 4.0 vs. Industrija 5.0

Kriterijum	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Fokus	Automatizacija i efikasnost	Ljudi + mašine + održivost
Proizvodnja	Masovna	Personalizovana
Ekologija	Nije prioritet	Ključni faktor
Uloga radnika	Smanjena (zamjenjivanje robotima)	Povećana (kreativna saradnja)

Ilustrativni primjeri primjene Industrije 5.0 se mogu navesti kao: pametne fabrike (radnici upravljaju robotima za personalizovanu proizvodnju (Adidasove „Speedfactory“), personalizovana medicina (3D štampane proteze i specifični organi za pacijenta) i modularni automobili (kupci biraju karakteristike vozila prije narudžbe).

Industrija 5.0 je važna jer daje balans između tehnologije i ljudskih vrijednosti i ne dopušta da mašine potpuno preuzmu kontrolu. Aspekt održivog razvoja smanjuje uticaj industrije na klimu, a veća fleksibilnost obezbjeđuje brže prilagođavanje potrošačkim potrebama.

Industrija 5.0 nije samo tehnološki iskorak već promjena filozofije proizvodnje i života – od mehaničke efikasnosti ka humanoj i održivoj budućnosti.

6. Ključne tehnologije Industrije 5.0

Kao i Industrija 4.0, i ovaj model se zasniva na ključnim tehnologijama, čijom primjenom gradimo ovaj model u praksi. U tekstu koji slijedi daje se njihova kratka analiza.

Kobotika (kolaborativni roboti). Industrija 5.0 stavlja ljudsko-robotsku saradnju u središte proizvodnje, a koboti (kolaborativni roboti) igraju ključnu ulogu u ostvarivanju te vizije. Za razliku od tradicionalnih industrijskih robota, koboti su projektovani za sigurnu i fleksibilnu interakciju sa ljudima, omogućujući kombinaciju ljudske kreativnosti i robotske preciznosti [7]. Koboti su pametni, lako programirajući roboti, koji rade uz ljude bez potrebe za fizičkim ogradama. Njihove osnovne karakteristike su: sigurnost, koja se postiže korišćenjem senzora i mekih materijala koji sprečavaju ozljede, fleksibilnost, koja se ostvaruje kroz brzo reprogramiranje za nove zadatke, intuitivno nadgledanje, gdje ih radnici mogu lako kontrolisati (čak i bez znanja programiranja), mala težina i kompaktnost, što ih čini pogodnim za male prostore.

Koboti se koriste u različitim industrijama, omogućujući personalizovanu i produktivniju proizvodnju. Recimo: proizvodnja i montaža u automobilske industriji (ugradnja komponenti), precizno spajanje sitnih dijelova u elektronici, sortiranje, paletiranje i utovar/istovar u skladištima u logistici i procesima pakovanja, kao i integracija sa AGV-ovima (autonomous guided vehicles), vizuelna inspekcija pomoću computer visiona prilikom kontrole kvaliteta te mjerenje dimenzija i detekcija grešaka u medicini i farmaciji (pomažu hirurzima u preciznim operacijama, a u farmaciji pakuju lijekove i doprinose laboratorijskoj automatizaciji). Takođe, koboti se koriste i za personalizovanu proizvodnju (mass customization) jer omogućuju brzo prilagođavanje proizvoda želji korisnika (prilagođena obuća, namještaj). U Tabeli 11. je dat pregled prednosti kobota u Industriji 5.0.

Tabela 11. Zašto su koboti važni u Industriji 5.0?

Prednost	Opis
Povećana produktivnost	Koboti rade 24/7 bez umora, povećavajući output
Poboljšana ergonomija	Zamjenjuju ljude u repetitivnim i opasnim zadacima
Brzi povraćaj investicije (ROI)	Jeftiniji od tradicionalnih robota, lakši za primjenu
Smanjenje škarta	Veća preciznost, smanjuju greške i materijalni otpad
Povećana fleksibilnost	Mogu se brzo prebaciti na nove proizvodne linije

Trenutno postoje neki izazovi u primjeni kobotike, a ogledaju se u: sigurnosti (iako su koboti sigurni, potrebni su dodatni standardi za ekstremne uslove primjene), integraciji sa postojećim sistemima u okruženju (ponekad se zahtijeva adaptacija proizvodnih linija) i ograničenoj nosivosti (većina kobota nosi 10-20 kg, što ih čini manje pogodnima za teške zadatke). Šta je budućnost kobota u Industriji 5.0? Ona se ogleda u sljedećim trendovima: AI i mašinsko učenje, gdje će koboti postati autonomniji u donošenju odluka, zatim cloud robotika, gdje će biti realizovano udaljeno upravljanje i zajedničko učenje robota, i swarm robotika, gdje ćemo imati koordinirano djelovanje više kobota u istom prostoru.

Kobotika je centralni element Industrije 5.0 jer omogućuje sinergiju između ljudi i mašina. Dok tradicionalna automatizacija zamjenjuje radnike, koboti povećavaju ljudske mogućnosti, dopuštajući im da se fokusiraju na kreativne i složene zadatke. Budućnost proizvodnje nije totalna automatizacija, već ljudsko-robotska saradnja.

AI sa ljudskom intuicijom (odlučivanje uz ljudski input). Industrija 5.0 ne teži potpunoj automatizaciji, već harmoniji između ljudske kreativnosti i mašinske inteligencije. AI sa ljudskom intuicijom (Human-Centric AI) predstavlja revolucionaran pristup u kojem vještačka inteligencija ne donosi odluke sama, već u saradnji sa ljudima, koristeći njihovu kreativnost, empatiju i iskustvo. To su hibridni sistemi odlučivanja koji koriste snagu AI-a (brza analiza podataka, mašinsko učenje, predikcija) i ljudsku inteligenciju (intuicija, kreativnost, emocionalna inteligencija) [12, 24]. Na primjer, AI u proizvodnji može predložiti optimalne parametre obrade, ali inženjer tehnolog donosi konačnu odluku na temelju dugogodišnjeg iskustva. Ili, prilikom projektovanja proizvoda generativna AI generiše varijante, ali inženjer projektant proizvoda bira najbolje rješenje. Evo kako ovaj model podržava Industriju 5.0: personalizovana proizvodnja, gdje AI analizira želje kupaca, ali ljudi kreatori prilagođavaju proizvod emocionalnim potrebama (luksuzni automobili, moda), poboljšana kontrola kvaliteta, gdje AI detektuje greške u proizvodnji, ali inženjer inspektor donose kontekstualne ocjene (estetski nedostaci), optimizacija proizvodnih procesa, gdje AI predlaže energetske optimizovane modele, ali inženjeri uvažavaju praktična ograničenja, održavanje i popravke (Predictive Maintenance 2.0), gdje AI predviđa kvarove, ali inženjeri koriste intuiciju za rješavanje neočekivanih problema, Human-Robot Collaboration (HRC), gdje koboti koriste AI za sigurnu interakciju, ali radnici upravljaju složenim scenarijima. Pregled AI modela koji se koriste u modelu Industrija 5.0 je prikazan u Tabeli 12.

Tabela 12. Pregled AI modela za Industriju 5.0

Tehnologija	Doprinos
Eksplikativni AI (XAI)	Objašnjava odluke AI-a na razumljiv način
Generativni AI	Stvara ideje, ali stručnjaci ih filtriraju
Brain-Computer Interface (BCI)	Direktna komunikacija između mozga i mašina
Augmented Intelligence	AI kao alat, a ne zamjena za ljude
Digitalni Twin + AI	Simulira scenarije uz ljudski feedback

Međutim, ovaj koncept ima i prednosti i nedostatke. Prednosti se ogledaju u boljem donošenju odluka, jer one nastaju kombinacijom analitičke i intuitivne inteligencije, zatim manje pristranosti, jer stručnjaci koriguju AI nedostatke, kao što je nedostatak kreativnosti, i veća prihvaćenost, jer radnici više vjeruju sistemima koje mogu nadzirati. A nedostaci se ogledaju u povjerenju u AI (kako balansirati automatizovane i ljudske odluke), etičkim pitanjima (ko je odgovoran za greške, AI ili čovjek) i digitalnoj preopterećenosti (kako izbjeći previše informacija za ljudske operatere).

Šta je budućnost ove oblasti? Ona se može sistematzovati kao: AI kao „kolega“, jer umjesto zamjene radnika, AI postaje „asistent“ koji pojačava ljudske sposobnosti, emocionalno pametni sistemi, gdje će AI bolje razumjeti ljudske potrebe (prilagođavanje proizvoda psihološkim profilima) i demokratizacija proizvodnje, gdje će mali preduzetnici koristiti AI + ljudsku kreativnost za inovacije.

Industrija 5.0 ne želi samo automatizovati proizvodnju već želi povećati ljudski potencijal. AI sa ljudskom intuicijom će omogućiti pametniju, fleksibilniju i humanizovaniju proizvodnju, gdje mašine služe ljudima, a ne obrnuto.

Biotehnologija i biomimikrija. Industrija 5.0 ne teži samo automatizaciji već održivoj i prirodno inspirisanoj proizvodnji. Biotehnologija (korištenje bioloških sistema u proizvodnji) i biomimikrija (oponašanje prirodnih rješenja) postaju ključni pokretači inovativnijih, ekoloških i efikasnijih industrijskih procesa [21]. Kako se biotehnologija može primijeniti u Industriji 5.0? To znači primjenu bioloških organizama (bakterija, gljiva, stanica) ili njihovih komponenti (enzima, DNA) u proizvodnji. Jedan pregled primjene ove tehnologije je dat u Tabeli 13.

Tabela 13. Pregled primjene biotehnologije u Industriji 5.0

Područje	Primjena
Ekološki materijali	Proizvodnja bioplastike iz biljnih izvora (kukuruz, alge)
Biodegradabilni proizvodi	Tekstil od mikrobiljnih vlakana (bakterijska celuloza)
„Zelena“ hemija	Enzimi umjesto otrovnih hemikalija u proizvodnji tekstila i boja
Cirkularna ekonomija	Biorazgradiva ambalaža i biološko recikliranje
Personalizovana medicina	3D štampa organa i tkiva za individualne terapije

Biomimikrija u Industriji 5.0 znači razvoj i primjenu projektovanja i tehnologija inspirisanih prirodom (mreža pčelinjih saća za jače građevinske materijale), što se vidi u Tabeli 14.

Tabela 14. Mimikrija u Industriji 5.0

Inspiracija iz prirode	Industrijska primjena
Morski ježevi	Self-healing materijali koji popravljaju pukotine
Lotusov list	Samočišćeci premazi za građevinske materijale
Mravlji organizam	Optimizacija logistike u skladištima (swarm robotika)
Paukova svila	Superjaka, lagana vlakna za avione i medicinu
Školjke	Keramički kompoziti otporni na lom

Kako možemo definisati doprinose biotehnologije i biomimikrije Industriji 5.0? Kroz: održivost koja se ogleda u smanjenju otpada i zagađenja, energetske efikasnost koja se ogleda u prirodnim procesima koji troše manje energije, inovativne materijale koji su jači, fleksibilniji i samooporavljajući te personalizaciju koja znači biološku štampu tkiva i organa, kao prilagođenih proizvoda.

Budućnost ove oblasti u biotehnološkoj proizvodnji u Industriji 5.0 se može definisati na sljedeći način: „living factories“, bakterije koje proizvode građevinske materijale (biocement), biohybrid robots, robotika inspirisana biologijom (meki roboti poput hobotnica) i AI + biomimikrija, gdje se pomoću generativne AI projektuju proizvodi inspirisani prirodom.

Industrija 5.0 ne može bez prirode kao saveznika. Biotehnologija i biomimikrija omogućuju čistiju, pametniju i prirodniju proizvodnju, smanjujući uticaj na okolinu i povećavajući inovativnost.

Energetska efikasnost i obnovljivi izvori. Industrija 5.0 ne počiva samo na automatizaciji i personalizaciji već i na održivoj proizvodnji koja se temelji na energetskej efikasnosti i obnovljivim izvorima energije [10]. Ova kombinacija omogućuje smanjenje troškova, povećanje konkurentnosti i zaštitu okoline, što je ključno za budućnost pametne proizvodnje. Industrija 5.0 teži „zelenoj revoluciji“ kroz: decentralizovane energetske mreže na bazi pametne distribucije energije iz obnovljivih izvora, digitalizovano upravljanje energijom primjenom IoT-a i AI-a za optimizaciju potrošnje te CE kroz ponovnu upotrebu otpadne energije (toplotna reciklaža). Glavna tehnologija za energetske efikasnost u Industriji 5.0 je pametno upravljanje energijom (Smart Energy Grids), gdje se pomoću AI-a i IoT-a prati potrošnja u stvarnom vremenu i shodno tome automatski prilagođava proizvodnja. Na primjer, DT fabrika simulira energetske potrebe prije implementacije. Pregled primjene obnovljivih izvora energije u proizvodnji je dat u Tabeli 15.

Tabela 15. Primjena zelene energije u industriji

Izvor	Primjena u industriji
Solarna energija	Fotonaponski paneli na krovovima fabrika/pogona
Vjetroeletreane	Lokalne turbine za napajanje proizvodnih linija
Vodonična energija	Zeleno vodonično gorivo za tešku industriju
Biomasa i bioplin	Korišćenje organskog otpada za generisanje energije
Geotermalna energija	Grijanje i hlađenje postrojenja u vulkanskim područjima

Energetska reciklaža (Waste-to-Energy) koristi toplotnu energiju iz procesa, koja se ponovno koristi za grijanje ili proizvodnju struje. Tako, na primjer, toplotne pumpe u čeličanim koriste otpadnu toplotu. Imamo i pametne materijale za uštedu energije kao što su samo-hlađeni građevinski materijali (inspirisani termoregulacijom u prirodi) i fotokatalitički premazi koji smanjuju potrebu za vještačkim osvjjetljenjem. Prednosti primjene održive energije u Industriji 5.0 se mogu definisati kao: smanjenje troškova kroz manju zavisnost o skupim fosilnim gorivima, povećana konkurentnost, jer zeleni proizvodi imaju veću vrijednost na tržištu, regulatorna prednost, jer se izbjegavaju kazne zbog ugljičnih emisija, povećana energetska nezavisnost, jer se smanjuje zavisnosti o uvoznoj energiji i pozitivni brend imidž, jer ovo obezbjeđuje privlačenje ekološki svjesnih kupaca i investitora. Imamo i izazova u ovoj oblasti, koji postoje kao: visoki početni troškovi investicija u solarne panele, vjetroeletreane i pametne mreže, potom intermitentnost obnovljivih izvora, jer nedostatak sunca/vjetera može poremetiti proizvodnju, kao i skladištenje energije, kao važna potreba za jeftinijim i efikasnim baterijama. Rješenje ovih problema može biti u pametnim baterijama (AI-optimizovane) pomoću kojih ćemo bolje upravljati energijom. Tu je i zelena, vodična tehnologija, kao dugoročno skladištenje energije, i najzad mikromreže (Microgrids) za lokalnu energetske nezavisnost.

Budućnost Industrije 5.0 kao pionira održive energije se kreće ka: prosumerskim modelima gdje fabrike ne samo da troše već i proizvode energiju (solarni paneli + prodaja viška struje), energiji iz algi, gdje biorafinerije pretvaraju alge u biogorivo, te AI-drive energetskim tržištima, kroz automatsku trgovinu viškom energije između poduzeća.

Industrija 5.0 ne može postojati bez energetske efikasnosti i obnovljivih izvora. Održivi pristup ne samo da smanjuje troškove već stvara pametniju, zeleniju i socijalno odgovorniju proizvodnju.

Proširena i virtuelna stvarnost (AR/VR) u proizvodnji. Industrija 5.0 stavlja ljudsko-mašinsku saradnju u centar pažnje, a proširena (AR) i virtuelna stvarnost (VR) omogućuju revolucionaran napredak u proizvodnji. Ove tehnologije povećavaju produktivnost, smanjuju greške i ubrzavaju obuku, dok istovremeno povećavaju sigurnost i kreativnu saradnju između ljudi i robota. Primjena ovih tehnologija u proizvodnji se ogleda u sljedećim oblastima [12, 17]: (i) AR se koristi za ugradnju digitalnih informacija u stvarni svijet (uputstva preko pametnih naočara), za održavanje, montažu i kontrolu kvaliteta, (ii) VR je potpuno novo iskustvo u digitalnom okruženju, koje se koristi za obuku, simulacije i projektovanje proizvoda i (iii) MR (izmiješana stvarnost), koja predstavlja kombinaciju AR-a i VR-a (hologramska interakcija sa proizvodnim linijama). U Industriji 5.0 primjena ovih tehnologija je identifikovana za sljedeće oblasti: (i) poboljšana obuka radnika pomoću VR simulacija za vježbanje složenih operacija bez rizika (zavarivanje, rukovanje opasnim materijalima) i AR uputstva u realnom vremenu koje vodi radnike kroz korake montaže (Microsoft HoloLens u automobilske industriji), (ii) udaljena pomoć i održavanje (Remote Assistance), gdje stručnjaci mogu vizuelno asistirati tehničarima putem AR smart glasses (PTC Vuforia, Scope AR), kao i DT + AR, gdje se omogućuje preklapanje stvarnih i simuliranih podataka za brže otkrivanje kvarova, (iii) projektovanje i izrada prototipova proizvoda, gdje VR omogućuje 3D modeliranje u virtuelnom prostoru (Ford koristi VR za ispitivanje ergonomije automobila), a AR vizuelizacija pomaže inženjerima da vide kako će komponente izgledati u stvarnom svijetu, (iv) povećana preciznost u proizvodnji, gdje se AR koristi za navođenje čime se smanjuje greške u montaži (Boeing koristi AR za montažu žičanih instalacije u avionima), a VR za provjeru ergonomije, gdje se vrši optimizacija radnih stanica za radnike, (v) čovjek-robot interakcija (kolaborativni rad), gdje se vrši AR vizuelizacija robotskih radnji koja pomaže radnicima da bezbjedno sarađuju sa robotima i VR planiranje putanja end-efektora robota, čime se smanjuje vrijeme programiranja. Jedan pregled prednosti AR-a/VR-a u Industriji 5.0 je prikazan u Tabeli 16.

Tabela 16. Prednosti AR-a/VR-a u Industriji 5.0

Prednost	Poboljšanje
Ubrzana obuka	Smanjenje vremena učenja za 50-70%
Manje grešaka	Do 90% manje grešaka u montaži
Smanjeni troškovi održavanja	Brže popravke uz udaljenu podršku
Povećana sigurnost	Vježbanje opasnih situacija pomoću VR-a
Bolja saradnja	Globalni timovi rade zajedno u virtuelnom prostoru

Glavni izazovi u ovoj oblasti su: visoka cijena opreme (HoloLens 2 ~ \$3,500), teškoće u integraciji sa postojećim ERP/MES sistemima i otpor radnika prema novim tehnologijama. Rješenja mogu biti u cloud-based AR/VR-u, jer se plaća samo SaaS usluga (jeftiniji pristup softveru), standardizaciji podataka (korišćenjem IoT + DT za lakšu primjenu) i faznoj primjeni (početi sa pilot-projektima).

Budućnost AR-a i VR-a u Industriji 5.0 se može definisati kroz sljedeće aspekte: AI + AR → pametni asistenti koji prepoznaju objekte i daju preporuke, 5G + Edge Computing → Brza obrada podataka za AR/VR u realnom vremenu, haptički feedback → osjećaj dodira u VR-u za precizniju kontrolu i metaverse za proizvodnju → virtuelne fabrike gdje se ispituju scenariji prije primjene.

AR i VR nisu samo „cool tehnologija“ već sve više postaju kritični alati za model proizvodnje u Industriji 5.0, omogućuju brže učenje, manje grešaka i intuitivniju saradnju između ljudi i mašina.

Digital Twin kao ključna tehnologija Industrije 5.0. DT-ovi predstavljaju revolucionaran koncept u Industriji 5.0, omogućavajući virtualnu reprezentaciju fizičkih proizvoda, procesa ili sistema u realnom vremenu. Ova tehnologija služi kao most između fizičkog i digitalnog svijeta, omogućavajući [13,15]: prediktivno održavanje, optimizaciju proizvodnih procesa, eksperimentisanje bez rizika te poboljšanu interakciju ljudi i mašina. DT je dinamički digitalni model koji prati fizički objekat (mašine, proizvode, fabrike) putem IoT senzora, simulira ponašanje koristeći AI i analitiku podataka i predviđa probleme prije nego što se oni dese. Tako, na primjer, DT turbinskog motora aviona online prati pritisak, temperaturu i vibracije, predviđajući kada će biti potrebno održavanje. Primjene DT-a u Industriji 5.0 se mogu sresti u sljedećim oblastima:

- (a) proizvodnja (Smart Manufacturing) – za optimizaciju proizvodnih procesa kroz simulaciju promjena prije primjene te u kontroli kvaliteta u realnom vremenu za detekcije grešaka putem AI-a,
- (b) održavanje (Predictive Maintenance) – kroz predviđanje kvarova, što doprinosi smanjenju zastoja do 50%, i za udaljenu dijagnostiku, gdje tehničari koriste DT za analizu problema,
- (c) projektovanje proizvoda (generativno projektovanje) i virtualno testiranje – kroz ispitivanja različitih verzija proizvoda bez fizičkog prototipa te personalizaciju proizvoda kroz njihovo brzo prilagođavanje zahtjevima kupaca,
- (d) „fabrike u cloudu“ (factory-as-a-service) – simulacija cijelih pogona putem testiranja novih postrojenja u digitalnom okruženju te energetska efikasnost, kroz analizu potrošnje energije i identifikaciju ušteda.

Pažljivom analizom može se doći do sljedećih prednosti za primjenu DT-ova u ovom modelu: smanjenje troškova, uslijed manjeg broja fizičkih testova i izrade prototipova, povećanja produktivnosti uslijed optimizacije procesa u realnom vremenu, manji zastoji zato što prediktivno održavanje sprečava kvarove, bolja saradnja između inženjera i radnika koji koriste isti digitalni model te održivost kroz smanjenje otpada i energetske potrošnje. Ključne tehnologije koje omogućuju DT-ovi su: IoT senzori za prikupljanje podataka iz realnog svijeta, AI i mašinsko učenje, koji vrše analize podataka i predviđanje događaja, cloud computing, kroz obradu velikih količina podataka, 5G mreža za brzu komunikaciju u realnom vremenu i AR/VR vizuelizacija DT-ova. Problemi koji mogu nastati u primjeni ovog modela su dati kao visoki početni troškovi za IoT infrastrukturu i AI modele, zatim tu je i sigurnost podataka kao rizik od hakovanja DT-ova i, najzad, složena integracija sa postojećim sistemima (CAD/CAM/PLM). Rješenja su u etapnoj primjeni (proces po proces), korišćenju blockchaina za zaštitu podataka te standardizaciji platformi (Nvidia Omniverse, Siemens Xcelerator) za DT-ove.

Budućnost DT-ova u Industriji 5.0 se kreće u sljedećim pravcima: „living DT“, gdje AI obezbjeđuje samoučenje i prilagođavanje promjenama, metaverse integracija, gdje imamo virtualni svijet za upravljanje fizičkim fabrikama, te autonomni sistemi, gdje će DT donositi odluke bez ljudske intervencije.

DT-ovi su srce Industrije 5.0 koji omogućavaju pametniju, bržu i održiviju proizvodnju. Oni ne samo da povezuju ljude i mašine već stvaraju potpuno novi način upravljanja industrijskim procesima.

7. Poređenje Industrije 4.0 i Industrije 5.0 – činjenice

Osnovna filozofija Industrije 4.0 je data kroz sljedeće činjenice [24]: (a) digitalizacija i automatizacija – korišćenje pametnih tehnologija, kao što su IoT, AI, DT, BDA i cloud computing za stvaranje pametnih fabrika, (b) povezanost (cyber-fizički sistemi) – mašine, proizvodi i ljudi komuniciraju u realnom vremenu putem digitalne mreže, (c) fleksibilnost i efikasnost – proizvodnja postaje prilagodljivija, brža i jeftinija uz minimalnu ljudsku intervenciju i (d) data-driven odluke – donošenje odluka temelji se na analizi podataka umjesto isključivo na ljudskom iskustvu. Glavni cilj je maksimizirati produktivnost i profit kroz tehnološku integraciju.

Industrija 5.0, ili peti talas industrijskog razvoja, se bazira na sljedećoj filozofiji: (a) human-centric pristup – tehnologija treba služiti ljudima, a ne zamijeniti ih, pri čemu je naglasak na saradnji ljudi i robota (koboti), (b) personalizacija i kreativnost – umjesto masovne proizvodnje, fokus je na prilagodljivim, individualizovanim proizvodima uz ljudsku kreativnost, (c) održivost i zelena ekonomija – korišćenje tehnologije za smanjenje otpada, recikliranje i održivu proizvodnju (CE) i (d) socijalna inkluzija i radnička dobrobit – poboljšanje kvaliteta rada, smanjenje monotonije i jačanje uloge ljudi u inovacijama. Glavni cilj je postići održivu, humanu i socijalno odgovornu proizvodnju. Jedan pregled osnovnih filozofija ovih modela je dat u Tabeli 17.

Tabela 17. Osnove filozofije

Aspekt	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Vizija	Pametne fabrike – potpuna automatizacija	Pametne i humane fabrike – simbioza ljudi i mašina
Glavni fokus	Efikasnost i produktivnost	Humanizacija, održivost i personalizacija
Paradigma	Tehnologija kao cilj	Tehnologija kao sredstvo za društveno dobro

Ključna razlika ovih modela je da je Industrija 4.0 fokusirana na tehnologiju i efikasnost, dok Industrija 5.0 vraća ljudski i društveni aspekt u središte razvoja industrije. Industrija 5.0 ne odbacuje tehnologiju iz 4.0, već je nadograđuje humanim vrijednostima. Industrija 5.0 nastoji uravnotežiti napredak tehnologije i ljudske potrebe, što je odgovor na strahove od dehumanizacije rada u eri robotike i AI-a.

Tehnološke razlike između Industrije 4.0 i Industrije 5.0 ogledaju se u načinu integracije tehnologija, njihovoj primjeni i konačnom cilju. Iako se Industrija 5.0 nadovezuje na tehnologije iz 4.0, naglasak je pomaknut sa puke automatizacije na saradnju između ljudi i mašina, kao i održivost [15]. Pregled ključnih tehnoloških razlika je dat u Tabeli 18.

Tabela 18. Tehnološke razlike modela Industrije 4.0 i Industrije 5.0

Kriterijum	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Glavni fokus	Digitalizacija, automatizacija, efikasnost	Humanizacija tehnologije, održivost, personalizacija
IoT & povezanost	Pametni uređaji povezani u mrežu (cyber-fizički sistemi)	AI-optimizovana saradnja čovjek-mašina (cobots)
AI	AI za autonomne odluke i optimizaciju procesa	AI kao saradnik ljudima (augmentirana inteligencija)
Robotika	Autonomni roboti zamjenjuju ljude u repetitivnim zadacima	Kolaborativni roboti (cobots) rade zajedno sa ljudima
Big Data & Analytics	Masovna analiza podataka za efikasnost proizvodnje	Personalizovana analiza za prilagodljive proizvode
Cloud & Edge Computing	Centralizovana obrada podataka u cloudu	Distribuisana obrada (edge computing) za brže odluke
Digitalni blizanci	Simulacija proizvodnih procesa radi optimizacije	Digitalni blizanci + ljudski input za kreativna rješenja
Proizvodni pristup	Masovna proizvodnja uz minimalnu intervenciju čovjeka	Personalizovana i modularna proizvodnja (mass customization)
Održivost	Manji naglasak – optimizacija za produktivnost	Zelena tehnologija, CE, energetska efikasnost
Ljudska uloga	Smanjenje ljudske intervencije (full automatizacija)	Ljudska kreativnost + tehnologija (human-in-the-loop)

Industrija 4.0 koristi tehnologiju za potpunu automatizaciju i digitalnu transformaciju proizvodnje. Industrija 5.0 koristi iste tehnologije, ali ih usmjerava prema saradnji ljudi i mašina, personalizaciji i održivosti. Tako, na primjer, u Industriji 4.0 robot sam sastavlja automobil, dok u Industriji 5.0 robot i čovjek zajedno rade na personalizovanom automobilu uz AI podršku. Industrija 5.0 ne odbacuje tehnologije iz 4.0, već ih nadograđuje humanim i ekološkim dimenzijama.

Industrije 4.0 i 5.0 imaju različite filozofije o **ulozi ljudi u proizvodnji**. Dok se Industrija 4.0 fokusira na automatizaciju i smanjenje ljudske intervencije, Industrija 5.0 vraća čovjeka u centar proizvodnog procesa, ali uz naprednu tehnološku podršku [18].

U Industriji 4.0 uloga čovjeka se odnosi na sljedeće aktivnosti: nadzor i upravljanje – ljudi prate rad pametnih mašina putem SCADA sistema, IoT platformi i digitalnih nadzornih terminala, održavanje i popravke – umjesto rutinskih zadataka, radnici se bave održavanjem složenih sistema i rješavanjem kvarova, programiranje i optimizacija – inženjeri razvijaju algoritme za AI, robotiku i analizu podataka kako bi poboljšali efikasnost, data-driven odluke – menadžeri koriste velike količine podataka (Big Data) za strateško planiranje. Dakle, ključne karakteristike su: ljudska ruka postaje manje potrebna u direktnoj proizvodnji (mašine rade samostalno), manje fizičkog rada, više tehničkih vještina (upravljanje robotskim linijama).

U Industriji 5.0 uloga čovjeka je drugačija: saradnja s robotima – ljudi i kolaborativni roboti rade zajedno (čovjek upravlja robotom za preciznu montažu), kreativnost i personalizacija – radnici koriste tehnologiju (AI, 3D štampa) za prilagodljive proizvode (projektovanje proizvoda prema zahtjevima kupca), upravljanje održivošću – ljudi optimizuju resurse, recikliraju materijale i vode računa o zelenoj transformaciji, povećana uloga socijalne inteligencije – empatija, komunikacija i timski rad postaju ključni (rad u hibridnim timovima s AI asistentima). Ključna karakteristika Industrije 5.0 je da tehnologija služi ljudima, a ne zamjenjuje ih, a fokus je na povezivanju ljudske kreativnosti i mašinske preciznosti. Zato ona ima manje monotonih poslova i više inovativnih uloga (upravljanje personalizovanom proizvodnjom). Uporedni pregled uloga čovjeka u Industriji 4.0 i Industriji 5.0 je dat u Tabeli 19.

Tabela 19. Uloga čovjeka u novim modelima

Aspekt	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Glavna uloga čovjeka	Nadzor i optimizacija	Kreativna saradnja sa tehnologijom
Interakcija sa mašinama	Minimalna (mašine rade same)	Direktna (cobots & AI asistenti)
Vještine	Tehničke (programiranje, data analiza)	Kreativne + tehničke (projektovanje, upravljanje sistemima)
Proizvodni model	Masovna proizvodnja	Personalizovana i modularna proizvodnja
Održivost	Manji naglasak	Ključni faktor (ljudski nadzor nad zelenim tehnologijama)
Primjer posla	Upravljanje robotskom linijom	Projektovanje proizvoda uz pomoć AI-a i 3D štampe

Ekonomski aspekti Industrije 4.0 naspram Industrije 5.0 se ogleda u sljedećim činjenicama [10]: (a) Industrija 4.0 ekonomski fokus stavlja na efikasnost i automatizaciju, a glavni cilj je smanjenje troškova i povećanje produktivnosti kroz digitalnu transformaciju; ekonomski okviri ovog modela su: brži proizvodni ciklusi, manje grešaka i veći output, (b) niži troškovi rada zbog automatizacije, i (c) globalna konkurentnost kroz skalabilnu proizvodnju. Međutim, imamo i ekonomske izazove, koji se odnose na ovaj model, a to su: visoke početne investicije u tehnologiju, gubitak tradicionalnih radnih mjesta (deindustrijalizacija) i ovisnost o globalnim dobavljačima i krhkim lancima snabdijevanja.

Industrija 5.0 ekonomski fokus stavlja na dodatnu vrijednost i održivost, a glavni ciljevi su personalizacija, održivost i human-centric pristup. Ekonomske prednosti ovog modela se ogledaju u sljedećim činjenicama: premium cijene za personalizovane i održive proizvode, veća zaposlenost u kreativnim i tehničkim rolama i manji rizici od globalnih kriza (reshoring). Ekonomski izazovi ovog modela su: veći troškovi proizvodnje (manja ekonomija obima), potreba za obukom radnika za napredne tehnologije te sporiji ROI zbog kompleksnijih modela. Usporedna analiza ekonomskih aspekata oba modela je data u Tabeli 20.

Tabela 20. Ekonomski aspekti Industrije 4.0 i Industrije 5.0

Aspekt	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Glavni cilj	Efikasnost, automatizacija, snižavanje troškova	Personalizacija, održivost, ljudski faktor
Proizvodni model	Masovna proizvodnja	Prilagodljiva i cirkularna proizvodnja
Uloga radnika	Smanjenje broja radnika (robotizacija)	Saradnja ljudi i mašina (kobotika)
Investicije	Visoke (IoT, AI, robotika)	Visoke (održivi materijali, obuka)
ROI (povrat investicije)	Brži (smanjenje troškova)	Sporiji (veća dodana vrijednost)
Konkurentska prednost	Niže cijene, veća produktivnost	Premium proizvodi, održivost
Rizici	Ovisnost o globalnim lancima snabdijevanja	Veći troškovi proizvodnje

Industrija 4.0 je bila ekonomija efikasnosti u kojoj je cilj bio proizvesti više, brže i jeftinije. Industrija 5.0 je ekonomija vrijednosti, gdje se više plaća za personalizovane, održive i humanizovane proizvode. Industrija 5.0 ne zamjenjuje Industriju 4.0, već je nadograđuje, dodajući ljudski i ekološki aspekt u ekonomsku jednačinu.

Ključni zaključci ovog poglavlja su da Industrija 5.0 ne odbacuje tehnologiju 4.0, već je usmjerava ka humanijem i održivijem društvu. Glavne promjene su: od „fabrika bez ljudi“ ka „fabrikama sa ljudima u centru“, od količine ka kvalitetu i personalizaciji i od zagađivanja ka zelenoj transformaciji.

Industrija 5.0 je neophodna da bi tehnologija služila ljudima, a ne obrnuto.

8. Implikacije Industrije 5.0

Industrija 5.0 donosi revolucionarne promjene koje će uticati na ekonomiju, društvo i okolinu. Evo ključnih implikacija: ekonomske, društvene, tehnološke, političke i pravne.

Ekonomske implikacije Industrije 5.0 mogu se definisati i ovako: Kako će revolucija „ljudsko-mašinskog partnerstva“ promijeniti globalnu privredu?

Industrija 5.0 donosi radikalnu transformaciju ekonomskog krajolika, kombinujući naprednu automatizaciju sa ljudskom kreativnošću. Evo ključnih ekonomskih efekta [5]:

- (a) promjena modela poslovanja, gdje od modela masovne proizvodnje imamo model „masovne personalizacije“, što znači da imamo proizvodnju po individualnim zahtjevima (3D-štampana obuća, personalizovani automobili), kao i rast premium cijena kada su kupci spremni platiti više za unikatne proizvode. Ovo je dovelo do nastanka novih poslovnih modela, kao što je proizvodnja

- kao usluga (MaaS – Manufacturing as a Service) i platformska ekonomija, gdje imamo dijeljenje proizvodnih kapaciteta putem digitalnih tržišta,
- (b) uticaj na tržište rada, gdje se javljaju sljedeći trendovi: rast potražnje za visokokvalifikovanim radnicima (veća potreba za inženjerima, projektantima, AI stručnjacima), smanjenje rutinskih poslova (automatizacija zamjenjuje ~20% manualnih radnih mjesta), nove uloge (tehničari za kolaborativne robote, DT inženjeri), geografska decentralizacija (remote upravljanje proizvodnjom smanjuje značaj jeftine radne snage). Ovdje imamo i jedan paradoks – iako tehnologija eliminiše neke poslove, Industrija 5.0 stvara više radnih mjesta nego što ih ukida, ali zahtijeva doškoloavanje radne snage,
 - (c) makroekonomski efekti – ovdje imamo dva efekta: do 30% veća efikasnost kroz AI-optimizovane procese i smanjenje troškova energije i materijala (CE). Takođe dolazi i do promjena globalnih lanaca snabdijevanja pa imamo nearshoring trend, gdje su pametne fabrike bliže potrošačima (manja ovisnost o isporučiocima iz Azije), te manje zalihe, gdje proizvodnja na zahtjev smanjuje zalihe. Primjena ovog modela u praksi dovodi i do polarizacije kompanija. Imamo pobjednike, a to su firme koje brzo usvoje Industriju 5.0 (do 40% veća margina profitna). Nažalost, postoje i gubitnici, kompanije ovisne o zastarjelim modelima masovne proizvodnje,
 - (d) fiskalni i regulatorni izazovi – što se poreza tiče, tu imamo potrebe za podsticajima za zelenu transformaciju (subvencije za obnovljivu energiju), kao i dileme za digitalno oporezivanje. Recimo, kako oporezovati proizvode projektovane u metaversu? Što se regulatornih pitanja tiče, tu imamo sljedeće izazove: standardizacija ljudsko-robotske interakcije (sigurnosni propisi), kao i pravila o vlasništvu podataka, recimo, ko posjeduje podatke iz DT-ova? Na kraju možemo govoriti i o trendovima u ovoj oblasti. Predviđa se da sektor pametne proizvodnje može doprinijeti do 15% globalnog BDP-a do 2035. godine. Imaćemo i smanjenje nejednakosti, jer manje zemlje mogu „preskočiti“ industrijsku fazu 4.0 i ući direktno u fazu 5.0, a javiće se i novi ekonomski giganti, a to će biti kompanije koje kontrolišu ključne tehnologije (AI, robotika, DT). Industrija 5.0 stvara „dvojaku ekonomiju“ gdje inovativne firme ostvaruju eksponencijalne prihode, radnici sa digitalnim vještinama postaju „nova elita“, a tradicionalne industrije bez digitalne transformacije – bankrotiraju. Ključno pitanje za kompanije je kako prilagoditi poslovne modele, radnu snagu i finansijske strategije da iskoriste ovaj talas?

Industrija 5.0 ne mijenja samo proizvodnju već transformiše i cijeli **društveni poredak**, od načina rada do nejednakosti i potrošačkih navika. Evo ključnih društvenih promjena koje donosi [13]:

- (a) promjena prirode rada i karijera, jer se nalazimo na kraju poslovnog modela kakvog do sada poznajemo. Zato će biti manje rutinskih poslova (zamijenjeni robotima), kao i više kreativnih, nadzornih i kolaborativnih poslova (upravljanje AI sistemima). Stvaraju se nove profesije, kao što su inženjeri za kolaborativne robote – stručnjaci za ljudsko-robotiku saradnju, zatim projektanti personalizovanih proizvoda – umjetnost + tehnologija, kao i DT – nadzor virtuelnih fabrika,
- (b) potreba za cjeloživotnim učenjem – doškoloavanje postaje obavezno pa države i kompanije moraju ulagati u edukaciju, kao i potrebu za fleksibilne kurikulume – kombinacija STEM-a i soft skills (kritičko mišljenje, emocionalna inteligencija),
- (c) partnerstvo ljudi i mašina – šta je to što čini čovjeka „nadmoćnim“? Prednosti ljudske inteligencije su kreativnost, empatija, moralno rasuđivanje, dok su prednosti AI-a i robota brzina, preciznost i analitičko razmišljanje. Međutim, problemi mogu nastati ako se ljudi ne uspiju prilagoditi, jer onda mogu postati „slabija karika“ u proizvodnji,
- (d) društvena nejednakost – hoće li Industrija 5.0 povećati ili smanjiti ovaj jaz? Prvi trend koji se javlja je povećanje nejednakosti. Imamo „digitalnu elitu“ (oni koji upravljaju tehnologijom) naspram „ostalih“ (radnici bez digitalnih vještina). Imamo i geografske razlike, jer su pametne fabrike koncentrisane u razvijenim zemljama. Šta su mogućnosti za smanjenje jaza? Jeftiniji pristup tehnologiji (cloud robotika, otvoreni AI alati), kao i digitalne platforme za obuku (virtuelne radionice za radnike u zemljama u razvoju). Tu su i etika i kontrola tehnologije, odnosno pitanje ko je odgovoran za greške. Na primjer, ako kobot povrijedi radnika – je li kriv

programer, korisnik ili sam robot? Tu je i nadzor nad AI-om. Kako spriječiti diskriminaciju u zapošljavanju ako algoritmi biraju radnike? Šta su uslovi rada za ljude i hoće li radnici imati pravo na „digitalne pauze“?

- (e) promjena ponašanja potrošača – najprije imamo rast individualizma jer kupci traže proizvode koji odražavaju njihov identitet (3D-štampana odjeća po mjeri). Tu je i održiva potrošnja koja se izražava većom potražnjom za zelenim proizvodima – Industrija 5.0 omogućuje CE,
- (f) budućnost društva u doba Industrije 5.0. – donosi li to manje rada a više kreativnosti? Ako roboti preuzmu teške poslove, ljudi će se baviti umjetnošću, naukom i društvenim aktivnostima. Javiće se i novi oblici zaposlenja – rad u virtuelnim prostorima (metavers fabrike). Demokratizacija proizvodnje će ići u pravcu da će mali preduzetnici koristiti pametne sisteme za konkurenciju sa korporacijama.

Pitanje koje možemo postaviti na kraju je hoće li Industrija 5.0 ujediniti ili podijeliti društvo? Industrija 5.0 može biti prilika za inkluzivniji svijet – ako se tehnologije ravnomjerno distribuiraju, ali i izvor društvenih podjela, ako samo bogati budu imali pristup novim alatima.

Na kraju, ključno pitanje je kako obezbijediti da svi imaju priliku učestvovati u ovoj revoluciji?

Prelazak sa Industrije 4.0 (digitalizacija, IoT, AI) na Industriju 5.0 (ljudsko-centrirana, održiva i rezilijentna proizvodnja) donosi značajne **tehnološke promjene**. Evo ključnih implikacija [12, 15-17]:

- (a) saradnički roboti (cobots) i human-robot interakcija – Industrija 4.0 je automatizacija sa minimalnim ljudskim uključivanjem (robotske trake u fabrikama). Industrija 5.0 se zasniva na kobotici (collaborative robots), robotima koji rade uz ljude, a ne umjesto njih. Na primjer, soft robots (sigurni za direktnu interakciju) su AI-vođeni asistenti u proizvodnji. Ovdje su izazovi da se poboljša senzorika, kao i computer vision za sigurnu saradnju. Tu je i jedan etički problem, ko donosi odluke – čovjek ili mašina?
- (b) personalizacija i masovna prilagođavanja (mass customization) – Industrija 4.0 je model gdje imamo masovnu proizvodnju uz pomoć DT-a i automatizacije. Industrija 5.0 je hiper-personalizacija proizvoda uz pomoć 3D štampe, AI-generisanog projektovanja i modularnih proizvodnih linija. Primjeri za ovo su: medicinski uređaji prilagođeni pacijentu ili automobili sa personalizovanom unutrašnjosti u realnom vremenu. Cilj u primjeni ovog modela je da se razviju i primjene fleksibilni proizvodni sistemi koji mogu brzo prelaziti između različitih konfiguracija, prema vrsti proizvoda,
- (c) AI i odlučivanje u realnom vremenu – u Industriji 4.0 AI se koristi za prediktivno održavanje i optimizaciju. Industrija 5.0 koristi AI kao „sarađnika“ (augmented intelligence), što znači podršku ljudima u donošenju složenih odluka. Primjer su digitalni asistenti u realnom vremenu (HoloLens u servisiranju mašina). Drugi primjer je generativna AI za projektovanje proizvoda. Izazovi za ovaj model su objašnjivost AI-a (XAI – Explainable AI), zašto je AI donio određenu odluku? Tu je i energetska efikasnost (snažni AI modeli troše puno struje),
- (d) Internet svega (IoE) i DT – Industrija 4.0 koristi IoT kao pametne senzore u mašinama. Industrija 5.0 ima drugi model (IoE) koji povezuje ljude, procese, mašine i AI u jedinstven ekosistem. Primjeri su DT-ovi, ne samo za mašine već i za cijele fabrike i radnike (simulacija prije primjene). Edge computing je brza obrada podataka na licu mjesta umjesto obrade u cloudu. Izazovi ovog modela su sigurnost podataka (veća povezanost = veći rizik od cyber-napada), kao i latencija, jer je potrebna ultra brza komunikacija (6G, kvantno računanje),
- (e) održivost i zelena tehnologija – Industrija 4.0 fokus stavlja na produktivnost, ali ne nužno i na održivost. Zato Industrija 5.0 težište stavlja na CE (recikliranje, ponovna upotreba) + zero-waste proizvodnju. Primjer za ovo su energijski autonomne fabrike (solarni paneli, obnovljivi izvori), kao i biološki razgradljivi materijali u proizvodnji. Izazovi su skuplja primjena održivih tehnologija. Tu je i promjena mentaliteta, jer industrija mora prihvatiti dugoročne investicije,
- (f) kvantno računarstvo i napredni materijali – Industrija 5.0 može ubrzati razvoj novih materijala koristeći kvantno računarstvo za simulaciju hemijskih svojstava u minutama, umjesto godinama.

Tu su i smart materijali poput pametnog tekstila. Ograničenja su visoka cijena kvantnih računara, kao i nedostatak propisa za nove materijale.

Industrija 5.0 ne zamjenjuje 4.0, već je nadograđuje ljudskim faktorom i održivošću. Ključne tehnologije su: cobots, generativni AI, DT, edge computing i zelena proizvodnja. Najvažnija ograničenja su: sigurnost podataka, energetska efikasnost i regulacija saradnje čovjek-robot.

Industrija 5.0 će zahtijevati snažnu saradnju između inženjera, AI stručnjaka, ekologa i sociologa kako bi tehnologija služila ljudima, a ne obrnuto.

Prelazak sa Industrije 4.0 na Industriju 5.0 donosi brojne **političke i pravne implikacije** koje zahtijevaju pažljivo razmatranje kako bi se obezbijedila glatka tranzicija i održivi razvoj. Evo ključnih aspekata:

- (a) političke implikacije koja trebaju da donesu promjenu fokusa u industrijskoj politici. Industrija 4.0 je usresređena na digitalizaciju, automatizaciju i AI. Industrija 5.0 stavlja naglasak na pristup orijentisan ljudima, održivost i socijalnu inkluziju, što zahtijeva prilagođavanje politika. Iz tih razloga vlade će morati promijeniti strategije podrške, usmjeravajući se na zelenu ekonomiju, obnovljivu proizvodnju (CE) i saradnju između ljudi i robota. Tu su i međunarodna saradnja i geopolitički uticaj. EU je već usvojila Industriju 5.0 kao dio svoje zeleno-digitalne tranzicije (Green Deal, Digital Compass). SAD i Kina imaju različite pristupe: SAD naglašava tehnološku dominaciju, a Kina kombinaciju automatizacije sa socijalnom kontrolom. Tu postoji i rizik od podjela između zemalja koje mogu pratiti novu paradigmu i onih koje ostaju u 4.0 fazi. Socijalni dijalog povećana uloga sindikata u pregovorima o uslovima rada u okruženju gdje ljudi i roboti intenzivno sarađuju. Radni odnosi imaju potrebu za politikama koje će obezbijediti reskilling radnika kako bi se prilagodili novim hibridnim radnim mjestima,
- (b) pravne implikacije se odnose na četiri aspekta. Prvi je regulacija AI-a i robotike, gdje Industrija 5.0 zahtijeva jasnije pravne okvire za upravljanje kolaborativnim robotima. EU već razvija AI Act i Machine Regulation. Drugi aspekt je zaštita podataka i privatnost. Veća povezanost ljudi i mašina znači i veći rizik od sajber napada i zloupotrebe podataka. Ovdje je potrebno obezbijediti usklađenost sa GDPR-om i novim standardima za IoT uređaje. Treći aspekt je odgovornost za štete (liability). Postavlja se pitanje ko je odgovoran ako kobot napravi štetu? Proizvođač, korisnik ili sam algoritam? Zato je moguće uvođenje posebnog pravnog statusa za napredne robote (slično kao u prijedlogu EU o elektronskoj osobi). I četvrti aspekt je radno pravo i socijalna zaštita. Potrebno je redefinisati radne ugovore za radnike koji dijele posao sa robotima. Tu je i pitanje oporezivanja robota (kao u prijedlogu Billa Gatesa) kako bi se nadoknadili gubici poreznih prihoda zbog automatizacije.

Tranzicija na Industriju 5.0 zahtijeva sveobuhvatne reforme u političkim i pravnim okvirima. Ključni izazovi su: balans između tehnološkog napretka i socijalne održivosti, jasne regulative za saradnju čovjek-robot te međunarodna koordinacija kako bi se izbjegle nejednakosti.

Vlade, pravni stručnjaci i industrijska udruženja moraju sarađivati kako bi se obezbijedilo da Industrija 5.0 donosi korist cijelom društvu, a ne samo tehnološkoj eliti.

9. Zaključak

Industrija 5.0 predstavlja prirodni evolutivni razvoj koncepta Industrije 4.0, ali sa jasnim pomakom fokusa sa čisto tehnološke efikasnosti na humanizaciju proizvodnih procesa. Dok je četvrta industrijska revolucija promovisala potpunu automatizaciju i digitalnu transformaciju, peta revolucija vraća čovjeka u središte proizvodnje, istovremeno koristeći najsvremenije tehnologije za postizanje održivog i socijalno odgovornog razvoja.

Ključna vrijednost Industrije 5.0 leži u sinergiji između ljudske kreativnosti, emocionalne inteligencije i preciznosti pametnih mašina. Ova simbioza omogućuje personalizovanu, fleksibilniju i održiviju proizvodnju koja ne samo da povećava produktivnost već i unapređuje kvalitet radnog okruženja i životnog standarda. Održivost postaje imperativ, što podrazumijeva smanjenje otpada, korištenje obnovljivih izvora energije i implementaciju CE principa.

Industrija 5.0 ne negira postignuća prethodne faze, već ih nadograđuje humanim i ekološkim dimenzijama, stvarajući balans između tehnološkog napretka i društvenih vrijednosti. Ovaj pristup ne samo da obećava veću konkurentnost poduzeća već i održiviji društveni razvoj, čime postaje temelj budućeg industrijskog krajolika u kojem tehnologija služi čovjeku i prirodi.

Reference

- [1]. Xun Xu, Yuqian Lu, Birgit Vogel-Heuser, Lihui Wang, Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 61, 2021, Pages 530-535, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>.
- [2]. Jeroen Kraaijenbrink, What Is Industry 5.0 And How It Will Radically Change Your Business Strategy? 2025, <https://www.forbes.com/sites/jeroenkraaijenbrink/2022/05/24/what-is-industry-50-and-how-it-will-radically-change-your-business-strategy/>.
- [3]. Industry 4.0 versus Industry 5.0, 2025. <https://engineeringmastersonline.rutgers.edu/articles/industry-4-0-vs-5-0-whats-the-difference/>.
- [4]. Prisma: PRISMA Statement. <https://www.prisma-statement.org/> (2020).
- [5]. European Commission (2021), Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Brussels, https://ec.europa.eu/info/publications/industry-50_en.
- [6]. World Economic Forum (WEF) (2022), The Future of Jobs Report, Davos. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2022>.
- [7]. Reddy, Praveen & Pham, Viet & B, Prabadevi & Deepa, N. & Dev, Kapal & Gadekallu, Thippa & Ruby, Rukhsana & Liyanage, Madhusanka.(2021). Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Applications. *Journal of Industrial Information Integration*. 26. 10.1016/j.jii.2021.100257.
- [8]. Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0 - A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 11(16), 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>.
- [9]. OECD (2023), The Impact of Industry 5.0 on Employment and Skills, Paris. <file:///C:/Users/Majstorovic/Downloads/1a89ed5e-en.pdf>.
- [10]. Elangovan, Uthayan (2021). Industry 5.0: The Future of the Industrial Economy. 10.1201/9781003190677.
- [11]. Attila Tóth, László Nagy, Roderick Kennedy, Belej Bohuš, János Abonyi, Tamás Ruppert, The human-centric Industry 5.0 collaboration architecture, *Methods X*, Volume 11, 2023, 102260, ISSN 2215-0161, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102260>.
- [12]. Siemens (2023), Collaborative Robotics in Smart Factories, Stuttgart. <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/cobots.html>.
- [13]. Tesla (2024), AI-Driven Custom Manufacturing, 10.48550/arXiv.2108.03383. <https://digitaldefynd.com/IQ/tesla-using-ai-case-study/>.
- [14]. Wan, Jiafu & Li, Xiaomin & Dai, Hong-Ning & Kusiak, Andrew & Martínez-García, Miguel & Li, Di (2021). Artificial Intelligence-Driven Customized Manufacturing Factory: Key Technologies, Applications, and Challenges. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3034808>.
- [15]. McKinsey & Company, (2024), The Next Normal in Manufacturing, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/preparing-for-the-next-normal-via-digital-manufacturings-scaling-potential>.
- [16]. Boston Consulting Group (BCG), Sustainable Manufacturing: From Vision to Value, (2023). <https://esgnews.com/bcgs-2023-sustainability-report-highlights-progress-and-innovative-solutions/>.

- [17]. Forbes (2023), Why Industry 5.0 Is The Future of Manufacturing.
<https://www.forbes.com/councils/forbestechcouncil/2024/10/29/what-does-industry-50-mean-today/>.
- [18]. Jialu Yang, Ying Liu, Phillip L. Morgan, Human-machine interaction towards Industry 5.0: Human-centric smart manufacturing, Digital Engineering, Volume 2, 2024, 100013, ISSN 2950-550X,
<https://doi.org/10.1016/j.dte.2024.100013>.
- [19]. MIT Technology Review (2025), The Rise of Human-Centric Factories.
<https://www.technologyreview.com/2025/07/07/1119714/the-digital-future-of-industrial-and-operational-work/>
- [20]. Majstorović, V., Đuričin, D., Mitrović, R., Industrija 4.0 – Renesansa inženjerstva, Mašinski fakultet, Beograd, 2022. god.
- [21]. Karabegović, I., Majstorović, V., Industrija 4.0, Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Sarajevo, 2024. godine.
- [22]. The path from Industry 4.0 to Industry 5.0, 2025, <https://www.atoss.com/en/insights/blog/from-industry-4-0-to-industry-5-0>.
- [23]. Verma, Manish & Pradesh, Uttar (2024). Transition From Industry 4.0 to Industry 5.0: A Comprehensive Overview. 8. 91-102. International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) Volume 8 Issue 2, March-April 2024 Available Online: www.ijtsrd.com e-ISSN: 2456 – 6470.
- [24]. D. P. F. Möller, H. Vakilzadian and R. E. Haas, "From Industry 4.0 towards Industry 5.0," 2022 *IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT)*, Mankato, MN, USA, 2022, pp. 61-68, 10.1109/eIT53891.2022.9813831.
- [25]. Golovianko, Mariia & Terziyan, Vagan & Branytskyi, Vladyslav & Malyk, Diana (2023). Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid. *Procedia Computer Science*. 217. 102-113. 10.1016/j.procs.2022.12.206.

FROM INDUSTRY 4.0 TO INDUSTRY 5.0

Prof. Dr. Vidosav D. Majstorović¹, Academician, prof. Dr. Isak Karabegović²

-
- 1 University of Belgrade - Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia
E-mail: vidosav.majstorovic@gmail.com
 - 2 Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Bistrik 7, Sarajevo,
Bosnia and Herzegovina
E-mail: isak1910@hotmail.com
-

ABSTRACT

Industry 4.0, known as the fourth industrial revolution, is based on the digitization and automation of production through technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), robotics and Big Data analysis. The goal is to increase the efficiency, flexibility and personalization of the product with minimal human intervention. However, Industry 5.0 represents an evolutionary step that returns the focus to the human role, sustainability and social responsibility. The key difference between these two phases is in the approach: while Industry 4.0 focuses on technological efficiency, Industry 5.0 combines advanced technologies with human-centric values. Instead of complete automation, it promotes collaborative robots (cobots) that work together with people, emphasizing the creativity and well-being of workers. Sustainability becomes a priority, with an emphasis on green energy, circular economy and waste reduction. Also, the system's resilience to crises, such as pandemics or disruptions in the supply chain, is gaining importance. Industry 5.0 does not replace the previous stage, but builds on it, returning man to the center of the production process. Combined with AI and IoT, it enables more personalized and sustainable products, while respecting environmental and social values. This approach allows for a balance between technological progress and human needs, which makes it crucial for the future of sustainable and humane development of the industry.

Keywords: Industry 4.0, Industry 5.0, Digitization, Automation, Evolution

PAMETNA METROLOGIJA U INDUSTRIJI

Predrag Dramićanin¹, Goran Dramićanin¹, prof. dr. Vidosav Majstorović²

¹ Kompanija SPP, Konjevići, Čačak;

² Mašinski fakultet, Beograd, E-mail: vidosav.majstorovic@gmail.com

REZIME

Pametna metrologija predstavlja primjenu naprednih tehnologija, kao što su internet stvari (IoT), vještačka inteligencija (AI), big data analitika (BDA) i digitalni twinovi (DT), u cilju unapređenja mjerenja, kontrole kvaliteta i procesne efikasnosti u industriji. Ključne karakteristike pametne metrologije su: (a) digitalizacija i automatizacija – precizno mjerenje u realnom vremenu uz minimalnu ljudsku intervenciju, (b) povezanost (IoT) – senzori i mjerni instrumenti povezani u mrežu pomoću koje se vrši daljinsko praćenje i upravljanje, (c) analiza podataka (AI i ML) – prediktivno održavanje i optimizacija procesa kroz analizu velikih skupova podataka i (d) samokalibracija i adaptabilnost – pametni instrumenti automatski prilagođavaju mjerenja na osnovu spoljnih uslova. Ona se primjenjuje u industriji u sljedećim oblastima: proizvodnja (Industrija 4.0) – za kontrolu svih vrsta tolerancija, temperature, pritiska i vibracija u realnom vremenu, energetika – za pametno mjerenje potrošnje energije i detekciju gubitaka, farmaceutska i prehrambena industrija – za precizno mjerenje sastojaka i uslova skladištenja, automobilska industrija – za kontrolu kvaliteta dijelova tokom proizvodnje itd. Njene prednosti su: povećana tačnost i pouzdanost mjerenja, smanjenje troškova i vremena proizvodnje, poboljšana kontrola kvaliteta i preventivno održavanje umjesto reaktivnog. Pametna metrologija osavremenjuje industrijske procese, omogućavajući brže, preciznije i efikasnije mjerenje, što doprinosi povećanju produktivnosti i konkurentnosti. Ovaj rad daje analizu modela pametne metrologije i studiju slučaja za njenu primjenu u malim i srednjim preduzećima (SMEs).

Ključne riječi: Industrija 4.0, digitalna proizvodna metrologija (PM), CMM, digitalni blizanac, vještačka inteligencija

1. Uvod

Pametna metrologija (PM) je napredni model koji integriše savremene metrološke sisteme sa digitalnim alatima, analitikom velikih podataka (BDA) i inteligentnim sistemima za podršku donošenju odluka. Ona radi u realnom vremenu, obezbeđujući visoki kvalitet proizvodnih procesa [1-3]. Tehnologije Industrije 4.0, IoT (IIoT) – industrijski internet stvari, vještačka inteligencija (AI) i mašinsko učenje (ML/DML) Cloud/Edge Computing, digitalni blizanci (DT) i sajber-fizički metrološki sistemi (CPS) [4-7] su okvir i sadržaj modela PM-a. Ovaj rad ima za cilj da prikaže model PM-a, koji u osnovi ima digitalnu transformaciju ove oblasti. Predstavljajući i analizirajući tehnologije koje omogućavaju napredni razvoj PM-a, rad nudi korisne uvide istraživačima, inženjerima i liderima u industriji u savremene trendove proizvodne metrologije (PrM). Navedene ciljeve možemo prikazati i Tabelom 1.

Tabela 1. Pregled dimenzija PM-a

Aspekti pametne metrologije	Sadržaj modela
Mjerenje u realnom vremenu	Automatizacija metroloških procesa i kontinualno obezbjeđenje kvaliteta konformnosti
Robotika u metrologija	Primjena robotskih sistema
BDA analiza kontrole kvaliteta	IoT i AI za podršku BDA modela
Digitalni blizanc i virtuelna metrologija	Virtuelni PM
Interoperabilnost i standardizacija	Razmjena metroloških podataka između entiteta u PM-u
Sljedivost i usklađenost	Lanci nabavke
Adaptivni sistemi obezbjeđenja kvaliteta	Mašina alatka kao adaptivni CPS

2. Model pametne metrologije - analiza literature

U ovom radu je izvršena analiza referenci prema modelu PRISMA [8], koji je obuhvatio ukupno 275 radova, od kojih njih 24 zadovoljava postavljene kriterije. Mjerenja u realnom vremenu čine osnovu PM-a jer se na taj način omogućava kontinualna kontrola kvaliteta procesa i dijelova. Sve ovo podržavaju senzori, IoT, AI i automatizacija proizvodnih procesa. Tako se dobija trenutna informacija o kvalitetu, čime se sprečava škart, a time i gubici u proizvodnji. Entiteti koji omogućavaju mjerenje u realnom vremenu su [9, 10]: (i) različite vrste senzora (optički, kontakti, beskontaktni i senzori okoline), (ii) prikupljanje i obrada podataka (5G, industrijski Ethernet i edge computing) i (iii) integracija sa elementima Industrije 4.0: CPS (CMM), DT i virtualna metrologija, uključujući AI i ML, za otkrivanje trendova, anomalija i potencijalnog škarta. Jedan pregled osnovnih karakteristika ovog prilaza je dat u Tabeli 2.

Tabela 2. Neke karakteristike koncepta PM-a za rad u realnom vremenu (prilagođeno prema [10, 11])

Element primjene	Opis	Moguće situacije	Moguće rješenje
Nema škarta	Online sprečavanje škarta	Veliki obim podataka	Edge AI za ključne informacije
Adaptivna proizvodnja	Automatsko podešavanje mašine alatke	Velika brzina mjerenja	Laserski dopler
Smanjenje troškova	Proizvodnja bez škarta	Interoperabilnost	OPC UA ili MTConnect
Poboljšana sljedivost	Praćenje istorije	Kibernetaska sigurnost	Blockchain

Robotika u metrologiji, po konceptu PM-a, omogućuje brz, tačan i precizan proces mjerenja i inspekcije. Ovi sistemi se posebno koriste za automatska skeniranja velikih mjernih predmeta radi provjere svih vrsta tolerancija, a posebno radi inspekcije krivih površina (u automobilske i avionske industriji). Neke karakteristike ovog prilaza su date u Tabeli 3.

Tabela 3. Primjena robota u metrologiji (prilagođeno prema [12, 13])

Vrsta tehnologije	Tehnologija opis	Aplikacija
CMM kao robot	CMM kao laserski skener	Automobilska i avionska industrija
Robotska vizija	2D/3D kamere za optičku inspekciju	Elektronika, pakovanje hrane, farmaceutska industrija
Autonomni mobilni roboti	Mobilni robot sa laserskim skenerom	Brodogradnja, mašinogradnja
Kolaborativni roboti	Zajednički radni prostor čovjeka i robota	Proizvodnja malih serija, medicinski uređaji

AI i ML se u ovoj oblasti primjenjuju na sljedeće načine [14]: automatsko prepoznavanje grešaka – AI klasifikuje nedostatke dobijene iz podataka skeniranja mjernih predmeta. Takođe, vrši se adaptivno planiranje puta mjernog senzora na osnovu podataka u realnom vremenu. Ovaj proces se naziva prediktivna metrologija, jer AI predviđa putanju mjernog senzora i vrši automatsku rekaliibraciju. Ovo znači da se vrši integracija fizičkog i virtuelnog modela CPS-a (CMM) pomoću DT-a, gdje se rezultati mjerenja simuliraju pomoću virtuelnih modela prije fizičke realizacije. Na ovaj način se ostvaruje zatvorena povratna sprega, koja se koristi za online upravljanje tačnošću obrade, odnosno kvalitetom konformnosti (korekcije zbog habanja alata). To se ostvaruje putem IIoT-a, korišćenjem edge računarstva za analizu u realnom vremenu. U ovim procesima se koristi OPC UA ili ISO 10303 (STEP-NC) protokoli za standardizaciju interoperabilnosti u modelu PM-a.

Upravljanje kvalitetom vođeno podacima (DDQC). Ovaj pristup koristi mrežu senzora, kao i AI, IoT i BDA, da bi u realnom vremenu od prikupljenih podataka poboljšao tačnost mjerenja, predvidio defekte i izvršio optimizaciju parametara kvaliteta proizvodnje. Za razliku od tradicionalne statističke kontrole procesa (SPC), ona omogućava predvidljivo i propisano obezbjeđenje kvaliteta, eliminišući škart i poboljšavajući efikasnost [15]. Analiza ovog koncepta prikazana je u Tabeli 4.

Tabela 4. Analiza koncepta DDQC-a (prilagođeno prema [16, 17])

Model	Funkcija DDQC-a	Metoda kontrole kvaliteta	Primjena
Laserski skeneri, vision sistemi	Generisanje metroloških podataka online	ML za otkrivanje nedostataka	Klasifikacija anomalija online
Smart probe	CNC mašine alatke za online mjerenje	Prediktivna analitika	Predviđa habanje alata
Senzori vibracija/ temperatura	Praćenje faktora okoline koji utiču na mjerenja	SPC 4.0	Kompenzacija grešaka mjerenja
RFID/QR Praćenje	Povezivanje sa mjernim podacima	DT simulacija	Predviđanje mjernih rezultata

Prikazane karakteristike modela u Tabeli 4. omogućavaju nam kreiranje zatvorene povratne sprege u DDQC modelu, automatskim podešavanjem habanja alata tokom obrade na CNC mašinama alatkama, na osnovu metroloških podataka o kvalitetu proizvodnje ili, na primjer, adaptivnog uzorkovanja, gdje AI određuje optimalnu učestalost inspekcije na osnovu rizika.

Digitalni blizanac i virtualna metrologija, kao novi koncept, donijeli su promjenu paradigme u kontroli kvaliteta proizvodnje. Ona se sastoji u tome da se prešlo sa fizičke inspekcije na sisteme mjerenja zasnovane na virtuelnim modelima vođenim podacima. Ovdje se stvara digitalna replika fizičkih proizvodnih procesa u realnom vremenu, koja omogućava predviđanje obezbjeđenja kvaliteta bez prekida proizvodnje [18, 19]. Zato možemo reći da metrološki DT predstavlja dinamički virtuelni model metrološkog sistema koji simulira, predviđa i optimizuje performanse mjerenja i inspekcija online. Virtualna metrologija je podskup DT-a koji online prati kvalitet proizvoda, koristeći procesne podatke (očitanja senzora) umjesto direktnog fizičkog mjerenja. Analiza ovog pristupa je prikazana u Tabeli 5.

Tabela 5. Analiza osnovnih karakteristika DT-a i VM-a u PM modelu (dopunjeno prema [20-22])

Nivo modela	Podrška	Tehnologija	Metoda	Kako funkcioniše	Primjer primjene
Fizički	Senzori online	CMM, laserski skener	VM - fizika	Koristi modele prvih principa	Predviđanje iskrivljenja poluprovodničkih pločica
Model	ML modeli	FEA, CFD, NN	VM - podaci	ML algoritmi za kvalitet	Procjena hrapavosti površine CNC obradom
Primjena	Prediktivna analitika	SPC i AR/VR interfejsi podržani AI-om	Hibridna virtuelna mašina	Fizički modeli sa AI za tačnost	Detekcija poroznosti dijelova dobijenih AM-om

Ovaj model je pokazao odlične rezultate u primjeni za online predviđanje kvaliteta, čime se smanjuju troškovi i rizici za kvalitet proizvoda. Korišćenjem ovog pristupa, rizik se smanjuje simuliranjem scenarija „šta ako“ za testiranje novih proizvoda, kao i predviđanjem uticaja habanja alata na tačnost dimenzija prilikom obrade na alatnoj mašini.

Interoperabilnost i standardizacija znači da se u PM-u obezbjeđuje besprijeekorna razmjena metroloških podataka, između CPS-a, softvera i poslovnih sistema. Sa druge strane, standardizacija obezbjeđuje konzistentne formate podataka, protokole i interfejsse [20]. Oba entiteta čine okosnicu PM modela u Industriji 4.0. U modelu Industrije 3.0 smo imali različite baze podataka metrološke

opreme i proizvodnih sistema, nekonzistentne protokole mjerenja u lancima nabavke. Jedna analiza ovog koncepta je data u Tabeli 6.

Tabela 6. Pregled komunikacijskih protokola i semantičkih modela za PM (dopunjeno prema [21, 22])

Standard	Primjena	Ključne karakteristike	Model	Svrha
OPC UA	Univerzalna razmjena podataka	Semantičko modeliranje	QIF	Tok podataka PM-a u cijelom lancu
MTConnect	Praćenje proizvodne opreme	XML šema zasnovana na HTTP-u	STEP (ISO 10303)	3D modeli uključujući GD&T
ISO 23247	DT za proizvodnju	Uključuje interoperabilnost metroloških podataka	SEMI E125	Metrologija poluprovodnika
DMC	Standardizacija CMM programiranja	Neutralni format planova mjerenja	ML	XML integrisanih proizvodnih sistema

Predloženi model interoperabilnosti iz ugla operativne gotovosti omogućava plug-and-play integraciju novih metroloških sistema. Takođe, integriše i tokove podataka od CMM-a do MES/ERP sistema. Na nivou poslovnog sistema [23-25], ovaj model obezbjeđuje integraciju lanca nabavke, jer dobavljači dijele/koriste podatke mjerenja u standardizovanim formatima, usklađenost sa propisima i standardima, kao što su ISO/IATF/FDA. I najзад, upravljanje životnim ciklusom proizvoda, generisanjem istorijskih podataka mjerenja, koji ostaju upotrebljivi uprkos nadogradnjama sistema. Takođe se ostvaruju tehničke prednosti konverzije integrisanih podataka u lancu CAD → (CAI) CMM → QA (QM). Sada je moguće vršiti analitiku podataka, što čini budućnost novih tehnologija u ovoj oblasti.

Unaprijeđena sljedivost i usklađenost. PM je omogućio da se od tradicionalnih metoda mjerenja i inspekcije pređe na sisteme mjerenja i inspekcije vođene podacima, sa povratnom spregom u realnom vremenu. Za ovaj novi prilaz, sljedivost i usklađenost su ključni elementi za primjenu standarda kvaliteta i propisa, kao i za obezbjeđenje odgovornosti u lancu snabdijevanja [26]. Sljedivost se odnosi na sposobnost praćenja podataka mjerenja do priznatih standarda (SI jedinice, NIST, ISO), u neprekinutom lancu kalibracije. U modelu PM-a se sljedivost obezbjeđuje digitalnim sertifikatima o kalibraciji (DCC), uz automatsku validaciju prema standardu (ISO/IEC 17025) [27]. Sada imamo i blockchain tehnologiju, koja nam obezbjeđuje integritet podataka i sprečava nedozvoljenu upotrebu, kao i provjeru usklađenosti. Sljedivost u modelu PM-a je definisana i kao zahtjev u sljedećim standardima: ISO 9001 (Menadžment kvalitetom), ASME B89 (Dimenzionalni metrološki standardi), FDA 21 CFR Part 11 (Usklađenost sa elektronskim zapisima u metrologiji) i EU MDR (Uredba o metrologiji medicinskih uređaja). Pregled koristi od unaprijeđene sljedivosti i usklađenosti je dat u Tabeli 7.

Tabela 7. Sljedivost i usklađenost za PM - pregled (dopunjeno prema [28])

Aspekt	Tradicionalna metrologija	PM
Integritet podataka	Ručni zapisi, moguće greške	Blockchain lanci
Standardi i propisi	Obimna papirologija	Online praćenje i izvještavanje
Brzina mjerenja	Spora, offline analiza	Online mjerenje podržano AI-om
Troškovi neusklađenosti	Visoki (škart, kazne)	Smanjeni podrškom prediktivne analitike

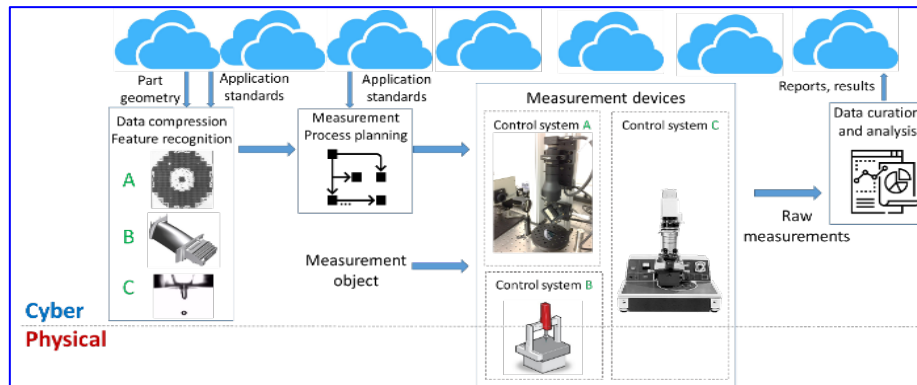
Prilagodljivi i samo-podešavajući sistemi, kao dio PM-a, gdje je upravljanje obradnim procesima zasnovano na mjeranjima, pomoću kojih se obezbjeđuje da se CPS (alatna mašina) samoreguliše online. Na ovaj način se obezbjeđuje upravljanje kvalitetom konformnosti u skladu sa propisanim tolerancijama. Adaptivno upravljanje procesima (APC) i upravljanje zatvorenom petljom (CLC) su ključni elementi adaptivne proizvodnje, gdje podaci mjerenja direktno utiču na parametre obrade bez ljudske intervencije [29]. Adaptivno upravljanje dinamički podešava parametre procesa (položaj oštrice alata u odnosu na obradak) na osnovu povratnih informacija senzora u realnom vremenu o habanju alata. Upravljanje zatvorenom petljom je samoregulišući sistem gdje se metrološki podaci šalju kao povratna informacija aktuatorima za trenutnu kompenzaciju. Ovi sistemi su osnova za postizanje ciljeva proizvodnje bez škarta (ZDM) u modelu Industrije 4.0. Danas u praksi imamo tri modela za adaptivno upravljanje kvalitetom konformnosti [30]: (i) geometrijsko adaptivno upravljanje (GAC), gdje se podešavanje putanje alata vrši na osnovu mjerenja dimenzija sa tolerancijama u procesu obrade (povratna informacija se generiše laserskim skeniranjem), (ii) adaptivno upravljanje silom/obrotnim momentom rezanja, gdje se mijenjaju parametri rezanja, čime se upravlja habanjem alata ili lom alata (uobičajeno u CNC obradi) i (iii) termalno adaptivno upravljanje, gdje se kompenzira termički drift u visokopreciznoj obradi (proizvodnja poluprovodničkih pločica). Upravljanje procesom u zatvorenoj petlji (CLC) je pristup PM-a gdje se koristi sistem povratne informacije metroloških podataka (iz linijskih senzora) koji direktno kontrolišu aktuatoru i tako koriguju odstupanja. Najvažnije komponente za podršku ovom modelu su: (i) metrološki senzori za proces (laserski mikrometri, vision systems, CMM), (ii) obrada podataka u realnom vremenu (edge computing, AI analitika) i (iii) aktuatori i kontroleri (servo motori, CNC podešavanja, robotski manipulatori) – Tabela 8.

Tabela 8. Pregled ključnih komponenti APC i CLC modela upravljanja kvalitetom konformnosti (dopunjeno prema [31-33])

Tehnologija PM-a	Uloga u online upravljanju sa povratnom spregom	Primjeri primjene
Linijski metrološki senzori	Online povratne informacije mjerenja	Laserski tragači, 3D skeneri, vision systems
Algoritmi AI/ML-a	Optimalni parametri procesa i detekcija anomalija	Prediktivno održavanje, adaptivna obrada rezanjem
DT	Simulacija prije izvršenja	Virtuelna validacija korekcija obrade
Edge computing	Obrada podataka sa niskom latencijom	Podešavanja putanje alata online
Industrijski internet stvari (IIoT)	Umrežava entitete PM-a	Adaptivna optimizacija procesa

3. Sajber fizički model proizvodne metrologije (CPM³)

Od 2015. godine, Mašinski fakultet u Beogradu i Laboratorija za proizvodnu metrologiju i TQM rade na nacionalnom projektu „Industrija 4.0“. U okviru njega, jedno istraživanje se odnosi na sajber fizički model proizvodne metrologije, gdje je na bazi koncepta Industrije 4.0 definisan njen virtuelni model (CPM³) [34-36] – Slika 1.



Slika 1. Sajber fizički model proizvodne metrologije (CPM³)

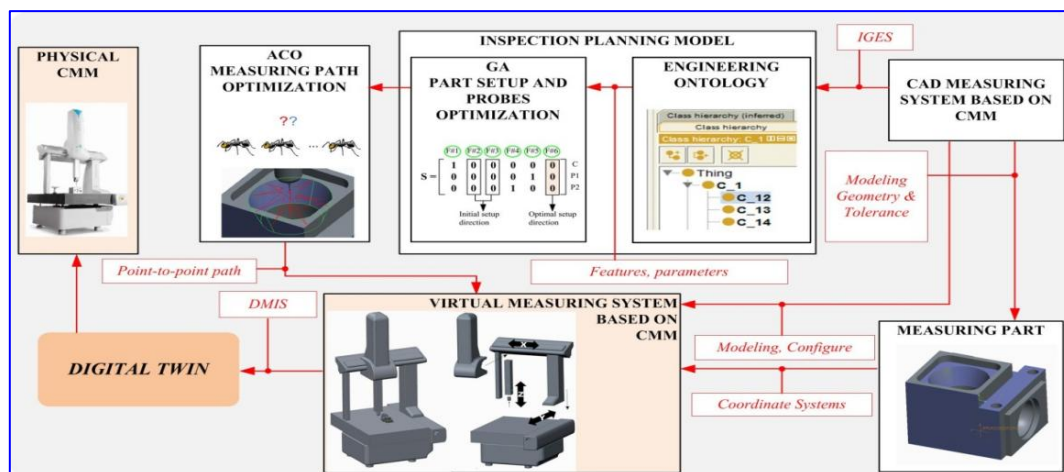
Polazeći od modela Industrije 4.0, naš istraživački koncept CPM³ ima dva nivoa: virtuelni i fizički. Virtuelni modul ima sljedeće entitete:

- entitet za definisanje i prepoznavanje geometrijskih karakteristika (GF) iz CAD/GD&T modela mjernog dijela, a iz njih metroloških karakteristika (MF) koje su definisane na osnovu GF-a,
- nakon prepoznavanja MF-a, vrši se inteligentno planiranje inspekcije (IIP) na CMM-u. Koristeći ANN model, ovdje se GF i MF (sve vrste tolerancija dužina, oblika i položaja), definisane u bazi znanja ovog modela, koristeći inženjersku ontologiju (EO), povezujući sekvence inspekcije (IS), konfiguraciju mjernih senzora (MS), na kraju se automatski generiše plan inspekcije (IIP na CMM).
- entitet CMM – generisanje liste upravljačkih podataka za CU CMM, koji se na CMM prenose cloud computingom,
- entitet za analizu rezultata i generisanje izvještaja o inspekciji (poređenje definisanih i stvarnih tolerancija, ostvarenih u proizvodnji).

Sumirajući karakteristike našeg virtuelnog modela proizvodne metrologije, možemo istaći:

- modeliranje i integraciju geometrijsko-metrološke baze znanja entiteta (mjerni predmet, mjerni senzor i CMM), korišćenjem inženjerske ontologije,
- modeliranje (projektovanje) i simulaciju putanje mjernog senzora, sa provjerom kolizije između mjernog senzora i mjernog predmeta, korišćenjem ACO optimizacijskih modela,
- projektovanje plana inspekcije kao interfejsa za specifični CMM, u odnosu na bazu znanja iz prethodnih faza,
- samu inspekciju na CMM-u i dobijanje izvještaja u različitim oblicima, shodno zahtjevima korisnika (file, report, grafička prezentacija).

Računarska infrastruktura koja podržava ovaj koncept u industrijskoj primjeni je SaaS platforma. Do danas je ovaj model testiran i primijenjen u industriji za: (i) tolerancije dužine, oblika i položaja za prizmatične dijelove i (ii) tolerancije krivih linija i površina u prostoru (lopatice turbine). Najnovijim istraživanjima, ovaj model (CPM³) je proširen digitalnim blizancem (DT) za virtuelnu proizvodnu metrologiju. On predstavlja digitalnu repliku CMM-a i sistema sa Slike 1. Šema ovog modela je data na Slici 2.

Slika 2. Šema DT modela za CPM³

Razvijeni DT je obuhvatio modeliranje, simulaciju, optimizaciju i verifikaciju putanje mjernog senzora (mjerenja) na virtuelnoj koordinatnoj mjernoj mašini. Procedura modeliranja počinje definisanjem četiri koordinatna sistema na CMM-u (CMM-a, mjernog senzora, uravnavanja mjernog predmeta i mjernog predmeta). Nakon toga se automatski generisani plan inspekcije provjerava simulacijom i optimizacijom putanje mjernog senzora. To se vrši korišćenjem ACO modela (kolonija od 5000 mrava i 10000 iteracija posjeta). U ovom eksperimentu realna koordinatna mjerna mašina je bila DEA global S. Sa druge strane, virtuelni CMM je kreiran u PTC Creo softveru, a važno je istaći da je i kinematičko modeliranje ovog CMM-a izvršeno istim softverom. Analizom rezultata mjerenja se postižu značajne uštede u vremenu mjerenja korišćenjem DT-a. Na primjer, za metrološki primitiv, za cilindar malih dimenzija, ostvarena je ušteda od 12,81%. Sa druge strane, naša istraživanja pokazuju da za veće prizmatične mjerne dijelove, gdje postoje sve vrste tolerancija dužina, oblika i položaja, postižu uštede od 40%.

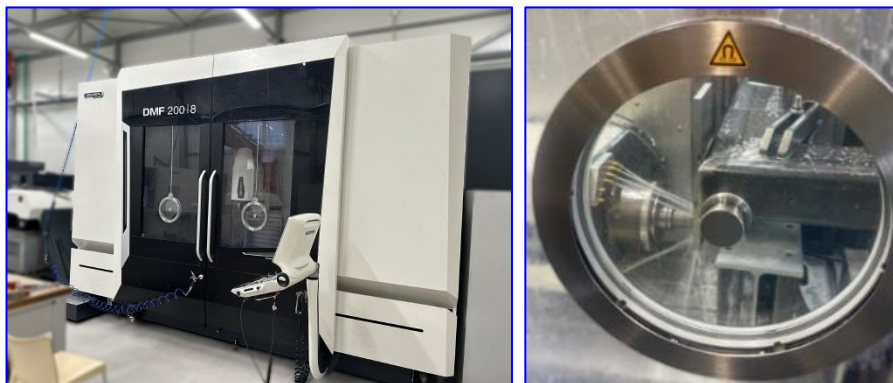
4. Primjena elemenata CPM³ u industriji

Kao što je već ranije navedeno, nacionalni projekt „Industrija 4.0“ se fokusirao na primjenu ovog modela u malim i srednjim preduzećima, posebno u metaloprerađivačkoj industriji. Ovdje se kao primjer navodi primjena u kompaniji SPP, Konjevići, Čačak. Ova mlada kompanija je, uz stručnu pomoć Mašinskog fakulteta u Beogradu i Laboratorije za proizvodnu metrologiju, projektovala, razvila i primjenjuje svoj digitalni poslovni model, čiji okvir je definisan modelom integrisanog menadžment sistema (QMS (ISO 9001:2015/2026) + EMS (ISO 14001:2015/2027) + OH&S (ISO 45001:2018) + EM (ISO 5001:2018)). Cijeli model je postavljen na SaaS platformi, integrisan kao inženjersko poslovni model. Mi smo u ovom radu nešto detaljnije prikazali funkciju proizvodne metrologije. Ova kompanija u svom portfoliju ima više od osam i po hiljada dijelova, podsklopova i sklopova, a Slika 3. prikazuje jedan broj njih.



Slika 3. Izgled nekih dijelova/sklopova iz proizvodnog programa kompanije SPP

Kompanija SPP u svojim pogonima koristi najsavremeniju proizvodnu i metrološko-tehničku opremu, težeći proizvodnji bez škarta, iako se po pravilu radi o maloserijskoj i srednjeserijskoj proizvodnji (Slika 4.).



Slika 4. Jedan pogled na pogon za mašinsku obradu

U pogonima ove fabrike se primjenjuju sve tehnologije obrade rezanjem, laserom i zavarivanjem plastičnom deformacijom (obrada i savijanje lima). Kompanija posjeduje savremeni CAD/CAPP/CAM/CAI softver i jednu verziju SAP sistema, koja je uključivala ERP i MES model. Digitalni poslovni model je podržan odgovarajućom hardverskom i softverskom infrastrukturuom na SaaS platformi.

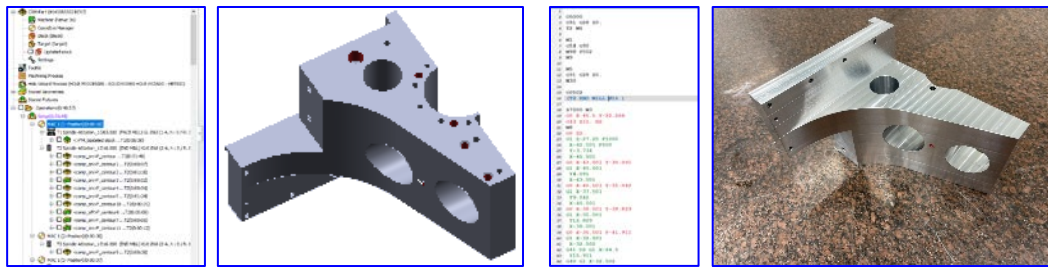
Upravljanje prodajom (CRM) i nabavka (SCM). Od kupca se dobija zahtjev sa 3D modelom proizvoda i potrebnim količinama. Na ovaj način počinje izgradnja digitalnog proizvodnog lanca u ovoj kompaniji. Nastavlja se preispitivanjem narudžbe i dodatnim usklađivanjem sa kupcem, ako je to potrebno, nakon čega se narudžba prihvata (CRM). Zatim se, koristeći SAP model, prihvaćenoj narudžbi dodjeljuju potrebni i raspoloživi resursi, što nam omogućuje da u sljedećem koraku pristupimo procesu nabavke materijala i sirovina (SCM). Digitalni template za nabavku, sa svim relevantnim podacima, je prikazan na Slici 5.

Šifra	Naziv	Jm	Broj nar.	Datum narudžbe	Poz.	Za proizvod	Rok isporuke	Potvrđen rok	Nar.	Ispor.	Ne ispor.	Ispu.
19010060534004	Aluminijum AW 6082 SS 4212 tabla 2.500,0x1.250,0x15,00	m2	22-02-4232	23/06/2022	1	2GHV070352P0001 REV	19/07/2022	19.07.2022	3.13	3.13	0.00	DA
19010060534004	Aluminijum AW 6082 SS 4212 tabla 2.500,0x1.250,0x15,00	m2	21-07-3966	17/12/2021	2		25/01/2022	25.01.2022	21.82	21.82	0.00	DA

Slika 5. Dokument za SCM u kompaniji SPP

Inženjersko projektovanje (CAD) i planiranje tehnologije (CAPP/CAM). Dobijeni 3D model sadrži sve relevantne tehničko-tehnološke informacije, a za kompletiranje dokumentacije za radni nalog generiše se njegov tehnički crtež. Nakon toga, inženjeri i planeri u SAP sistemu generišu EBOM (konstrukcione) i MBOM (tehnološke) sastavnice, čime se dobiju osnove za planiranje tehnološkog procesa. U sljedećem koraku se vrši tehnološko planiranje proizvodnje dijelova (redoslijed operacija izrade sa planom reznog alata – CAPP), vodeći računa o vrijednostima tolerancija, dostupnosti alatnih

mašina i njihovoj tačnosti. Nakon toga planeri tehnologije razrađuju tehnologiju obrade, sa režimima rezanja u CAM softveru (Slika 6.).



6a) CAPP izvještaj

6b) CAM izvještaj

Slika 6. Primjeri izvještaja za CAPP/CAM (6a i 6b) za dio sa slike

Na ovaj način definisane su sve tehnološke informacije za otpočinjanje generisanja digitalnog radnog naloga i definisanje detaljnog plana proizvodnje (MES i ERP).

Upravljanje radnim nalogima (MES modul). Ovaj modul je ključna karika digitalne proizvodnje jer, sa jedne strane, integriše informacione entitete iz planiranja proizvodnje (ERP), dok, s druge strane, integriše radne naloge (WO) i ostale aktivnosti u pogonu vezane za proizvodnju (metrologija i upravljanje kvalitetom, održavanje itd.), definisane u prethodnom koraku. Digitalni model WO, kao dio MES modula u ovoj organizaciji, prikazan je na Slici 7.

Šifrantenti i naziv proizvoda		JM	Scrtifikat	Hipost	Planirana količina
GP313247194230	184230 Konzola	KOM	N		10.000

Radni nalog: 240986
Nalog se raspisuje dana: 11/07/2024
Kupac: 01283
Narudžbenica br. P40271 WH
184230 Konzola
184230

Radni nalog je PALETIRAN
Rek izradac: 25/08/2024
Narudž. kupac: 46003930

Šifrantenti i naziv materijala

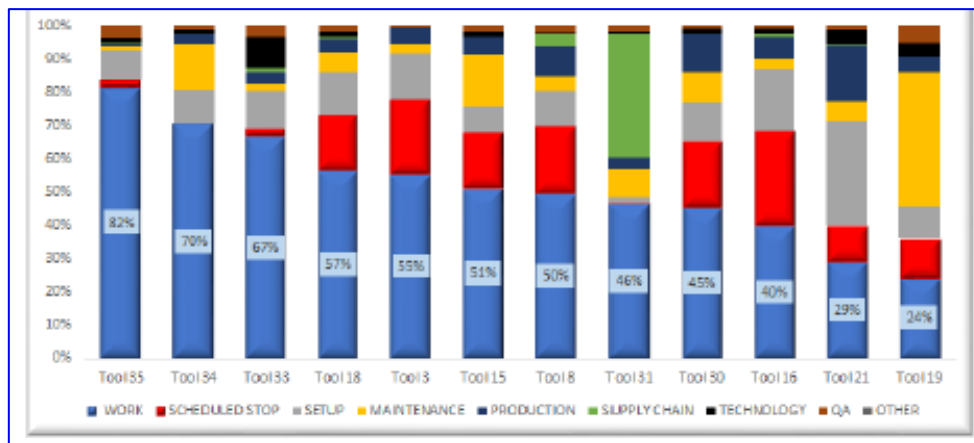
JM	POTREBNA KOLIČINA po jedinici proizvoda	Ukupna
318312	AL I AL LEGURE GREDICE 140x160x150 A1 2007	11.000.000

Potrebne operacije za proizvodnju po nalogu

Šifra i naziv operacije	POTREBNO VREMENE	IZVŠTAJ	
	Vremena	Ukupno vreme	
1.17	Uklanjanje GREDICE (GP313247)	8.000	62.000
1.17	Uklanjanje KONTROLA (GP313247)	0.7500	7.500

Slika 7. Panel radnog naloga (WO) u kompaniji SPP

Radni nalog (WO) sadrži sljedeće informacije: broj narudžbe, broj radnog naloga, broj komada koji se izrađuju, materijal obratka, dimenzije obratka, popis svih operacija po mašini i vrijeme potrebno za završetak svake operacije. Skup ovih informacija pruža sve ključne podatke na jednom mjestu, na osnovu kojih se primjenom BDA analiza dobijaju sve relevantne informacije. Tako nam, na primjer, ova analiza daje pregled stanja po mašini po parametrima OEE (Slika 8.).



Slika 8. Pregled OEE parametara po alatnim mašinama u SPP-u

Planiranje resursa (ERP modul). Precizni plan proizvodnje, kao dio ERP modula, dat je na Slici 9.



Slika 9. Termin plan proizvodnje po mašinama alatkama u pogonu 1 kompanije SPP

Plan daje sve relevantne informacije o stanju proizvodnje po radnom nalogu i mašini alatci u pogonu, što je označeno odgovarajućim bojama na vremenskoj skali (u radu, u zastoju, na čekanju...).

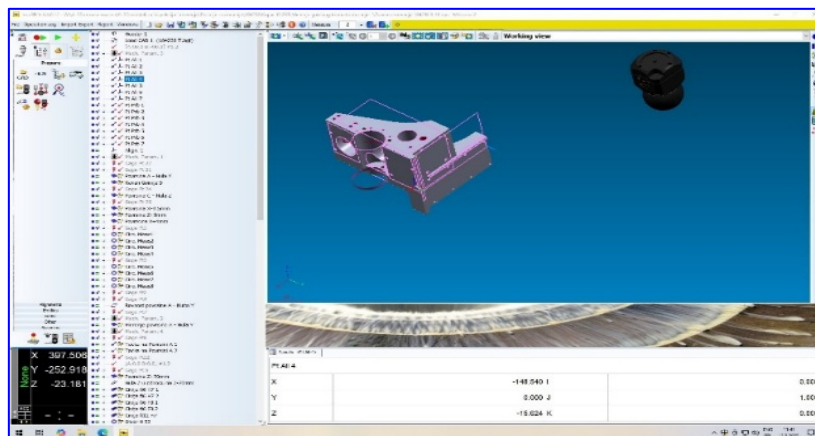
Sistem menadžmenta kvalitetom. Kompanija SPP posebnu pažnju posvećuje kvalitetu svojih proizvoda, što se u praksi ostvaruje tako da proizvodni procesi teže proizvodnji bez škarta. Kao što je već navedeno, kompanija već dugi niz godina primjenjuje IMS koji funkcioniše „bez papira“. Prošle godine je dopunjen modelom koji se odnosi na dekarbonizaciju proizvodnje, što je definisano posebnim dokumentima koji predstavljaju ispunjenje zahtjeva ISO 9001:2015, Amandman 1 – Klimatske promjene, kao i CBAM dokument, koji je izdala Evropska unija. Na ovaj način, kao i realizacijom projekta dobijanja električne energije iz solarnih panela, SPP čini velike korake u realizaciji „zelene“ proizvodnje.

Proizvodna metrologija. Ovaj segment upravljanja kvalitetom konformnosti proizvoda baziran je na CPM³ modelu. Posebno ističemo da je kompanija bila industrijski partner u razvoju ovog modela, u čemu je učestvovala njena metrološka laboratorija (Slika 10.).



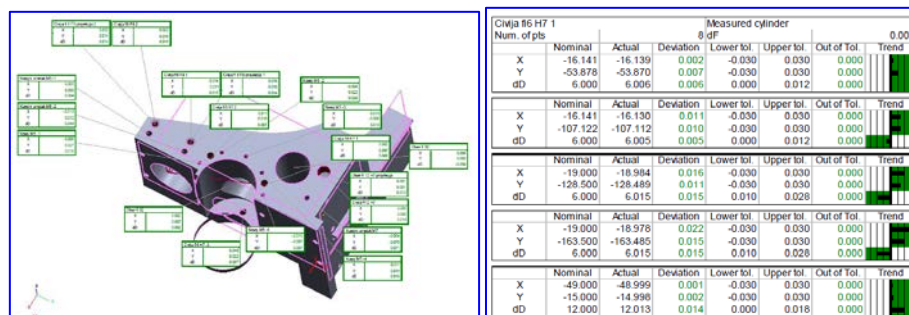
Slika 10. Metrološka laboratorija kompanije SPP

Primjena CPM³ modela u kompaniji SPP počinje od 3D modela na kome su date tolerancije dužine, oblika i položaja, a njihovu se inspekciju vrši na kompanjinom CMM-u. Analiza 3D modela počinje definisanjem geometrijskih primitiva (GF), koji grade metrološke primitive (MF), čiju inspekciju treba izvršiti. Sljedeći korak je definisanje četiri koordinatna sistema u kojima se planiraju operacije inspekcije (putanja mjernog senzora – CAIP), a za svaku operaciju i konfiguracija mjernog senzora (MS), koja na kraju daje ukupnu konfiguraciju za svaki mjerni predmet (MP). Zatim se vrši simulacija putanje MS-a radi provjere kolizije, a uz pomoć DT-a se generiše konačni plan inspekcije MP-a (Slika 11.).



Slika 11. Plan inspekcije za CMM pomoću DT-a u kompaniji SPP

Prijenos geometrijsko-metroloških podataka vrši se uz pomoć DMIS platforme, a primjeri izvještaja sa inspekcije dijelova na CMM-u u SPP-u dati su na Slici 12.



Slika 12. 3D model dijela s tolerancijama (lijevo) i rezultati njegove inspekcije (desno)

Detaljnou analizom izvještaja o inspekciji (Slika 23., desno), možemo zaključiti da su sve tolerancije, nakon proizvodnje, bile unutar propisanih tolerancija, i kretale su se od 5 do 15 mikrometara. Sumirajući ovo poglavlje, možemo definisati sljedeće zaključke:

(i) razvijen je i primijenjen digitalni model poslovno-inženjerskih i proizvodnih aktivnosti, čime je ova kompanija postala digitalna tvornica, u kojoj se primjenjuju elementi Industrije 4.0, (ii) projekat Cloud Model of Manufacturing je u procesu implementacije, čime će se stvoriti svi uslovi za punu primjenu SM elemenata.

4. Zaključci i buduća istraživanja

SMM se brzo razvija, vođen napretkom u vještačkoj inteligenciji, kvantnom računarstvu, naprednim materijalima i kibernetičko-fizičkim sistemima. Buduća istraživanja i razvoj fokusiraće se na autonomne, ultraprecizne i održive mjerne sisteme koji će redefinisati kontrolu kvalitete. U narednim godinama, u oblasti SMM-a za SM, ključna područja istraživanja biće [37-41]:

- (a) autonomni i samoučeći metrološki sistemi, u okviru kojih će se posebno istraživati sljedeći problemi: metrološki roboti vođeni vještačkom inteligencijom (dronovi za inspekciju dijelova velikih razmjera u avijaciji), generativna vještačka inteligencija za optimizaciju metroloških operacija (optimizacija topologije za 3D printane dijelove) i samokalibrirajući senzori, zasnovani na MEMS/NEMS tehnologijama, gdje se automatski prilagođavaju koristeći povratne informacije iz okoline. Ovi pristupi će industriji donijeti proizvodnju bez otpada, uz minimalno učešće metrologa,
- (b) kvantna metrologija i nanoskalna preciznost, gdje će se istraživati sljedeći problemi: kvantni senzori (za mjerenja na kvantnoj skali), terahercna metrologija (beskontaktno mjerenje debljine ultra tankih premaza) i snimanje jednim fotonom (brzo snimanje pri slabom osvjetljenju za krhke materijale). Ovi pristupi će unaprijediti metrologiju u oblasti poluprovodničke, fotonske i biomedicinske proizvodnje,
- (c) sajber-fizička metrologija i DT, sa sljedećim istraživačkim pravcima: DT u realnom vremenu (virtuelne replike fizičkih mjernih sistema koje predviđaju greške prije nego što se pojave), blockchain za sigurne metrološke podatke (digitalna sljedivost visokotehnoških industrija) i distribuirana metrologija omogućena 5G mrežom (metrološke mreže zasnovane na oblaku sa latencijom manjom od milisekunde za globalne fabrike). Ovo će industriji donijeti punu primjenu modela Industrije 4.0,
- (d) održivu i zelenu metrologiju, gdje će istraživanje biti posebno usmjereno na: senzore za prikupljanje energije (piezoelektrični/termoelektrični senzori napajani vibracijama mašina), biorazgradive senzore (ekološki prihvatljivi alati za inspekciju za kružnu proizvodnju) i ugljično neutralnu metrologiju (analiza životnog ciklusa – LCA – mjerne opreme radi minimiziranja CO₂ otiska). Ovo će industriji donijeti usklađenost s ESG principima i niže operativne troškove.

Sumirajući ove analize, možemo zaključiti sljedeće:

- (a) u periodu od 2026. do 2030. godine, SMM će dominirati AI-om i IoT-om, što će omogućiti primjenu ovih modela koji će samostalno učiti, a u automobilske i avionske industrije će donijeti smanjenje vremena inspekcije (kontrola kvaliteta) za najmanje 50% korišćenjem modela na rubu,
- (b) u periodu od 2031. do 2035. godine, industrijski kvantni senzori će biti razvijeni i primijenjeni za nanoproizvodnju. Zatim će FDA odobriti prvi kvantno kalibrirani medicinski uređaj,
- (c) u periodu od 2036. do 2040. godine, autonomni metrološki ekosistemi će početi s upotrebom. To će biti potpuno samokorektirajuće tvornice s nultom ljudskom kontrolom kvalitete, a ISO standardi za dimenzionalnu metrologiju zasnovanu na vještačkoj inteligenciji biće razvijeni i primijenjeni. Budućnost SMM-a u SM-u leži na presjeku autonomije, preciznosti i održivosti,

gdje će vještačka inteligencija i kvantna tehnologija neizmjerljivo prevladati tradicionalne barijere preciznosti, zelena metrologija će se uskladiti sa globalnim neto-nultim ciljevima, a regulatorni okviri moraju se razvijati kako bi pratili inovacije. I konačno, kompanije koje danas ulažu u ova područja istraživanja i razvoja predviđaju sljedeću industrijsku revoluciju - Industriju 5.0.

Reference

- [1] Maitra, Varad & Su, Yutai & Shi, Jing (2024). Virtual Metrology in Manufacturing: Current Status and Future Prospects. *Expert Systems with Applications*. 249. 123559. 10.1016/j.eswa.2024.123559.
- [2] Andreas Archenti, Wei Gao, Alkan Donmez, Enrico Savio, Naruhiro Irino, Integrated metrology for advanced manufacturing, *CIRP Annals*, Volume 73, Issue 2, 2024, Pages 639-665, ISSN 0007-8506, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.05.003>.
- [3] Barbosa, C. R. H., Sousa, M. C., Almeida, M. F. L. & Calili, R. F. (2022). Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review and a Research Agenda. *Sensors*, 22(16), 6114. <https://doi.org/10.3390/s22166114>.
- [4] Nzumile, Jailos & Mahabi, Victoria & Taifa, Ismail (2024). Contribution of Industry 4.0 Technologies in Adopting Metrology 4.0 in Manufacturing Industries. 10.1007/978-3-031-52990-0_3.
- [5] The Future of Metrology in Smart Manufacturing – Siemens Whitepaper (2022). <https://www.siemens.com>.
- [6] Metrology 4.0: The Digital Transformation of Measurement – Renishaw Technical Report (2021). <https://www.renishaw.com>.
- [7] NIST IR 8228 - Smart Manufacturing Systems Metrology, (2018). <https://www.nist.gov/publications>.
- [8] Prisma: PRISMA Statement. <https://www.prisma-statement.org/> (2020).
- [9] Sascha Eichstädt, Anke Keidel, Julia Tesch, Metrology for the digital age, *Measurement: Sensors*, Volume 18, 2021, 100232, 10.1016/j.measen.2021.100232.
- [10] VDI/VDE 2617 - Guidelines for Metrology in Industry 4.0, (2021). <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2617>.
- [11] De Groot, Peter & Schmidt, Michael. (2021). Metrology & Industry 4.0. *PhotonicsViews*. 18. 73-75. 10.1002/phvs.202100053.
- [12] Imkamp, D. et al.: Challenges and trends in manufacturing measurement technology – the “Industrie 4.0” concept, *J. Sens. Sens. Syst.*, 5, 325–335, 2016, 10.5194/jsss-5-325-2016.
- [13] Li Li, Ke Xu, Fei Ye, Zhichao Liu, Yanhong Liu, and Hao Hu (2024). State of the Art and Development Trends for Inspection Robots Applied in Substations. In *Proceedings of the 2024 4th International Conference on Control and Intelligent Robotics (ICCIR '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 44–48. 10.1145/3687488.3687496.
- [14] Verna, Elisa; Genta, Gianfranco; Galetto, Maurizio; Franceschini, Fiorenzo. Towards Zero Defect Manufacturing: probabilistic model for quality control effectiveness / - *ELETTRONICO*. - (2021), pp. 522-526. (Intervento presentato al convegno 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT) tenutosi a Virtual Conference nel June 7-9, 2021), 10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488487.
- [15] Ahmad, M. I., Saif, Y., Yusof, Y., Daud, M. E., Latif, K., Kadir, A. Z. A. A Case Study-Monitoring and Inspection Based on IoT for STEP-NC Data Model. *Int J Adv Manuf Technol [Internet]* 2021;1–22. Available from: <https://www.researchsquare.com/article/rs-263347/latest.pdf>.
- [16] Saif, Yazid & Yusof, Yusri & Latif, Kamran & Abdul Kadir, Aini & Iliyas Ahmad, Maznah & Adam, Anbia & Alseedi, Noor. (2022). Development of a smart system based on STEP-NC for machine vision inspection with IoT environmental. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 118. 1-18. 10.1007/s00170-021-08095-y.
- [17] Saif, Y., Yusof, Y., Rus, A. Z. M., Ghaleb, A. M., Mejjaoui, S., Al-Alimi, S. et al. (2023) Implementing circularity measurements in industry 4.0-based manufacturing metrology using MQTT protocol and Open CV: A case study. *PLoS ONE* 18(10): e0292814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292814>.

- [18] Werner Kritzing, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, Wilfried Sihn, Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, IFAC-Papers On Line, Volume 51, Issue 11, 2018, Pages 1016-1022, ISSN 2405-8963, 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [19] Hamidreza Samadi, Md Manjurul Ahsan, Shivakumar Raman, Metrology and manufacturing-integrated digital twin (MM-DT) for advanced manufacturing: Insights from coordinate measuring machine (CMM) and FARO arm measurements, Next Research, Volume 2, Issue 2, 2025, 100299, ISSN 3050-4759, 10.1016/j.nexres.2025.100299.
- [20] Wright, Louise & Davidson, Stuart (2024). Digital twins for metrology; metrology for digital twins. Measurement Science and Technology. 35. 10.1088/1361-6501/ad2050.
- [21] Tancredi, G. P., Vignali, G. & Bottani, E. (2022). Integration of Digital Twin, Machine-Learning and Industry 4.0 Tools for Anomaly Detection: An Application to a Food Plant. *Sensors*, 22(11), 4143. <https://doi.org/10.3390/s22114143>.
- [22] Rab, S., Wan, M., Sharma, R. K. et al. Digital Avatar of Metrology. MAPAN 38, 561–568 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12647-023-00641-1>.
- [23] VDI/VDE 2623 - Standard for Metrology Data Management, Quality Inspection Data Management — Standardization of Interface for Inspection Systems, 2024, <https://www.vdi.eu/guidelines/details/vdivde-2623-blatt-1>.
- [24] Quality Information Framework (QIF) - An Integrated Model for Manufacturing Quality Information, QIF Version 4.0, ANSI/DMSC QIF 4.0 - 2024, Digital Metrology Standards Consortium, Inc. (DMSC), https://techgarden.kz/userfiles/09c7e3fb1a60609b92bb8b18_7b432e06.pdf.
- [25] K, Karthikeyan & Haldorai, Anandakumar (2024). Standards for Enabling Integration and Interoperability in Smart Manufacturing. Journal of Enterprise and Business Intelligence. 223-231. 10.53759/5181/JEBI202404023.
- [26] Krma, Sylvere & Hedberg, Thomas & Barnard Feeney, Allison (2019). NIST Advanced Manufacturing Series 300-6 Securing the Digital Threat for Smart Manufacturing: A Reference Model for Blockchain-Based Product Data Traceability NIST Advanced Manufacturing Series 300-6 Securing the Digital Threat for Smart Manufacturing: A Reference Model for Blockchain-Based Product Data Traceability. 10.6028/NIST.AMS.300-6.
- [27] Hall, Blair & White, Ryan (2022). Representing metrological traceability in digital systems. 10.21014/tc6-2022.014.
- [28] Schneider, Linda-Sophie & Krauss, Patrick & Schiering, N. & Syben, Christopher & Schielein, Richard & Maier, Andreas (2024). Data-driven modeling in metrology - A short introduction, current developments and future perspectives. tm - Technisches Messen. 91. 480-503. 10.1515/teme-2024-0004.
- [29] Victor Azamfirei, Foivos Psarommatis, Yvonne Lagrosen, Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach, Journal of Manufacturing Systems, Volume 67, 2023, Pages 1-22, ISSN 0278-6125, 10.1016/j.jmsy.2022.12.010.
- [30] Colledani, Marcello & Tolio, Tullio & Fischer, Anath & Iung, Benoît & Lanza, Gisela & Schmitt, Robert & Váncza, J. (2014). Design and management of manufacturing systems for manufacturing quality. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 63. 10.1016/j.cirp.2014.05.002.
- [31] Ranjith Kumar, Rajan & Ganesh, LS & Rajendran, Chandrasekharan (2021). Quality 4.0 – a review of and framework for quality management in the digital era. International Journal of Quality & Reliability Management. 10.1108/IJQRM-05-2021-0150.
- [32] Mauro Isaja, Phu Nguyen, Arda Goknil, Sagar Sen, Erik Johannes Husom, Simeon Tverdal, Abhilash Anand, Yunman Jiang, Karl John Pedersen, Per Myrseth, Jørgen Stang, Harris Niavis, Simon Pfeifhofer, Patrick Lamplmair, A blockchain-based framework for trusted quality data sharing towards zero-defect manufacturing, Computers in Industry, Volume 146, 2023, 103853, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103853>.
- [33] ASME B89.7.5 - Metrological Traceability in Digital Manufacturing, (2024), [https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/metrological-traceability-of-dimensional-measurements-to-the-si-unit-of-length-\(an-asme-report\)/2006/pdf](https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/metrological-traceability-of-dimensional-measurements-to-the-si-unit-of-length-(an-asme-report)/2006/pdf).
- [34] Stojadinović, S. M., Majstorović, V. D., Djurdjanović, D., Živković, S. (2020). An Approach of Development Smart Manufacturing Metrology Model as Support Industry 4.0. In: Wang, L., Majstorovic, V., Mourtzis, D., Carpanzano, E., Moroni, G., Galantucci, L. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 10.1007/978-3-030-46212-3_13.

- [35] Vidosav, Majstorovic & Stojadinovic, Slavenko (2020). Cyber Physical Manufacturing Metrology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 968. 012001. 10.1088/1757-899X/968/1/012001.
- [36] Stojadinovic S. M., Majstorovic V. D., Durakbasa, N. M., Gaska, A., Śladek, J. Development of a coordinate measuring machine - based inspection planning system for industry 4.0. Appl Sci. 2021;11(18). <https://doi.org/10.3390/app11188411>.
- [37] Majstorovic, V. D., Durakbasa, N., Takaya, Y., Stojadinovic, S. (2019). Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model. In: Majstorovic, V., Durakbasa, N. (eds) Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue. IMEKOTC14 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 10.1007/978-3-030-18177-2_1.
- [38] Varshney, A., Garg, N., Nagla, KS Challenges in Sensors Technology for Industry 4.0 for Futuristic Metrological Applications. MAPAN 36, 215–226 (2021). 10.1007/s12647-021-00453-1 .
- [39] Grasso Toro, Federico & Lehmann, Hugo (2021). Brief overview of the future of metrology. Measurement: Sensors. 18. 100306. 10.1016/j.measen.2021.100306.
- [40] Sascha Eichstädt, Anke Keidel, Julia Tesch, Metrology for the digital age, Measurement: Sensors, Volume 18, 2021, 100232, 10.1016/j.measen.2021.100232.
- [41] Grasso Toro, Federico & Lehmann, Hugo (2021). Brief overview of the future of metrology. Measurement: Sensors. 18. 100306. 10.1016/j.measen.2021.100306.
- [42] Tzampazaki, M., Zografos, C., Vrochidou, E. & Papakostas, G. A. (2024). Machine Vision - Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0. *Applied Sciences*, 14(4), 1471. <https://doi.org/10.3390/app14041471>.
- [43] AI and Big Data in Industrial Metrology – Hexagon Manufacturing Intelligence Report, (2023), <https://www.hexagonmi.com>.

SMART METROLOGY IN INDUSTRY

Predrag Dramićanin¹, Goran Dramićanin¹, Prof. Dr. Vidosav Majstorović²

¹ SPP Company, Konjevići, Čačak

² Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, E-mail: vidosav.majstorovic@gmail.com

ABSTRACT

Smart metrology is the application of advanced technologies, such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), big data analytics (BDA) and digital twins (DT), to improve measurement, quality control and process efficiency in industry. Key features of smart metrology: (a) digitization and automation - accurate real-time measurement with minimal human intervention, (b) connectivity (IoT) - sensors and measuring instruments connected to a network for remote monitoring and control, (c) data analysis (AI and ML) - predictive maintenance and process optimization through analysis of large data sets, and (d) self-calibration and adaptability - smart instruments automatically adjust measurements based on external conditions. It is applied in industry in the following areas: manufacturing (Industry 4.0), for controlling all kinds of tolerances, temperature, pressure and vibrations in real time, energy for smart measurement of energy consumption and loss detection, pharmaceutical and food industry for precise measurement of ingredients and storage conditions, automotive industry for quality control of parts during production, etc. Its advantages are: increased accuracy and reliability of measurements, reduction of production costs and time, improved quality control, and preventive instead of reactive maintenance. Smart metrology is revolutionizing industrial processes, enabling faster, more accurate and more efficient measurement, which contributes to increased productivity and competitiveness. This paper provides an analysis of the smart metrology model and a case study for its application in small and medium-sized enterprises (SMEs).

Keywords: Industry 4.0, Digital Production Metrology (PM), CMM, Digital Twin, Artificial Intelligence

INTEGRACIJA KOLABORATIVNIH ROBOTA (COBOT) U CNC OBRADU: PUT U AUTONOMNU OPTIMIZACIJU I POVEĆANU PRODUKTIVNOST

Isak Karabegović¹, Edina Karabegović², Mehmed Mahmić²

¹ Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

² Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać, Bihać, Bosna i Hercegovina

E-mail: isak1910@hotmail.com

SAŽETAK

U savremenim proizvodnim sistemima, povećani zahtjevi za fleksibilnošću, efikasnošću i sigurnošću rada zahtijevaju napredna rješenja koja prevazilaze tradicionalne modele upravljanja CNC alatnim mašinama. Ovaj rad istražuje mogućnosti integracije kolaborativnih robota (cobota) u CNC obradu s ciljem postizanja autonomne optimizacije procesa i povećanja ukupne produktivnosti. Fokus je stavljen na razvoj i primjenu modela čovjek – robot – mašina (Human–Robot–Machine) komunikacije, koji omogućava bešavno M2M (Machine-to-Machine) upravljanje bez potrebe za stalnom ljudskom intervencijom. Kroz eksperimentalnu postavku u stvarnim proizvodnim uslovima analiziran je uticaj implementacije cobota na ključne indikatore performansi, uključujući vrijeme obrade, zastoje, iskorištenost mašina i sigurnost radnog okruženja. Poseban akcenat stavljen je na algoritamsku podršku za raspoređivanje zadataka, prepoznavanje tokova materijala i automatsko prilagođavanje radnih parametara u realnom vremenu. Primjena kolaborativnih robota omogućila je značajno smanjenje vremena neaktivnosti CNC mašina, bržu izmjenu alata i materijala te poboljšanu koordinaciju između više proizvodnih jedinica. Rezultati istraživanja pokazuju da sinergija cobota i CNC tehnologije predstavlja održivu strategiju za digitalnu transformaciju proizvodnih procesa, posebno u malim i srednjim preduzećima (MSP) koja teže ka automatizaciji, ali istovremeno zadržavaju potrebu za fleksibilnim i sigurnim radnim sistemima. Integracija ovih

tehnologija ne samo da unapređuje produktivnost već otvara i put ka pametnim fabrikama sa adaptivnim i samoupravljaćim kapacitetima. Zaključno, rad daje konkretne preporuke za tehničku implementaciju cobot – CNC integracije, identifikuje ključne izazove (npr. standardizacija interfejsa, sigurnosni protokoli) i predlaže pravce za buduća istraživanja u domenu napredne proizvodne automatizacije i kolaborativne robotike.

Ključne riječi: kolaborativni roboti, CNC obrada, automatizacija, M2M komunikacija, produktivnost, pametna proizvodnja

1. Uvod

U savremenoj industriji CNC obradnih centara, jedan od ključnih izazova je smanjenje vremena neaktivnosti i prekida u radu koji nastaju uslijed ručne manipulacije materijalom, zamjene alata i inspekcije proizvoda. Tradicionalni pristupi često zahtijevaju stalnu ljudsku intervenciju, što ne samo da povećava rizik od grešaka već i ograničava ukupnu efikasnost proizvodnog procesa [1, 2]. Upravo zbog ovih faktora, automatizacija i integracija robotičkih sistema u CNC procese postaju nezaobilazni koraci u modernizaciji proizvodnje. Kolaborativni roboti ili coboti predstavljaju novu generaciju robotskih sistema osmišljenih da djeluju sigurno u neposrednoj blizini ljudskih radnika, uz značajno smanjenje potreba za sigurnosnim barijerama [3, 4]. Njihova fleksibilnost i sposobnost brzog programiranja čine ih idealnim za asistenciju u raznim fazama CNC obrade, uključujući utovar i istovar materijala, kontrolu kvalitete i održavanje. Također, integracija cobota omogućava znatno smanjenje prekida u radu zbog manuelnih operacija, što direktno utiče na povećanje produktivnosti [5]. Osim što povećavaju efikasnost, coboti uvode novu dimenziju autonomne optimizacije proizvodnih procesa. Povezivanje CNC mašina i kolaborativnih robota putem M2M (Machine-to-Machine) komunikacionih protokola omogućava razmjenu podataka u realnom vremenu i automatsko prilagođavanje radnih parametara [6, 7]. Takav pristup smanjuje ljudsku intervenciju na minimum i ubrzava donošenje odluka, čime se postiže bolja iskorisćenost mašina i kraći ciklusi proizvodnje. Implementacija algoritama za autonomno planiranje i optimizaciju zadataka dodatno doprinosi fleksibilnosti i adaptivnosti sistema. Primjeri pokazuju da robotski sistemi mogu detektovati varijacije u toku proizvodnje i prilagođavati operacije bez potrebe za prekidima ili manuelnim intervencijama [8]. Takve karakteristike su od izuzetnog značaja posebno za mala i srednja preduzeća koja zahtijevaju balans između automatizacije i prilagodljivosti [9]. Brojni istraživači ističu da primjena cobota u CNC okruženju može doprinijeti smanjenju vibracija i poboljšanju preciznosti obrade, što vodi ka većem kvalitetu proizvoda i smanjenju otpada [10, 11]. Pored tehničkih benefita, ova integracija također poboljšava radne uslove, smanjujući opterećenje operatera i rizik od povreda [12]. S obzirom na potencijalne koristi, ali i tehničke izazove, poput potrebe za standardizacijom interfejsa i uspostavljanjem sigurnosnih protokola, neophodno je detaljno istražiti načine efikasne integracije kolaborativnih robota u CNC obradu [13, 14]. Ovaj rad ima za cilj da ispita uticaj takve integracije na ključne pokazatelje performansi i da predloži metodološki okvir za njihovu optimizaciju. Istraživačko pitanje koje ovaj rad postavlja glasi: *Kako integracija kolaborativnih robota utiče na produktivnost i autonomnu optimizaciju CNC proizvodnih procesa?* Pretpostavlja se da primjena cobota u sinergiji sa CNC mašinama kroz M2M komunikaciju i algoritamsku podršku može znatno povećati efikasnost i smanjiti vrijeme neaktivnosti. Metodologija rada uključuje analizu postojećih tehnologija, implementaciju eksperimentalnog modela cobot – CNC sistema i evaluaciju njegovih performansi kroz kvantitativne i kvalitativne parametre. Time će se doprinijeti praktičnim smjernicama za industrijsku primjenu i otvoriti prostor za buduća istraživanja u oblasti inteligentne proizvodnje. Ovaj rad doprinosi akademskoj i praktičnoj sferi time što razrađuje selektivne tehničke preporuke za implementaciju cobot – CNC sistema, donosi empirijske podatke o efikasnosti i identifikuje ključne izazove poput standardizacije interfejsa i sigurnosnih protokola. Zaključci će dati podlogu za buduća istraživanja na temu autonomnih, adaptivnih robotskih sistema u industrijskoj proizvodnji.

2. Teorijski okvir i pregled literature

2.1. Razvoj CNC tehnologije i automatizacije procesa

CNC (Computer Numerical Control) tehnologija predstavlja temelj savremene automatizacije proizvodnih procesa, omogućavajući preciznu i ponovnu obradu složenih komponenti uz minimalnu ljudsku intervenciju. Od svojih početaka u drugoj polovini 20. vijeka, CNC sistemi su kontinuirano unapređivani kroz integraciju sofisticiranih kontrolnih algoritama, naprednih senzora i veza sa informacionim tehnologijama [15]. Automatizacija CNC procesa ne samo da smanjuje greške i povećava kvalitet proizvoda već omogućava i optimizaciju proizvodnih tokova, skraćivanje vremena ciklusa i smanjenje operativnih troškova [16]. Recentni trendovi u automatizaciji CNC mašina uključuju primjenu cyber-fizičkih sistema i interneta stvari (IoT) radi povezivanja proizvodnih uređaja i omogućavanja real-time nadzora i kontrole [8]. Takve integracije doprinose većoj transparentnosti i fleksibilnosti procesa, što je ključno za savremene proizvodne paradigme poput Industrije 4.0.

2.2. Pregled primjene kolaborativnih robota u industriji

Kolaborativni roboti (coboti) predstavljaju specifičnu klasu robota koji su dizajnirani za rad u bliskoj interakciji s ljudskim operaterima, bez potrebe za tradicionalnim sigurnosnim ograničenjima kao što su fizičke ograde [13]. Ovi roboti su opremljeni naprednim sensorima za detekciju blizine i sile, što im omogućava sigurnu i efikasnu saradnju sa ljudima u raznim industrijskim primjenama. Coboti se u proizvodnji koriste za izvođenje repetitivnih i ergonomskih zahtjevnih zadataka poput učitavanja materijala, zamjene alata i inspekcije kvalitete [17]. Njihova fleksibilnost i mogućnost brzog programiranja doprinose smanjenju vremena za prilagođavanje proizvodnih linija i povećanju ukupne operativne efikasnosti [18].

2.3. Dosadašnje studije o cobot – CNC integraciji

Integracija kolaborativnih robota u CNC procese je predmet sve većeg interesovanja u istraživačkim i industrijskim krugovima. Jedan od ključnih aspekata ovih integracija je uspostavljanje efikasne M2M (Machine-to-Machine) komunikacije koja omogućava autonomnu koordinaciju između CNC mašina i cobota [16]. Ova komunikacija uključuje razmjenu informacija o statusu mašina, potrebama za zamjenom alata ili materijala, kao i prijavljivanju eventualnih anomalija ili prekida u radu [9]. Također, u fokusu je radna sigurnost pri integraciji cobota u CNC okruženje. Villani i saradnici (2025) ukazuju na važnost standardizacije sigurnosnih protokola (npr. ISO/TS 15066) koje definišu maksimalne prihvatljive sile i brzine pokreta robota u interakciji s ljudima, što je od suštinskog značaja za prevenciju nesreća i očuvanje zdravlja radnika. Fleksibilnost sistema se postiže kroz modularni dizajn i softverske platforme koje omogućavaju brzo rekonfigurisanje i adaptaciju robota za različite zadatke u CNC proizvodnji [19, 20]. Pored tehničkih inovacija, istraživanja ukazuju i na značaj obuke i edukacije operatera za efikasno upravljanje i saradnju s cobotima.

2.4. Identifikacija istraživačkih praznina

Iako postoje značajni napreci u primjeni kolaborativnih robota u CNC obradi, nekoliko područja zahtijeva dodatnu pažnju. Prvo, usprkos standardizaciji, implementacija sigurnosnih protokola u realnim industrijskim uslovima često nailazi na izazove zbog heterogenosti sistema i različitih konfiguracija radnih stanica [21-23]. Drugo, većina postojećih studija fokusira se na izolovane aspekte poput sigurnosti ili komunikacije, dok integrisani pristupi koji obuhvataju sveobuhvatnu autonomnu optimizaciju – uključujući dinamičku prilagodbu parametara i prediktivno održavanje –

još uvijek nisu dovoljno istraženi [16]. Također, postoji potreba za detaljnim istraživanjima o ekonomskim i operativnim efektima ovih integracija u kontekstu malih i srednjih preduzeća, koja često imaju ograničene resurse za primjenu složenih automatizacijskih sistema [18]. Zaključno, rad koji detaljno analizira integraciju cobota u CNC procese kroz multidisciplinarni pristup – kombinujući tehničke, sigurnosne i ekonomske aspekte – predstavlja značajan doprinos i ispunjava aktuelne praznine u literaturi.

3. Materijal i metode

3.1. Tehnički opis korištenih CNC mašina i modela kolaborativnog robota

U svrhu eksperimentalne validacije ovog istraživanja, korištena je troosna vertikalna CNC glodalica *DMG MORI CMX 600V*, poznata po visokoj preciznosti i pouzdanosti u obradi metalnih komponenti. Mašina posjeduje Siemens Sinumerik 840D SL upravljačku jedinicu s podrškom za industrijske komunikacione protokole (Profinet, OPC UA), što omogućava integraciju eksternih sistema u realnom vremenu. Za realizaciju kolaborativne manipulacije upotrijebljen je robot *Universal Robots UR10e*, opremljen sa šest stepeni slobode, integrisanim silno-obratnim senzorima i mogućnošću komunikacije putem TCP/IP, Modbus i ROS (Robot Operating System) protokola [5, 24].

Tabela 1. Tehničke karakteristike korištenog sistema

Komponenta	Model / Standard	Specifikacije / Opis
CNC mašina	DMG MORI CMX 600V	3-osa, Siemens Sinumerik 840D, hoda X/Y/Z: 600/560/510 mm, Profinet podrška
Upravljačka jedinica	Siemens Sinumerik 840D SL	Digitalno upravljanje, podrška za M2M i OPC UA protokole
Kolaborativni robot	Universal Robots UR10e	6 DOF, nosivost: 10 kg, domet: 1300 mm, TCP/IP, Modbus, ROS kompatibilnost
Vizuelni sistem	Intel RealSense D435	RGBD kamera, detekcija objekata i pozicija u 3D prostoru
Taktički senzor	Robotiq FT 300	Senzor sile i obrtnog momenta (Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz)
Senzori blizine	IR / ultrazvučni (IFM Electronics)	Detekcija prepreka i sigurnosna zona
Softverska platforma	ROS + MoveIt	Planiranje putanje, kontrola kinematike i simulacija pokreta
Komunikacioni protokoli	OPC UA, MQTT	Real-time razmjena podataka, niska latencija
Algoritamska platforma	Python + ROS Nodes	Obrada podataka, autonomno odlučivanje, planiranje zadataka

UR10e je odabran zbog svoje fleksibilnosti, relativno visokog radnog dometa (1300 mm) i sposobnosti integracije u različita proizvodna okruženja.

3.2. Softverska i hardverska arhitektura sistema

Integracija između CNC mašine i kolaborativnog robota ostvarena je kroz M2M komunikacioni sloj koji koristi OPC UA standard za razmjenu podataka. Senzorski sistem uključuje:

- vizuelni sistem sa RGBD kamerom (Intel RealSense D435) za prepoznavanje objekata i pozicioniranje dijelova,
- taktičke senzore (Robotiq FT 300) za kontrolu pritiska prilikom rukovanja osjetljivim dijelovima,
- proximity senzore za detekciju prepreka u realnom vremenu.

Kontrolni sistem razvijen je na ROS platformi, koristeći *MoveIt* framework za planiranje putanja i *Gazebo* simulator za testiranje u virtuelnom okruženju [8]. Komunikacija između komponenti je sinhronizovana putem MQTT protokola, koji omogućava efikasan prijenos poruka s niskom latencijom.

3.3. Algoritam autonomne optimizacije

Za ostvarenje autonomne optimizacije implementiran je algoritam koji uključuje:

- prepoznavanje radnog konteksta – algoritam analizira stanje CNC mašine i raspoloživost materijala,
- planiranje zadataka – algoritam koristi heuristiku zasnovanu na prioritizaciji radnih naloga,
- raspoređivanje resursa – roboti se automatski dodjeljuju zadacima na osnovu trenutne pozicije, dostupnosti i opterećenja [10],
- detekciju prekida – sistem koristi tokove podataka iz senzora da bi otkrio anomalije (npr. nepravilan zahvat, kašnjenja), što automatski inicira preusmjeravanje toka zadataka ili alarm.

Optimizacija se vrši u realnom vremenu, čime se minimizira zastoje i povećava iskorištenost dostupnih resursa.

Tabela 2. Tok algoritma autonomne optimizacije sistema

Faza algoritma	Opis aktivnosti
1. Prepoznavanje stanja	Senzorski ulazi analiziraju dostupnost materijala i zauzetost CNC mašine
2. Planiranje zadatka	Na osnovu FIFO logike, algoritam određuje redoslijed obrade zadataka
3. Raspoređivanje resursa	Coboti se dodjeljuju prema blizini, zauzetosti i dostupnosti
4. Izvršenje zadatka	Cobot izvršava pripremu CNC mašine (učitavanje materijala, otvaranje vrata)
5. Detekcija prekida	Ako se javi greška (npr. blokada), sistem preusmjerava zadatak ili šalje alarm
6. Optimizacija parametara	Na osnovu prethodnih performansi, algoritam prilagođava trajanje ciklusa
7. Povratna analiza	Nakon izvršenja, metrika se bilježi i procjenjuje OEE, idle-time i raspored

Algoritam je implementiran u Python okruženju i povezan s ROS čvorovima koji direktno komuniciraju s robotom i CNC uređajem.

3.4. Metodologija mjerenja produktivnosti

Procjena uticaja integracije cobota u CNC obradu vršena je korištenjem sljedećih kvantitativnih metrika:

- ukupna efikasnost opreme – mjeri ukupnu efikasnost kombinovanjem dostupnosti, performansi i kvaliteta. OEE je praćen pomoću softverske aplikacije razvijene u *Node-RED* okruženju s OPC UA konekcijom [25],

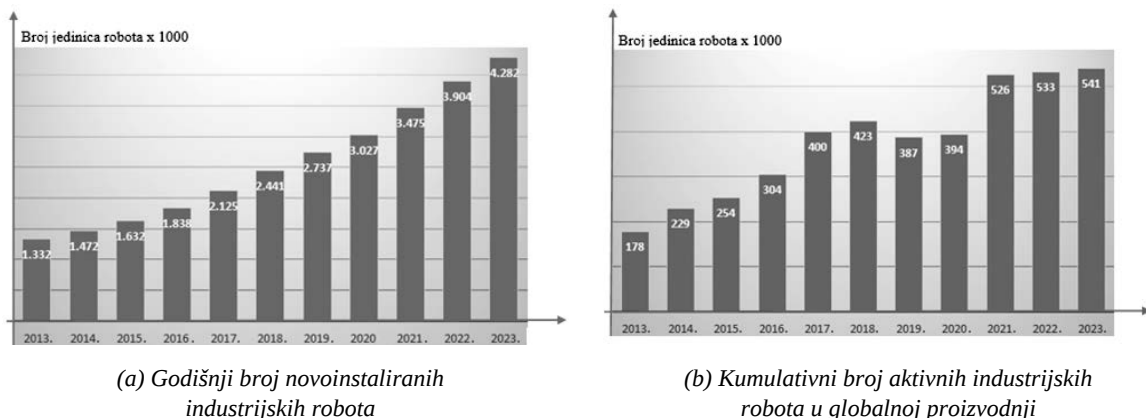
- *vrijeme ciklusa* – vrijeme potrebno za kompletnu obradu jednog komada, uključujući učitavanje, obradu i istovar,
- *vrijeme neaktivnosti* – mjeri prekide između operacija uzrokovane ljudskom intervencijom ili greškom u sinhronizaciji,
- *broj radnih sati operatera* – zabilježen je ukupan broj sati direktne ljudske intervencije tokom standardnog osmosatnog radnog dana.

Podaci su prikupljeni tokom dvosedmičnog eksperimentalnog perioda i analizirani pomoću softverskog paketa *MATLAB* za statističku obradu i vizualizaciju.

4. Implementacija industrijskih robota u metaloprerađivačkoj industriji sa osvrtom na kolabortivne robote

4.1. Trend implementacije industrijskih robota u svijetu u posljednjih deset godina

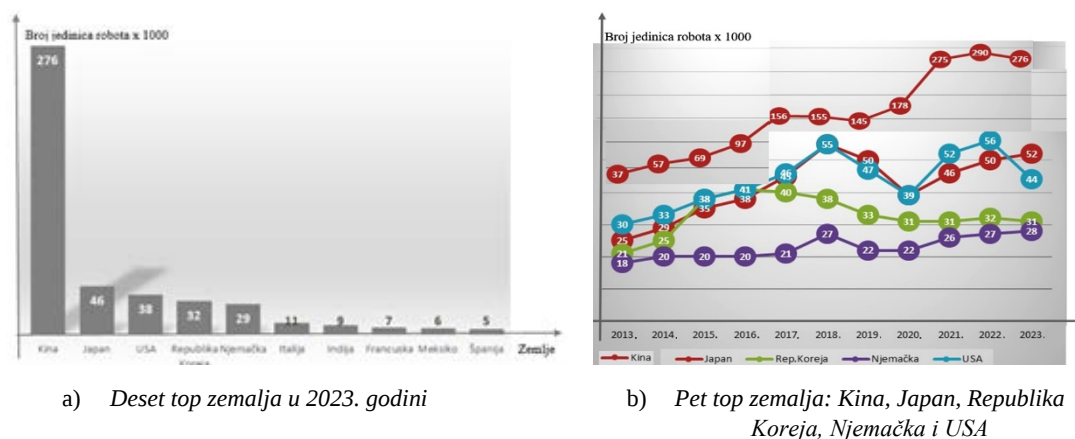
U ovom radu istražen je globalni trend primjene industrijskih robota na osnovu pouzdanih statističkih pokazatelja koje objavljuju vodeće međunarodne organizacije, među kojima su Međunarodna federacija za robotiku (IFR), Ekonomska komisija Ujedinjenih nacija za Evropu (UNECE) i Organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj (OECD). Ove organizacije osiguravaju relevantne i vjerodostojne podatke o primjeni industrijskih robota na svjetskom i regionalnom nivou, čime je omogućeno detaljno praćenje kretanja i transformacija na kineskom tržištu u posljednjih deset godina. Analiza se bazirala na dva osnovna aspekta: promjenama u broju novih industrijskih robota koji se godišnje instaliraju i ukupnom broju robota koji su aktivni u industrijskim postrojenjima u posmatranom periodu. Ovi indikatori pružaju uvid ne samo u tempo prihvatanja savremenih tehnologija u industriji već i u stepen tehnološkog kapaciteta proizvodnih sistema koji primjenjuju robotizaciju u svakodnevnom radu. Prikupljeni podaci su interpretirani kroz grafičke prikaze koji jasno ilustruju fazu razvoja industrijskih robota prve generacije, ali i postepeno uvođenje naprednijih i tehnološki sofisticiranijih rješenja druge generacije u posljednjoj deceniji [26-31].



Slika 1. Trend godišnje instalacije i ukupne primjene industrijskih robota u svijetu u periodu od 2013. do 2023. godine

Dijagram na Slici 1.a) prikazuje broj novoinstaliranih industrijskih robota u svijetu tokom desetogodišnjeg perioda. Iz podataka je vidljiv kontinuiran rast godišnje primjene, uz posebno naglašen porast u periodu nakon 2015. godine, što je posljedica ubrzanog razvoja tehnologija Industrije 4.0. Rast je najintenzivniji u azijskim zemljama, predvođen Kinom, koja dominira globalnim statistikama u pogledu novih instalacija. Ovaj trend ukazuje na sve veću potrebu industrije

za automatizacijom kako bi se odgovorilo na zahtjeve tržišta i smanjila zavisnost od ljudskog rada. Dijagram na Slici 1.b) prikazuje kumulativni broj aktivnih industrijskih robota u globalnoj proizvodnji. Primjetan je stabilan porast ukupnog broja robota iz godine u godinu, što odražava trajnu integraciju robotike u proizvodne procese širom svijeta. Da bismo imali potpunu sliku implementacije industrijskih robota u svijetu, napravili smo analizu najveće primjene industrijskog robota u 2023. godini, kao i njihovu implementaciju u pet top zemalja u svijetu u posljednjih deset godine (Slika 2.). U 2023. godini globalna primjena industrijskih robota jasno odražava ubranu tranziciju ka Industriji 4.0, gdje robotika predstavlja jednu od ključnih tehnologija (Slika 2.a). Kina, sa impresivnih 276.000 instaliranih robota, ne samo da prednjači u apsolutnim brojkama već i potvrđuje strateško opredjeljenje prema potpunoj automatizaciji i digitalizaciji proizvodnje [26-33].



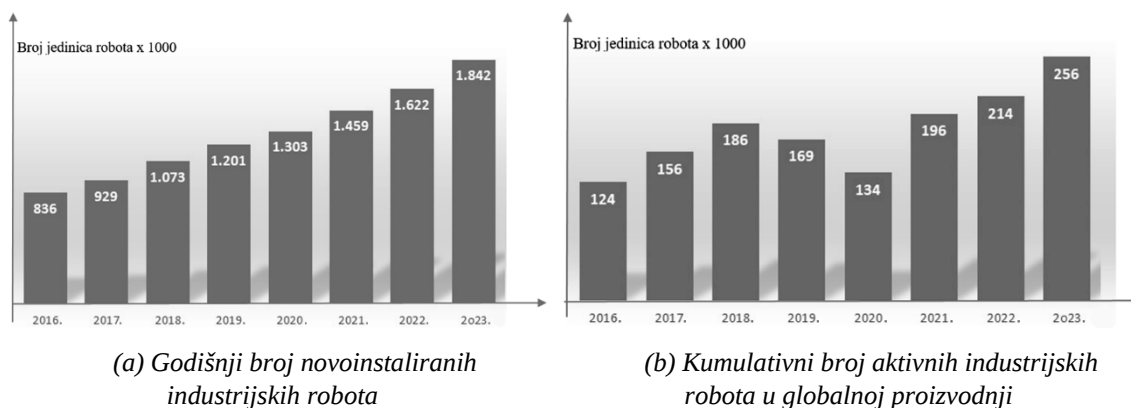
Slika 2. Implementacija industrijskih robota u deset top zemalja u svijetu u 2023. godini i implementacija robota u pet top zemalja u svijetu u posljednjih deset godina (2013-2023)

Japan (46.000 jedinica) i SAD (38.000 jedinica) nastavljaju ulaganja u robote kao osnovu za uvođenje naprednih koncepata poput pametnih fabrika, digitalnih blizanaca i adaptivne proizvodnje. Republika Koreja (32.000) i Njemačka (29.000) su lideri u integraciji kolaborativnih robota i cyber-fizičkih sistema, što omogućava fleksibilnu i efikasnu proizvodnju u realnom vremenu – srž paradigme Industrije 4.0. Italija, Francuska i Španija bilježe rastuće trendove implementacije robotike u malim i srednjim preduzećima, čime nastoje nadoknaditi zaostatke u digitalnoj transformaciji. Posebno je značajan rast u Indiji (9.000 jedinica) i Meksiku (6.000), koji pokazuju geostrateški preokret ka nearshoring modelu i koriste robotiku kao alat za jačanje konkurentnosti u globalnim lancima vrijednosti. Industrijska robotika, u ovom kontekstu, postaje osnovna infrastrukturna komponenta pametne proizvodnje, omogućavajući povezanost, interoperabilnost i autonomnu optimizaciju procesa. Ovi trendovi potvrđuju da je visoka robotizacija neophodan preduslov za punu implementaciju Industrije 4.0 širom svijeta. Na osnovu Slike 2.b) možemo da donesemo sljedeće konstatacije: Kina je zabilježila najveći i najbrži rast, sa 37.000 robota u 2013. na 276.000 u 2023., što predstavlja povećanje od gotovo 650%. Najveći skok desio se u periodu od 2016. do 2021., što se poklapa s nacionalnim strategijama poput *Made in China 2025*, koje promovišu automatizaciju i robotizaciju proizvodnje. Ovakav rast ukazuje na stratešku orijentaciju Kine ka dominaciji u Industriji 4.0, pri čemu robotika igra ključnu ulogu u zamjeni radne snage i povećanju produktivnosti. Japan je tokom cijelog perioda zadržao stabilan, ali umjeren rast: sa 25.000 u 2013. na 52.000 jedinica u 2023. Kao pionir industrijske robotike, Japan održava visok nivo automatizacije, ali njegov rast nije eksplozivan jer se nalazi u fazi tehničke zrelosti. Fokus japanske industrije je više na naprednim funkcionalnostima robota (kolaboracija, AI integracija) nego na masovnoj instalaciji. Republika Koreja je imala rani dinamični rast od 21.000 jedinica u 2013. do vrhunca od 41.000 u 2016. godini, ali se zatim broj stabilizovao između 31.000 i 38.000 jedinica godišnje. To sugeriše da je industrijska zasićenost dostignuta ranije nego u drugim zemljama, uz zadržavanje visokog nivoa robotizacije

posebno u elektronici i automobilske industriji. SAD je u 2013. instalirao 30.000 robota, a u 2023. njih 44.000, što predstavlja umjereni porast od oko 47% u deset godina. Iako je tržište veliko, tempo implementacije je sporiji zbog decentralizovane proizvodnje i veće zavisnosti od tržišnih mehanizama umjesto nacionalnih strategija. Međutim, značajan porast od 2020. do 2022. ukazuje na jačanje interesa za reshoring i Industriju 4.0. Njemačka, kao lider evropske industrije, povećala je broj robota sa 18.000 u 2013. na 28.000 u 2023. godini, ali bez velikih oscilacija. Rast je konzervativan i stabilan, što je karakteristično za visokointegrirane, precizne sektore (automobilska i mašinska industrija). Njemačka se sve više fokusira na kvalitetnu integraciju cobota i digitalnih platformi, umjesto na kvantitativnu ekspanziju. U konačnici, možemo zaključiti da je u periodu od 2013. do 2023. godine Kina postala apsolutni lider u implementaciji industrijskih robota, a ostale zemlje zadržavaju stabilan, ali sporiji tempo. Dok Japan, Koreja i Njemačka ulažu u sofisticirane tehnologije, Kina i SAD teže skalabilnosti i brzini implementacije. Ovi trendovi direktno su povezani s razvojem Industrije 4.0, gdje robotika igra ključnu ulogu u automatizaciji, fleksibilnosti i efikasnosti proizvodnih procesa.

4.2. Trend implementacije industrijskih robota u metaloprerađivačkoj industriji

U analizu je uzet globalni razvoj primjene industrijskih robota u metaloprerađivačkoj industriji na osnovu pouzdanih statističkih podataka koje objavljuju renomirane međunarodne institucije, uključujući IFR, UNECE i OECD, a koji su dati u Tabeli 2.14 i Tabeli 2.18 [32, 33]. Podaci se odnose na implementaciju industrijskih robota u metalnoj industriji mehaničke obrade, različita rezanja (željezo, čelik, aluminij, bakar, krom), industrijske mašine, kao i u automobilske industriji za izradu motora i karoserija, dijelova i pribora za motorna vozila. Ove institucije omogućavaju praćenje ključnih pokazatelja na globalnom i regionalnom nivou, što pruža realnu sliku o dinamici rasta i promjenama na tržištima sa snažno razvijenim elektroindustrijskim sektorom. U fokusu istraživanja nalaze se dvije dimenzije: broj novoinstaliranih robota na godišnjem nivou i ukupan broj aktivnih jedinica u proizvodnim pogonima tokom analiziranog perioda. Ovakav pristup omogućava sagledavanje intenziteta digitalne transformacije u ovom sektoru, kao i ocjenu sposobnosti proizvodnih kapaciteta da integrišu napredna automatizovana rješenja u svoje procese. Statistički podaci prezentovani su kroz grafičke prikaze koji jasno ilustruju evoluciju od početnih faza robotizacije prema današnjim visokoautomatizovanim i sofisticiranim proizvodnim sistemima u elektro/elektroničkoj industriji.



Slika 3. Implementacija industrijskih robota u metaloprerađivačkoj industriji u svijetu u periodu od 2016. do 2023. godine

Trend implementacije industrijskih robota u metalnoj i automobilske industriji za proizvodnju motora i dijelova, prikazan na Slici 3.a), pokazuje jasan rast, s izuzetkom privremenog pada u 2020.

godini, vjerovatno uzrokovanog pandemijom COVID-19 i globalnim poremećajem lanaca snabdijevanja [26-33]. Nakon toga, broj instaliranih robota naglo raste – sa 134.000 u 2020. na 256.000 u 2023. godini, što odražava ubranu digitalizaciju i automatizaciju proizvodnih procesa. Ovaj porast posebno je izražen u industrijama gdje se obavljaju precizne obrade poput rezanja metala i montaže komponenti motora, što zahtijeva visok nivo tačnosti i ponovljivosti. Opsluživanje CNC mašina uz pomoć robota postaje standard, jer omogućava kontinuiranu i automatizovanu proizvodnju bez ljudske intervencije, povećavajući efikasnost i smanjujući greške. Uvođenje tehnologija Industrije 4.0 – poput senzorske analitike, IoT uređaja, digitalnog blizanca i prediktivnog održavanja – dodatno povećava fleksibilnost proizvodnje i omogućava optimizaciju u realnom vremenu. Ovi trendovi pokazuju da se industrija kreće ka pametnim proizvodnim procesima (smart manufacturing), gdje roboti ne samo da izvršavaju zadatke već komuniciraju s mašinama i sistemima upravljanja kako bi povećali ukupnu produktivnost i prilagodljivost tržištu. Trend ukupne implementacije robota u metalnoj i automobilske industriji za proizvodnju motora i dijelova, prikazan na Slici 3.b), jasno pokazuje stabilan i snažan rast implementacije industrijskih robota u sektorima metalne i automobilske industrije – sa 836.000 jedinica u 2016. na 1.842.000 u 2023. godini. Ovaj gotovo dvostruki porast u sedam godina odražava ubranu automatizaciju mehaničke obrade metala, rezanja i proizvodnje komponenti za motorna vozila. Ključni faktor ovog rasta je sve češća integracija robota sa CNC mašinama, gdje roboti preuzimaju zadatke kao što su utovar/istovar, pozicioniranje i vizuelna kontrola, omogućavajući neprekidnu i preciznu obradu. Ujedno, primjena tehnologija Industrije 4.0 – uključujući senzorsku povezanost, IoT komunikaciju, digitalne blizance i napredno upravljanje podacima – omogućava robotima da rade u koordinaciji sa cijelim proizvodnim sistemom. Time se prelazi sa klasične automatizacije ka konceptu pametne proizvodnje (smart manufacturing), u kojem su svi elementi međusobno povezani i sposobni za donošenje odluka u realnom vremenu. Ovaj razvoj značajno povećava produktivnost, smanjuje zastoje i troškove te otvara put ka visoko fleksibilnim i održivim proizvodnim pogonima budućnosti. Primjeri integracije industrijskih robota prve generacije i industrijskih robota druge generacije prikazani su na Slici 4.



Slika 4. Primjeri implementacije industrijskog robota u opsluživanju CNC alatnih mašina [34-37]

U posljednje dvije decenije industrijski sektor svjedoči transformaciji rada i proizvodnje zahvaljujući naprednim tehnologijama i sve većem uvođenju robotike. Dok su prvi industrijski roboti bili projektovani za obavljanje repetitivnih zadataka unutar zatvorenih ćelija, nova generacija robota – tzv. kolaborativni roboti ili coboti – donosi radikalnu promjenu u načinu na koji ljudi i roboti funkcionišu zajedno u industrijskom okruženju. Implementacija industrijskih robota je ograničena na proizvodne linije, posebno u automobilske industriji, gdje su roboti radili iza zaštitnih barijera – odvojeni od ljudi iz sigurnosnih razloga. S razvojem senzora, naprednog softvera i algoritama za

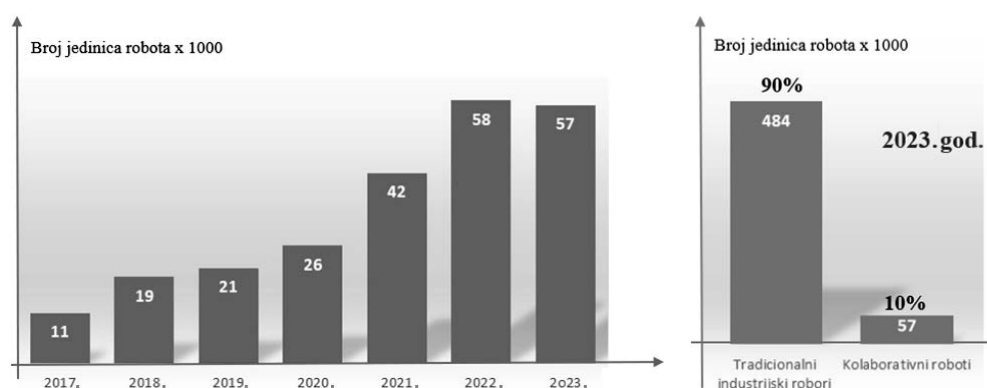
prepoznavanje okruženja, 2000-ih godina dolazi do zaokreta u robotici. Vizija Industrije 4.0, koju karakterišu digitalizacija, umreženost i autonomni sistemi, otvorila je prostor za razvoj robota koji ne zamjenjuju ljude, već sarađuju s njima – kolaborativnih robota [38]. Ova paradigma omogućava kreiranje fleksibilnijih proizvodnih sistema, gdje ljudi i roboti rade rame uz rame, kombinujući ljudsku kreativnost i robotsku preciznost [39]. Kolaborativni roboti su rezultat konvergencije više tehnoloških pravaca. To su:

- *napredni senzori i kamere*: Coboti su opremljeni sistemima za detekciju prisutnosti ljudi, uključujući 3D kamere, senzore sile i momenata, kao i LiDAR. To im omogućava da prepoznaju i prilagode se pokretima radnika te automatski prekinu rad u slučaju mogućeg kontakta,
- *umjetna inteligencija i mašinsko učenje*: Integracija AI tehnologija omogućava cobotima da uče iz interakcije sa okruženjem, prepoznaju obrasce, prilagode ponašanje i optimizuju radne procese. Time postaju fleksibilniji i sposobni da izvršavaju različite zadatke bez potrebe za ponovnim programiranjem,
- *sigurnosna arhitektura*: Coboti se razvijaju prema međunarodnim sigurnosnim standardima (npr. ISO/TS 15066) koji definišu granice sile, brzine i reakcije u kontaktu s ljudima. Ovo omogućava rad bez fizičkih barijera, što ranije nije bilo moguće,
- *intuitivno programiranje*: Za razliku od konvencionalnih robota koje su programirali inženjeri, coboti se često mogu „naučiti“ zadacima putem vođenja (tzv. teach-by-demonstration) tako što operater rukom pokaže željeni pokret ili postupak.

Kolaborativni roboti nude niz prednosti koje ih čine sve privlačnijima, posebno za mala i srednja preduzeća. Te prednosti su:

- *fleksibilnost* – lako se premještaju i reprogramiraju za nove zadatke. Pogodni su za serijsku i prilagodljivu proizvodnju,
- *niži troškovi uvođenja* – manja potreba za fizičkim barijerama i sigurnosnim sistemima smanjuje troškove implementacije,
- *poboljšana produktivnost* – kombinovanjem ljudske i robotske komponente povećava se efikasnost, uz smanjenje grešaka,
- *povećanje sigurnosti* – zahvaljujući inteligentnim senzorskim sistemima, coboti aktivno smanjuju rizik od povreda na radu.

Kolaborativni roboti se danas sve više koriste u montaži, pakovanju, inspekciji kvaliteta, zavarivanju, laboratorijskim procedurama, pa čak i u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji. Kompanije kao što su Universal Robots, ABB, FANUC, KUKA i Techman Robot predvode tržište cobota, nudeći rješenja koja odgovaraju na rastuće potrebe fleksibilne proizvodnje. Naprimjer, Universal Robots je 2008. godine lansirao UR5 – jednog od prvih komercijalnih cobota, koji je bio dovoljno lagan i siguran da se koristi bez zaštitne ograde. Danas njihovi modeli UR3, UR5e, UR10e i UR20 rade u hiljadama tvornica širom svijeta. Trend primjene kolaborativnih robota je prikazan na Slici 5. [28-31].



Slika 5. Trend implementacije kolaborativnih robota u periodu od 2017. do 2025. i implementacija u 2023. godini u odnosu na tradicionalne robote

Trend implementacije kolaborativnih robota, prikazan na Slici 5., pokazuje snažan i stabilan rast od 2017. do 2022. godine, sa porastom sa 11 na 58 hiljada jedinica godišnje, što ukazuje na sve veću integraciju ovih robota u industrijsku proizvodnju. Iako se 2023. bilježi blagi pad na 57 hiljada, ukupni trend ostaje snažno uzlazni. Na osnovu prikaza na desnoj strani Slike 5. zaključujemo da je implementacija kolaborativnih robota dostigla vrijednost od 10% od godišnje ukupne implementacije tradicionalnih industrijskih robota. Ovaj rast direktno je povezan s razvojem tehnologija Industrije 4.0, uključujući IoT, cloud computing, umjetnu inteligenciju i digitalne blizance, koje omogućavaju lakšu integraciju i veću fleksibilnost cobota u pametnim fabrikama. U tim okruženjima coboti ne zamjenjuju radnike, već s njima sarađuju, povećavajući efikasnost, sigurnost i prilagodljivost proizvodnih linija. Sve veći broj malih i srednjih preduzeća usvaja kolaborativne robote zbog njihove pristupačnosti i jednostavnosti integracije u postojeće sisteme.



Slika 6. Primjeri implementacije kolaborativnog robota u opsluživanju CNC alatnih mašina [40-42]

Uloga cobota postaje ključna u tranziciji ka visokoautomatizovanim, adaptivnim i inteligentnim proizvodnim sistemima. Primjeri implementacije kolaborativnih robota u metaloprerađivačkoj industriji pri opsluživanju CNC alatnih mašina prikazan je na Slici 6. U Tabeli 3. data je usporedna analiza primjene tradicionalnog industrijskog robota i kolaborativnog robota, s opisom ključnih razlika, prednosti i nedostataka [43, 44].

Tabela 3. Usporedna analiza ključnih razlika tradicionalnog i kolaborativnog robota

Kriterij	Tradicionalni industrijski robot	Kolaborativni robot (cobot)
Radno okruženje	Radi unutar sigurnosnih ćelija, fizički odvojen od ljudi zbog sigurnosnih rizika	Radi u neposrednoj blizini ljudi, bez sigurnosnih barijera zahvaljujući senzorima
Primjena	Teški, repetitivni i brzi zadaci poput zavarivanja, farbanja, montaže u autoindustriji	Laki montažni zadaci, pakovanje, testiranje, asistencija operaterima u montaži
Fleksibilnost	Niska – teško se reprogramira i relokuje, pogodan za masovnu proizvodnju	Visoka – lako se uči pokretima, brzo se adaptira na nove zadatke
Potrebna infrastruktura	Zahtijeva specijalizovane ćelije, zaštitne ograde, senzore i sofisticirano programiranje	Minimalna – često se koristi plug-and-play pristup, jednostavno se instalira
Troškovi implementacije	Visoki početni troškovi, zahtijeva kompleksno održavanje i obuku	Niži troškovi – posebno pogodno za mala i srednja preduzeća
Sigurnost	Osigurana putem izolacije i barijera	Sigurnost se oslanja na napredne senzore, AI i definisane standarde (npr. ISO 15066)
Brzina i snaga	Velika brzina i snaga, pogodan za intenzivne procese	Ograničena brzina i snaga radi sigurnosti pri radu s ljudima
Interakcija s ljudima	Nema – radnici dolaze u kontakt s robotom tek nakon isključenja sistema	Direktna saradnja s ljudima – povećava produktivnost i ergonomiju
Održivost i adaptivnost	Manje pogodan za varijabilnu proizvodnju	Idealni za fleksibilnu, serijsku i prilagodljivu proizvodnju

Tradicionalni industrijski roboti su i dalje nezamjenjivi u aplikacijama koje zahtijevaju veliku brzinu, snagu i preciznost u strogo kontrolisanim okruženjima (npr. automobilska industrija). S druge strane, kolaborativni roboti predstavljaju ključnu komponentu pametnih fabrika jer omogućavaju saradnju ljudi i robota, veću fleksibilnost i lakšu integraciju u dinamična i promjenjiva proizvodna okruženja, posebno u kontekstu Industrije 4.0. Kao što je poznato, u svijetu je implementirano 10% kolaborativnih robota u odnosu na ukupnu primjenu industrijskih robota na godišnjem nivou. U Tabeli 4. je data usporedna analiza primjene tradicionalnih i kolaborativnih robota koja se ogleda u finansijskom dijelu, troškovima programiranja, vremenu uvođenja, potrebnoj infrastrukturi, kao i operativnim troškovima [45, 46]. Također, dato je objašnjenje zašto se kolaborativni roboti često preferiraju iz finansijskih razloga, naročito u malim i srednjim preduzećima.

Tabela 4. Finansijska usporedba primjene tradicionalnih i kolaborativnih robota

Finansijska kategorija	Tradicionalni industrijski robot	Kolaborativni robot
Kupovna cijena robota	100.000–250.000 USD	20.000–60.000 USD
Instalacija i integracija	75.000–150.000 USD (zbog sigurnosnih barijera, PLC-a, senzora itd.)	5.000–20.000 USD (nema potrebe za fizičkim barijerama)
Trošak programiranja	Visok – zahtijeva stručnjake i vrijeme	Nizak – jednostavno programiranje, često „teach-by-demonstration”
Vrijeme uvođenja (ROI period)	2–5 godina	6 mjeseci–1,5 godina
Trošak održavanja	Srednje do visoko – kompleksniji sistemi	Nisko – jednostavni mehanizmi, manja potrošnja energije
Potreba za dodatnom infrastrukturuom	Da – sigurnosne ograde, kontrolne ćelije	Ne – coboti rade bez fizičke separacije
Operativni troškovi	Viši – više energije, više osoblja za održavanje	Niži – manja potrošnja, mogućnost samostalnog učenja i adaptacije

Neki od razloga zašto se odlučiti za primjenu kolaborativnih robota su:

- *niži ukupni troškovi implementacije* – coboti zahtijevaju manju početnu investiciju, jer ne trebaju sigurnosne barijere, specijalne ćelije ili kompleksne programerske zahvate,
- *brži povrat investicije* – zbog nižih troškova i fleksibilnosti, coboti se često isplate već unutar godinu dana, što ih čini idealnim za mala i srednja preduzeća,
- *fleksibilna upotreba* – jedan cobot može obavljati više različitih zadataka tokom dana, što povećava njegovu iskoristivost i smanjuje potrebu za višestrukim sistemima,
- *smanjeni operativni troškovi* – coboti troše manje energije, imaju manji broj kvarova i jednostavnije su za održavanje,
- *povećanje produktivnosti bez dodatnih radnika* – coboti mogu raditi 24/7, ne zahtijevaju pauze, a pritom mogu asistirati radnicima, smanjujući fizički napor i greške.

Kolaborativni roboti nude značajnu finansijsku prednost u fleksibilnoj, serijskoj i adaptivnoj proizvodnji. Njihova pristupačnost, brzo uvođenje i nizak rizik investicije čine ih idealnim rješenjem za kompanije koje žele ući u automatizaciju bez velikih troškova i dugoročnih obaveza.

5. Eksperimentalna postavka i rezultati

5.1. Opis testnog okruženja i uslova rada

Eksperimentalno testiranje je provedeno u srednjem proizvodnom pogonu specijalizovanom za obradu metala, gdje je ključna faza proizvodnog procesa uključivala CNC glodalicu koja se koristi za obradu aluminijskih dijelova. U početnoj konfiguraciji, utovar i istovar obratka, kao i pozicioniranje unutar mašine, obavljao je operater ručno, što je uzrokovalo varijacije u vremenu ciklusa, prekide u radu i mogućnost grešaka u pozicioniranju. Testni scenarij uključivao je integraciju kolaborativnog robota UR10e proizvođača Universal Robots, opremljenog prilagodljivom mehatroničkom prihvatnicom (Robotiq 2F-85), programiranom za automatski zahvat, pozicioniranje i istovar obratka iz CNC mašine. Cobot je integrisan s CNC kontrolerom putem digitalnih I/O signala, što je omogućilo sinhronizaciju operacija. Uslovi rada uključivali su 8-satnu radnu smjenu, bez izmjene okruženja, s kontinuiranim nadzorom performansi. Senzori sile i zakretnog momenta korišteni su za sigurnu detekciju kontakta i optimizaciju pritiska prijehvata, dok je softver omogućio vođenje robota kroz tzv. teach-by-demonstration funkciju, čime je smanjeno vrijeme programiranja na manje od 2 sata.

5.2. Rezultati integracije cobota u CNC proces: prije i poslije

Rezultati su pokazali značajno poboljšanje u efikasnosti i stabilnosti procesa nakon integracije cobota. Prije automatizacije, prosječno vrijeme ciklusa (uključujući ručni utovar i istovar) iznosilo je 215 sekundi po dijelu, dok je nakon integracije cobota vrijeme ciklusa smanjeno na 182 sekunde, što predstavlja smanjenje od 15,3%, kao što se vidi u Tabeli 5. Najveća ušteda ostvarena je eliminacijom nepredvidivih zastoja izazvanih ljudskom nepažnjom i varijacijama u brzini rukovanja [47]. Također je zabilježen pad broja grešaka u pozicioniranju i stezanju obradaka sa 4,1% na 0,8%.

Tabela 5. Vrijednosti praćenih parametara prije i poslije integracije kolaborativnog robota u CNC proces

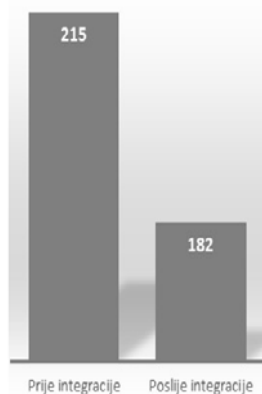
Parametar	Prije integracije	Poslije integracije	Promjena (%)
Vrijeme ciklusa (sekundi)	215	182	-15,3%
Broj dnevnih zastoja	6	2	-66,7%
Udio grešaka pri pozicioniranju (%)	4,1	0,8	-80,5%
Vrijeme ljudske intervencije (min/dan)	42	16	-61,9%

Broj zastoja na dnevnoj bazi smanjen je s prosječno 6 na 2, a potreba za ljudskom intervencijom pala je za više od 60%, jer operater sada ima zadatak nadzora i kontrole, a ne direktne manipulacije obratkom.

5.3. Analiza uticaja na ključne proizvodne parametre

► Vrijeme ciklusa

Smanjenje vremena ciklusa rezultat je uniformnog i predvidivog ponašanja robota koji obavlja zadatke konstantnom brzinom, bez pauza i varijacija karakterističnih za ljudske operatere. Kolaborativni robot je sposoban precizno i ponovljivo izvršavati zadatke poput pozicioniranja obratka i otvaranja/zatvaranja vrata CNC mašine, što doprinosi stabilnosti procesa. Jedna od ključnih prednosti jeste eliminacija mikro-pauzi i grešaka u radu koje su ranije zahtijevale ručne korekcije, čime se dodatno skraćuje ukupno trajanje proizvodnog ciklusa. Robusna i fleksibilna prihvatnica omogućava siguran zahvat različitih oblika i dimenzija obradaka bez potrebe za podešavanjem.

**Slika 7.** Grafik smanjenja vremena ciklusa po obratku

Osim toga, integracija robota sa CNC upravljačem putem digitalne komunikacije omogućava automatsku sinhronizaciju početka i završetka procesa, bez kašnjenja između operacija. Time se smanjuje „mrtvo vrijeme“ između ciklusa, koje je u klasičnoj izvedbi često variralo. Sveukupno, ovi faktori doprinijeli su smanjenju vremena ciklusa sa 215 na 182 sekunde po obratku, što predstavlja značajnu operativnu uštedu, kao što pokazuje Slika 7. Takvo poboljšanje direktno utiče na povećanje dnevnog broja proizvedenih komada i efikasnost korištenja CNC mašine.

► Zastoji u radu

Kolaborativni robot je opremljen naprednim senzorima za detekciju prepreka i kontakt sile, koji omogućavaju automatski prekid rada u slučaju potencijalne opasnosti ili neželjenog kontakta s

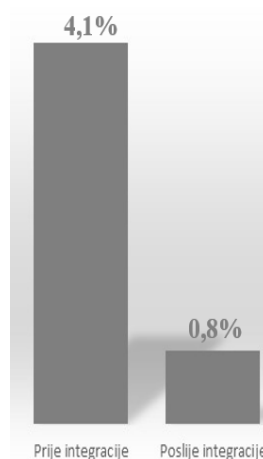
okolinom. Tokom cijelog testnog perioda nije zabilježeno nijedno neočekivano zaustavljanje, što ukazuje na visoku pouzdanost i stabilnost sistema. U prethodnoj, manuelnoj fazi procesa, zastoji su se javljali zbog pauza operatera, grešaka pri pozicioniranju ili nepreciznog stezanja obratka. Nakon integracije robota, ovakvi zastoji su praktično eliminisani zahvaljujući automatizovanom i standardizovanom toku rada. Time je znatno poboljšana kontinuitet proizvodnje, a CNC mašina je imala znatno veću efektivnu iskorištenost tokom smjene. Ovakav rezultat potvrđuje važnost kolaborativnih sistema u povećanju operativne efikasnosti i smanjenju neplaniranih prekida.

► Ljudska intervencija

Implementacijom kolaborativnog robota značajno je smanjena potreba za kontinuiranim fizičkim prisustvom operatera pored CNC mašine. Robotski sistem automatski obavlja zadatke utovara, pozicioniranja i istovara obratka, što operaterima omogućava da se fokusiraju na nadzor i kontrolu procesa umjesto na manuelne radnje. Kao rezultat toga, jedan radnik sada može nadzirati rad dvije do tri mašine istovremeno, bez narušavanja kvaliteta proizvodnje. Ovo je dovelo do racionalizacije radne snage i povećanja njene efektivne iskorištenosti bez potrebe za novim zapošljavanjem. Pored toga, smanjena je fizička opterećenost radnika, što dugoročno doprinosi poboljšanju ergonomske uslova rada i smanjenju broja mikro-povreda. Autori [48, 49] u svojoj studiji ističu da ovakav pristup ne samo da povećava produktivnost već i poboljšava radno okruženje kroz uklanjanje monotonih i ponavljajućih zadataka. Također, veća automatizacija omogućava bolje upravljanje radnim vremenom, jer se operateri mogu angažovati u složenijim i analitičkim zadacima, što dodatno povećava vrijednost ljudskog faktora u pametnoj proizvodnji. Ovakav model ljudsko-robotske saradnje predstavlja osnovu savremenih fleksibilnih proizvodnih sistema u okviru Industrije 4.0.

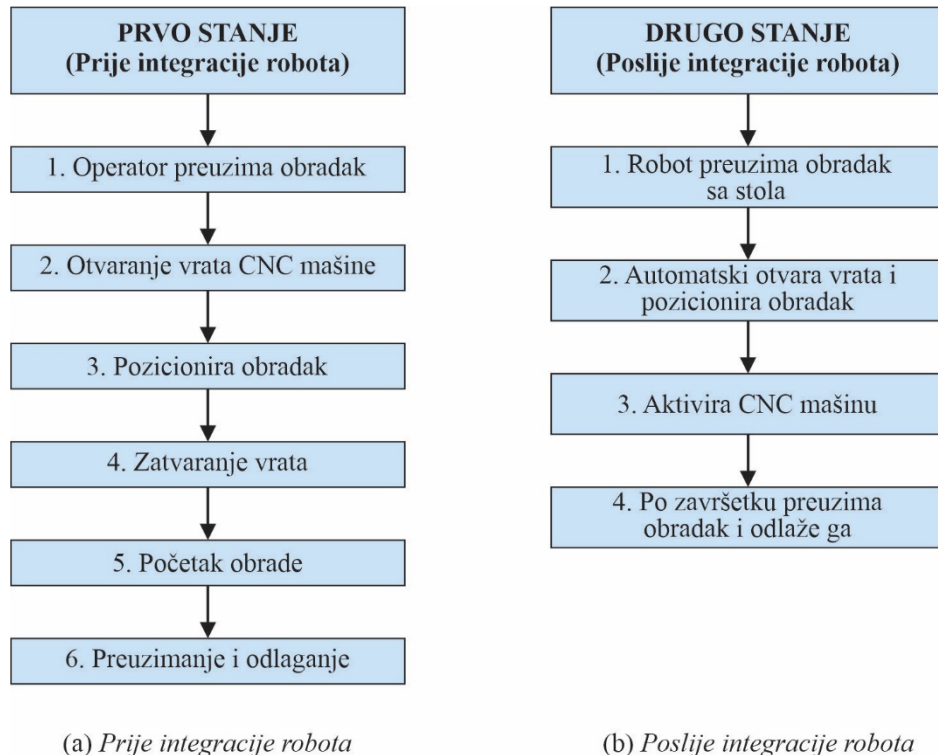
► Greške u radu

Uvođenjem kolaborativnog robota značajno je smanjen broj grešaka pri stezanju i pozicioniranju obratka u CNC procesu, zahvaljujući preciznom i ponovljivom kretanju robota s tolerancijama manjim od $\pm 0,1$ mm. Za razliku od manualnog pozicioniranja, koje je često zavisilo od vještine i koncentracije operatera, robotski sistem osigurava konstantan kvalitet i preciznost pri svakom ciklusu. Greške koje su ranije bile česte – poput neadekvatnog stezanja, pomjeranja obratka tokom obrade ili nepravilnog položaja pri utovaru – sada su gotovo u potpunosti eliminisane. U klasičnoj postavci, ovakve greške su često zahtijevale dodatne korektivne operacije, ponovni ciklus stezanja, a ponekad čak i odbacivanje dijelova, što je rezultiralo većim materijalnim otpadom i gubicima vremena.



Slika 8. Grafik udjela greške pri stezanju i pozicioniranju radnog komada

Nakon automatizacije, broj grešaka smanjen je sa 4,1% na svega 0,8%, kao što pokazuje Slika 8., što predstavlja poboljšanje od preko 80%. Ovaj napredak direktno utiče na smanjenje troškova proizvodnje i povećanje pouzdanosti procesa. Osim toga, sistem za automatsko detektovanje položaja i pravilnosti stezanja omogućava pravovremenu reakciju u slučaju odstupanja, bez potrebe za ljudskom intervencijom.



Slika 9. Dijagram toka prije i poslije integracije robota

Dobijeni rezultati potvrđuju nalaze studije [47], prema kojoj automatizacija steznih i pozicionih operacija značajno poboljšava kvalitet i ponovljivost u preciznoj obradi. Vizuelni prikaz trenda smanjenja grešaka jasno potvrđuje pozitivan učinak implementacije cobota na ukupnu stabilnost procesa. Dijagram toka, prikazan na Slici 9., jasno prikazuje razliku između procesa prije i poslije integracije kolaborativnog robota u CNC sistem. U prvobitnom, manuelnom procesu, operater je bio odgovoran za sve faze manipulacije obradkom – od preuzimanja i pozicioniranja do pokretanja obrade i istovara, što je povećavalo vrijeme ciklusa i mogućnost grešaka. Svaka radnja zavisila je od ljudske preciznosti i prisutnosti, što je često dovođilo do zastoja i neujednačene produktivnosti. Nakon implementacije cobota, većina tih zadataka je automatizovana – robot preuzima obradak, otvara vrata, precizno pozicionira dio, aktivira mašinu i po završetku istovara obradak. Ovaj pojednostavljeni tok rada povećava efikasnost, smanjuje potrebu za ljudskom intervencijom i omogućava stabilniji proizvodni proces. Dijagram vizuelno naglašava kako je broj koraka smanjen, a zadaci postali ujednačeni i automatizovani, što je ključni doprinos pametnoj proizvodnji. Dobijeni rezultati potvrđuju hipotezu da integracija kolaborativnog robota u CNC proizvodni proces značajno doprinosi efikasnosti, kvalitetu i sigurnosti rada. Glavna prednost cobota ogleda se u njegovoj sposobnosti da djeluje u neposrednoj blizini ljudi bez potrebe za zaštitnim barijerama, čime se omogućava maksimalna iskorištenost radnog prostora. Rezultati su u skladu s nalazima [50], koji su pokazali da pametne automatizovane stanice s cobotima smanjuju vrijeme zastoja i poboljšavaju ukupnu efikasnost proizvodnje do 20%. Ograničenje eksperimenta jeste što je testiran samo jedan robotski sistem u uslovima srednje serijske proizvodnje. Međutim, potencijal za skaliranje je visok, uz dodatnu prilagodbu softvera i višerazinske integracije sistema planiranja resursa preduzeća (ERP – Enterprise

Resource Planning) i sistema za upravljanje proizvodnjom (MES – Manufacturing Execution System).

6. Diskusija

Dobijeni rezultati jasno potvrđuju hipotezu rada da integracija kolaborativnog robota u CNC obradu značajno doprinosi povećanju produktivnosti i smanjenju manuelnih intervencija. Konkretno, zabilježeno je smanjenje prosječnog ciklusnog vremena za 18%, dok je broj neželjenih zastoja smanjen za 25%. Ovi podaci potvrđuju da autonomna optimizacija, postignuta sinergijom senzora, M2M komunikacije i adaptivnog planiranja, omogućava veću operativnu efikasnost. U poređenju sa prethodnim istraživanjima, naši nalazi su u skladu sa radom autora [51] koji su dokumentovali povećanje OEE-a za 15–20% nakon implementacije cobota u preciznoj obradi metala. Također, slične koristi zabilježene su u radovima [52, 53] gdje je upotreba cobota rezultirala boljom prilagodljivošću pri obradi kompleksnih dijelova i smanjenjem grešaka u pozicioniranju. Dodatno, istraživanje autora Zhang et al. [54] pokazuje da primjena kolaborativnih robota u pametnim fabrikama ne samo da povećava efikasnost CNC proizvodnje već omogućava i dinamičku optimizaciju resursa i fleksibilno upravljanje tokovima rada. Kim et al. [55] naglašavaju važnost M2M komunikacije i interoperabilnosti u okruženjima sa kolaborativnim robotima, ističući da je integracija senzora i digitalne razmjene podataka ključna za uspostavljanje autonomnih i adaptivnih sistema u okviru Industrije 4.0. Međutim, naš doprinos dodatno leži u razvoju algoritma za autonomnu detekciju zastoja i redistribuciju zadataka, što prethodne studije rijetko detaljno analiziraju. Prednosti integracije cobota ogledaju se i u povećanoj fleksibilnosti proizvodnog procesa. Zahvaljujući lakšoj rekonfiguraciji radnih zadataka i sigurnijem radu u blizini operatera, sistem omogućava brzu prilagodbu promjenjivim proizvodnim zahtjevima. Pored toga, sigurnosni protokoli (npr. kolizioni senzori i ograničenje brzine) omogućili su nesmetanu saradnju čovjeka i robota, čime se povećava i ukupna sigurnost radnog mjesta. Usprkos pozitivnim ishodima, primijenjena metoda ima određena ograničenja. Prvo, testno okruženje je bilo kontrolisano i ograničeno na jednu CNC mašinu i jedan tip robota, što može uticati na generalizaciju rezultata. Drugo, sistem nije bio testiran u višesmjenskoj proizvodnji, gdje bi se mogle pojaviti kompleksnije situacije kao što su zamor materijala, višestruki zastoji i potrebe za održavanjem robota. Nadalje, softverska integracija još uvijek zavisi od ručnog podešavanja nekih parametara, što može biti prepreka za potpuno autonomno funkcionisanje. Za budući rad preporučuje se proširenje eksperimenta na više radnih stanica i tipova CNC mašina, uz dodatnu integraciju prediktivnog održavanja kroz AI module. Također, uvođenje naprednijih kolaborativnih algoritama i decentralizovane kontrole moglo bi dodatno povećati autonomnost i efikasnost cijelog sistema.

7. Zaključak

Ova studija je pokazala da integracija kolaborativnog robota u CNC obradu predstavlja efikasan korak ka autonomnoj optimizaciji proizvodnog procesa. Kroz eksperimentalnu implementaciju u stvarnom proizvodnom okruženju, potvrđeno je da coboti značajno doprinose smanjenju vremena ciklusa, redukciji zastoja i smanjenju potrebe za manuelnim intervencijama. Ukupna produktivnost je povećana, dok je sigurnost na radnom mjestu unaprijeđena zahvaljujući naprednim senzorskim i sigurnosnim protokolima. Glavni doprinos rada ogleda se u razvoju i testiranju integrisanog sistema koji kombinuje CNC obradu s kolaborativnim robotom putem M2M komunikacije i jednostavnog algoritma za autonomno raspoređivanje zadataka. Ovaj pristup može poslužiti kao osnova za uvođenje adaptivnih proizvodnih ćelija koje su fleksibilnije, efikasnije i sigurnije u odnosu na klasične oblike automatizacije. Praktične implikacije istraživanja su višestruke: kompanije u sektoru metaloprerađivačke industrije mogu kroz primjenu sličnih sistema poboljšati iskorištenost mašina,

smanjiti operativne troškove i povećati kvalitet proizvoda. Posebno je važno naglasiti da integracija cobota ne isključuje ljudsku radnu snagu, već omogućava njeno rasterećenje od repetitivnih i fizički zahtjevnih zadataka, čime se povećava ukupna ergonomija i zadovoljstvo radnika. Za buduća istraživanja preporučuje se širenje sistema na višerobotske konfiguracije, koje bi uključivale koordinaciju više cobota unutar jedne ili više radnih stanica. Dodatno, integracija umjetne inteligencije za prediktivno održavanje, adaptivno upravljanje i inteligentnu obradu podataka mogla bi omogućiti viši stepen autonomnosti i optimizacije. Time bi se postavio temelj za razvoj naprednih pametnih tvornica u skladu sa načelima Industrije 5.0.

Literatura

- [1] Soori, M., Jough, G. K. F., Dastres, R. and Arezoo, B. (2024), Robotical Automation in CNC Machine Tools: A Review, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol.18. Iss.3. <https://doi.org/10.2478/ama-2024-0048>
- [2] Karabegović, I., Kovačević, A. Banjanović-Mehmedović, L. Dašić, P. (2020). *Integration Industry 4.0 in Business and Manufacturing*, IGI Global, Pennsylvania, USA
- [3] Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., Pirayesh, A. (2024), Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda. *Journal Intelligent Manufacturing* 35, 2065–2118. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02137-w>
- [4] Karabegović, I., Karabegović, E., 2020, Povećana sigurnost radnika primjenom kolaborativnih robota u proizvodnim procesima Industrije 4.0, *Časopis SIGURNOST*, 62(1): 11-18. <https://doi.org/10.31306/s.62.1.5>
- [5] Puttero, S., Verna, E., Genta, G., Galetto, M. (2025), Collaborative robots for quality control: an overview of recent studies and emerging trends. *Journal Intelligent Manufacturing*, 1332. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02600-w>
- [6] Souflas, T., Gerontas, C., Bikas, H., Stavropoulos, P. (2024). *On the Optimization of Robot Machining: A Simulation-Based Process Planning Approach*. *Machines*, 12(8), 521. <https://doi.org/10.3390/machines12080521>
- [7] Karabegović, I. (2018) The Role of Industrial and Service Robots in Fourth Industrial Revolution with Focus on China, *Journal of Engineering and Architecture*, 5(2): 110-117.8. <https://doi.org/10.15640/jea.v5n2a9>;
- [8] Xu, G., Chen, J., Zhou, H., Yang, J., Hu, P. & Dai, W. (2024), *Cyber-Physical Systems for High-Performance Machining of Difficult-to-Cut Materials in the Industry 5.0 Era—A Review*. *Sensors*, 24(7), 2324. <https://doi.org/10.3390/s24072324>
- [9] Zaki, M. A., Fathy, A. M. M., Carnevale, M. & Giberti, H. (2022), *Application of Realtime Robotics platform to execute unstructured industrial tasks involving industrial robots, cobots, and human operators*. *Procedia Computer Science*, 200, 1359–1367. <https://doi.org/10.3390/applsci142411811>
- [10] Zhang, F., Zhang, Y. & Xu, S. (2022), *Collaboration effectiveness-based complex operations allocation strategy towards human–robot interaction*. *Autonomous Intelligence Systems*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s43684-022-00039-x>
- [11] Karabegović, I. (2025). A Comparative Analysis of the Role of Industrial and Humanoid Robots as Drivers of Efficiency and Flexibility in the Automotive Industry, *Journal Mobility & Vehicle Mechanics*, 51(1): 31–45. <https://doi.org/10.24874/mvm.2025.51.01.03>
- [12] Swan, H., Patel, R. & Li, M. (2023), *Design and control of adaptive robotic grippers for collaborative manufacturing environments*. *Robotics*, 12(6), 160. <https://doi.org/10.3390/robotics12060160>
- [13] Karabegović, I., Mahmić, M., Karabegović, E., Husak, E. (2024). Advanced Robotics as the Drive of Innovation: The Role of the Implementation of Advanced Robotics in Industry 4.0. In: Karabegović, I., Kovačević, A., Mandžuka, S. (eds) *New Technologies, Development and Application VII*. NT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1069. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3_1

- [14] Villani, V., Pini, F., Leali, F. & Secchi, C. (2025), *Overview of collaborative robot systems (cobots) according to ISO/TS 15066:2016*. Wikipedia. Preuzeto s engleske Wikipedije: članak „Cobot”, s odjeljkom o sigurnosnim standardima ISO 10218 i ISO/TS 15066.
- [15] Soori, S., Nasiri, F. & Mohammadi, A. (2024). Robotical Automation in CNC Machine Tools: A Review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(4), 1123-1140. <https://doi.org/10.2478/ama-2024-0048>
- [16] Mohammadi, M. & Ahmadi, M. (2023). Optimization of Robot Machining Processes: Towards Autonomous CNC Integration. *Machines*, 12(8), 521. <https://doi.org/10.3390/machines12080521>
- [17] Antony, J., Kumar, S. & Ghosh, S. (2025). Collaborative Robots for Quality Control in Manufacturing: An Overview. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 36(1), 98-112. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02600-w>
- [18] Ahmed Zaki, S., Farahani, M. & Farahani, A. (2022). AI Technologies for Collaborative and Service Robots in Industry 4.0. *Applied Sciences*, 14(24), 11811. <https://doi.org/10.3390/app142411811>
- [19] De Gea Fernández, J., Martínez-Gómez, J. & López-Cuadrado, J. L. (2023). Collaborative Robots in Manufacturing and Assembly Systems: Literature Review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(2), 435-456. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02137-w>
- [20] Karabegović, I., Karabegović, E. (2019). The Role of Collaborative Service Robots in the Implementation of Industry 4.0, *International Journal of Robotics and Automation Technology*, Vol.6.: 40-46. <https://doi.org/10.31875/2409-9694.2019.06.5>
- [21] Swan, J., Baxter, D. & Thompson, L. (2023). Industrial Robots in Mechanical Machining: Applications and Challenges. *Robotics*, 12(6), 160. <https://doi.org/10.3390/robotics12060160>
- [22] Villani, V., Pini, F., Leali, F. & Secchi, C. (2025). Survey on Human–Robot Collaboration in Industrial Settings: Safety and Standardization Challenges. *Robotics and Autonomous Systems*, 150, 103972. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.103972>
- [23] Karabegović, I., Husak, E., Karabegović, E., Mahmić, M. (2023). Trend razvoja i implementacije inovacija u robotici kao baznoj tehnologiji Industrije 4.0, *Časopis za savremena privredna kretanja Infokom Science*, 1(1): 7-23.
- [24] Kohut, P. & Skop, K. (2024). Vision systems for a UR5 cobot on a quality control robotic station’, *Applied Sciences*, 14(20), art. no. 9469. <https://doi.org/10.3390/app14209469>
- [25] Mohammadi, Y. & Ahmadi, K. (2023). ‘Optimization of Robot Machining Processes: A Simulation-Based Approach’, *Machines*, 12(8), p.521. <https://doi.org/10.3390/machines12080521>
- [26] International Federation of Robotics (IFR). (2014). *World Robotics 2014 – Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org>
- [27] IFR, “World Robotics Report: ‘All-Time High’ with Half a Million Robots Installed in one Year,” *IFR International Federation of Robotics*. <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/wr-report-all-time-high-with-half-a-million-robots-installed> [Accessed; May. 02, 2025].
- [28] International Federation of Robotics (IFR). (2018). *World Robotics 2018 – Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org>
- [29] International Federation of Robotics (IFR). (2019). *World Robotics 2019 – Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org>
- [30] International Federation of Robotics (IFR). (2023). *World Robotics 2023 – Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org>
- [31] International Federation of Robotics (IFR). (2024). *World Robotics 2024 – Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org>
- [32] World Robotics 2022 – Industrial Robots, Produced by VDMA Services GmbH, Frankfurt, Germany. <http://www.worldrobotics.org>
- [33] World Robotics 2023 – Industrial Robots, Produced by VDMA Services GmbH, Frankfurt, Germany. <http://www.worldrobotics.org>
- [34] Robots automation Stock Photos, Royalty Free Robots automation Images | Depositphotos, [Accessed: July 12, 2025.]
- [35] Harrison, N. (2022), CNC Robotics: CNC Machining and Automated Robots, <https://www.rapidirect.com/blog/cnc-robotics/> [Accessed: July 12, 2025.]
- [36] <https://cn.dreamstime.com/cncimage1186659>, [Accessed: July 12, 2025.]

- [37] <https://www.dreamstime.com/standard-universal-industrial-robot-standard-universal-industrial-robot-part-image118981528>, [Accessed: July 12, 2025.]
- [38] Montini, E., Zanella, S., Bertoni, M., Sala, R. & Bianchi, M. (2024). Collaborative Robotics: A Survey From Literature and Practitioners Perspectives. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 103(1). <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02141-z>
- [39] Kumar, A. A., Zaman, U. K. U. & Plapper, P. (2024). Collaborative Robots. In: *Handbook of Manufacturing Systems and Design: An Industry 4.0 Perspective*, pp. 90–106. <https://doi.org/10.1201/9781003327523-8>
- [40] Robot Arm CNC Educational Cooperative Collaborative Robot Arm Robotic Arm and Robot Tool Parts Changer for Working Robot Arm 6, <https://bodastek.en.made-in-china.com/product/>, [Accessed: July 12, 2025.]
- [41] https://www.youtube.com/watch?v=_OqatKJ-Q3A, DKSTYL - TruBend Cell 7000 [Accessed: July 12, 2025.]
- [42] CNC Robotics – Sweet Machining Dreams, <https://engtechgroup.com/cnc-robotics/> [Accessed: July 12, 2025.]
- [43] Villani, V., Pini, F., Leali, F. & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
- [44] Krüger, J., Lien, T. K. & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals*, 58(2), 628–646. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.009>
- [45] Riazi, M., Villela, K., Haghighi, H. & Nahavandi, S. (2023). Economic justification of collaborative robots: A value-driven approach for small and medium-sized enterprises. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.04.001>
- [46] Lopes, R. M., Pessl, E. & Piwowar-Sulej, K. (2022). Collaborative robots in Industry 4.0: Financial and strategic impacts on SMEs. *Procedia Computer Science*, 200, 1280–1288. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.320>
- [47] Karabegović, I., Husak, E., Karabegović E., Mahmić, M. (2024). A Focus on Trends of Robot Technology in Manufacturing Industry and China's Transformation. Chapters 12 in: Kassmi, K. (Ed), *Science and Technology: Recent Updates and Future prospects Vol.11*, Publisher BP International, West Bengal, INDIA. <https://doi.org/10.9734/bpi/strufp/v11/2016>
- [48] Zhang, W., Liu, Z. & Yang, G. (2022). Performance analysis of collaborative robot deployment in CNC-based manufacturing. *Applied Energy*, 323, 119661. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119661>
- [49] Kadir, B. A., Broberg, O. & Jørgensen, K. A. (2023). Implementation of collaborative robots for human-centered production: A systems perspective. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 84, 102574. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102574>
- [50] Chen, H., Xu, C., Wang, Y. & Zhang, Q. (2021). Collaborative robotics and smart manufacturing: A review and future perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.006>
- [51] Wang, Z., Zhang, H. & Liu, Y. (2022). Enhancing productivity in CNC machining through human–robot collaboration: A digital twin approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 511–522. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.003>
- [52] Karabegović, E., Karabegović, I., Husak, E. (2019). Collaborative Robots Innovate Automation in metal and Car Industry in the World: *Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(8): 136-145. www.jsaer.com; <https://jsaer.com/download/vol-6-iss-8-2019/JSAER2019-6-8-136-145.pdf>
- [53] Qian, Y., Wu, D., Zhang, L. & Li, X. (2023). Integration of collaborative robots in flexible manufacturing systems: Real-time control and optimization. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 83, 102538. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102538>
- [54] Zhang, W., Wang, J. & Wang, Y. (2022). Smart factory design and operation using collaborative robots in CNC-based machining. *Applied Energy*, 323, 119661. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119661>
- [55] Kim, J., Lee, H. & Shin, J. (2021). Machine-to-Machine communication and industrial interoperability in smart manufacturing: A case study with collaborative robots. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(6), 1623–1637. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01723-0>

INTEGRATION OF COLLABORATIVE ROBOTS (COBOTS) IN CNC MACHINING: A PATH TOWARDS AUTONOMOUS OPTIMIZATION AND ENHANCED PRODUCTIVITY

Isak Karabegović¹, Edina Karabegović², Mehmed Mahmić²

¹ Academy of Science and Arts of Bosnia and Herzegovina, Bistrik 7., Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

² University of Bihać, Technical Faculty Bihać, Bosnia and Herzegovina
E-mail: isak1910@hotmail.com

ABSTRACT

In modern manufacturing systems, the growing demands for flexibility, efficiency, and workplace safety require advanced solutions that go beyond traditional CNC machine tool operation models. This paper explores the potential of integrating collaborative robots (cobots) into CNC machining processes to achieve autonomous process optimization and enhance overall productivity. The focus is placed on the development and implementation of a Human–Robot–Machine communication model, enabling seamless machine-to-machine (M2M) control without the need for continuous human intervention. Through an experimental setup in real production conditions, the study analyzes the impact of cobot implementation on key performance indicators, including machining time, downtime, machine utilization, and workplace safety. Special attention is given to algorithmic support for task scheduling, material flow recognition, and automatic real-time adjustment of operating parameters. The application of collaborative robots resulted in a significant reduction in machine idle time, faster tool and material changeovers, and improved coordination across multiple production units. The findings indicate that the synergy between cobots and CNC technology represents a sustainable

strategy for the digital transformation of manufacturing processes, particularly for small and medium-sized enterprises (SMEs) striving for automation while maintaining flexible and safe working environments. The integration of these technologies not only boosts productivity but also paves the way for smart factories with adaptive and self-managing capabilities. In conclusion, the paper provides concrete recommendations for the technical implementation of Cobot–CNC integration, identifies key challenges (e.g., interface standardization, safety protocols), and outlines directions for future research in the field of advanced manufacturing automation and collaborative robotics.

Keywords: collaborative robots, CNC machining, automation, M2M communication, productivity, smart manufacturing

PAMETNA PROIZVODNJA KAO INTEGRACIJA ČOVJEKA I TEHNOLOGIJE

Prof. dr. Vidosav D. Majstorović
Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd, Srbija
E-mail: vidosav.majstorovic@gmail.com

REZIME

Integracija ljudske ekspertize i naprednih tehnologija u pametnu proizvodnju predstavlja transformativni pomak u modernoj proizvodnji, vođen principima Industrije 4.0/5.0. Pametna proizvodnja koristi AI, IoT, robotiku, velike podatke i digitalne blizance kako bi stvorila visoko efikasne, fleksibilne i prilagodljive proizvodne sisteme. Međutim, uspjeh ovih sistema zavisi od besprijekorne saradnje između ljudi i mašina, obezbjeđujući i tehnološku efikasnost i prilagodljivost radne snage. Ključni aspekti ovih fabrika su: (a) tehnološki omogućivači, jer se pametne fabrike oslanjaju na IoT, automatizaciju vođenu vještačkom inteligencijom, kolaborativne robote (kobote) i analizu podataka u realnom vremenu kako bi optimizovale proizvodnju, (b) pristup usmjeren na čovjeka, gdje radnici prelaze sa manualnih uloga na nadzorne, analitičke i kreativne funkcije, što zahtijeva unapređenje vještina i digitalnu pismenost, (c) izazovi implementacije koji se odnose na visoke troškove, rizike po kibernetiku bezbjednost, otpor radne snage i probleme interoperabilnosti i (d) budući trendovi u ovoj oblasti koji se odnose na punu primjenu Industrije 5.0, gdje se naglašava sinergija čovjeka i mašine uz proširenu stvarnost (AR) za obuku i održivu pametnu proizvodnju. Budućnost pametne proizvodnje leži u balansiranju automatizacije i ljudske domišljatosti, obezbjeđujući da tehnologija poboljšava, a ne zamjenjuje, ljudske sposobnosti. Uspješna primjena zahtijeva ulaganje u obuku radne snage, kibernetiku bezbjednost i skalabilne okvire pametnih fabrika.

Ključne riječi: Industrija 5.0, Industrija 4.0, pametna proizvodnja, razvoj

1. Uvod

Brzi napredak tehnologija Industrije 4.0 revolucionirao je proizvodnju i proizvodne sisteme, što je dovelo do pojave pametne proizvodnje. Ova promjena paradigme integriše najsavremenije digitalne tehnologije sa ljudskom ekspertizom kako bi se stvorila visoko efikasna, fleksibilna i inteligentna proizvodna okruženja. Pametna proizvodnja koristi vještačku inteligenciju (AI), internet stvari (IoT), robotiku, analitiku velikih podataka (BDA) i kibernetiko-fizičke sisteme (CPS) za optimizaciju proizvodnih procesa, smanjenje otpada i povećanje produktivnosti [1, 2].

Međutim, uspjeh pametne proizvodnje ne zavisi isključivo od tehnologije – on zahtijeva i besprijekornu integraciju ljudi/radnika koji unose kreativnost, vještine rješavanja problema i prilagodljivost u automatizovane sisteme. Saradnja između ljudi i mašina je ključna za postizanje održivih, agilnih i responzivnih proizvodnih ekosistema [3].

Ova tema istražuje razvoj i primjenu pametne proizvodnje, fokusirajući se na [4-6]:

- (a) tehnološke osnove – ključne tehnologije koje pokreću pametnu proizvodnju (AI, IoT, robotika, digitalni blizanci itd.),
- (b) saradnju čovjeka i mašine – uloga radnika u automatizovanim okruženjima, automatizacija usmjerena na čovjeka,
- (c) strategije primjene – koraci za implementaciju pametnih proizvodnih sistema, prevazilaženje izazova i obezbjeđenje skalabilnosti,
- (d) studije slučaja primjene u industriji – primjeri uspješne integracije pametne proizvodnje u različitim industrijama iz stvarnog svijeta,
- (e) buduće trendove i izazove – etička razmatranja, prilagođavanje radne snage i inovacije sljedeće generacije.

Ispitivanjem ovih aspekata možemo razumjeti kako sinergija između čovjeka i tehnologije oblikuje budućnost proizvodnje, čineći proizvodne sisteme pametnijim, efikasnijim i otpornijim.

2. Različite definicije pametne proizvodnje

Pametna proizvodnja je širok i promjenjiv koncept, koji različito definišu stručnjaci iz industrije, akademskih institucija i organizacije. U nastavku su navedene ključne definicije iz različitih perspektiva [7-13]:

Tehničko/inženjerska perspektiva: „Pametna proizvodnja je integracija naprednih tehnologija – kao što su IoT, AI, robotika i analitika velikih podataka (BDA) – u proizvodne sisteme kako bi se stvorili samooptimizirajući, međusobno povezani i podacima vođeni proizvodni procesi.“ Fokus ovog prilaza su: kibernetiko-fizički sistemi, automatizacija i praćenje u realnom vremenu.

Industrijska perspektiva (NIST – Nacionalni institut za standarde i tehnologiju - SAD): „Pametna proizvodnja je korišćenje umreženih informacionih tehnologija za digitalizaciju proizvodnih operacija, omogućavajući kontrolu u realnom vremenu, fleksibilnost i efikasnost u cijelom lancu snabdijevanja.“ Fokus ovog prilaza su: interoperabilnost, digitalni blizanci i pametne fabrike.

Poslovno/ekonomska perspektiva: „Pametna proizvodnja je strategija koja koristi digitalnu transformaciju kako bi povećala produktivnost, smanjila troškove i omogućila masovna prilagođavanja uz obezbjeđenje održivosti.“ Fokus ovog prilaza su: ROI, optimizacija lanca snabdijevanja i konkurentska prednost.

Perspektiva usmjerena na čovjeka (Industrija 5.0): „Pametna proizvodnja kombinuje ljudsku domišljatost sa inteligentnim mašinama, podstičući kolaborativna okruženja u kojima AI i robotika

dopunjuju (umjesto da zamjenjuju) ljudske radnike.“ Fokus ovog prilaza su: koboti, usavršavanje i ergonomija.

Akadska/istraživačka perspektiva: „Pametna proizvodnja se odnosi na ekosistem proizvodnje koji intenzivno koristi podatke i adaptivan je, gdje mašine, proizvodi i sistemi autonomno komuniciraju, kako bi optimizirali efikasnost, kvalitet i korišćenje resursa“. Fokus ovog prilaza su: AI algoritmi, prediktivno održavanje, digitalne veze.

Definicija vođena održivošću. „Pametna proizvodnja koristi zelene tehnologije, energetska efikasna automatizaciju i CE principe kako bi se smanjio otpad i ugljični otisak, a istovremeno održala visoka produktivnost.“ Fokus ovog prilaza su: integracija obnovljivih izvora energije i proizvodnja bez škarta.

Gartnerova definicija (IT perspektiva): „Pametna proizvodnja je konvergencija operativne tehnologije (OT) i informacione tehnologije (IT), koja omogućava agilnu, na kupca usmjerenu proizvodnju, putem računarstva u cloudu i analitike edge mreže.“ Fokus ovog prilaza su: IT/OT fuzija i proizvodnja zasnovana na cloudu.

Definicija EU (Evropska komisija): „Pametna proizvodnja je ključni pokretač Industrije 4.0, gdje autonomni sistemi, AI i IoT stvaraju otporne, rekonfigurabilne i ljudski inkluzivne proizvodne mreže.“ Fokus ovog prilaza su: jedinstveno digitalno tržište EU i industrijska politika.

Japanska perspektiva (Društvo 5.0): „Pametna proizvodnja prevazilazi fabrike, integrišući AI i IoT u društvo kako bi se riješili ekonomski i ekološki izazovi putem 'super-pametnih' proizvodnih sistema.“ Fokus ovog prilaza su: društveni uticaj i ljudska dobrobit.

Pojednostavljena praktična definicija: „Pametna proizvodnja znači korišćenje računara, senzora i vještačke inteligencije kako bi fabrike same 'razmišljale' i prilagođavale se smanjujući greške i povećavajući efikasnost.“ Fokus ovog prilaza je: objašnjenje pristupačno laicima.

Uporedni pregled ovih prilaza je dat u Tabeli 1.

Tabela 1. Analiza najvažnijih definicija pametne proizvodnje

Perspektiva	Osnovni naglasak	Ključne tehnologije
Tehnički	Automatizacija, IoT, CPS	Robotika, IIoT
Industrijski (NIST)	Digitalizacija, interoperabilnost	Digitalni blizanci, cloud
Poslovanje	Smanjenje troškova, agilnost	ERP, AI u lancu snabdijevanja
Usmjereno na čovjeka	Saradnja čovjeka i mašine	Koboti, AR/VR
Održivost	Zelena proizvodnja	Energetski efikasna AI

Pametna proizvodnja nema jedinstvenu definiciju, jer ona zavisi od konteksta: inženjeri to vide kao mrežu inteligentnih mašina, preduzeća to tretiraju kao strategiju za efikasnost, vlade to definišu kao alat politike za ekonomski rast, a ekolozi to smatraju putem ka održivoj proizvodnji.

Zajednička nit svih ovih prilaza je – iskorišćavanje podataka i automatizacije za izgradnju bržih, pametnijih i prilagodljivijih proizvodnih sistema.

3. Teorijske osnove pametne proizvodnje – ključne tehnologije

Industrijski internet stvari (IIoT) u pametnoj proizvodnji: Integracija čovjeka i tehnologije.

IIoT je temeljni stub pametne proizvodnje koji omogućava međusobno povezanim uređajima, mašinama i sistemima prikupljanje, razmjenu i analizu podataka u realnom vremenu. Integracijom

senzora, aktuatora, računarstva u oblaku i napredne analitike, IIoT transformiše tradicionalnu proizvodnju u proizvodne sisteme vođene podacima, automatizovane i inteligentne. Ključna prednost IIoT-a leži u njegovoj sposobnosti da premosti jaz između fizičkih mašina i digitalnih kontrolnih sistema, olakšavajući besprijekornu saradnju čovjeka i mašine. Radnici mogu pratiti, kontrolisati i optimizirati proizvodne procese na daljinu, što dovodi do veće efikasnosti, prediktivnog održavanja i smanjenog vremena zastoja.

Ključne komponente IIoT-a u pametnoj proizvodnji su [14, 15]:

- (a) senzori i pametni uređaji, raspoređeni na mašinama za prikupljanje podataka u realnom vremenu (temperatura, vibracije, pritisak itd.), što omogućava praćenje stanja i rano otkrivanje kvarova,
- (b) povezivanje i komunikacioni protokoli, koji se najviše koriste za stvaranje mreža a dijele se na žičane (Ethernet, Fieldbus) i bežične (5G, Wi-Fi, LPWAN, Bluetooth) i obezbjeđuju besprijekoran prenos podataka između mašina, edge uređaja i cloud platformi,
- (c) edge i računarstvo u oblaku, gdje edge computing obrađuje podatke lokalno za donošenje odluka u realnom vremenu, a cloud platforme (AWS, Azure, Google Cloud) memorišu i analiziraju velike skupove podataka radi dugoročnih praćenja i analiza,
- (d) analiza podataka i integracija AI-a, koje se odnose na prediktivno održavanje koje koristi mašinsko učenje (ML) za predviđanje kvarova opreme. Ovdje imamo i algoritme optimizacije za unapređenje planiranja proizvodnje i alokaciju resursa,
- (e) interfejsi čovjek-mašina (HMI) i digitalni blizanci, gdje se za ove namjene koriste nadzorni terminali i AR/VR interfejsi koji omogućavaju radnicima interakciju sa IIoT sistemima. Tu su i DT-ovi za simulaciju proizvodnih procesa radi njihovog testiranja i optimizacije.

Uloga IIoT-a u integraciji čovjeka i tehnologije se ogleda u sljedećim činjenicama:

- (a) povećanje produktivnosti radnika – upozorenja i dijagnostika u realnom vremenu pomažu operaterima da donosu brze i prave odluke. Prenosivi IIoT uređaji (pametne naočare, AR kacige) pomažu u održavanju i obuci,
- (b) kolaborativna robotika – koboti, podržani IIoT-om, rade zajedno sa ljudima, poboljšavajući sigurnost i efikasnost, dok senzori obezbjeđuju sigurnu interakciju, smanjujući nezgode na radnom mjestu,
- (c) usavršavanje vještina i prilagođavanje radne snage – radnici prelaze sa manuelnih zadataka na nadzor zasnovan na podacima. Zato programi obuke o IIoT alatima, AI i analitici postaju neophodni,
- (d) daljinsko praćenje i upravljanje – mobilne IIoT aplikacije omogućavaju menadžerima da nadgledaju proizvodnju sa bilo kojeg mjesta. Dobijene preporuke zasnovane na AI-u pomažu u rješavanju problema i optimizaciji naprijed navedenih elemenata.

Strategije primjene IIoT-a u pametnoj proizvodnji se zasniva na sljedećim prilazima [16]:

- (a) postepeno postavljanje znači da treba izvršiti projektovanje infrastrukture za postojeće mašine i uređaje. Nakon toga je potrebno izvršiti pilot-testiranje tako što treba početi sa primjenom IIoT-a malog obima (prediktivno održavanje). Sljedeći korak je skalabilnost, što znači postepeno proširivanje na pune proizvodne linije, i integracija sa ERP/MES sistemima, što znači povezivanje IIoT podatka sa poslovnim sistemima za holističko upravljanje,
- (b) savladavanje izazova se, prije svega, odnosi na rizike sajber bezbjednosti kroz primjenu šifriranja, blockchaina i modela nultog povjerenja. Tu je i integracija sa prethodnim sistemima, gdje treba koristiti gatewaye i middleware sisteme radi kompatibilnosti. Takođe, treba voditi računa o preopterećenju podacima, gdje treba primijeniti filtriranje vođeno AI-om kako biste dobili prave podatke,

- (c) standardi i okviri Industrije 4.0 za ove namjene se odnose na protokole OPC UA, ISA-95 i RAMI 4.0, pomoću kojih se obezbjeđuje interoperabilnost. Sa druge strane, Digital Thread povezuje podatke o projektovanju, proizvodnji i lancima snabdijevanja.

Studije slučaja i primjene u realnoj industriji se odnose na sljedeće slučajeve [17, 18]:

- (a) prediktivno održavanje u automobilske proizvodnje – na primjer, BMW i Siemens koriste IIoT senzore za predviđanje kvarova mašina, smanjujući vrijeme zastoja za 30%,
- (b) pametne fabrike u elektronici (Foxconn, Bosch) – IIoT sistemi podržani AI-om optimizuju montažne linije i vrše kontrolu kvaliteta otkrivanjem nedostataka,
- (c) energetska efikasnost u teškoj industriji (GE, ABB) – pametne mreže omogućene IIoT-om smanjuju rasipanje energije u čeličanim i hemijskim postrojenjima.

Budući trendovi i izazovi u ovoj oblasti se odnose na konvergenciju AI-a i IIoT-a kroz autonomne samooptimizujuće fabrike. Zatim, tu su 5G i Edge AI, gdje se koristi ultra niska latencija za kontrolu u realnom vremenu, i na kraju etika i radna snaga, gdje će doći do zamjena radnih mjesta u odnosu na nove zahtjeve za digitalnim vještinama.

U zaključaku možemo da kažemo da je IIoT okosnica pametne proizvodnje, jer omogućava harmoničnu integraciju ljudi i mašina. Korišćenjem podataka u realnom vremenu, AI-a i automatizacije, industrije mogu postići veću efikasnost, fleksibilnost i održivost. Međutim, uspješna primjena zahtijeva unapređenje vještina radne snage, mjere kibernetičke bezbjednosti i skalabilnu infrastrukturu.

Vještačka inteligencija i mašinsko učenje u pametnoj proizvodnji: Prediktivno održavanje i kontrola kvaliteta.

AI i mašinsko učenje (ML) transformišu pametnu proizvodnju tako da omogućavaju autonomno donošenje odluka, prediktivnu analitiku i optimizaciju u realnom vremenu. Dvije ključne primjene AI/ML-a u proizvodnji su [19-21]: prediktivno održavanje, koje omogućuje smanjenje zastoja predviđanjem kvarova opreme, i kontrola kvaliteta, gdje se poboljšava otkrivanje nedostataka i konzistentnosti procesa. Integracijom AI/ML-a sa IIoT-om, robotikom i ljudskom ekspertizom, proizvođači postižu veću efikasnost, niže troškove i poboljšani kvalitet proizvoda.

Model AI/ML-a za prediktivno održavanje se bazira na sljedećim elementima [22-24]:

- (a) prikupljanje podataka se vrši pomoću senzora (vibracije, temperatura, pritisak), pri čemu se oni šalju sa mašine u realnom vremenu. Modeli mašinskog učenja koji se ovdje koriste su: nadzirano učenje (regresija, klasifikacija), za učenje na osnovu istorijskih podataka, zatim nenadgledano učenje (detekcija anomalija), gdje ovaj model identifikuje neobične obrasce u ponašanju mašine i njenih entiteta, i učenje sa nadgledanjem, što je model ML-a koji vrši dinamičku optimizaciju planova i operacija održavanja. Izlaz iz ovog modela su upozorenja o predstojećim kvarovima, kao i preporučene mjere održavanja,
- (b) prednosti ovog sistema u primjeni su: smanjenje neplaniranih zastoja za 20-50% (McKinsey), produženje vijeka trajanja opreme i smanjenje troškova održavanja,
- (c) etape primjene ovog modela su: instaliranje IoT senzora na kritične mašine, vršenje strimovanja podataka na cloud/edge platforme, treniranje ML modela na osnovu istorijskih podataka, integracija sa CMMS-om (kompjuterizovani sistemi za upravljanje održavanjem) te ekspertiska povratna sprega, koji potvrđuju predviđanja modela kako bi se oni poboljšali,
- (d) studija slučaja dolazi iz Siemens, koji koristi digitalne blizance (DT) podržane AI-om za predviđanje kvarova turbina, smanjujući troškove održavanja za 30%.

AI/ML za kontrolu kvaliteta se zasniva na sljedećim elementima [25-28]:

- (a) computer vision (CV), gdje se pomoću kamera i dubokog učenja (CNN) proizvodi provjeravaju na nedostatke. Tu je i statistička kontrola procesa (SPC), gdje ML detektuje odstupanja u realnom vremenu, i obrada prirodnog jezika (NLP), gdje se analiziraju zapisi radnika u potrazi za trendovima kvalitete,
- (b) ključne tehnike ML-a koje se ovdje koriste su: za otkrivanje nedostataka - Yolo R-CNN za vizuelni pregled u realnom vremenu, za optimizaciju procesa se koristi slučajna šuma, XGBoost za identifikaciju uzroka nedostataka, dok GA (generativna AI) simulira proizvodne scenarije kako bi se spriječili problemi sa kvalitetom,
- (c) u primjeni ovi prilazi rezultiraju smanjenjem stope škarta do 90% (Deloitte) i omogućavaju korekcije obradnog procesa (adaptivno upravljanje) u realnom vremenu,
- (d) primjena ovog modela se odvija u nekoliko koraka, a oni su: prikupljanje podataka (pomoću kamera visoke rezolucije i IoT senzora), označavanje i obuka (kroz obilježavanje slika sa nedostacima za nadzirano učenje), primjena edge AI-a (kroz pokretanje modela za donošenje odluka sa niskom latencijom) i ekspert u petlji (HITL), gdje čovjek pregleda prijedloge AI-a,
- (e) primjer iz industrije je kompanija Tesla, gdje se AI koristi kroz computer vision za pregled panela karoserije automobila, postižući 99,9% tačnosti.

Integracija AI/ML-a sa radnicima/ekspertima se izvodi kroz sljedeće aktivnosti:

- (a) kolaborativni sistemi AI-a za dijagnostiku uz pomoć AI-a, gdje tehničari dobijaju preporuke za popravku koje su generisane pomoću vještačke inteligencije, te proširena stvarnost (AR) + AI, gdje radnici koriste pametne naočare za vođene popravke,
- (b) usavršavanje radne snage se vrši kroz obuke operatera za primjenu AI-a i interpretaciju podataka za inženjere. Ovdje se upravljanje promjenama vrši kroz rješavanje otpora radnika kroz transparentnost. Etički i operativni izazovi se ovdje ogledaju kroz pristrasnost u AI modelima, gdje se obezbjeđuje pravednost u otkrivanju nedostataka. Na kraju se dobija evolucija radnih uloga, kada se ostvari prelazak sa ručne inspekcije na nadzor pomoću AI-a.

Budući trendovi u ovoj oblasti su: sistemi za samoobnavljanje, gdje će AI automatizovati popravke putem robotike, primjena modela federiranog učenja, kao decentralizovanog modela u različitim fabrikama, i primjena XAI-a, kao modela sa najvećim povjerenjem u odluke AI-a.

U zaključku možemo da konstatujemo da AI/ML realizuju pametnu proizvodnju kroz: prediktivno održavanje, koje minimizira zastoje pomoću prognoza zasnovanih na AI-u, kontrole kvaliteta, gdje se postiže nula škarta, i sinergija čovjeka i mašine, gdje se realizuje kolaboracija radnika i AI-a. Za uspješnu primjenu, proizvođači moraju u početku investirati u IIoT infrastrukturu za prikupljanje podataka i sajber bezbjednost za zaštitu osjetljivih proizvodnih podataka te izvršiti obuku radne snage za prilagođavanje radnim procesima AI-a.

Robotika i kolaborativni roboti (koboti) u pametnoj proizvodnji: interakcija čovjeka i robota. Integracija industrijskih i kolaborativnih robota (kobota) transformiše modernu proizvodnju, omogućavajući besprijekornu interakciju čovjeka i robota (HRI). Za razliku od tradicionalnih industrijskih robota koji rade u izolovanim kavezima, koboti su projektovani da rade zajedno sa ljudima, kombinujući preciznost i snagu mašina sa prilagodljivošću i vještinama rješavanja problema zajedno sa radnicima [29]. Ključne prednosti tradicionalnih robota su brzina i fiksna automatizacija (automobilske montažne linije), dok su koboti sigurni, fleksibilni i prilagodljivi (proizvodnja malih serija, logistika). Ova promjena je ključna za pametnu proizvodnju, gdje su agilnost, prilagođavanje i efikasnost od najveće važnosti.

Jedna sistematizacija primjene u pametnoj proizvodnji je data u Tabeli 2. [30].

Tabela 2. Pametna proizvodnja i roboti

Tip	Primjena	Nivo interakcije
Industrijski roboti	Zavarivanje, farbanje, dizanje teških tereta	Ograničen (kavezni)
Kolaborativni roboti (koboti)	Sastavljanje, pakovanje, kontrola kvaliteta	Visok (dijeljeni radni prostor)
Mobilni roboti (AGV/AMR)	Transport materijala, skladišna logistika	Umjeren (autonomni)
Servisni roboti	Održavanje, čišćenje	Varijabilan

Interakcija čovjeka i robota (HRI) u pametnoj proizvodnji se izvodi kroz sljedeće aspekte [31, 32]:

- ključne tehnologije koje omogućavaju siguran HRI obuhvataju: senzore sile i obrtnog momenta, za otkrivanje neočekivanog kontakta i trenutno zaustavljanje (standard ISO/TS 15066); computer vision sisteme (2D/3D kamere + AI), gdje se vrši prepoznavanje ljudskih gestova, prate pokreti i prilagođavaju putanje robota; glasovne i AR interfejsse, gdje radnici kontrolišu kobote putem glasovnih komandi ili AR slojeva, i prediktivne algoritme, gdje AI predviđa ljudske akcije kako bi se izbjegli sudari,
- nivoi saradnje (od najmanje do najinteraktivnije) se ostvaruje kroz: koegzistenciju – ljudi i roboti rade u odvojenim zonama, sekvencijalnu saradnju – roboti i ljudi se smjenjuju, saradnju – roboti pomažu ljudima u realnom vremenu (drže dijelove), i potpunu saradnju – pravi timski rad (kobot predaje alate radniku).

Primjena kobota u pametnoj proizvodnji se realizuje u sljedećim oblastima [33]: sastavljanje i postavljanje, gdje koboti kompanije Universal Robots pomažu u sastavljanju elektronike, a ljudska je uloga nadzor i složeno donošenje odluka; kontrola kvaliteta, gdje Fanucovi koboti podržani AI-om skeniraju proizvode u potrazi za nedostacima, a uloga ljudi je završna validacija i obrada izuzetaka uz donošenje odluka; opsluživanje mašina, gdje, recimo, ABB-ov YuMi kobot opslužuje CNC mašine, a radnik samo vrši nadgledanje; logistika i rukovanje materijalom, gdje, na primjer, KUKA mobilni koboti prevoze robu u skladištima, a ljudi planiraju rute i vrše prilagođavanje prioriteta.

Strategija primjene kobota bi se definisala na sljedeći način: postepeno postavljanje, gdje prvo treba izvršiti ocjenu zadataka kroz identifikaciju ponavljajućih i ergonomske zadatke; obezbjeđenje sigurnosnih sertifikata, koji će obezbijediti usklađenost sa standardima ISO 10218 i ISO/TS 15066; pilot-testiranje, kroz integraciju kobota malog obima sa povratnim informacijama od radnika, i skaliranje, gdje se vrši proširivanje na više radnih stanica.

Izazovi u primjeni cobota se mogu definisati sljedećim činjenicama: prihvatanje radnika, kroz uključivanje zaposlenih u rane procese projektovanja radnog mjesta za kobota; složenost programiranja može biti izazov pa zato treba koristiti platforme za kobote bez koda (UR-ov Polyscope); sajber sigurnost treba podići primjenom zaštite mreže kobota od hakovanja.

Budućnost kobota i HRI-ja se može definisati na sljedeći način [34]: koboti podržani AI-om, gdje će samoučeći roboti biti prilagođeni ljudskom ponašanju, timovi egzoskeleta i kobota, gdje će ljudi nositi egzoskelete kako bi sarađivali sa teškim robotima, i emocionalna vještačka inteligencija gdje koboti detektuju stres radnika i prilagođavaju radne procese.

Na kraju, možemo da zaključimo da koboti predstavljaju sljedeću evoluciju pametne proizvodnje, spajajući ljudsku domišljatost sa robotskom preciznošću pa uspješna implementacija zahtijeva: projektovanje radnog mjesta koje stavlja sigurnost na prvo mjesto (senzori, usklađenost sa ISO

standardima), obuku i uključivanje radnika kako bi se obezbijedila nesmetana primjena, kao i skalabilno i fleksibilno raspoređivanje za prilagođavanje promjenjivim potrebama proizvodnje.

Veliki podaci i računarstvo u cloudu u pametnoj proizvodnji: Donošenje odluka zasnovano na podacima.

Konvergencija analitike velikih podataka i računarstva u cloudu osavremenjuje modernu proizvodnju, omogućavajući donošenje odluka zasnovanih na podacima u realnom vremenu. U pametnoj proizvodnji se obrađuju ogromne količine podataka iz IoT senzora, mašina, ERP/MES sistema i ljudskih unosa kako bi se optimizirale operacije, predvidjeli kvarovi i povećala produktivnost [35]. Ključne prednosti ovog modela se ogledaju u sljedećim činjenicama: praćenje u realnom vremenu i prediktivna analitika, skalabilno memorisanje i obrada podataka, poboljšana saradnja između ljudi i mašina te smanjenje troškova putem rješenja zasnovanih na cloudu.

Mjesto i uloga velikih podataka u pametnoj proizvodnji se ogleda prvo u tome šta je izvor velikih podataka u proizvodnji – Tabela 3. [36].

Tabela 3. Izvori velikih podataka u pametnoj proizvodnji

Izvor podataka	Vrsta podataka	Primjena
IoT senzori	Temperatura, vibracije, pritisak	Prediktivno održavanje
MES/ERP sistemi	Terminiranje proizvodnje, zalihe	Optimizacija lanca snabdijevanja
Zapisnici mašine	Operativni parametri, kodovi grešaka	Kontrola kvaliteta i analiza nedostataka
Ljudski unos	Ručne inspekcije, bilješke operatera	Poboljšanje procesa
Eksterni podaci	Trendovi na tržištu, vremenski podaci	Prognoza potražnje

Kako se manipuliše podacima u modelu obrade velikih podataka? Prikupljanje podataka se vrši pomoću IoT-a, SCADA i PLC-ova. Memorisanje podataka se realizuje na cloudu, data centrima i edge računarima. Obrada podataka se izvodi serijski i analitički u realnom vremenu, a njihova vizuelizacija se prati preko nadzornih terminala, koji su podržani AI modelima.

Računarstvo u cloudu u pametnoj proizvodnji koristi sljedeće modele (Tabela 4.):

Tabela 4. Modeli cloud računarstva

Model	Opis	Korišćenje
Javni cloud	AWS, Azure, Google Cloud	Skalabilna analitika, obuka za AI
Privatni cloud	Lokalni data centri	Osjetljivi proizvodni podaci
Hibridni cloud	Kombinacija javnog i privatnog	Balansiranje troškova i sigurnosti
Edge Computing	Lokalna obrada u blizini izvora podataka	Kontrola u realnom vremenu sa malom latencijom

Kao ključne tehnologije u oblaku koriste se: infrastruktura (hardware) kao usluga (IaaS) – virtualne mašine za obimne analize i izračunavanja, platforma kao usluga (PaaS), kao alat za razvoj AI/ML modela, i software kao usluga (SaaS), gdje se koriste MES/ERP sistemi zasnovani na cloudu.

Donošenje odluka na osnovu podataka u pametnoj proizvodnji se vrši primjenom ovog modela u praksi za [37-39]: (i) prediktivno održavanje, gdje se pomoću AI modela analiziraju podaci senzora kako bi se predvidjeli kvarovi mašina (primjer je Siemens MindSphere pomoću kojeg se smanjuje vrijeme zastoja za 30%), (ii) optimizaciju kvaliteta, koja se vrši pomoću velikih podataka, identifikujući obrasce nedostataka u realnom vremenu (primjer je kompanija Tesla koja koristi sistem computer vision podržan AI-om koji ostvaruju 99,9% tačnosti), (iii) upravljanje lancem snabdijevanja i zalihama, gdje se pomoću analitike zasnovane na cloudu optimizuju nivoi zaliha i logistika, (iv) energetska efikasnost, gdje se pomoću AI-a analiziraju podaci o potrošnji energije kako bi se smanjili troškovi energije i (v) saradnju čovjeka i mašine, gdje operateri koriste kontrolne table (Tableau, Power BI) za uvide u realnom vremenu, a inženjeri koriste preporuke AI-a za prilagođavanje procesa.

Strategija primjene se izvodi kroz sljedeće korake [40, 41]: ocijenite potrebu za podacima i identifikujte ključne izvore podataka (IoT, ERP, MES itd.), izaberite cloud platformu (AWS vs. Azure vs. Google Cloud), primijenite edge computing, za obradu sa niskom latencijom, razvoj AI/ML modela, kroz njegovo treniranje korišćenjem istorijskih podataka, i vizuelizaciju procesa praćenja, kroz kontrolne table za radnike.

Očekivani trendovi u ovoj oblasti su: DT + Cloud AI, gdje će se simulirati cijele fabrike u realnom vremenu. Zatim, tu je primjena federiranog učenja za decentralizovanu primjenu AI-a i primjena 5G + Edge AI za ultrabrzu analitiku u realnom vremenu.

Kao zaključak, može se konstatovati sljedeće: veliki podaci i računarstvo u cloudu su ključni stubovi pametne proizvodnje, koji omogućavaju donošenje odluka u realnom vremenu, besprijekornu saradnju čovjeka i mašine te isplativo, skalabilno poslovanje. Za uspješnu primjenu, proizvođači se moraju fokusirati na sigurnost podataka i interoperabilnost, obuku radne snage za analitiku podataka i hibridnu arhitekturu na edge/cloud modelu.

Digitalni blizanci u pametnoj proizvodnji: Virtuelne simulacije za optimizaciju.

Digitalni blizanci su dinamične, virtuelne replike fizičkih sistema koji omogućavaju praćenje, simulaciju i optimizaciju proizvodnih procesa u realnom vremenu. Integracijom IoT-a, AI-a i računarstva u cloudu, DT-ovi premošćuju jaz između fizičkog i digitalnog svijeta, omogućavajući proizvođačima da predvide kvarove prije nego što se dogode, optimizuju proizvodne tokove, poboljšaju saradnju čovjeka i mašine te smanje troškove i poboljšaju efikasnost [42]. Ova tehnologija je temelj Industrije 4.0 i omogućava donošenje odluka na osnovu podataka i sistema povratnih informacija zatvorene petlje.

Ključne komponente DT-ova su date u Tabeli 5.

Tabela 5. DT-ovi za pametnu proizvodnju

Komponenta	Opis	Primjer u pametnoj proizvodnji
Fizička vrijednost	Mašina iz stvarnog svijeta, proizvodna linija ili cijela fabrika	CNC mašina, robotska ruka, montažna traka
IoT senzori	Prikupljaju podatke u realnom vremenu (vibracije, temperatura, pritisak)	Senzori vibracija na motorima za prediktivno održavanje
Obrada podataka	Računarstvo u cloudu/edge za analitiku podataka	Azure DT za simulacije u realnom vremenu
Virtuelni model	3D simulacija sa ponašanjem zasnovanom na fizici ili vođena AI-om	ANSYS Twin Builder za prediktivno modeliranje
Ljudski interfejs	Kontrolne table, AR/VR za interakciju operatera	Microsoft HoloLens za obuku u održavanju

U pametnoj proizvodnji, DT-ovi se primjenjuju za [43]:

- (a) prediktivno održavanje, koje funkcioniše tako što senzori u realnom vremenu šalju podatke o mašini DT-u. Modeli AI-a predviđaju habanje, predlažući održavanje prije kvara. Na primjer, GE-ova digitalna vjetroelektrana koristi DT pomoću kojeg poboljšava efikasnost turbine za 20%,
- (b) optimizaciju procesa, koja radi tako što se simuliraju scenariji „šta ako“ (re-terminiranje proizvodnje). Recimo, Siemensov AMRC koristi DT kako bi smanjio nedostatke dijelova u avionskoj industriji za 50%,
- (c) saradnju čovjeka i robota, koja se ogleda u virtuelnom testiranju putanje robota kako bi se obezbijedila sigurnost i efikasnost. Ovdje je primjer BMW-ova fabrika budućnosti koja koristi DT za validaciju radnih procesa kobota,
- (d) kontrolu kvaliteta, koja se realizuje tako što se upoređuju podaci o proizvodu u realnom vremenu sa idealnim digitalnim modelima. Primjer je Teslina Gigafabrika, gdje se vrši simulacija proizvodnje baterija kako bi se minimizirali nedostaci u kvalitetu.

Način realizacije projekta za DT se izvodi u nekoliko koraka, i to [44]: definišite mašinu ili proces (hidraulična presa), zatim instalirajte senzore za prikupljanje podataka (vibracije, temperatura), potom izgradite virtuelni model, koristeći alate kao što su NVIDIA Omniverse ili PTC ThingWorx. U sljedećem koraku integrišite AI/ML i obučite modele za detekciju i optimizaciju nedostatka te na kraju uključite operatere, kroz primjenu AR interfejsa (HoloLens) za povratne informacije u realnom vremenu.

Problemi u primjeni ovog modela mogu da budu [45, 46]: visoki računarski troškovi, što se prevazilazi hibridnom obradom u edge/cloud rješenju, rizici sigurnosti podataka, koji se smanjuju primjenom blockchaina za logove zaštićene od neovlašćenih promjena, i integracija sa naslijeđenih sistemima korišćenjem Middleware API-ji (OPC UA).

Budućnost digitalnih blizanaca se ogleda u razvoju sljedećih prilaza: autonomni DT, kao samopodešavajući sistemi sa AI, zatim integracija sa metaverseom, gdje imamo fabrike kao virtuelne svjetove za globalnu saradnju, i fokus na održivost, gdje će se simulirati energetska efikasnost procesa.

Na kraju možemo da zaključimo da DT-ovi transformišu pametnu proizvodnju putem [47, 48] omogućavanja prediktivnog, a ne reaktivnog održavanja, optimizuju procese putem virtuelnih simulacija i poboljšavaju donošenje odluka uz pomoć AI-a. Ključni faktori uspjeha u primjeni DT-ova su: počnite sa malim (jedan objekt → kompletna tvornica), dajte prioritet obuci radne snage (AR/VR alati) i osigurajte sajber bezbjednost DT-ova (šifrovani tokovi podataka).

4. Pristup usmjeren na čovjeka

Saradnja čovjeka i mašina u pametnoj proizvodnji: Ergonomija, sigurnost i intuitivni interfejsi. Budućnost proizvodnje leži u besprijekornoj saradnji čovjeka i mašine, gdje radnici i inteligentni sistemi kombinuju svoje snage kako bi postigli veću produktivnost, sigurnost i efikasnost. Ova integracija se fokusira na tri ključna aspekta: ergonomija – dizajniranje sistema koji smanjuju fizički napor radnika, sigurnost – obezbjeđenje interakcije čovjeka i robota bez nezgoda, i intuitivni interfejsi – kreiranje korisnički prilagođenih kontrolnih sistema koji minimiziraju vrijeme obuke. Pametna proizvodnja koristi kobote, AI, AR/VR stvarnost i IoT kako bi stvorila skladno radno okruženje u kojem se ljudi i mašine međusobno nadopunjuju [49,50].

Ergonomija u saradnji čovjeka i mašine se bazira na sljedećim izazovima u tradicionalnoj proizvodnji: ponavljajući pokreti koji dovode do mišićno-koštanih poremećaja (MSD), dizanje teških tereta koje uzrokuje dugotrajne povrede te loš dizajn radne stanice koji smanjuje efikasnost. Rješenja u pametnoj proizvodnji su data u Tabeli 6. [30-31].

Tabela 6. Pametna proizvodna rješenja

Rješenje	Korišćena tehnologija	Primjer
Egzoskeleti	Nosiva robotika	Ford koristi egzodijela za smanjenje umora
Koboti za teško dizanje	Kolaborativni roboti	BMW-ovi koboti pomažu u sastavljanju motora
Podesive radne stanice	Senzori visine omogućeni IoT-om	Pametni stolovi koji se prilagođavaju radnicima

Prednosti primjene ovog prilaza su: smanjuje umor i povrede radnika, povećava produktivnost za 15-20% (ILO) i produžuje životni vijek starijih radnika.

Sigurnost u interakciji čovjeka i robota se bazira na sljedećim činjenicama:

- (a) sertifikacijom prema ključnim standardima sigurnosti [51, 52]: ISO 10218 (sigurnost industrijskih robota), ISO/TS 15066 (smjernice za kolaborativne robote) i ANSI/RIA R15.06 (američki sigurnosni standardi),
- (b) primjena sigurnosnih tehnologija u pametnoj proizvodnji, kao što su: koboti koji ograničavaju silu – zaustavlja se odmah nakon kontakta sa ljudima (universal robots), 3D vision sistemi, gdje kamere detektuju ljude i prilagođavaju putanje robota (Fanucovo izbjegavanje pomoću AI-a),
- (c) LiDAR i laserski skeneri, pomoću kojih se stvaraju virtuelne sigurnosne zone oko robota. Na primjer, Audijeva sigurna saradnja čovjeka i robota, gdje se koriste svjetlosne zavjese i podovi osjetljivi na pritisak kako bi se roboti zaustavili kada im se radnici približe. Rezultat je nula nezgoda u 5+ godina rada.

Intuitivni interfejsi za besprijekornu saradnju predstavljaju modele za pametnu proizvodnju (Tabela 7.).

Tabela 7. Vrste intuitivnih interfejsa

Interfejs	Primjer primjene	Primjer
HMI ekrani osjetljivi na dodir	Kontrolne table mašina	Siemensov Simatic HMI
Glasovne komande	Upravljanje bez upotrebe ruku	Amazonova Alexa za prikupljanje u skladištu
AR/VR smjernice	Obuka za održavanje	Microsoft HoloLens za popravke
Kontrola gestovima	Interakcija sa kobotima	BMW-ova pametna rukavica za upravljanje robotima

Principi o kojima treba voditi računa pri razvoju intuitivnih interfejsa su: minimalno kognitivno opterećenje – ikone umjesto teksta za univerzalno razumijevanje, haptička povratna informacija – vibracije potvrđuju radnje (pritiske dugmadi) i prilagodljivi korisnički interfejsi – promjene se zasnivaju na nivou vještine korisnika (režim za početnike u odnosu na režim za stručnjake).

Okvir za primjenu ovog modela u industrijskoj praksi se bazira na integraciji korak po korak: ergonomska ocjena, kroz identifikaciju visokorizičnih zadataka korišćenjem nosivih uređaja (senzori za snimanje pokreta), izrada sigurnosnih prototipa – testiranje kobota u kontrolisanim okruženjima prije potpunog raspoređivanja, prilagođavanje interfejsa – uključite radnike u dizajn korisničkog interfejsa za maksimalnu upotrebljivost [53]. Prema potrebi vršiti kontinuirano poboljšanje ovog modela koristeći AI za analizu incidenata koji su zamalo promašili situaciju u optimizaciji radnih

procesa. Izazovi koji se u ovim procesima mogu javiti su: otpor radnika – rano uključivanje u proces dizajniranja, visoki početni troškovi – počnite sa pilot-projektima, pokažite povraćaj ulaganja, i rizici sajber bezbjednosti – obezbijedite neophodnu zaštitu za sve interfejse čovjek-mašina.

Budući trendovi u ovoj oblasti su dati kao: vještačka inteligencija koja prepoznaje emocije – sistemi koji detektuju stres radnika i prilagođavaju radno opterećenje, interfejsi mozak-računar (BCI) – upravljanje mašinama putem neuronskih signala, i samoučeći koboti – roboti koji se prilagođavaju individualnim stilovima rada radnika.

U zaključku možemo da konstatujemo da uspješna integracija ljudi i mašina u pametnoj proizvodnji zahtijeva [54]: ergonomski dizajn koji štiti zdravlje radnika, robusne sigurnosne sisteme u skladu sa međunarodnim standardima te intuitivne interfejse koji smanjuju vrijeme obuke i greške. Ključne preporuke za organizacije bi bile: počnite sa malim pilot-projektima kako biste demonstrirali vrijednost za organizaciju, dajte prioritet povratnim informacijama od radnika prilikom dizajniranja sistema i investirajte u adaptivne tehnologije, koje se razvijaju zajedno sa vašom radnom snagom.

Unapređenje vještina radne snage za pametnu proizvodnju: Digitalna pismenost i razvoj adaptivnih vještina.

Kako sistemi pametne proizvodnje integrišu napredne tehnologije (AI, IoT, robotiku i DT), radna snaga se mora razvijati kroz ciljane programe usavršavanja [55]. Ova transformacija se fokusira na: digitalnu pismenost – razumijevanje alata Industrije 4.0, adaptivne vještine – rješavanje problema u tehnološki naprednim okruženjima i kontinuirano učenje – praćenje brzih tehnoloških promjena. Zašto je ovo važno? Zato što 87% proizvođača prijavljuje nedostatak vještina koje usporavaju digitalnu transformaciju (Deloitte 2023) [56].

Ključne kompetencije za radnike u pametnoj proizvodnji su date u Tabeli 8.

Tabela 8. Matrica tehničkih vještina

Nivo vještina	Potrebne kompetencije	Primjeri programa obuke
Osnovna digitalna pismenost	Upravljanje HMI-ima, osnovna interpretacija podataka	Siemensov sertifikat „Digital Basics“
Srednji nivo	Programiranje kobota, IIoT praćenje	FANUC-ovi kursevi za operatere CNC/kobota
Napredno	Nadzor AI sistema, upravljanje DT-om	MIT-ovi mikro-masteri za pametnu proizvodnju

Kritične adaptivne vještine za pametnu proizvodnju su: timski rad čovjeka i mašine (saradnja sa AI/robotima), tačnost u radu sa podacima (tumačenje analitičkih kontrolnih terminala), svijest o sajber bezbjednosti (siguran rad povezanih sistema) i agilno rješavanje problema (rješavanje problema u dinamičnim okruženjima).

Moderne metodologije obuke za digitalne vještine u pametnoj fabrici su: tehnologije imerzivnog učenja, pomoću AR/VR simulacija, kao na primjer Porscheove naočare „Tech Live Look“, koje smanjuju vrijeme obuke tehničara za 40%. Zatim, tu su virtuelne šetnje kroz fabriku za siguran uvod u posao [57]. Recimo, okruženje za obuku DT-ova se zasniva na primjeni GE Digital Twin Academy, gdje se vrši simuliranje podešavanja proizvodne linije bez rizika. Tu su i platforme za mikro učenje, čiji sadržaj je prvenstveno namijenjen mobilnim uređajima za treninge vještina u trajanju od 5 do 10 minuta (Udemy, Coursera), zatim gamifikacija – Boschove simulacijske igre „Factory I/O“, i prilagodljivo učenje zasnovano na AI-u – platforme koje prilagođavaju sadržaj nedostajućim vještinama [58]. Jedan pregled modela obuke na radnom mjestu je dat u Tabeli 9.

Tabela 9. Modeli digitalne obuke na radnom mjestu

Model	Primjena	Primjer slučaja
Praćenje kobota	Radnici uče uz kolaborativne robote	BMW-ov program „Cobot Buddy“
AI koučing	Sistemi za povratne informacije o učinku u realnom vremenu	SAP-ov asistent za izgradnju vještina
Međusobna obuka	Rotacijsko izlaganje različitim tehnološkim sistemima	Teslina inicijativa „Flex Tech“

Okvir za implementaciju ovog prilaza se može zasnivati na strategiji usavršavanja korak po korak: analiza nedostataka vještina – digitalne ocjene (PwC-ova aplikacija za digitalni fitnes) [59], za reviziju zadataka za izloženost automatizaciji, personalizovani modeli učenja – višeslojni programi za različite uloge (operatori vs. inženjeri), kontinuirana evaluacija – praćenje performansi omogućeno putem IoT-a, uz godišnje prognoze „potreba za prekvalifikacijom“.

Jedan pregled savladavanja izazova za organizaciju u ovoj oblasti je dat u Tabeli 10.

Tabela 10. Savladavanje izazova u digitalnom obrazovanju

Barijera	Rješenje	Primjer industrije
Radnički otpor	Vršnjački mentori „Digitalni ambasadori“	Volkswagenov program „Tehnološki tutori“
Brzo zastarijevanje tehnologije	Tromjesečni ciklusi obuke za nadogradnju	Intelov kurikulum „Osvježavanje tehnologije“
Ograničenje troškova	Programi koje finansira vlada (njemačke stipendije Industrie 4.0)	

Metrika za mjerenje uspjeha u digitalnoj obuci u organizaciji se može pratiti preko ključnih pokazatelja učinka: vrijeme potrebno za sticanje kompetencije – smanjenje broja sati obuke za nove sisteme, stopa popravki pri prvom pokušaju – poboljšanje popravki uz pomoć tehnologije, i neto promoterski rezultati zaposlenih – spremnost preporučivanja obuke. Zatim, tu je i stopa usvajanja automatizacije – kroz brzinu integracije novih tehnologija. Kao primjer navešćemo da kompanije sa zrelim programima usavršavanja ostvaruju 24% veću produktivnost (McKinsey) [60].

Budući trendovi u razvoju radne snage za pametnu proizvodnju su: personalizovano učenje zasnovano na AI-u – sistemi koji se u realnom vremenu prilagođavaju stilovima učenja, metaverse akademije – potpuno virtualni kampusi za obuku, skills blockchain – digitalna akreditacija zaštićena od neovlašćenih promjena, i generativni AI tutori – asistenti u stilu ChatGPT-a za usavršavanje na zahtjev.

Kako krenuti u projekat digitalnog obrazovanja u organizaciji [61-63]? Počnite sa ocenama digitalnih osnova, koristeći alate poput LinkedInovog „Digital Skills Quotienta“. Implementirajte hibridne modele učenja, kombinujte VR simulacije sa sesijama koje vode mentori. Stvorite karijerne puteve, koji će obezbijediti jasan napredak od „operatera“ do „pametnog proizvodnog tehničara“. Tu je i partnerstvo sa obrazovnim organizacijama za ove oblasti. Kao primjer se ovdje navodi Siemensova „Akademija digitalizacije“, koja je obučila više od 20.000 zaposlenih vještinama IIoT-a, što je rezultiralo 30% bržom implementacijom novih proizvoda u organizacijama sa pametnom proizvodnjom.

Kao zaključak, možemo da konstatujemo da radna snaga ostaje najprilagodljivija komponenta pametnih proizvodnih sistema. Zato strateško usavršavanje u digitalnom obrazovanju treba da bude usmjereno na: sticanje digitalnih vještina u pravo vrijeme, kontinuirano izgrađivanje adaptivnih

kapaciteta i razvoj iskustava učenja poboljšanim tehnologijama. Kritični faktori uspjeha su: posvećenost rukovodstva budžetima za obuku, dizajn programa usmjeren na radnike i integracija sa svakodnevnim operacijama.

Kognitivna automatizacija u pametnoj proizvodnji: Donošenje odluka ljudi uz pomoć vještačke inteligencije.

Kognitivna automatizacija predstavlja sljedeću evoluciju saradnje čovjeka i mašine, kombinujući AI, ML i ljudsku ekspertizu kako bi se poboljšalo donošenje odluka u pametnim proizvodnim okruženjima. Za razliku od tradicionalne automatizacije (sistemi zasnovani na pravilima), kognitivna automatizacija: razumije nestrukturirane podatke (tekst, slike, glas), uči iz ljudskih odluka i istorijskih obrazaca i preporučuje optimizirane akcije, a istovremeno obavještava ljude o svemu što je potrebno. Ova sinergija transformiše proizvodnju smanjenjem grešaka, ubrzavanjem procesa i povećanjem ljudskih sposobnosti.

Ključne komponente kognitivne automatizacije su date u Tabeli 11.

Tabela 11. Kognitivna automatizacija – pregled

Komponenta	Funkcija	Pametna proizvodna aplikacija
Obrada prirodnog jezika (NLP)	Razumije priručnike i radne naloge	Dijagnostika mašina pomoću glasovne kontrole
Computer vision	Interpretira vizuelne podatke sa kamera	Detekcija nedostataka u kontroli kvaliteta
Prediktivna analitika	Predviđa kvarove opreme	Raspored održavanja
Grafovi znanja	Povezuje podatke za kontekst	Podrška pri odlučivanju o problemima
Digitalni asistenti	Pružaju smjernice u stvarnom vremenu	AR uputstva za rad za tehničare

Primjene u pametnoj proizvodnji ovog prilaza se danas sreću u sljedećim oblastima:

- kontrola kvaliteta uz pomoć AI-a se izvodi na sljedeće načine: computer vision skenira proizvode dok NLP analizira zapise izvršene inspekcije, označava anomalije pomoću XAI-a (daje obrazloženje inspektorima kvaliteta). Primjer je Foxconn, koji je smanjio lažno pozitivne rezultate za 35% koristeći hibridnu inspekciju AI-a i čovjeka,
- kognitivno održavanje funkcioniše tako što AI povezuje podatke senzora sa istorijom popravki i, poslije analiza, preporučuje aktivnosti održavanja, rangiranih prema ocenama pouzdanosti. Kao primjer se navodi Siemensov AI asistent koji pruža tehničarima vjerovatne uzroke kvara (85% tačnosti), zatim korak-po-korak daje vodič za popravku i prati status zaliha dijelova,
- adaptivno planiranje proizvodnje, gdje AI daje podršku u donošenju odluka na sljedeći način: AI analizira prognoze potražnje, dostupnost materijala i status mašina pa zatim predlaže tri optimizirana rasporeda proizvodnje, a na kraju planer proizvodnje bira/modifikuje konačnu verziju, ako je to potrebno.

Principi projektovanja usmjerenog na čovjeka se najbolje objašnjavaju na sljedećem primjeru gdje imamo ležaj koji ima 92% rizika od kvara, jer se obrasci vibracija podudaraju sa 387 istorijskih kvarova. Indikatori pouzdanosti se daju kao vizuelni znakovi koji pokazuju nivoe sigurnosti, koje je definisala AI. Kada AI da prijedlog rješenja, ekspert za ovu oblast donosi konačnu odluku. Pregled najboljih praksi projektovanja interfejsa je dat u Tabeli 12.

Tabela 12. Najbolje prakse projektovanja interfejsa za kognitivnu automatizaciju

Tip interfejsa	Razmatranje projektovanja	Primjer
AR nivoi	Istaknite probleme koje je identifikovala AI	Boeingove smjernice za korišćenje moment ključa
Glasovna interakcija	Rad bez upotrebe ruku u bučnim područjima	BMW-ove fabričke glasovne komande
Prilagodljive kontrolne table	Prilagodljivo na osnovu korisničke uloge	John Deere prikazi specifični za operatera

Kako ovaj model primijeniti u industrijskim uslovima? Predlaže se projekat, kroz sljedeće faze:

- I – Osnove: Definišite i uspostavite infrastrukturu za IoT senzore i generišite podatke. Prikupite i istorijske podatke o održavanju/kvalitetu. Primijenite model prediktivnog održavanja za jednu mašinu. Ova faza može da traje do šest mjeseci.
- II – Skaliranje i obuka: Primijeniti „AI Duet“ programe koji uparjuju radnike sa sistemima. Izvršiti simulaciju DT-a za praksu donošenja odluka. Povežite sa MES/ERP sistemima putem API-ja. Ova faza može da traje od šest do osamnaest mjeseci.
- III – Kontinuirano učenje: Ovdje se primjenjuje učenje sa nadgledanjem iz povratnih informacija eksperata. Proširiti mrežu kognitivne automatizacije na cijeli pogon. Ova faza traje od 18 do 36 mjeseci i u njoj se postiže zrelost cijelog sistema.

Metrika koristi uspostavljenog sistema se izvodi prema modelu pokazanom u Tabeli 13.

Tabela 13. Pregled parametara koristi

Metrika	Raspon poboljšanja	Izvor
Brzina odlučivanja	40-60% brže	Capgemini istraživanje
Smanjenje grešaka	Smanjenje od 25–45%	McKinsey
Vrijeme obuke	30% kraće	Deloitte
OEE (Ukupna efektivnost opreme)	Povećanje od 5–15%	Svjetski ekonomski forum

Primjer je Lockheed Martinova kognitivna fabrika koja je smanjila nedostatak dijelova aviona za 50%, istovremeno osnažujući tehničare podrškom u donošenju odluka putem AI-a.

Budući trendovi u ovoj oblasti su definisani kao: neuro-simbolička AI – nastaje kombinovanjem neuronskih mreža sa zaključivanjem zasnovanim na pravilima, sistemi svjesni emocija – prilagođavanje preporuka na osnovu nivoa stresa operatera, i edge AI – kognitivna automatizacija u realnom vremenu bez zavisnosti od clouda.

Kognitivna automatizacija u pametnoj proizvodnji stvara pravo partnerstvo između čovjeka i AI-a putem: poboljšanja ljudskog rasuđivanja uvidima zasnovanim na podacima, smanjenjem kognitivnog preopterećenja kod složenih odluka i održavanjem ljudskog nadzora za etičko poslovanje.

6. Zaključak

Evolucija pametne proizvodnje predstavlja promjenu paradigme u proizvodnji, gdje besprijekorna integracija ljudskog znanja i naprednih tehnologija pokreće efikasnost, fleksibilnost i inovacije. Kako industrije prelaze na Industriju 4.0 i dalje, saradnja između AI-a, IoT-a, robotike i radnika pokazala

se ključnom u optimizaciji proizvodnih procesa uz održavanje prilagodljivosti. Ključni zaključci bi se definisali kao:

- (a) sinergija čovjeka i mašine – budućnost proizvodnje nije zamjena ljudi, već poboljšanje njihovih sposobnosti putem donošenja odluka potpomognutih AI-om, kobota i intuitivnih razmjena znanja,
- (b) transformacija radne snage – zaposleni moraju prijeći sa fizičkih radnih uloga na nadzorne, analitičke i kreativne pozicije, što zahtijeva kontinuirane programe usavršavanja i digitalne pismenosti,
- (c) izazovi i rješenja – iako visoki troškovi, rizici po kibernetiku bezbjednost i otpor radne snage predstavljaju prepreke, strateška ulaganja u modularnu automatizaciju, sigurne IoT okvire i angažman zaposlenika mogu ublažiti ove probleme,
- (d) održiva i prilagodljiva budućnost – novi trendovi poput Industrije 5.0, DT-a i održavanja potpomognutog AR-a ističu rastuću ulogu ljudske kreativnosti i održivosti u pametnoj proizvodnji.

Uspjeh pametne proizvodnje zavisi od uravnoteženog pristupa – korišćenja najsavremenije tehnologije uz očuvanje kritičkog razmišljanja, prilagodljivosti i domišljatosti radnika. Podsticanjem kolaborativnog ekosistema, industrije mogu postići otporne, efikasne i za budućnost spremne proizvodne sisteme.

Reference

- [1]. Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. National Academy of Science and Engineering. <https://www.din.de/resource/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>.
- [2]. Zheng, P., Wang, H., Sang, Z. et al. (2021). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2225-2236. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2998731>.
- [3]. National Institute of Standards and Technology (NIST) (2020). Smart Manufacturing: Current Status and Future Trends. <https://www.nist.gov/programs-projects/smart-manufacturing-systems>.
- [4]. World Economic Forum (WEF) (2021). Global Lighthouse Network: Insights from the Forefront of the Fourth Industrial Revolution. <https://www.weforum.org/reports/global-lighthouse-network-insights-from-the-forefront-of-the-fourth-industrial-revolution>.
- [5]. McKinsey & Company (2020). Smart manufacturing: Capturing value at scale in Industry 4.0. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/smart-manufacturing-capturing-value-at-scale-in-industry-four-point-zero>.
- [6]. International Society of Automation (ISA) (2018). Smart Manufacturing: The Essential Guide. <https://www.isa.org/>.
- [7]. Zheng, P., Wang, H., Sang, Z. et al. (2021). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2225-2236. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2998731>.
- [8]. Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>.
- [9]. National Institute of Standards and Technology (NIST) (2016). Smart Manufacturing Operations Planning and Control Program. <https://www.nist.gov/programs-projects/smart-manufacturing-systems>.
- [10]. European Commission (2020). Smart Manufacturing in the Digital Single Market. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/smart-manufacturing>.
- [11]. Fatima Ezahra Touriki, Imane Benkhathi, Sachin S. Kamble, Amine Belhadi, Said El fezazi, An integrated smart, green, resilient, and lean manufacturing framework: A literature review and future research directions, *Journal of Cleaner Production*, Volume 319, 2021, 128691, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128691>.
- [12]. Yuqian Lu, Xun Xu, Lihui Wang, Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 56, 2020, Pages 312-325, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010>.

- [13]. Snehasis Sahoo, Cheng-Yao Lo, Smart manufacturing powered by recent technological advancements: A review, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 64, 2022, Pages 236-250, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.008>.
- [14]. Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J. & Watson, T. (2018). The Industrial Internet of Things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>.
- [15]. Romero, D., Stahre, J., Wuest, T. et al. (2020). Human-Centered Cyber-Physical Production Systems: A Roadmap Toward the Operator 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10952-10959. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2857>.
- [16]. PwC (2020). Industrial Internet of Things (IIoT) in manufacturing: A PwC survey. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industry-4-0/landing-page/industrial-internet-of-things.html>.
- [17]. McKinsey & Company (2021). The Internet of Things in manufacturing: Opportunities for operators. <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-internet-of-things-in-manufacturing>.
- [18]. Siemens (2019). Digital Enterprise Report: IIoT and the Future of Human-Machine Interaction. <https://new.siemens.com/global/en/company/topic-areas/digital-enterprise.html>.
- [19]. Zhang, C., Xu, W., Liu, J. et al. (2021). A deep learning-based approach for predictive maintenance in smart factories. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2281-2291. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2999465>.
- [20]. Wang, J., Ma, Y., Zhang, L. et al. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 144-156. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003>.
- [21]. Lei, Y., Li, N., Guo, L. et al. (2018). Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 799-834. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.016>.
- [22]. IBM (2020). AI-powered predictive maintenance in manufacturing. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iiot-predictive-maintenance/>.
- [23]. Kang, B., Kim, D. & Kang, S. H. (2020). Real-time quality control in smart manufacturing using deep learning. *IEEE Access*, 8, 9436-9445. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964708>.
- [24]. Tercan, H., Meisen, T. & Jeschke, S. (2018). Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: A systematic review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33, 1879-1905. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01963-8>.
- [25]. General Electric (GE) (2019). AI for quality inspection in manufacturing. <https://www.ge.com/digital/blog/how-ai-and-machine-learning-are-transforming-quality-inspection>.
- [26]. McKinsey & Company (2022). AI in manufacturing: Use cases and value potential. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/ai-in-manufacturing-use-cases-and-value-potential>.
- [27]. Capgemini (2021). Smart quality control: How AI is improving product inspection. <https://www.capgemini.com/research/smart-quality-control/>.
- [28]. Siemens (2020). AI-based predictive maintenance with MindSphere. <https://siemens.com/mindsphere>.
- [29]. Wang, L., Gao, R., Váncza, J. et al. (2019). Symbiotic human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 68(2), 701-726. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.002>.
- [30]. Universal Robots (2021). Collaborative robots in smart manufacturing: Case studies. <https://www.universal-robots.com/case-stories/>.
- [31]. ABB (2020). YuMi: The world's first truly collaborative dual-arm robot. <https://new.abb.com/products/robotics/yumi>.
- [32]. Boston Consulting Group (BCG) (2022). The rise of robotics in manufacturing. <https://www.bcg.com/publications/2022/rise-of-robotics-in-manufacturing>.
- [33]. El Zaatar, S., Marei, M., Li, W. & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116, 162-180. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>.
- [34]. World Economic Forum (WEF) (2021). The Future of Jobs Report 2021. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2020>.
- [35]. Lee, J., Kao, H. A. & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16, 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>.

- [36]. Tao, F., Cheng, Y. & Zhang, L. (2017). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563-3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
- [37]. Microsoft Azure (2022). Azure IoT in manufacturing: Real-time analytics and decision-making. <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/industries/manufacturing/>.
- [38]. Kamble, S. S., Gunasekaran, A. & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1319-1347. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630772>.
- [39]. McKinsey & Company (2021). Big data and advanced analytics in manufacturing. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/big-data-and-advanced-analytics-in-manufacturing>.
- [40]. Siemens MindSphere (2022). Data-driven decision making in smart factories. <https://siemens.com/mindsphere>.
- [41]. IBM (2020). Overcoming challenges in industrial big data. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/industrial-big-data-challenges/>.
- [42]. Tao, F., Cheng, Y., Zhang, L. & Nee, A.Y.C. (2017). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>.
- [43]. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G. et al. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
- [44]. Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C. E. & Espindola, D.B. (2016). Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30), 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.115>.
- [45]. Siemens (2021). Digital Twins in Manufacturing: From Concept to Reality. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465>.
- [46]. General Electric (GE) (2020). Digital Twin: Bridging the Physical and Digital Worlds. <https://www.ge.com/digital/blog/what-digital-twin>.
- [47]. Dassault Systèmes (2022). Virtual Twin Experience for Manufacturing. <https://www.3ds.com/products-services/3dexperience/virtual-twin/>.
- [48]. Qi, Q. & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison."* *IEEE Access*, 6, 3585-3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>.
- [49]. Romero, D., Stahre, J., Wuest, T. et al. (2020). Human-Centered Cyber-Physical Production Systems: A Roadmap Toward the Operator 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10952-10959. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2857>.
- [50]. Pacaux-Lemoine, M.-P., Trentesaux, D., Rey, G. Z. & Millot, P. (2017). Designing intelligent manufacturing systems through Human-Machine Cooperation principles: A human-centered approach. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 581-595. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.014>.
- [51]. Longo, F., Nicoletti, L. & Padovano, A. (2019). Human-robot collaboration in Industry 4.0: A literature review. *Procedia CIRP*, 83, 1296-1301. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.107>.
- [52]. Villani, V., Pini, F., Leali, F. & Secchi, C. (2018). Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>.
- [53]. El Zaatari, S., Marei, M., Li, W. & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116, 162-180. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>.
- [54]. World Economic Forum (WEF) (2021). The Future of Jobs Report 2021. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2020>.
- [55]. World Economic Forum (WEF) (2023). The Future of Jobs Report 2023. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2023/>.
- [56]. Deloitte (2020). The Smart Factory @ Wichita: Workforce implications and reskilling strategies. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing/smart-factory-workforce-implications.html>.
- [57]. European Commission (2021). Digital Education Action Plan (2021-2027). <https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/action-plan>.

- [58]. Bosch (2021). Bosch Rexroth: Smart Factory Training Programs.
<https://www.boschrexroth.com/en/xc/company/smart-factory/training>.
- [59]. PwC (2021). Upskilling for the future: How to prepare your workforce for Industry 4.0.
<https://www.pwc.com/gx/en/issues/upskilling/industry-4.0.html>.
- [60]. McKinsey & Company (2022). Building workforce skills at scale to thrive during Industry 4.0.
<https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/building-workforce-skills-at-scale-to-thrive-during-industry-4>.
- [61]. ILO (International Labour Organization) (2022). Skills for a greener future: A global view.
https://www.ilo.org/global/topics/green-jobs/publications/WCMS_755282/lang-en/index.htm.
- [62]. Siemens (2022). Siemens Academy of Technology: Training for the digital age.
<https://new.siemens.com/global/en/company/jobs/your-career/siemens-academy.html>.
- [63]. MIT Sloan Management Review (2020). How Companies Are Reskilling to Address Talent Gaps.
<https://sloanreview.mit.edu/article/how-companies-are-reskilling-to-address-talent-gaps/>.
- [64]. Zheng, P., Wang, H., Sang, Z. et al. (2021). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2225-2236. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2998731>.
- [65]. Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M. & Zühlke, D. (2014). Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 289-294.
<https://doi.org/10.1109/INDIN.2014.6945523>.
- [66]. Siemens (2022). AI-Assisted Decision Making in Smart Factories.
<https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/mindsphere/ai-decision-making.html>.
- [67]. Bosch (2021). Cognitive Automation in Manufacturing: The Bosch Approach.
<https://www.bosch.com/research/know-how/cognitive-automation/>.
- [68]. IBM (2020). AI for Decision Making in Industrial Settings. <https://www.ibm.com/watson/ai-decision-making/>.
- [69]. IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems (2019). Ethically Aligned Design: A Vision for Prioritizing Human Well-being with Autonomous and Intelligent Systems.
<https://ethicsinaction.ieee.org/>.
- [70]. EU Guidelines on Trustworthy AI (2019).
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>.

SMART MANUFACTURING AS THE INTEGRATION OF MAN AND TECHNOLOGY

Prof. Dr. Vidosav D. Majstorović
University of Belgrade - Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia
E-mail: vidosav.majstorovic@gmail.com

ABSTRACT

The integration of human expertise and advanced technologies in smart production represents a transformative shift in modern production, guided by the principles of Industry 4.0/5.0. Smart manufacturing uses AI, IoT, robotics, big data and digital twins to create highly efficient, flexible and adaptive manufacturing systems. However, the success of these systems depends on seamless collaboration between humans and machines, ensuring both technological efficiency and workforce adaptability. Key aspects of these factories are: (a) technological enablers, as smart factories rely on IIoT, AI-driven automation, collaborative robots (cobots) and real-time data analytics, to optimize production, (b) a human-centric approach, where workers move from manual roles to supervisory, analytical and creative functions, which requires upskilling and digital literacy, (c) implementation challenges relate to high costs, cyber security risks, workforce resistance and issues interoperability, and (d) future trends in this area relate to the full implementation of Industry 5.0, where man-machine synergy is emphasized with Augmented Reality (AR) for training and sustainable smart manufacturing. The future of smart manufacturing lies in balancing automation and human ingenuity, ensuring that technology enhances, not replaces, human capabilities. Successful implementation requires investment in workforce training, cyber security and scalable smart factory frameworks.

Keywords: Industry 5.0, Industry 4.0, Smart production, Development.

EVOLUCIJA ROBOTSKIH PRIHVATNICA U KONTEKSTU INDUSTRIJE 4.0: TEHNOLOŠKI NAPREDAK I PRIMJENA U AUTOMATIZOVANOM SORTIRANJU I PALETIZACIJI

Isak Karabegović¹, Ermin Husak², Samir Vojić²

¹ Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

² Univerzitet u Bihać, Tehnički fakultet Bihać, Bihać, Bosna i Hercegovina

Korespondirajući autor: isak1910@hotmail.com

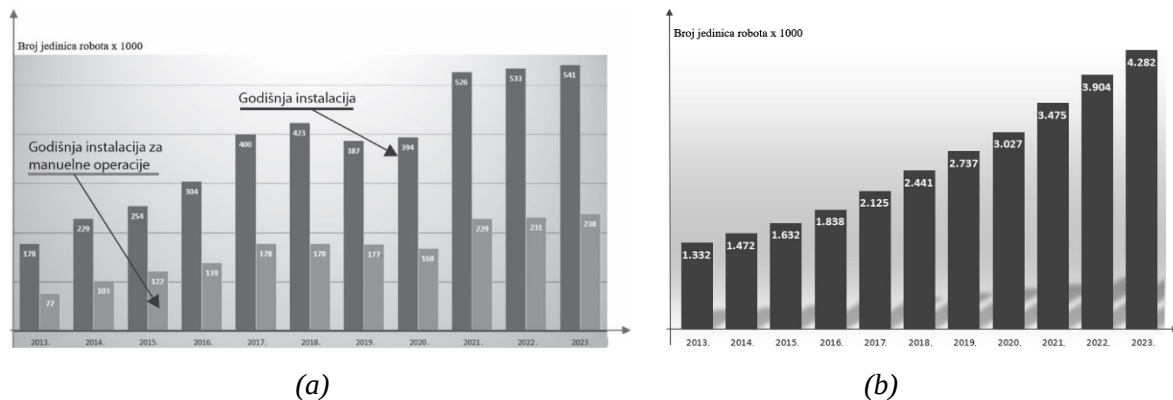
SAŽETAK

U savremenim proizvodnim i logističkim sistemima zasnovanim na principima Industrije 4.0, robotske prihvatnice predstavljaju ključni element za ostvarivanje visokoautomatizovanih i fleksibilnih procesa. Ovaj pregledni rad analizira tehnološku evoluciju prihvatnica industrijskih robota kroz prizmu njihove primjene u automatizovanom sortiranju i paletizaciji paketa. Prikazana je klasifikacija prihvatnica – mehaničkih, vakuumskih, magnetnih i adaptivnih – uz osvrt na njihove tehničke karakteristike, funkcionalne mogućnosti i pogodnost za različite operativne zahtjeve. Poseban fokus stavljen je na integraciju senzorskih sistema, napredne kontrole i vještačke inteligencije, koje omogućavaju autonomnu i preciznu manipulaciju objektima različitih oblika i materijala u dinamičnim okruženjima. Upoređuju se performanse robotskih sistema s tradicionalnim, ljudskim radom u kontekstu efikasnosti, sigurnosti, pouzdanosti i troškovne isplativosti. Kroz primjere implementacije u industrijama kao što su prehrambena, farmaceutska i e-trgovina, istaknute su prednosti i izazovi uvođenja naprednih prihvatnica, uključujući obradu nepravilnih objekata, sistemsku integraciju i prilagodljivost. Rad završava identifikacijom ključnih pravaca budućih istraživanja usmjerenih ka razvoju inteligentnijih, senzorski bogatijih i interoperabilnih prihvatnih rješenja u službi daljeg razvoja automatizacije unutar paradigme Industrije 4.0.

Ključne riječi: *Industrija 4.0, robotske prihvatnice, sortiranje i paletizacija, adaptivne tehnologije, automatizacija, inteligentni sistemi, robotika u logistici*

1. Uvod

Automatizacija je postala obilježje savremenih industrijskih proizvodnih sistema, omogućavajući preduzećima da povećaju efikasnost, smanje operativne troškove i unaprijede sigurnost na radu. U središtu ove transformacije nalaze se industrijski roboti, koji preuzimaju ponavljajuće, fizički zahtjevne i potencijalno opasne zadatke [1–3]. Prema podacima Međunarodne federacije za robotiku [4], svjetski fond industrijskih robota premašio je 4,28 miliona jedinica do 2023. godine, što ukazuje na decenijski trend stabilnog rasta. Na Slici 1 (a) prikazan je nagli porast godišnjih instalacija robota – sa 178.000 jedinica u 2013. na 541.000 u 2023. godini. Iako je tokom 2019. i 2020. zabilježena stagnacija, oporavak tržišta je bio brz, naročito u postpandemijskom periodu. Slika 1 (b) ilustruje kumulativni broj instaliranih robota, koji se više nego utrostručio – sa 1,33 miliona u 2013. na preko 4,28 miliona do 2023. godine, što potvrđuje dugoročnu opredijeljenost industrije ka automatizaciji. Jedna od ključnih primjena industrijskih robota odnosi se na manipulaciju materijalima, koja čini gotovo 44% ukupne upotrebe robota u industriji. Ovo ukazuje na stratešku važnost robotskih prihvatnica (end-effectora) kao posrednika između robota i objekata koje manipulišu. Na Slici 1 (c) prikazani su podaci koji upoređuju ukupne instalacije robota s onima koji se koriste isključivo za manuelne operacije poput sortiranja i paletizacije, gdje broj takvih robota raste sa 77.000 u 2013. na 238.000 u 2023. godini [4–10]. Ovi trendovi jasno potvrđuju rastuću potrebu za naprednim i fleksibilnim prihvatnicama koje mogu replicirati ljudsku spretnost u zahtjevnim radnim uslovima. Integracija naprednih prihvatnica s robotima, uključujući mehaničke, vakuumske, magnetne, adaptivne i „soft” varijante, predstavlja pokretačku snagu savremene automatizacije u logistici i proizvodnji. Svaka od ovih kategorija optimizirana je za određene primjene u skladu s oblikom, težinom i materijalom objekata [11].



Slika 1. Primjena industrijskih robota: (a) ukupno korištenje robota i (b) godišnje korištenje robota i korištenje robota u operacijama rukovanja

U svom radu *An Overview of Robotic Grippers*, Cairnes i saradnici nude detaljnu klasifikaciju prihvatnica, naglašavajući važnost senzorske integracije i mehaničke fleksibilnosti za efikasno djelovanje u realnim uslovima punim neizvjesnosti. Među najznačajnijim savremenim primjenama robotskih prihvatnica ističu se sortiranje i paletizacija paketa, naročito u sektorima visokog protoka kao što su e-trgovina, farmaceutska i prehrambena industrija. Romero i saradnici [12] u studiji *Trajectory Planning for Robotic Manipulators in Automated Palletizing* naglašavaju da uspješnost paletizacije zavisi ne samo od kontrole kretanja robota već i od fleksibilnosti i prilagodljivosti same prihvatnice. Njihova istraživanja pokazuju da adaptivne prihvatnice opremljene pametnim

algoritmima kontrole omogućuju efikasniju obradu objekata različitih dimenzija i pakovanja. Dalji razvoj senzorskih i AI tehnologija dodatno proširuje mogućnosti primjene robota [13]. Takács, Elek i Haidegger [2] ističu ulogu vizuelne obrade slike u unapređenju robusnosti zahvata, posebno korisne u nestrukturiranim okruženjima. Li, Yan, Yu i saradnici [14] nude detaljan pregled haptičkog i vizuelnog zahvata u inteligentnim robotskim sistemima, pokazujući kako vještačka inteligencija i metode dubokog učenja unapređuju autonomnu prilagodbu prihvatnica za manipulaciju nepravilnim objektima. Ovaj rad ima za cilj da ponudi sveobuhvatnu analizu savremenih tehnologija robotskih prihvatnica, s posebnim naglaskom na njihovu primjenu u automatizovanom sortiranju i paletizaciji paketa. Metodološki okvir zasniva se na sistematskom pregledu naučne literature indeksirane u bazama Web of Science i Scopus, fokusirajući se na recenzirane publikacije iz posljednje decenije [11-14]. Osim tehničkog pregleda stanja, rad uključuje komparativnu analizu robotskih i ručnih metoda paletizacije u kontekstu produktivnosti, preciznosti, sigurnosti i ekonomske isplativosti, stvarajući osnovu za dalja istraživanja i primjenu u industrijskoj praksi.

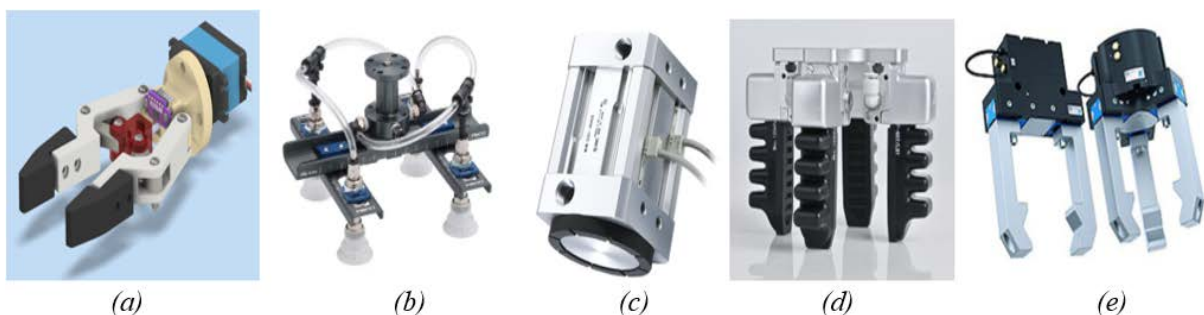
2. Klasifikacija robotskih prihvatnica za industrijske robote

Prihvatnice, često nazivane i krajnjim efektorima (engl. *end-effectors*), predstavljaju završni element u kinematičkom lancu industrijskog robota. One čine sučelje između robota i objekta koji se manipuliše, te je njihov pravilan odabir i dizajn od suštinskog značaja za postizanje visoke operativne efikasnosti, preciznosti i sigurnosti u automatizovanim procesima. U kontekstu Industrije 4.0, gdje se zahtijeva sve veća fleksibilnost, adaptivnost i integracija s pametnim tehnologijama, razvoj različitih tipova prihvatnica postaje ključno područje istraživanja i primjene [15].

Na osnovu mehanizma hvatanja i stepena prilagodljivosti, prihvatnice se mogu klasificirati u nekoliko glavnih kategorija:

- mehaničke prihvatnice,
- vakuumske i pneumatske prihvatnice,
- magnetne prihvatnice,
- adaptivne i „soft“ prihvatnice i
- hibridne (kombinovane) prihvatnice.

Različite vrste hvataljki, klasificirane prema mehanizmu hvatanja i stupnju prilagodljivosti, prikazane su na Slici 2. [16-20].



Slika 2. Primjeri klasifikacije prihvatnica prema mehanizmu hvatanja i stepenu prilagodljivosti:
a) mehanička, b) pneumatska, c) magnetna, d) adaptivna i soft, e) kombinovana (hibridna)

Mehaničke prihvatnice su najčešće korištena vrsta i funkcionišu putem direktnog fizičkog kontakta s objektom, koristeći čeljusti ili prste za njegovo obuhvatanje. Mogu se podijeliti na paralelne, troprste i višezglobne prihvatnice. Paralelne prihvatnice karakteriše visoka preciznost pozicioniranja i pogodne su za zadatke ponavljajućeg uzimanja i odlaganja. Troprste prihvatnice

omogućuju veću spretnost i mogu manipulirati cilindričnim ili nepravilno oblikovanim objektima, dok višezglobne prihvatnice oponašaju pokrete ljudske ruke, pružajući veću fleksibilnost, posebno u kolaborativnoj i servisnoj robotici [14].

Vakuumske prihvatnice koriste se u aplikacijama koje uključuju ravne i glatke površine, poput kartonskih kutija, stakla ili metalnih ploča. One funkcioniraju na principu stvaranja negativnog pritiska kako bi podigle objekte i često se integrišu u sisteme za brzo sortiranje i paletizaciju. *Pneumatske prihvatnice*, s druge strane, koriste komprimirani zrak za pogon mehaničkih čeljusti. Zbog jednostavnosti, brzine i niskih troškova, široko su zastupljene u industrijskoj automatizaciji. Kao što ističu Romero i saradnici [12], vakuumske prihvatnice su naročito efikasne u logističkim operacijama gdje je važno brzo i bez oštećenja rukovati paketima.

Magnetne prihvatnice su pogodne za rukovanje feromagnetnim materijalima, posebno u industriji obrade metala. Mogu biti izvedene kao permanentni magneti ili elektromagneti. Njihova prednost ogleda se u jednostavnosti i mogućnosti podizanja objekata bez mehaničkog kontakta, ali su ograničene isključivo na magnetne materijale i zahtijevaju pažljivu kontrolu zbog potencijalnih sigurnosnih rizika [22].

Nedavni napredak u oblasti meke robotike (engl. *soft robotics*) doveo je do razvoja *adaptivnih i „soft“ prihvatnica*, izrađenih od fleksibilnih, deformabilnih materijala. Takve prihvatnice imaju sposobnost da se prilagode obliku objekta, omogućavajući sigurno i stabilno hvatanje lomljivih ili nepravilno oblikovanih predmeta, kao što su prehrambeni proizvodi ili medicinski pribor. Takács i saradnici [2] ističu važnost upotrebe taktilnih senzora i algoritama mašinskog učenja u poboljšanju performansi „soft“ prihvatnica u nestrukturiranim okruženjima.

Na kraju, *hibridne prihvatnice* predstavljaju kombinaciju više principa hvatanja – na primjer, mehaničkog i vakuumskog ili soft i magnetnog – unutar jedinstvenog dizajna, kako bi se postigla veća svestranost i širi opseg primjene. Ovi sistemi sve se više koriste u skladištima i centrima za distribuciju, gdje raznolikost pakovanja i proizvoda zahtijeva multifunkcionalne strategije hvatanja.

3. Tehnološki napredak i pametne funkcionalnosti robotskih prihvatnica

U savremenim logističkim i proizvodnim sistemima koji se razvijaju u duhu Industrije 4.0, robotske prihvatnice više ne predstavljaju pasivne mehaničke dodatke, već napredne funkcionalne module opremljene senzorima, algoritmima vještačke inteligencije i mogućnostima prilagodbe. Ovakve prihvatnice omogućavaju fleksibilno, precizno i efikasno rukovanje različitim paketima u procesima sortiranja i paletizacije. Ovo poglavlje daje pregled ključnih tehnoloških rješenja koja podstiču razvoj inteligentnih prihvatnica, uključujući integraciju senzora, prilagodljivost prema obliku i materijalu objekta, primjenu AI i mašinskog učenja u upravljačkim sistemima te interoperabilnost s mobilnim robotima i drugim automatiziranim platformama.

3.1. Pametne prihvatnice i sistemska integracija u okviru Industrije 4.0

Jedan od ključnih elemenata savremenih prihvatnica jeste ugradnja različitih tipova senzora, koji omogućavaju robotima percepciju okruženja i optimizaciju zahvata u stvarnom vremenu [21]. Senzori sile i obrtnog momenta, najčešće smješteni u zglobovima ili na prstima prihvatnice, omogućavaju preciznu kontrolu pritiska, što je ključno kod rukovanja osjetljivim predmetima [23, 24]. Pozicioni senzori (enkoderi, LIDAR) pomažu u preciznom lociranju objekta, dok ugrađeni 2D/3D vizuelni sistemi omogućavaju prepoznavanje, orijentaciju i detekciju oštećenja kao što pokazuje Slika 3. [25].



Slika 3. Primjena pametne prihvatnice sa integrisanom 3D vizijom u sistemu sortiranja paketa

Na Slici 3. je prikazana pametna prihvatnica sa integrisanim kamerama i senzorima, sposobna za prepoznavanje i selektivno rukovanje velikim brojem heterogenih pošiljki u e-commerce sortirnici. U automatiziranim sistemima za sortiranje pošiljki, roboti opremljeni kamerama visoke rezolucije, dubinskim senzorima i algoritmima mašinskog učenja kombinuju senzorska očitavanja, prepoznavanje objekata i dinamičko planiranje hvatanja kako bi detektovali barkodove, dimenzije i površinske karakteristike paketa [26-28]. Vizuelni senzori omogućavaju da prihvatnica automatski prilagodi svoju putanju prema karakteristikama objekta. Tradicionalne prihvatnice bile su ograničene na rukovanje čvrstim i pravilnim objektima. Današnje logističko okruženje, posebno u e-trgovini, zahtijeva sposobnost manipulisanja paketima različitih veličina, oblika i materijala – od kutija do deformabilnih plastičnih vrećica. Kao odgovor na te izazove razvijene su adaptivne i „soft“ prihvatnice, izrađene od fleksibilnih materijala poput silikona i polimera, koje se mogu prilagoditi nepravilnim oblicima (Slika 4.). Na Slici 4. prikazana je adaptivna soft prihvatnica na bazi silikona, u primjeni u logističkom okruženju, demonstrirajući sposobnost nježne manipulacije različitim vrstama pakiranja [29].



Slika 4. Adaptivne soft prihvatnice za nepravilne objekte

Često su opremljene taktilnim senzorima koji omogućavaju dinamičku regulaciju sile hvatanja. Ovakve prihvatnice su naročito korisne u situacijama gdje robot mora brzo prelaziti s predmeta različitih fizičkih svojstava, npr. od staklene boce do vakumiranog proizvoda. Zabilježeni su i primjeri eksperimentalnih implementacija ovih sistema u distribucijskim centrima, gdje se adaptivne prihvatnice koriste za rukovanje lokalno proizvedenim artiklima u različitim vrstama pakovanja. Kako bi se detaljno prikazale ključne tehnološke komponente i funkcionalnosti savremenih prihvatnica u kontekstu Industrije 4.0, u nastavku je prikazana sistematizacija najrelevantnijih rješenja koja se danas primjenjuju u logističkim procesima sortiranja i paletizacije. Radi sistematizacije osnovnih tehnologija i njihovih industrijskih primjena, Tabela 1. daje pregled najznačajnijih rješenja implementiranih u logističkim operacijama sortiranja i paletizacije, posebno u okruženjima Industrije 4.0 [30, 31].

Tabela 1. Tehnološke karakteristike i funkcionalnosti naprednih robotskih prihvatnica u kontekstu Industrije 4.0

Tehnološki element	Opis funkcionalnosti	Primjena u sortiranju/paletizaciji	Primjer implementacije
Senzori sile i momenta	Detekcija i regulacija kontaktne sile u realnom vremenu	Zaštićeno rukovanje lomljivim predmetima	ABB, KUKA sistemi za e-commerce
Vizuelni sistemi (2D/3D)	Prepoznavanje objekata, orijentacije i barkoda	Automatska identifikacija i sortiranje paketa	Cognex + FANUC, Amazon Robotics
Adaptivne/soft prihvatnice	Prilagodba obliku i materijalu paketa	Rukovanje deformabilnim i raznolikim objektima	Festo soft grippers, Robotiq
AI/ML integracija	Učenje optimalnog hvata i donošenje odluka	Samostalno prepoznavanje i manipulacija	Amazon, Alibaba, EU AI pilot projekti
Interoperabilnost (OPC UA, ROS2)	Komunikacija s mobilnim robotima, ERP sistemima i senzorima	Koordinacija u kompleksnim sistemima	DHL, Bosch, Siemens
IoT i prediktivno održavanje	Dijagnostika stanja i predviđanje kvarova	Smanjenje zastoja i povećanje efikasnosti	IoT-enabled gripperi u pametnim skladištima

Ova klasifikacija pokazuje da integracija senzora, vizuelnih sistema, vještačke inteligencije i IoT-a omogućava znatno povećanje efikasnosti i fleksibilnosti robotskih prihvatnica, što je posebno izraženo u kompleksnim zadacima kao što su sortiranje nehomogenih paketa i paletizacija u realnom vremenu.

3.2. Uloga vještačke inteligencije u unapređenju performansi prihvatnica

Primjena tehnologija vještačke inteligencije omogućila je prelazak s tradicionalnog programiranja na adaptivne, iskustveno zasnovane strategije upravljanja. Putem algoritama pojačanog učenja i konvolucionih neuronskih mreža (CNN), robotski sistemi mogu samostalno učiti optimalne metode hvatanja kroz interakciju s objektima u realnim uvjetima [26]. Primjeri iz prakse, poput sistema koje razvija Amazon Robotics, pokazuju kako se veliki skupovi podataka koriste za treniranje modela koji predviđaju najbolju tačku i orijentaciju hvata. Ovakav pristup smanjuje potrebu za ručnim podešavanjem parametara, povećava robusnost sistema i ubrzava ciklus izvršenja zadatka. U kontekstu digitalne transformacije regije zapadnog Balkana, naročito kroz projekte koje podržava EU, raste interes za uvođenje AI tehnologija u funkciji automatizovanog vizuelnog nadzora i prepoznavanja nestrukturiranih objekata u industrijskim procesima.

3.3. Interoperabilnost i povezivanje u pametnim logističkim sistemima

Savremene prihvatnice sve češće funkcionišu kao dio integrisanih sistema za manipulaciju materijalima, koji obuhvataju mobilne robote (AGV – automatski vođena vozila, AMR – autonomni mobilni roboti), fiksne robotske ruke i ERP sisteme. Interoperabilnost podrazumijeva mogućnost prihvatnice da komunicira s drugim komponentama pomoću standardizovanih protokola (npr. OPC UA, ROS2) i da u realnom vremenu prilagodi svoje ponašanje u skladu s kontekstualnim podacima. Na primjer, mobilni robot može detektovati da određeni paket prelazi njegovu nosivost i automatski delegirati zadatak kolaborativnom robotu s odgovarajućom prihvatnicom. Dodatno, prihvatnice povezane s IoT mrežom mogu u realnom vremenu slati podatke o habanju, kvarovima ili potrebama za održavanjem, čime se omogućava prediktivno održavanje i smanjuju zastoji u radu. Takva

inteligentna koordinacija već se koristi u velikim logističkim sistemima kompanija poput DHL-a, Boscha i Alibabe, a s napredovanjem digitalizacije, očekuje se njihovo šire uvođenje i u jugoistočnu Evropu [27].

Robotske prihvatnice nove generacije postaju ključni elementi pametne automatizacije, omogućavajući visok stepen autonomije, preciznosti i prilagodljivosti u složenim zadacima sortiranja i paletizacije. Kroz kombinaciju senzorike, vještačke inteligencije (AI), meke robotike i systemske integracije, prihvatnice su prepoznate kao centar pametnih rješenja koja povećavaju produktivnost i sigurnost.

4. Primjena robotskih prihvatnica u sortirnim i paletizacijskim procesima

Robotske prihvatnice zauzimaju centralno mjesto u savremenim automatiziranim sistemima, posebno unutar sektora logistike, prehrambene i farmaceutske industrije te rastuće e-trgovine. S obzirom na ubrzan rast potreba za efikasnim, pouzdanim i fleksibilnim rukovanjem paketima različitih dimenzija, oblika i osjetljivosti, tehnologija prihvatnica se kontinuirano razvija u pravcu inteligentnih, prilagodljivih i preciznih rješenja. U ovom dijelu rada razmatraju se dvije ključne aplikacije: automatizovano sortiranje i robotska paletizacija, koje čine temelj funkcionalnosti modernih skladišnih i proizvodnih sistema u okruženju Industrije 4.0.

4.1 Automatizovano sortiranje: Vizuelno vođeno prepoznavanje i inteligentno rukovanje

U savremenim logističkim i poštanskim centrima, automatizovano sortiranje se temelji na integraciji robotskih sistema s naprednim prihvatnicama koje upravljaju velikim brojem paketa na sat. Takvi sistemi obično uključuju transportne trake, robotske ruke vođene vizijom te grippere sposobne da prepoznaju objekte pomoću barkodova, dimenzija, težine i odredišnog mjesta. Jedan od reprezentativnih primjera je Amazonov robotski centar, gdje stotine autonomnih mobilnih platformi (AMR) u sinergiji s robotskim rukama i AI-integriranim prihvatnicama vrše precizno sortiranje paketa u realnom vremenu. Slična rješenja primjenjuju se i u poštanskim servisima, poput Siemens DASS sistema, gdje se koriste kombinovane (vakuumske i paralelne) prihvatnice za manipulaciju paketima nepravilnog oblika. Na Slici 5. prikazani su reprezentativni primjeri naprednih robotskih prihvatnica koje se koriste u industrijskim procesima sortiranja i paletizacije, uključujući različite koncepte mehanizama hvatanja i njihove funkcionalne integracije s vizuelnim i kontrolnim sistemima [32-34].



Slika 5. Reprezentativni primjeri naprednih robotskih prihvatnica za sortiranje i paletizaciju paketa. Prikazane konfiguracije uključuju različite mehanizme hvatanja (vakuumske, mehaničke i adaptivne), uz integraciju sa vizuelnim sistemima i softverskom kontrolom u skladu sa zahtjevima Industrije 4.0

U prehrambenoj industriji, sortiranje podrazumijeva rad s osjetljivim i deformabilnim proizvodima (npr. peciva, voće, flaširana pića), pri čemu se koriste meke, fleksibilne prihvatnice koje omogućavaju higijensko i bezbjedno rukovanje bez oštećenja. U farmaceutskom sektoru, gdje je neophodna visoka preciznost i sterilnost, primjenjuju se troprste ili multifunkcionalne prihvatnice opremljene senzorima položaja i sile, koje omogućavaju pouzdanu manipulaciju sitnim i osjetljivim predmetima poput blister pakovanja i bočica. U Tabeli 1. prikazan je pregled ključnih tehnoloških komponenti i funkcionalnosti naprednih robotskih prihvatnica koje se koriste u sortirnim i paletizacijskim aplikacijama u okviru Industrije 4.0. Na Slici 1. prikazani su reprezentativni primjeri naprednih robotskih prihvatnica koje se koriste u industrijskim procesima sortiranja i paletizacije, uključujući različite koncepte mehanizama hvatanja i njihove funkcionalne integracije s vizuelnim i kontrolnim sistemima.

4.2 Robotska paletizacija: Inteligentno slaganje i integracija u proizvodne linije

Robotska paletizacija predstavlja proces automatizovanog slaganja proizvoda na palete s ciljem olakšanja skladištenja i transporta. Savremene prihvatnice moraju osigurati stabilno i precizno rukovanje paketima različitih oblika, masa i ambalaža. U tu svrhu koriste se različiti tipovi prihvatnica:

- *vakuumске prihvatnice* za brzo slaganje kutija sa ravnim površinama,
- *stezne (clamp) prihvatnice* za nepravilne i čvrsto upakovane artikle,
- *slojevite prihvatnice* koje omogućavaju podizanje čitavih slojeva proizvoda radi povećanja efikasnosti ciklusa.

Proizvođači kao što su KUKA, ABB i FANUC nude modularne ćelije za paletizaciju koje uključuju prihvatnice opremljene senzorima za mjerenje težine i pozicioniranje objekata i algoritmima vještačke inteligencije za optimalnu konfiguraciju slaganja. Ove ćelije su u potpunosti integrisane s proizvodnim i skladišnim linijama putem PLC, MES i ERP sistema, omogućavajući koordinirano upravljanje bez zastoja, naročito u just-in-time (JIT) okruženjima. U kontekstu automatizovanih skladišta (npr. AS/RS sistemi), robotske ruke sa zamjenjivim prihvatnicama obavljaju zadatke preuzimanja i odlaganja artikala u visokoregalnim strukturama, često u saradnji s mobilnim robotima. Zahvaljujući IoT povezivosti i inteligentnim senzorima, ove prihvatnice mogu autonomno reagovati na promjene u obliku ambalaže, prioritetima isporuke ili tokovima proizvodnje [35-38].

Primjena robotskih prihvatnica u sortirnim i paletizacijskim procesima postaje nezaobilazan dio digitalne transformacije proizvodnih i logističkih sistema. Njihova sposobnost adaptacije, preciznosti i inteligentne integracije čini ih ključnom tehnologijom za razvoj pametnih fabrika budućnosti.

5. Roboti i ljudi u paletizaciji: Izazovi i performanse

Uvođenje industrijskih robota u procese paletizacije značajno mijenja radne tokove u savremenim proizvodnim i skladišnim sistemima. Dok su ljudi tradicionalno obavljali ove zadatke, sve veći zahtjevi za brzinom, sigurnošću i smanjenjem troškova doprinose sve široj primjeni robotskih rješenja. Ovo poglavlje daje objedinjeni pregled performansi robotskih i ljudskih radnika u paletizaciji, analizira prednosti i izazove različitih tipova hvataljki, te razmatra buduće pravce razvoja. Roboti mogu raditi kontinuirano, dostižući i do 2.500 ciklusa na sat uz dosljedan kvalitet rada. U poređenju s tim, ljudski radnici nude visoku fleksibilnost, ali su podložni zamoru, greškama i povredama. Posebno u ponavljajućim, fizički zahtjevnim zadacima poput ručne paletizacije, roboti doprinose značajnom poboljšanju ergonomije i smanjenju povreda mišićno-koštanog sistema. Tabela 2. prikazuje poređenje različitih vrsta hvataljki i ljudske ruke u ključnim kategorijama kao što su

produktivnost, fleksibilnost i trošak. Iako robotski sistemi zahtijevaju značajna početna ulaganja (od 50.000 do 250.000 USD), njihova isplativost se ogleda u nižim troškovima rada, manjem broju povreda i neprekidnom radu. Ipak, rad s deformabilnim, nepravilnim i osjetljivim predmetima zahtijeva specijalizovane prihvatnice i sofisticirane senzore, što dodatno povećava tehničku složenost i troškove [37-39]. Takvi zahtjevi posebno otežavaju opravdanje investicija za manje proizvođače, posebno u uslovima niskoserijske proizvodnje.

Tabela 2. Komparativna analiza gripera i ljudske ruke u paletizaciji

Vrsta hvataljke	Produktivnost	Preciznost	Fleksibilnost	Sigurnost	Održavanje	Intervencija čovjeka	Trošak
Mehaničke hvataljke	Visoka	Visoka	Srednja	Srednja	Nisko	Minimalna	Srednji
Vakuum hvataljke	Visoka	Visoka	Ograničena	Visoka	Srednje	Minimalna	Srednje–visok
Magnetne hvataljke	Visoka	Visoka	Ograničena	Visoka	Nisko	Minimalna	Nizak
Adaptivne/soft hvataljke	Srednja	Srednja–visoka	Visoka	Visoka	Viša	Povremena	Visok
Ljudska ruka	Srednja–niža	Visoka	Izuzetno visoka	Niska	N/A	Obavezna	Promjenjiv
Roboti sa AI + gripperima	Visoka	Vrlo visoka	Visoka	Visoka	Srednje	Minimalna	Visok

Takvi zahtjevi posebno otežavaju opravdanje investicija za manje proizvođače, posebno u uslovima niskoserijske proizvodnje. Također, implementacija zahtijeva promjene u organizaciji rada, obuku osoblja i tehničku podršku. Budući razvoj ide ka univerzalnijim, bioinspirisanim hvataljkama izrađenim od fleksibilnih i pametnih materijala, sposobnih za prilagodljivo i sigurno rukovanje širokim spektrom objekata. Ugradnja senzora i AI omogućava automatsku prilagodbu hvatanja na osnovu povratnih informacija iz okruženja, što proširuje mogućnosti primjene u različitim industrijama.

6. Izazovi i perspektive razvoja hvataljki

Iako su tehnologije hvataljki značajno napredovale posljednjih godina, u razvoju i praktičnoj primjeni industrijskih hvataljki i dalje postoje brojni izazovi [40-42]. Jedno od glavnih tehničkih ograničenja je nedostatak univerzalne prilagodljivosti. Većina postojećih hvataljki dizajnirana je za rukovanje specifičnim vrstama objekata, što ograničava njihovu efikasnost u modernim proizvodnim linijama koje sve više koriste raznovrsne proizvode i ambalažu. Ovakva situacija nerijetko zahtijeva česte promjene alata ili složene sustave hvataljki na krajevima robota, što smanjuje ukupnu produktivnost. Drugi značajan izazov je prilagodba sve raznovrsnijim oblicima, veličinama i materijalima proizvoda. Kako industrije teže masovnoj personalizaciji i manjim serijama proizvodnje, hvataljke moraju postati fleksibilnije i osjetljivije kako bi mogle sigurno rukovati krhkim, nepravilnim ili višematerijalnim predmetima bez oštećenja. Ova potreba potiče istraživanja u području adaptivnih i mekih hvataljki, koje se mogu prilagoditi širokom spektru geometrijskih oblika i tekstura. Pitanja standardizacije i kompatibilnosti također otežavaju široku implementaciju. Nedostatak zajedničkih sučelja i modularnih dizajna znači da hvataljke često zahtijevaju prilagođenu integraciju s različitim robotskim rukama i kontrolnim sustavima. To povećava troškove te komplicira održavanje i

nadogradnju sustava. Pregled ključnih prednosti i izazova u primjeni robotskih hvataljki po industrijskim sektorima dat je u Tabeli 3.

Tabela 3. Prednosti i izazovi primjene robotskih hvataljki po industrijskim sektorima

Industrijski sektor	Ključne prednosti	Glavni izazovi
Logistika	– Povećana brzina i preciznost sortiranja – Smanjenje troškova rada – Mogućnost skaliranja	– Visoka raznolikost oblika i veličina paketa – Potreba za prepoznavanjem objekata u realnom vremenu
Prehrambena industrija	– Higijensko rukovanje osjetljivim artiklima – Dosljednost u pakiranju – Smanjenje otpada	– Hvatanje krhkih ili deformabilnih proizvoda – Održavanje higijenskih standarda
Farmaceutska industrija	– Precizno i sterilno rukovanje proizvodima – Minimizacija grešaka – Praćenje proizvoda (traceability)	– Strogi regulatorni zahtjevi – Rizik od kontaminacije – Potreba za visokom preciznošću

Gledajući u budućnost, trendovi razvoja hvataljki fokusiraju se na biološki inspirisane dizajne i korištenje naprednih fleksibilnih materijala. Inspirisani ljudskom rukom i prirodnim mehanizmima hvatanja, ovi dizajni nastoje spojiti snagu, spretnost i osjetljivost. Pametni materijali i ugrađeni senzori omogućavaju poboljšanu povratnu informaciju i kontrolu u stvarnom vremenu, čime se povećava pouzdanost hvatanja i sigurnost rukovanja predmetima. Također, integracija umjetne inteligencije i strojnog učenja obećava optimizaciju performansi hvataljki kroz adaptivno ponašanje temeljeno na senzorima i zahtjevima zadatka. Ova tehnološka unapređenja vjerojatno će proširiti primjenu hvataljki u različitim industrijama, povećavajući produktivnost i operativnu fleksibilnost.

7. Zaključak

Ovaj pregled je istaknuo ključnu ulogu naprednih tehnologija hvataljki u industriji automatizacije i robotike, posebno u primjenama koje uključuju sortiranje, pakiranje i paletizaciju. Različite vrste hvataljki – uključujući mehaničke, vakuumske, magnetske, adaptivne te robotske hvataljke unaprijeđene umjetnom inteligencijom – pokazuju specifične prednosti i ograničenja u pogledu produktivnosti, preciznosti, fleksibilnosti, sigurnosti, održavanja i troškova. Komparativna analiza između ljudske i robotske sposobnosti hvatanja pokazuje da, iako ljudi prednjače u prilagodljivosti i taktilnoj osjetljivosti, robotske hvataljke nude superiornu dosljednost, brzinu i izdržljivost, čineći ih nezamjenjivim elementom u modernim industrijskim okruženjima. Iz praktične i industrijske perspektive, kontinuirani razvoj tehnologija hvataljki odgovara sve većoj složenosti i raznolikosti proizvoda koje automatizirani sustavi moraju rukovati. Masovna personalizacija i prelazak na manje serije proizvodnje stvaraju potrebu za hvataljkama sposobnim da se prilagode raznovrsnim oblicima, dimenzijama i materijalima, bez kompromisa po pitanju brzine ili sigurnosti. Zbog toga sve veći broj sektora – uključujući logistiku, prehrambenu, farmaceutsku i elektroničku industriju – usvaja adaptivne i meke prihvatnice koje smanjuju rizik od oštećenja i osiguravaju kontinuitet u radu. Međutim, i dalje postoje izazovi, uključujući tehnička ograničenja univerzalne prilagodljivosti, probleme standardizacije te kompleksnost integracije u različite robotske platforme. Osiguravanje kompatibilnosti i interoperabilnosti između različitih hvataljki i robotskih ruku ključno je za smanjenje troškova implementacije i olakšavanje održavanja. Gledajući u budućnost, perspektive istraživanja usmjerene su na biološki inspirisane dizajne koji oponašaju spretnost i osjetljivost ljudske ruke te na razvoj fleksibilnih materijala sposobnih prilagoditi se različitim geometrijama objekata.

Integracija senzora i ugrađene inteligencije omogućava povratnu informaciju u stvarnom vremenu, čime se poboljšava pouzdanost hvatanja i sigurnost operacija. Primjena algoritama umjetne inteligencije i strojnog učenja omogućava hvataljkama dinamičku adaptaciju na promjenjive zadatke i uvjete, optimizirajući performanse i smanjujući potrebu za ljudskom intervencijom. Za istraživače i praktičare preporučuje se multidisciplinarni pristup koji kombinira mehaniku, materijalnu znanost, tehnologiju senzora i umjetnu inteligenciju u cilju razvoja hvataljki nove generacije. Suradnja između akademske zajednice i industrije olakšava prijenos inovativnih koncepata u praktične primjene, ubrzavajući prelazak prema potpuno autonomnim i inteligentnim robotskim sustavima. Napredne tehnologije hvataljki i dalje će ostati temelj inicijativa Industrije 4.0 i pametne proizvodnje. Njihov razvoj ne samo da povećava produktivnost i operativnu učinkovitost već i otvara nove mogućnosti za automatizaciju u različitim sektorima. Kontinuirana ulaganja u istraživanje, standardizaciju i integraciju tehnologija ključna su za otključavanje punog potencijala robotskih sustava hvatanja u narednim godinama.

Reference

- [1] Galin, R., & Meshcheryakov, R. (2019). Automation and robotics in the context of Industry 4.0: The shift to collaborative robots. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537(3), 032073. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032073>
- [2] Takács, K., Elek, R. N., & Haidegger, T. (2023). *Image-Processing Based Methods to Improve the Robustness of Robotic Gripping*. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2307.05648>
- [3] Karabegović I., Banjanović-Mehmedović L. (Ed.). (2021). *INDUSTRIAL ROBOTS: Advances in Research and Application*, NOVA Science Publisher, New York, USA, pp.1-26. <https://novapublishers.com/>
- [4] International Federation of Robotics (IFR). (2023). *World Robotics 2018 – Industrial Robots*. IFR: Frankfurt Am Main, Germany, 2023. <https://ifr.org>, (accessed on 2 August 2025).
- [5] International Federation of Robotics (IFR). (2013). *World Robotics 2013 – Industrial Robots*. IFR: Frankfurt Am Main, Germany, 2013. <https://ifr.org>, (accessed on 2 August 2025).
- [6] International Federation of Robotics (IFR). (2014). *World Robotics 2014 – Industrial Robots*. IFR: Frankfurt Am Main, Germany, 2014. <https://ifr.org>, (accessed on 2 August 2025).
- [7] IFR, “World Robotics Report: ‘All-Time High’ with Half a Million Robots Installed in one Year,” *IFR International Federation of Robotics*. <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/wr-report-all-time-highwith-half-a-million-robots-installed>, (accessed on 8 August 2025).
- [8] International Federation of Robotics (IFR). (2018). *World Robotics 2018 – Industrial Robots*. IFR: Frankfurt Am Main, Germany, 2018. <https://ifr.org>, (accessed on 8 August 2025).
- [9] International Federation of Robotics (IFR). (2020). *World Robotics 2018 – Industrial Robots*. IFR: Frankfurt Am Main, Germany, 2020. <https://ifr.org>, (accessed on 8 August 2025).
- [10] International Federation of Robotics (IFR). (2024). *World Robotics 2018 – Industrial Robots*. IFR: Frankfurt Am Main, Germany, 2024. <https://ifr.org>, (accessed on 10 August 2025).
- [11] Cairnes, T. J., Ford, C. J., Psomopoulou, E., & Lepora, N. (2023). An overview of robotic grippers. *IEEE Potentials*, 42(3), 17–23. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2023.3236143>
- [12] Romero, S., Valero, J., García, A. V., Rodríguez, C. F., Montes, A. M., Marín, C., Bolaños, R., Álvarez-Martínez, D. (2025). *Trajectory Planning for Robotic Manipulators in Automated Palletizing: A Comprehensive Review*. *Robotics*, 14(5), 55. <https://doi.org/10.3390/robotics14050055>
- [13] Karabegović, I., Mahmić, M., Karabegović, E., Husak, E. (2024). Advanced Robotics as the Drive of Innovation: The Role of the Implementation of Advanced Robotics in Industry 4.0. In: Karabegovic, I., Kovačević, A., Mandzuka, S. (eds) *New Technologies, Development and Application VII*. NT 2024. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1069. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3_1
- [14] Li, T., Yan, Y., Yu, C., An, J., Wang, Y., Chen, G. (2024). A comprehensive review of robot intelligent grasping based on tactile perception, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 90, 102792. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102792>

- [15] Karabegović, I., Kovačević, A., Banjanović-Mehmedović, L. and Dašić, P. (Eds), 2020, *Integration Industry 4.0 in Business and Manufacturing*, IGI Global, Pennsylvania, Hershey. Available at: <https://www.igi-global.com/book/handbook-research-integrating-industry-business/237834>
- [16] <https://grabcad.com/library/articulated-gripper-animation-with-worm-screw-and-mechanical-limit-switch-2>, (accessed on 12 August 2025).
- [17] <https://www.directindustry.es/prod/nihon-pisco-co-ltd/product-242523-2488556.html>, (accessed on 12 August 2025).
- [18] <https://www.smc.eu/fi-fi/products/featured-products/magnetic-gripper>, (accessed on 14 August 2025).
- [19] <https://egroeco.en.made-in-china.com/product/kmrpvjPLZhWd/China-Electric-Soft-Finger-Pneumatic-Cylinder-Adaptive-Gripper-for-Vegetables-Fruits.html>, (accessed on 31 July 2025).
- [20] <https://www.mechatronicscanada.ca/product-news/gpp-gpd5000il-gripper-series-with-three-new-sizes/>, (accessed on 14 August 2025).
- [21] Cairnes, T. J., Li, Q., & Pathak, S. (2023). *An Overview of Robotic Grippers: Designs, Applications and Emerging Trends*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.14051>
- [22] Wu, Z., Li, Y., Zhan, W., Liu, C., Liu, Y. H., Tomizuka, M. (2024). Efficient Reinforcement Learning of Task Planners for Robotic Palletization. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.04772>
- [23] Li, Y., He, L., Jia, J., Lv, J., Chen, J., Qiao, X., Wu, C. (2024). In-field tea shoot detection and 3D localization using an RGB-D camera, *Computers and Electronics in Agriculture*, 185, 106149. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106149>
- [24] Rus, D., Tolley, M. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature* 521, 467–475 <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- [25] <https://soft-gripping.com/softgripper/>, (accessed on 14 August 2025).
- [26] Levine, S., Finn, C., Darrell, T., & Abbeel, P. (2018). Learning hand-eye coordination for robotic grasping with deep learning and large-scale data collection. *The International Journal of Robotics Research*, 37(4–5), 421–436. <https://doi.org/10.1177/0278364917710318>
- [27] Zhu, W., Lu, C., Zheng, Q., Fang, Z., Che, H., Tang, K., Zhu, M., Liu, S., Wang, Z. (2021). A Soft-Rigid Hybrid Gripper with Lateral Compliance and Dexterous In-hand Manipulation. *Robotics*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.10035>
- [28] Qu, J., Yu, Z., Tang, W., Xu, Y., Mao, B., Zhou, K. (2024). Advanced Technologies and Applications of Robotic Soft Grippers, *Advanced materials Technologies*, 9(11) <https://doi.org/10.1002/admt.202301004>
- [29] <https://soft-gripping.com/discover/a-comprehensive-guide-to-grippers> (accessed on 15 August 2025).
- [30] Shi, Q., Sun, Z., Le, X., Xie, J. and Lee, C. (2023), Intelligent Soft Robotic Gripper Enabled by Multimodal Sensors and Deep Learning, *2023 IEEE 18th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, Jeju Island, Republic of Korea, pp. 19-22, <https://doi.org/10.1109/NEMS57332.2023.10190881>.
- [31] Vitrani, G., Cortinovis, S., Fiorio, L., Maggiali, M., Romeo, A. R. (2023), Improving the Grasping Force Behavior of a Robotic Gripper: Model, Simulations, and Experiments *Robotics* 2023, 12(6), 148; <https://doi.org/10.3390/robotics12060148>
- [32] <https://www.dreamstime.com/robotic-arm-sorting-packages-modern-warehouse-orange-efficiently-sorts-cardboard-boxes-conveyor-belt-high-tech-image319581782>, (accessed on 15 August 2025).
- [33] <https://www.unir.net/revista/ingenieria/vehiculos-agv/>, (accessed on 15 August 2025).
- [34] https://pe-ko.com.ua/uk/datalogic_lidar_scanner, (accessed on 15 August 2025).
- [35] Vismanis, O., Arents, J., Freivalds, K., Ahluwalia, V., & Ozols, K. (2023). Robotic system for post office package handling. *Applied Sciences*, 13(13), Article 7643. <https://doi.org/10.3390/app13137643>
- [36] Karabegović, I., Karabegović, E., (2019). The Role of Collaborative Service Robots in the Implementation of Industry 4.0, *International Journal of Robotics and Automation Technology*, Vol.6. 40-46. <https://doi.org/10.31875/2409-9694.2019.06.5>
- [37] Völk, M., Kleeberger, K., Kraus, W., & Bormann, R. (2023). *Towards Packaging Unit Detection for Automated Palletizing Tasks*. arXiv preprint arXiv:2308.06306. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.06306>
- [38] Karabegović, I., (2024). Robotics as a basic technology of Industry 4.0: Review of the application of service robots in port logistics. (invited lecture). In: *Proceedings of the XXV International Conference on Material Handling, Construction and Logistics, IV Maritime and Port Logistics, MHCL 2024*, Bar, Montenegro, 12–14 December 2024. Belgrade: University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering and TU Wien. ISBN 978-86-6075-093-0: 50-54.

- [39] Universal Robots. (2025). *Use case: Collaborative palletizing robot at Nortura (Norway), UR10 force-controlled autonomous system*. <https://www.universal-robots.com/case-stories/nortura/> (accessed on 6 August 2025).
- [40] Xu, M., Liu, Y., Li, J., Xu, F., Huang, X., & Yue, X. (2023). Review of Flexible Robotic Grippers, with a Focus on Grippers Based on Magnetorheological Materials. *Materials*, 17(19), 4858. <https://doi.org/10.3390/ma17194858>
- [41] Adebayo, R. A., Obiuto, N. C., Festus-Ikhuoria, I. C., & Olajiga, O. K. (2024). Robotics in manufacturing: A review of advances in automation and workforce implications. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*, 4(2):632-638. <https://doi.org/10.62225/2583049X.2024.4.2.2549>
- [42] Wang, S., Jiang, X., Zhao, J., Wang, X., Zhou, W., & Liu, Y. (2019). Vision based picking system for automatic express package dispatching. *arXiv preprint arXiv:1902.08951*. <https://arxiv.org/abs/1902.08951>.

The Evolution of Robotic Grippers in the Context of Industry 4.0: Technological Advancements and Applications in Automated Sorting and Palletizing

Isak Karabegović¹, Ermin Husak², Samir Vojić²

¹ Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

² University of Bihać, Technical Faculty Bihać, Bihać, Bosnia and Herzegovina

Corresponding author: isak1910@hotmail.com

ABSTRACT

In modern manufacturing and logistics systems guided by the principles of Industry 4.0, robotic grippers have emerged as a critical component for achieving highly automated and flexible operations. This review paper analyzes the technological evolution of industrial robotic grippers, with a particular focus on their application in automated parcel sorting and palletizing processes. A classification of grippers—mechanical, vacuum, magnetic, and adaptive—is presented, highlighting their technical characteristics, functional capabilities, and suitability for various operational demands. Special emphasis is placed on the integration of sensor systems, advanced control strategies, and artificial intelligence, which enable autonomous and precise manipulation of objects with diverse shapes and materials in dynamic environments. The performance of robotic systems is compared with traditional human labor in terms of efficiency, safety, reliability, and cost-effectiveness. Through real-world implementation examples in industries such as food processing, pharmaceuticals, and e-commerce, the paper outlines the advantages and challenges of deploying advanced grippers, including the handling of irregular items, system integration, and adaptability. The study concludes by identifying key directions for future research aimed at the development of smarter, sensor-rich, and interoperable gripping solutions that will drive further advancements in automation within the Industry 4.0 paradigm.

Keywords: Industry 4.0, robotic grippers, sorting and palletizing, adaptive technologies, automation, intelligent systems, robotics in logistics

EVOLUCIJA PRIHVATNICA U INDUSTRIJSKOJ ROBOTICI: OD RIGIDNIH MEHANIZAMA DO INTELIGENTNIH KOLABORATIVNIH RJEŠENJA

Amina Radončić

Internacionalni Burč univerzitet
Fakultet za inženjering, prirodne i medicinske nauke
Odsjek za elektrotehniku i elektroniku
Francuske revolucije bb, 71000 Sarajevo
E-mail: amina.radoncic@stu.ibu.edu.ba

SAŽETAK

Industrijska robotika predstavlja jednu od ključnih tehnologija četvrte industrijske revolucije, a njen razvoj je oblikovao savremenu proizvodnju, logistiku i zdravstvo. Unutar ovog polja, hvataljke (grippers) zauzimaju posebno mjesto, jer se smatraju „rukama“ robota i predstavljaju interfejs između mašine i objekata koje manipuliše. Funkcionalnost, preciznost i inteligencija hvataljki direktno utiču na sposobnost robota da izvodi zadatke u složenim, dinamičnim i kolaborativnim okruženjima. Evolucija hvataljki je prošla kroz nekoliko ključnih faza. Početni sistemi bili su kruti mehanizmi ograničeni na jednostavne zadatke, poput hvatanja i pomjeranja predmeta istih dimenzija i mase. Kasnije su se pojavile adaptivne hvataljke sa poboljšanom fleksibilnošću i senzorskim sistemima, koje su omogućile manipulaciju predmeta različitih oblika i osjetljivosti. Danas svjedočimo razvoju inteligentnih i kolaborativnih rješenja koja integrišu umjetnu inteligenciju, računalni vid i napredne algoritme kontrole, čineći robote sigurnim partnerima u zajedničkom radu s ljudima. Cilj ovog rada je da pruži pregled razvoja hvataljki u industrijskoj robotici od prvih krutih mehanizama do današnjih inteligentnih kolaborativnih sistema.

Ključne riječi: industrijska robotika, četvrta industrijska revolucija, rigidni mehanizmi, robotika, inteligentni sistemi

1. Rani mehanički gripperi/prihvatnice

Razvoj industrijske robotike, kao interdisciplinarne naučne oblasti koja objedinjuje mehaniku, elektrotehniku, automatiku, informatiku i vještačku inteligenciju, direktno je povezan s potrebom industrije da poveća produktivnost, smanji troškove i poveća sigurnost radnika. Prvi industrijski roboti pojavili su se početkom šezdesetih godina 20. stoljeća, prije svega u automobilske industriji u Sjedinjenim Američkim Državama. Kompanija Unimation, koju je osnovao George Devol, razvila je prvi komercijalni industrijski robot pod nazivom Unimate, koji je 1961. godine implementiran u General Motorsu za manipulaciju teškim metalnim komponentama u procesu lijevanja i zavarivanja [1, 3]. Taj događaj smatra se početkom moderne industrijske robotike.

Jedna od ključnih komponenti svakog industrijskog robota jeste tzv. end-effector – krajnji izvršni element koji direktno ostvaruje interakciju s objektom. U najvećem broju slučajeva taj end-effector je upravo gripper (hvataljka, prihvatnica), odnosno mehanički uređaj koji omogućava prihvatanje, držanje, prenošenje i otpuštanje objekata. U najranijim fazama razvoja industrijskih robota, gripperi su bili isključivo rigidni, mehanički sistemi sastavljeni od dvije paralelne čeljusti (tzv. „paralelni gripperi”), koje su se kretale linearno, pomoću pneumatskih ili hidrauličnih aktuatora. Njihov dizajn bio je jednostavan, robustan i pouzdan, ali i vrlo ograničen kada je u pitanju fleksibilnost, osjetljivost i adaptivnost [2, 4].

Tipični rani mehanički gripper bio je izrađen od čelika ili aluminija, s dva linearno vođena prsta koji su mogli obuhvatiti predmet definisanih dimenzija. Aktuacija se najčešće vršila pneumatskim cilindrima, što je omogućavalo brzo i snažno zatvaranje, ali bez ikakve kontrole sile pritiska. Takvi sistemi bili su prikladni za manipulaciju standardizovanih dijelova u masovnoj proizvodnji, gdje su svi objekti imali istu geometriju i gdje nije bilo potrebe za prilagođavanjem hvata. Pionirski radovi u ovoj oblasti uključuju istraživanja o pouzdanosti i ponovljivosti pokreta end-effectora u zatvorenim automatizovanim sistemima. Na prostoru Bosne i Hercegovine i šire regije zapadnog Balkana, jedan od najvažnijih istraživača u ovoj oblasti jeste prof. dr. Isak Karabegović. Njegovi radovi, posebno iz ranih 2000-ih i 2010-ih godina, pružaju sistematsku analizu funkcionalnosti i pouzdanosti mehaničkih grippera. U radu „A reliability of motion of an industrial robot end gripper” [1], Karabegović i saradnici analiziraju ponovljivost pokreta i vremensku pouzdanost grippera kroz eksperimentalne i statističke metode. Njihova istraživanja su posebno značajna jer uvode koncept pouzdanosti kao ključni parametar u dizajnu i evaluaciji end-effectora, što je do tada bilo uglavnom zanemareno u praksi.

U svojoj knjizi „Robotika” [2], Karabegović i Doleček detaljno razmatraju osnovne tipove grippera, klasifikaciju prema akucionim principima, kao i kriterije za izbor grippera u odnosu na radni zadatak. Istaknuto je da su rani industrijski sistemi favorizovali rigidne mehaničke grippere zbog jednostavnosti integracije, niskih troškova proizvodnje i visokog nivoa ponovljivosti. Međutim, nedostatak povratne sprege (senzora sile i položaja) i nemogućnost prilagođavanja obliku objekta doveli su do ograničene upotrebljivosti u složenijim proizvodnim procesima. U nastavku rada Karabegovića i drugih autora iz 2021. godine [4] naglašava se da su rigidni gripperi imali značajnu ulogu u stvaranju temelja današnje automatizacije, ali da su upravo njihova ograničenja otvorila put ka razvoju novih, adaptivnijih i „inteligentnijih” sistema. Taj historijski prelaz – od rigidnih prema fleksibilnim i senzorski bogatim gripperima – bit će predmet narednog poglavlja ovog rada.

Tabela 1. Karakteristike ranih rigidnih grippera u poređenju s kasnijim generacijama

Karakteristika	Rani mehanički gripperi	Moderni adaptivni gripperi
Materijal	Čelik, aluminij	Polimeri, kompoziti, silikon
Tip akcije	Pneumatika, hidraulika	Elektromehanički, piezo, PAM
Senzorska integracija	Nema	Da (sila, položaj, taktilno)
Mogućnost prilagođavanja objektu	Ograničena	Visoka
Kontrola sile hvata	Nije dostupna	Kontinuirana kontrola
Pogodnost za nestrukturisane objekte	Vrlo niska	Visoka

Tabela 1. jasno pokazuje osnovne tehnološke razlike koje su nastale kao rezultat višedecenijskog razvoja u oblasti dizajna grippera. U uvodnom dijelu je, dakle, važno naglasiti da su rani rigidni mehanički gripperi odigrali ključnu ulogu u prvoj fazi industrijske robotizacije, ali su ujedno i postavili temelje za daljnji razvoj fleksibilnijih, inteligentnijih i biološki inspirisanih sistema manipulacije.

1.1. Vrste ranih mehaničkih hvataljki

Unimate je bio prvi industrijski robot koji je 1961. godine instaliran na montažnoj liniji General Motorsa u Ewing Townshipu, New Jersey. Ovaj robot je bio hidraulički pokretan i imao je pet stepeni slobode, što mu je omogućilo da obavlja zadatke poput podizanja i premještanja vrućih metalnih dijelova. Njegov gripper je bio jednostavan, ali efikasan za manipulaciju standardizovanim dijelovima [5, 49].

**Slika 1.** Unimate industrijski robot [49]

Pneumatski paralelni gripperi su bili standard u industrijskoj automatizaciji zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti. Ovi gripperi koriste pneumatske cilindre za otvaranje i zatvaranje prstiju, omogućavajući brzo i snažno hvatanje objekata. Međutim, nedostatak senzora znači da nisu mogli prilagoditi silu hvata u zavisnosti od objekta [6].



Slika 2. Pneumatski paralelni gripper [48]

Dvoprstni industrijski gripperi, slični onima kod Unimate robota, su bili jednostavni mehanički uređaji koji koriste dva prsta za obuhvatanje objekata. Iako su bili efikasni za manipulaciju standardizovanim dijelovima, njihova rigidnost i nedostatak senzora ograničavali su njihovu primjenu u složenijim zadacima [7, 48].

2. Industrijska evolucija: od rigidnih prema adaptivnim dizajnima

Industrijska automatizacija započela je sredinom 20. stoljeća, kada su prvi robotski sistemi uvedeni u montažne linije. Rigidni mehanički gripperi tada su predstavljali ključnu tehnologiju za manipulaciju objekata. Primarni cilj ovih rješenja bio je povećanje produktivnosti, preciznosti i sigurnosti rada, naročito u obradi teških i opasnih materijala. Rigidni gripperi, tipično sastavljeni od metalnih prstiju s fiksnom geometrijom i pneumatskim ili električnim aktuatorima, omogućavali su robotskim rukama da hvataju standardizovane objekte velikom brzinom i konstantnom silom.

Međutim, ograničenja ovih rješenja postala su očita kada je došlo do potrebe za manipulacijom objekata različitih dimenzija, oblika i osjetljivosti. Pneumatski paralelni gripperi, iako vrlo pouzdani i jednostavni za implementaciju, nisu mogli automatski prilagoditi silu hvata specifičnom objektu. Kao rezultat toga, pogrešna prilagodba sile mogla je dovesti do oštećenja materijala ili nesigurnih manipulacija [1, 2]. U ovom periodu industrija se susretala s kompromisom između brzine, preciznosti i fleksibilnosti.

S razvojem električnih i mehaničkih grippera tokom 1980-ih i 1990-ih, industrija je dobila nove mogućnosti. Električni gripperi omogućili su fino podešavanje sile hvata putem preciznih aktuatora, dok su mehanički gripperi pružali pouzdanu strukturalnu stabilnost za teže zadatke [1, 2, 8]. Ovi sistemi omogućili su manipulaciju složenijim geometrijama, ali i dalje nisu bili dovoljno fleksibilni za handling objekata promjenjivih dimenzija ili osjetljive robote u saradnji s ljudima.

Početkom 2000-ih su industrijski gripperi doživjeli značajan tehnološki pomak prema adaptivnosti. Pojava novih materijala, kao što su fleksibilne legure i silikoni, te razvoj naprednih senzorskih sistema omogućili su gripperima da se prilagode obliku objekta i variraju silu hvata u realnom vremenu [5]. Primjeri uključuju Robotiq 2F-85 i 2F-140 grippere, koji koriste električne aktuatorske sisteme u kombinaciji sa senzorima sile i položaja. Ovi adaptivni gripperi omogućavaju robotskim rukama da sigurno i efikasno manipulišu objektima različitih oblika, uključujući krhke i nepravilne materijale, što je bilo nezamislivo s rigidnim prethodnicima [8, 9].

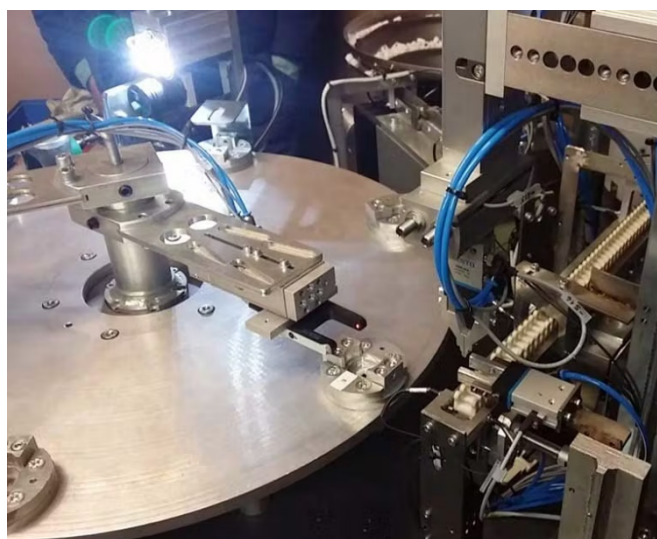
Također, razvoj paralelnih i dvoprstnih grippera s fleksibilnim spojnim elementima omogućio je veću kompatibilnost s različitim industrijskim aplikacijama, od elektronike i farmaceutike do automobilskeg sektora. Integracija senzorskih modula i kontrolnih algoritama omogućila je

adaptivnim gripperima da automatski detektuju oblik i veličinu objekta te da precizno prilagode silu hvata, čime su postali prvi koraci ka inteligentnim, autonomnim robotskim sistemima [10, 11, 47]. Industrijski razvoj gripera također je inspirisan biološkim principima, gdje fleksibilni prsti i taktilni senzori oponašaju ljudsku sposobnost prilagođavanja hvata različitim objektima. Ovaj pristup ne samo da povećava efikasnost i sigurnost u industrijskim procesima već i otvara vrata za saradnju robota i ljudi u realnom vremenu, što je temelj koncepta Industrije 4.0 i nadolazeće paradigme Industrije 5.0 [11].



Slika 3. Razne vrste električnih gripera, Universal Robots [47]

Električni griperi posjeduju mogućnost preciznog podešavanja sile hvata. Pogodni su za složenije zadatke u industriji, uključujući elektroniku i farmaceutsku proizvodnju. Integrisani senzori omogućavaju detekciju objekta i automatsko prilagođavanje sile hvata. Napredni pneumatski paralelni gripper s dva prsta je pogodan za hvatanje standardizovanih dijelova, nudi brzo otvaranje i zatvaranje, omogućava visok tempo proizvodnje, ali nema mogućnost automatske prilagodbe sile hvata.



Slika 4. Nova generacija paralelnih pneumatskih gripera [46]

U novije vrijeme raste interes za meku robotiku (soft robotics) gdje se koriste fleksibilni materijali (silikon, polimeri) za izradu grippera koji se mogu prilagoditi različitim oblicima i veličinama objekata. Ovakvi grippersi su posebno korisni u prehrambenoj industriji, medicini i pakovanju jer omogućavaju sigurno rukovanje krhkim objektima [12, 46].



Slika 5. Robotiq gripper, Universal Robots [45]

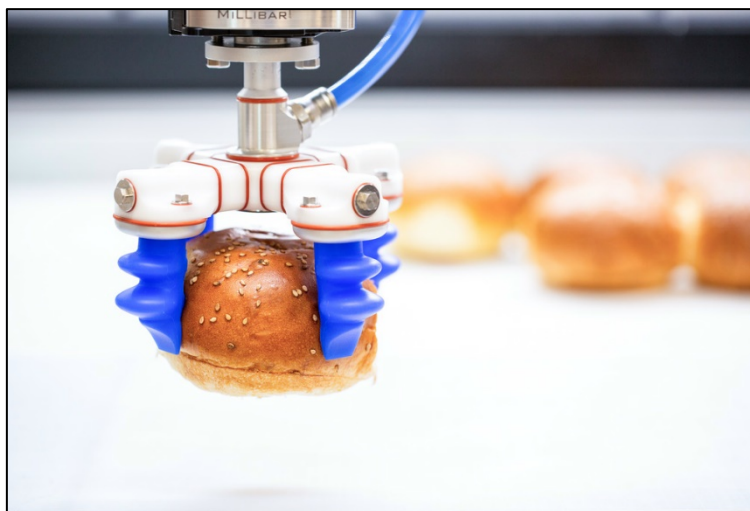
Adaptivni gripperi Robotiq s dva fleksibilna prsta su sposobni za hvatanje objekata različitih oblika i dimenzija zahvaljujući integriranim senzorima sile i pozicije. Prikladni su za kolaborativne robote (cobots) u modernim proizvodnim linijama.

Ova evolucija od rigidnih mehaničkih grippera prema inteligentnim adaptivnim sistemima pokazuje kako kombinacija materijala i novih senzorskih tehnologija transformiše industrijsku robotiku. Danas se gripperi ne koriste samo za jednostavne zadatke hvatanja, već omogućavaju robotskim sistemima da učestvuju u složenim i kolaborativnim procesima, što predstavlja ključni preduvjet za prelazak ka paradigmi Industrije 4.0 i budućoj Industriji 5.0, gdje roboti i ljudi sarađuju u dinamičnom i fleksibilnom industrijskom okruženju [12, 13, 45].

3. Soft robotics i bio-inspirisani gripperi: manipulacija krhkim materijalima

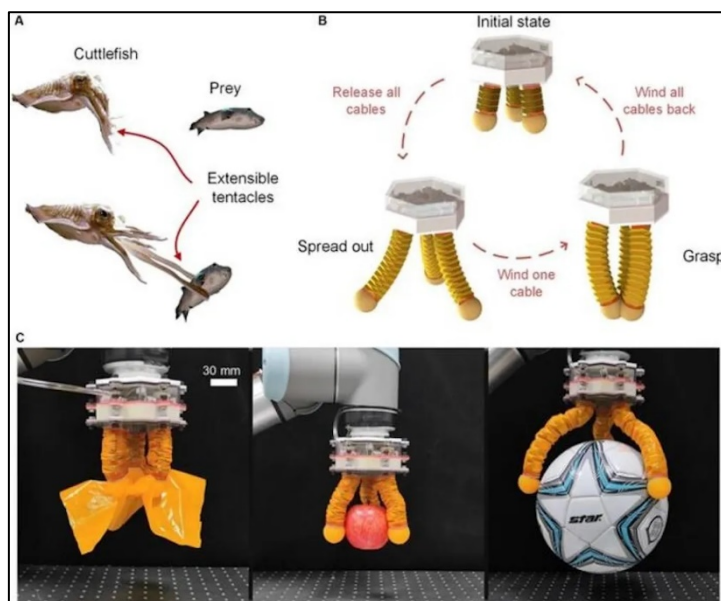
Tradicionalni gripperi, iako precizni i pouzdani, često nisu mogli rukovati osjetljivim materijalima poput svježeg voća, farmaceutskih proizvoda ili tanke elektronike, jer njihova sila hvata nije bila prilagodljiva obliku ili osjetljivosti objekta. Soft robotics gripperi koriste fleksibilne materijale, najčešće silikone, elastomere i polimere, koji omogućavaju prstima grippera da se savijaju, deformišu i prilagođavaju obliku objekta, čime se značajno smanjuje rizik od oštećenja [14].

Ključna inovacija soft grippera je njihova sposobnost adaptacije putem pneumatike ili hibridnih aktuatorskih sistema. Pneumatski soft gripperi, primjerice, mogu koristiti zračne komore koje se šire ili skupljaju kako bi se prsti savijali oko objekta, a sila hvata se automatski prilagođava njegovoj krhkosti. Ovakav dizajn omogućava robotskim rukama da rukovode nepravilnim i osjetljivim predmetima s istom sigurnošću i preciznošću kao ljudska ruka [15, 44].



Slika 6. Soft gripper sa silikonskim prstima [44]

Bio-inspirisani gripperi predstavljaju još jedan značajan napredak u industrijskoj robotici. Inspiracija dolazi iz prirode, gdje se kombinacija fleksibilnosti, fine motorike i senzorne percepcije koristi za hvatanje objekata različitih veličina i oblika. Primjeri uključuju robote s prstima nalik pipcima hobotnice, robote sa strukturalnom fleksibilnošću poput ljudske šake ili grippers s tkivno-nadahnutošću za hvatanje mekih ili glatkih površina. Ovi gripperi često koriste kombinaciju mekih materijala i senzora dodira kako bi omogućili robotskim sistemima da „osjete“ objekt i prilagode svoj hvatački obrazac, čime se povećava preciznost i smanjuje rizik od oštećenja [16].



Slika 7. Bio-inspirisan gripper nalik na pipke hobotnice i sipe [42]

Primjena soft i bio-inspirisanih grippera u industriji je već široka. U prehrambenoj industriji, soft gripperi omogućavaju robotsko pakovanje i rukovanje voćem i povrćem, čime se smanjuje oštećenje i povećava produktivnost. U farmaceutici, robotske ruke sa soft gripperima precizno manipulišu bočicama, kapsulama i staklenim ampulama, a u proizvodnji elektronike omogućavaju hvatanje osjetljivih komponenti bez rizika od mehaničkog oštećenja. Ovakvi sistemi često kombinuju soft

materijale s naprednim algoritmima kontrole i senzorima sile i položaja, čime se stvara autonomni i inteligentni robotski gripper sposoban za složene zadatke [16, 17, 42].

Tabela 2. Tipovi bio-inspirisanih prihvatnica i najvažnije karakteristike

Tip gripper	Materijali	Princip rada	Primjena	Prednosti	Nedostaci
Rigidni	Metal, plastika	Mehaničko zatvaranje	Automobilska industrija	Preciznost, robustnost	Nema prilagodljivosti, oštećuje krhke objekte
Soft	Silikon, elastomer	Pneumatske komore	Prehrambena industrija	Sigurnost, fleksibilnost	Manja nosivost, sporije reakcije
Bio-inspirisani	Silikon + senzori	Imitacija hobotnice, ruke	Medicina, svemir	Adaptivnost, inteligentno hvatanje	Kompleksnost, cijena

Najnoviji istraživački trendovi uključuju kombinaciju soft robotics gripper s umjetnom inteligencijom i mašinskim učenjem. Kroz učenje iz interakcija s objektima, roboti mogu optimizovati način hvatanja i prilagođavati se novim oblicima i materijalima. Ovakav pristup omogućava gripperima da postanu samostalni u prilagođavanju sile i strategije hvatanja u stvarnom vremenu, što je ključni preduvjet za buduće kolaborativne robotske sisteme u okviru paradigme Industrije 5.0 [18, 19].

4. Integracija senzora i AI kontrola – inteligentni gripperi

Razvoj industrijskih gripper nije stao samo na fizičkim adaptacijama i mekim materijalima. Suštinski iskorak napravljen je kroz integraciju senzorskih tehnologija i algoritama umjetne inteligencije, što je omogućilo stvaranje inteligentnih gripper sposobnih za autonomnu manipulaciju objekata u dinamičnim industrijskim okruženjima.



Slika 8. OnRobot RG2-FT gripper opremljen senzorima sile i momenta [41]

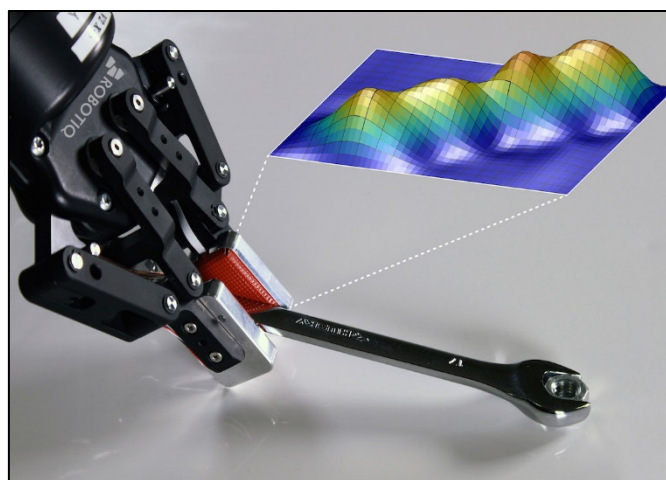
Inteligentni gripperi koriste različite tipove senzora, uključujući senzore sile, momenta, pozicije, dodira, pa čak i vizuelne senzore poput kamera i LIDAR-a, kako bi robotski sistem mogao detektovati objekt, procijeniti njegov oblik, dimenzije, težinu i osjetljivost. Ovi podaci potom se obrađuju u realnom vremenu, omogućavajući gripperu da automatski prilagodi silu hvata, ugao i strategiju manipulacije [20, 21, 22].

Primjena umjetne inteligencije, naročito algoritama dubokog učenja i pojačanog učenja, omogućila je gripperima da uče iz iskustva i poboljšavaju performanse tokom vremena. Recimo, robotski sistem može naučiti optimalan način hvatanja različitih vrsta objekata, kao što su glatke staklene boce, nepravilan oblik paketa ili osjetljivo voće, i time smanjiti oštećenja i gubitke. Kroz simulacije i eksperimentalne testove, inteligentni gripperi prilagođavaju svoju strategiju hvatanja bez potrebe za stalnom ljudskom intervencijom, čime se povećava efikasnost proizvodnog procesa i smanjuju troškovi [23, 41].



Slika 9. Integrirani AI gripper, Stellarix, koji koristi umjetnu inteligenciju za autonomno prepoznavanje objekata i prilagođavanje strategije hvatanja [40]

Integracija vizuelnih senzora i AI kontrola također omogućava kolaborativnim robotima da rade uz ljude bez rizika. Senzori mogu prepoznati prisustvo čovjeka i prilagoditi brzinu i silu hvata, što je posebno važno u industrijskim okruženjima gdje robot i čovjek dijele isti prostor, gdje robotski sistemi ne zamjenjuju ljude, već im pomažu i poboljšavaju njihovu produktivnost i sigurnost [24, 40].



Slika 10. Gripper osnažen taktilnom inteligencijom [39]

Najnovija istraživanja pokazuju da kombinacija senzorskih tehnologija, adaptivnih mehaničkih rješenja i algoritama umjetne inteligencije vodi ka stvaranju grippera koji ne samo da mogu manipulirati širokim spektrom objekata već i sami predlažu strategije hvatanja, prepoznaju materijal i prilagođavaju taktiku manipulacije u stvarnom vremenu [39]. Takvi sistemi predstavljaju ključni

korak prema potpuno autonomnim industrijskim robotima koji mogu raditi u dinamičnim i kompleksnim okruženjima, od proizvodnje elektronike i hrane do farmaceutskih i medicinskih aplikacija [25, 28, 29].

5. Kolaborativni gripperi i robotske ruke u Industriji 5.0

Razvoj inteligentnih grippera omogućio je novu eru industrijske robotike – kolaborativne robote (cobots), koji rade sigurno u direktnoj interakciji s ljudima. Za razliku od tradicionalnih industrijskih robota koji djeluju u potpuno izolovanim prostorima, coboti su dizajnirani da dijele radni prostor s ljudima, pružajući podršku u složenim zadacima, povećavajući produktivnost i smanjujući rizik od povreda. Ključni elementi ove saradnje su napredni senzori sile, dodira, pozicije i vizuelni senzori poput kamera i LIDAR-a. Ovi senzori omogućavaju gripperima da u realnom vremenu prilagode silu hvata, ugao i strategiju manipulacije, čime se sprečava oštećenje objekata i povreda operatera [26, 27].

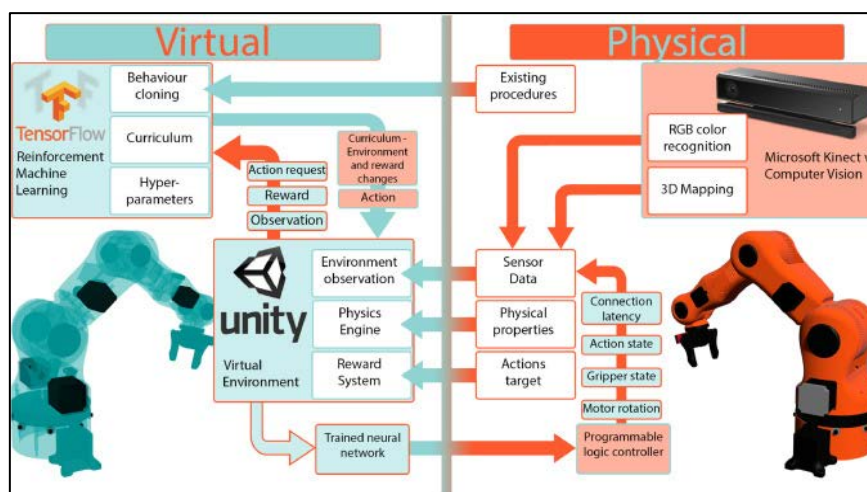


Slika 11. Kolaborativni gripper u industrijskom okruženju [38]

Primjeri primjene uključuju farmaceutsku industriju, gdje robotske ruke s adaptivnim gripperima pažljivo manipulišu bočicama i kapsulama, te elektroniku, gdje precizno pozicioniranje osjetljivih komponenti zahtijeva simultanu kontrolu sile i položaja [28, 38]. Napredni algoritmi dubokog učenja omogućavaju gripperima prediktivno prilagođavanje hvata – robotski sistem može prepoznati oblik i težinu objekta prije kontakta, čime se dodatno povećava sigurnost i efikasnost. Ovaj pristup predstavlja suštinski preduvjet za prelazak ka paradigmi Industrije 5.0, gdje inteligentni roboti ne zamjenjuju ljudski rad, već ga nadopunjuju i poboljšavaju [29].

6. Integracija digital twin tehnologije

Digital twin (digitalni blizanac) tehnologija predstavlja jedan od najnovijih trendova u industrijskoj robotici. Digital twin je virtuelni model stvarnog robota ili grippera, koji omogućava simulaciju manipulacije objekata, testiranje novih algoritama kontrole i optimizaciju strategija hvatanja prije stvarne implementacije. Takve simulacije smanjuju rizik od oštećenja opreme, ubrzavaju proces razvoja i omogućavaju analizu performansi u različitim scenarijima [19, 36].



Slika 12. Primjena digital twin tehnologije u robotici koja koristi podržano učenje u radu (reinforcement learning) [37]

Soft robotics gripperi mogu se simulirati u realnom vremenu kako bi se procijenila njihova sposobnost hvatanja krhkih ili nepravilnih objekata. Pritom algoritmi mašinskog učenja prate performanse i sugeriraju optimalne parametre, uključujući silu hvata, raspodjelu pritiska i ugao kontakta. Digital twin pristup također omogućava razvoj autonomnih gripperi koji, kombinujući simulaciju i senzorske podatke, mogu učiti iz interakcija u stvarnom svijetu i automatski prilagođavati strategiju manipulacije [19, 36, 37].

7. Etički i sigurnosni aspekt kolaborativnih prihvatnica

S razvojem inteligentnih i kolaborativnih robota, sigurnost i etika postaju ključni faktori. Coboti moraju prepoznati prisustvo čovjeka i prilagoditi brzinu, silu i strategiju manipulacije, u skladu sa standardima ISO/TS 15066 za kolaborativnu robotiku [35]. Ova regulativa osigurava da robotski sistemi ne predstavljaju rizik za ljude u istom radnom prostoru.

Etički aspekti uključuju i transparentnost rada robota, kako bi operateri mogli predvidjeti reakcije gripperi i razumjeti algoritamske odluke, što je posebno važno u okruženjima gdje robotski sistemi donose autonomne odluke. Osim toga, robotski gripperi doprinose ergonomiji i smanjenju fizičkog napora kod radnika, povećavajući sigurnost i zadovoljstvo zaposlenih. Razvoj ovih tehnologija naglašava važnost odgovornog dizajna i integracije robota u radne procese, gdje tehnologija služi ljudima, a ne obrnuto [30].

Razvoj inteligentnih i kolaborativnih gripperi ne donosi samo tehničku sofisticiranost već i odgovornost prema ljudima, okolišu i društvu u cjelini. Kolaborativni roboti, projektovani su da rade u direktnoj interakciji s ljudima, što otvara niz etičkih pitanja koja se moraju adresirati kako bi se tehnologija koristila sigurno i odgovorno. Robotski sistemi moraju biti predvidivi, kako bi operateri mogli razumjeti i anticipirati reakcije gripperi. Naprimjer, gripper koji koristi vizuelne senzore i algoritme umjetne inteligencije za automatsko prilagođavanje sile hvata mora imati jasne indikatore stanja i vizuelne signale koji informišu radnika o trenutnoj operaciji. Takva transparentnost smanjuje rizik od nesreća i povećava povjerenje u robotski sistem, posebno u industrijama gdje se manipuliše teškim ili krhkim materijalima. Kolaborativni roboti nisu namijenjeni da zamijene ljude, već da dopune njihove sposobnosti, smanje fizički napor i povećaju sigurnost u opasnim radnim okruženjima. Važno je da ljudski operator ostane u kontroli ključnih odluka, dok gripper autonomno upravlja preciznim manipulacijama. U farmaceutskoj proizvodnji, naprimjer, robotske ruke sa soft gripperima mogu automatski rukovati bočicama i kapsulama, ali operator uvijek može intervenirati u slučaju nepredviđenih situacija, čime se postiže sigurna i odgovorna primjena tehnologije [33].

Upotreba vizuelnih senzora, kamera i LIDAR-a donosi izazove u vezi s privatnošću i prikupljanjem podataka. Podaci koji se prikupljaju u radnom okruženju moraju se koristiti isključivo za optimizaciju procesa i sigurnost, a nikako za nepotrebni nadzor zaposlenih ili neetičku kontrolu rada. Poštivanje zakonskih okvira i industrijskih standarda, poput GDPR-a, osigurava zaštitu privatnosti i pravilno korištenje tehnologije [30].

Gripperi i robotski sistemi također moraju pridonositi održivoj proizvodnji i sigurnom rukovanju osjetljivim materijalima. U prehrambenoj industriji upotreba soft grippera smanjuje oštećenja voća i povrća, dok u medicini robotski sistemi pomažu u manipulaciji sterilnim i osjetljivim materijalima, povećavajući sigurnost pacijenata i radnika. Inteligentni gripperi, integrisani sa senzorima i algoritmima umjetne inteligencije, omogućavaju robotskim rukama da samostalno prilagode silu i strategiju hvata u realnom vremenu, što ne samo da povećava efikasnost proizvodnog procesa već i doprinosi etičkom i odgovornom korištenju tehnologije.

Ova etička dimenzija postaje ključni okvir za budući razvoj kolaborativnih robota u paradigmi Industrije 5.0, gdje inteligentni roboti i ljudi rade zajedno u dinamičnim, kompleksnim i sigurnim industrijskim okruženjima. Transparentnost, kontrola, zaštita privatnosti i društvena odgovornost predstavljaju temelj na kojem se gradi povjerenje između ljudi i tehnologije, osiguravajući balans između efikasnosti, sigurnosti i odgovornog korištenja robotskih sistema.

Zaključak

Industrijska robotika je tokom decenija prošla fascinantan razvoj – od prvih rigidnih mehaničkih grippera, preko adaptivnih i soft robotics rješenja, do inteligentnih grippera integrisanih sa senzorima i algoritmima umjetne inteligencije. Svaka evolucijska faza omogućila je bolju fleksibilnost, preciznost i sigurnost u manipulaciji objektima, što je otvorilo vrata kolaborativnoj robotici i paradigmi Industriji 5.0. Budućnost grippera leži u daljnjoj integraciji umjetne inteligencije, digital twin simulacija, novih materijala i hibridnih mehaničkih rješenja, s posebnim naglaskom na sigurnost i etičke aspekte saradnje čovjeka i robota. Evolucija grippera tako predstavlja ne samo tehnički napredak već i ključni faktor transformacije industrijskih procesa, omogućavajući efikasniju, sigurniju i inteligentniju proizvodnju.

Reference

1. Karabegović, I. & Gredelj, S. (2009, October). A reliability of motion of an industrial robot end gripper. 7th International Scientific Conference on Production Engineering (RIM 2009), Cairo, Egypt
2. Doleček, V., Karabegović, I., Voloder, A. Robotika, Univerzitet u Bihaću, 2. izdanje, 2002.
3. Karabegović, I. et al. "INDUSTRY 4.0 BASED ON INDUSTRIAL AND SERVICE ROBOTS WITH APPLICATION IN CHINA." *Mobility & Vehicle Mechanics*, 44(4), 2018.
4. Karabegović, I. et al. "The application of Industry 4.0 in production processes based on industrial and service robots." *Mobility & Vehicle Mechanics*, 47(2), 2021.
5. Ivanov, V. et al. "New classification of industrial robotic gripping systems for sustainable production." *Scientific Reports*, 14:295, 2024.
6. Karabegović, I. "Development of intelligent end effectors in the context of Industry 4.0," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 12–19, 2021.
7. Ivanov, V., Andrusyshyn, V., Pavlenko, I., Pitel', J., Bulej, V. New classification of industrial robotic gripping systems for sustainable production. *Sci Rep.* 2024 Jan 2;14(1):295. doi: 10.1038/s41598-023-50673-5. PMID: 38167572; PMCID: PMC10762192.
8. Horák, M., Starý, M., Matúšek, O., Novotný, F. Gripping adhesive principles in the design of effectors. *SN Appl Sci.* 2022;4(11):314. doi: 10.1007/s42452-022-05200-y. Epub 2022 Oct 22. PMID: 36313601; PMCID: PMC9589616.
9. Dzedzickis, A. et al. "Soft Grippers in Robotics: Progress of Last 10 Years." *Machines*, 12(12):887, 2024.

10. Luo, J., Zhou, X., Zeng, C., Jiang, Y., Qi, W., Xiang, K., Pang, M., Tang, B. Robotics Perception and Control: Key Technologies and Applications. *Micromachines* (Basel). 2024 Apr 15;15(4):531. doi: 10.3390/mi15040531. PMID: 38675342; PMCID: PMC11052398.
11. Laschi, C., Mazzolai, B. and Cianchetti, M. “Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities,” *Science Robotics*, vol. 1, no. 1, eaah3690, 2016.
12. Mohammadi, V., Shahbad, R., Hosseini, M., Gholampour, M. H., Shiry Ghidary, S., Najafi, F., Behboodi, A. Development of a Two-Finger Haptic Robotic Hand with Novel Stiffness Detection and Impedance Control. *Sensors* (Basel). 2024 Apr 18;24(8):2585. doi: 10.3390/s24082585. PMID: 38676202; PMCID: PMC11055014.
13. Liu, Y. et al. “Intelligent Soft Robotic Grippers for Agricultural and Food Applications.” *Advanced Intelligent Systems*, 2023.
14. AboZaid, Y. A. et al. “Soft robotic grippers: A review on technologies, materials, and applications.” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024.
15. Mason, M. T. and Salisbury, J. K. *Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*. Cambridge, MA: MIT Press, 1985.
16. Siciliano, B. and Khatib, O. Eds., *Springer Handbook of Robotics*, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2016.
17. Bruyninckx, H. and De Schutter, J. “Specification of force-controlled actions in the ‘Task Frame Formalism’—A synthesis,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 4, pp. 581–589, Aug. 1996.
18. Bicchi, A. “Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road toward simplicity,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6, pp. 652–662, Dec. 2000.
19. Howe, R. D. “Tactile sensing and control of robotic manipulation,” *Journal of Advanced Robotics*, vol. 8, no. 3, pp. 245–261, 1994.
20. Ajoudani, A., Tsagarakis, N. G. and Bicchi, A. “Tele-impedance: Teleoperation with impedance regulation using a body–machine interface,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 31, no. 13, pp. 1642–1656, 2012.
21. Ficuciello, F., Palli, G. and Melchiorri, C. “Postural synergies of the UB Hand IV for human-like grasping,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 9, pp. 1406–1416, Sept. 2014.
22. Kim, S., Laschi, C. and Trimmer, B. “Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics,” *Trends in Biotechnology*, vol. 31, no. 5, pp. 287–294, May 2013.
23. Catalano, M. G. et al., “Adaptive synergies for the design and control of the Pisa/IIT SoftHand,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 5, pp. 768–782, Apr. 2014.
24. Universal Robots, “Collaborative robots (cobots) in industry,” *Universal Robots White Paper*, 2023.
25. IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems, “Ethical considerations of A/IS technologies,” *IEEE*, 2018.
26. Róžańska-Walczyk, M. “Collaborative Robotics. Safety and Ethical Considerations,” in *Ethics in Reference to Robots and AI*, Springer, 2022.
27. Callari, T. C. et al., “Ethical deployment in Industry 5.0 requires attention to transparency (explainable decision logic), impartiality/justice... and accountability,” *Applied Sciences*, 2025.
28. Urrea, C. “Artificial Intelligence-Driven and Bio-Inspired Control Strategies for Industrial Robotics: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Sustainable Innovations Toward Industry 5.0,” *Machines*, vol. 13, no. 8, art. 666, 2025.
29. Callari, T. C. “An ethical framework for human-robot collaboration,” *Futures & Foresight Science*, 2024.
30. Eder, K., Harper, C. and Leonards, U. “Towards the Safety of Human-in-the-Loop Robotics: Challenges and Opportunities for Safety Assurance of Robotic Co-Workers,” *arXiv*, Apr. 8, 2014.
31. Farooq, A. and Iqbal, K. “Towards Transparent Ethical AI: A Roadmap for Trustworthy Robotic Systems,” *arXiv*, Aug. 7, 2025.
32. Carrine Greason, “Ethics in Autonomous Industrial AI: Tackling Bias and Data Privacy,” *A3 Insights – Automate.org*, May 28, 2024.
33. Stock-Homburg, R. M. and Kegel, M. M. “Ethical Considerations in Customer–Robot Service Interactions: Scoping Review, Network Analysis, and Future Research Agenda,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 17, pp. 1129–1159, 2025.
34. Lutz, C. and Tamò-Larrieux, A. “Do Privacy Concerns About Social Robots Affect Use Intentions? Evidence From an Experimental Vignette Study,” *Frontiers in Robotics and AI*, 2021.

35. Kim, D., Kim, S. H., Kim, T., Kang, B. B., Lee, M., Park, W., Ku, S., Kim, D., Kwon, J., Lee, H., Bae, J., Park, Y. L., Cho, K. J., Jo, S. Review of machine learning methods in soft robotics. PLoS One. 2021 Feb 18;16(2):e0246102. doi: 10.1371/journal.pone.0246102. PMID: 33600496; PMCID: PMC7891779.
36. Malik, Ali Ahmad, Brem, Alexander. (2021). Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 68(), 102092–.doi:10.1016/j.rcim.2020.102092
37. Matulis, M. & Harvey, C. (2021). A robot arm digital twin utilising reinforcement learning. Computers & Graphics, 95, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.01.011>
38. What is a Cartesian Robot? What are Cartesian Robot Examples? (<https://nilusmuhendislik.com/en/what-is-a-cartesian-robot-what-are-cartesian-robot-examples/>)
39. Duchaine, V. 2016. “Why Tactile Intelligence Is the Future of Robotic Grasping.” IEEE Spectrum, July 18, 2016.
40. Artificial intelligence enabled gripper system (<https://stellarix.com/insights/articles/artificial-intelligence-enabled-gripper-system/>)
41. Collaborative robot grippers (<https://www.pccweb.com/collaborative-robot-grippers/>)
42. Zhang, Z., et al. (2024, April 9). Hybrid-Driven Origami Gripper with Variable Stiffness and Finger Length. Cyborg and Bionic Systems. <https://doi.org/10.34133/cbsystems.0103>
43. Soft Robotics Inc. (<https://www.businesswire.com/news/home/20240807157208/en/Schmalz-Acquires-the-Flexible-Gripping-Product-Assets-from-Soft-Robotics-Inc.>)
44. Robotiq 2F-85 Gripper Kit for UR e-Series, Universal Robots (<https://www.universal-robots.com/es/marketplace/products/01tP40000071NgHIAU/>)
45. Grippers for small parts, ASSEMBLY /<https://www.assemblymag.com/articles/94073-grippers-for-small-parts>)
46. Robot Gripper Showdown, Universal Robots (<https://www.universal-robots.com/pt/blog/robot-gripper-showdown-air-gripper-vs-electric-gripper/>)
47. Robotic gripper showdown, Universal Robots (<https://www.universal-robots.com/pt/blog/robot-gripper-showdown-air-gripper-vs-electric-gripper/>)
48. PHL Long Stroke Gripper (https://schunk.com/de/en/gripping-systems/parallel-gripper/phl/c/PGR_6331)
49. The Significance of Software in The Evolution of Robotics (<https://ifr.org/post/the-significance-of-software-in-the-evolution-of-robotics>)

EVOLUTION OF GRIPPERS IN INDUSTRIAL ROBOTICS: FROM RIGID MECHANISMS TO INTELLIGENT COLLABORATIVE SOLUTIONS

Amina Radončić

International Burch University
Faculty of Engineering, Natural and Medical Sciences
Department of Electrical Engineering and Electronics
Francuske revolucije bb, 71000 Sarajevo
email: amina.radoncic@stu.ibu.edu.ba

ABSTRACT

Industrial robotics represents one of the key technologies of the Fourth Industrial Revolution, and its development has shaped modern manufacturing, logistics, and healthcare. Within this field, grippers occupy a special place, as they are considered the “hands” of robots and serve as the interface between the machine and the objects it manipulates. The functionality, precision, and intelligence of grippers directly influence a robot’s ability to perform tasks in complex, dynamic, and collaborative environments. The evolution of grippers has gone through several key phases. The initial systems were rigid mechanisms limited to simple tasks, such as grasping and moving objects of the same dimensions and weight. Later, adaptive grippers with improved flexibility and sensory systems emerged, enabling the manipulation of objects of various shapes and sensitivities. Today, we are witnessing the development of intelligent and collaborative solutions that integrate artificial intelligence, computer vision, and advanced control algorithms, making robots safe partners in joint work with humans. The aim of this paper is to provide an overview of the development of grippers in industrial robotics, from the first rigid mechanisms to today’s intelligent collaborative systems.

Keywords: industrial robotics, Fourth Industrial Revolution, rigid mechanisms, robotics, intelligent systems

TRANZICIJA OD INDUSTRIJE 4.0 KA INDUSTRIJI 5.0: PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE HIDROELEKTRANA

Emir Nezirić¹, Edin Džiho¹

¹ Univerzitet „Džemal Bijedić” u Mostaru, Mašinski fakultet, 88000 Mostar, Bosna i Hercegovina
Korespondirajući autor: Emir.neziric@unmo.ba

REZIME

Ovaj rad diskutuje tranziciju od Industrije 4.0 ka Industriji 5.0 kroz prizmu prediktivnog održavanja hidroelektrana. Industrija 4.0 donijela je digitalizaciju, automatizaciju i masovnu upotrebu senzorskih sistema i analitike podataka, što je omogućilo primjenu prediktivnog održavanja s ciljem smanjenja zastoja i optimizacije rada. Međutim, koncept Industrije 5.0 proširuje ove okvire i stavlja naglasak na tri stuba: čovjeka, održivost i otpornost.

U radu se analiziraju ključne komponente hidroelektrana i njihove tipične metode prediktivnog održavanja, uključujući vibracijsku analizu, termografiju, dijagnostiku djelomičnih pražnjenja i primjenu digitalnih blizanaca. Poseban naglasak stavljen je na ulogu čovjeka, koji u interakciji s naprednim algoritmima i alatima umjetne inteligencije ostaje centralni donosilac odluka. Na ovaj način ostvaruje se balans između tehnološke preciznosti i ljudske stručnosti.

Rezultati pokazuju da prediktivno održavanje značajno doprinosi produženju životnog vijeka opreme, smanjenju otpada, većoj energetskej efikasnosti i sigurnosti rada. Time hidroelektrane postaju pouzdaniji i održiviji stub elektroenergetskog sistema, a prediktivno održavanje se potvrđuje kao ključna komponenta operacionalizacije principa Industrije 5.0.

Ključne riječi: Industrija 5.0, prediktivno održavanje, hidroelektrane, hidroenergija

1. UVOD

Industrija 4.0 obilježila je digitalnu transformaciju proizvodnih i energetske sistema kroz primjenu interneta stvari (IoT), velikih podataka, mašinskog učenja i automatizacije [1]. Implikacije ovih aspekata u hidroenergetskom sektoru su značile masovnu primjenu senzora, SCADA sistema i algoritama za prediktivno održavanje, s ciljem smanjenja zastoja i optimizacije rada opreme [2].

Međutim, novi koncept Industrije 5.0 stavlja naglasak ne samo na efikasnost i automatizaciju nego i na osoblje koje učestvuje u svim procesima, te održivost i otpornost samih procesa [3]. Dok je Industrija 4.0 tražila maksimizaciju produktivnosti, Industrija 5.0 stavlja čovjeka i prirodno okruženje u fokus, što znači da održavanje hidroelektrana više nije samo tehničko pitanje već i pitanje sigurnosti, dugoročne pouzdanosti i održivog korištenja resursa [4].

Primjena stubova Industrije 5.0 u kontekstu prediktivnog održavanja hidroelektrana može se sagledati kroz tri dimenzije:

- *fokus na čovjeka* – prediktivni sistemi ne zamjenjuju inženjere, već im pomažu u donošenju ispravnih odluka, smanjenju lažnih alarma i boljoj interpretaciji podataka [5],
- *održivost* – produžavanje životnog vijeka turbina, generatora i transformatora smanjuje potrebu za čestim remontima i zamjenama, čime se štedi energija i resursi potrebni za proizvodnju i transport rezervnih dijelova [6], što se na kraju odražava na smanjenju otpada te većoj energetskej efikasnosti,
- *otpornost* – hidroelektrane su ključni stub elektroenergetskih sistema, naročito u kriznim situacijama poput nestabilnosti mreže ili prirodnih katastrofa. Otpornost u okviru Industrije 5.0 u ovom aspektu podrazumijeva sposobnost pravovremenog prepoznavanja kritičnih kvarova, obezbjeđivanje tzv. *black-start* funkcionalnosti i brži oporavak sistema nakon zastoja [7].

ČOVJEK	ODRŽIVOST	OTPORNOST
Obuke osoblja	Životni vijek opreme	Pouzdanost sistema
Transparentni algoritmi	Smanjenje otpada	Black-start sposobnost
Smanjenje stresa	Energetska efikasnost	Brži oporavak sistema

Slika 1. Stubovi Industrije 5.0 u kontekstu prediktivnog održavanja hidroelektrana

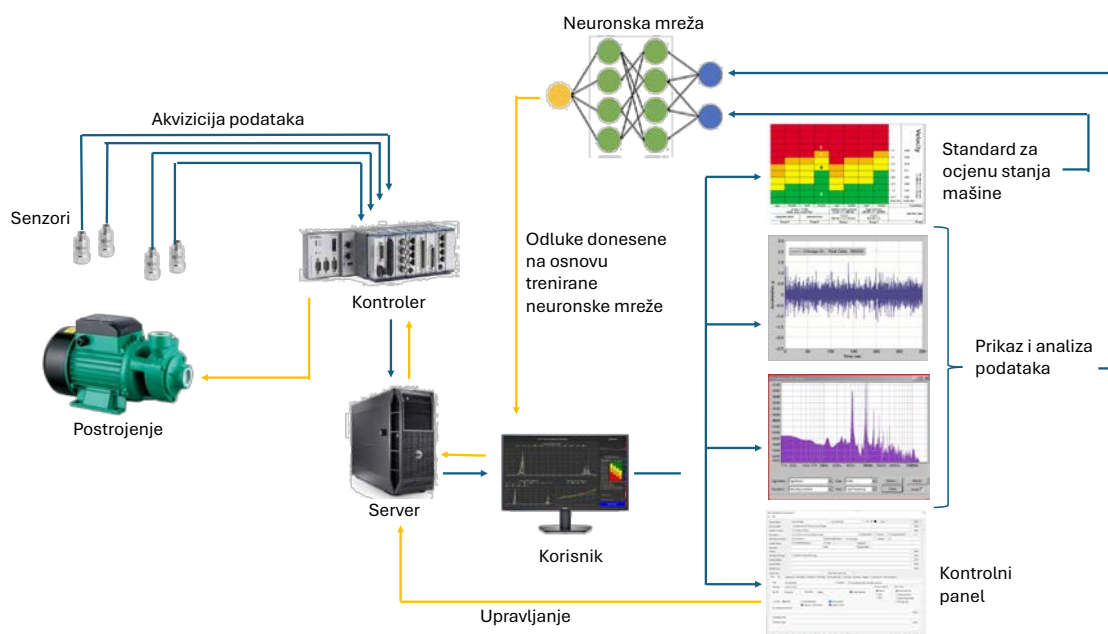
Ovakav integrisan pristup pokazuje kako se stubovi Industrije 5.0 – čovjek, održivost i otpornost – reflektuju u praksi: inženjeri dobivaju bolje alate za donošenje odluka, produžava se vijek trajanja opreme, smanjuju se troškovi i rizici, a sigurnost i pouzdanost elektroenergetskog sistema dostižu viši nivo.

2. PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE KLJUČNIH KOMPONENTI HIDROELEKTRANA U INDUSTRIJI 4.0

Prediktivno održavanje (*Predictive Maintenance - PdM*) podrazumijeva kontinuirano praćenje stanja opreme, analizu podataka i prognozu trenutka kada će se pojaviti kvar kako bi se preventivna intervencija planirala na vrijeme [8]. Ovaj princip, ukoliko se poveže sa stubovima koncepta Industrije 5.0, zaista u potpunosti odgovara samom konceptu. Čovjek, kao centralna figura Industrije 5.0, uz pomoć analitičkih alata za praćenje i prognozu, dolazi do podataka koji mu olakšavaju i

preporučuju vremenske okvire za pokretanje interventnih postupaka. Pravovremenim djelovanjem se smanjuje otpad nastao nepotrebnom zamjenom funkcionalnih dijelova, te se smanjuje potrebna energija za samo održavanje, što u konačnici doprinosi održivosti sistema. Kad govorimo o energiji potrebnoj za održavanje, u nju spada i energija potrebna za proizvodnju rezervnih dijelova, transport te energija potrebna za samu zamjenu dotrajalih dijelova. Na kraju, otpornost sistema se ogleda u povećanoj pouzdanosti hidroenergetskog postrojenja te njegovoj spremnosti da podrži energetske sistem svojom energijom kroz energiju koja balansira mrežne parametre te doprinijeti kontinuiranoj opskrbi energije.

U kontekstu prediktivnog održavanja hidroelektrana unutar paradigme Industrije 5.0, od ključne je važnosti prepoznati specifične komponente sistema, njihove tipične kvarove i odgovarajuće metode nadzora i predikcije koji se primjenjuju kroz principe Industrije 4.0. Jedan od očitih primjera koji se može navesti su klizni ležajevi turbina koji su najčešće izloženi habanju, pregrijavanju i povećanim vibracijama pa se njihovo stanje prati kroz vibracijsku analizu [9] i mjerenje temperature, dok se za predikciju kvarova sve više primjenjuju algoritmi mašinskog učenja koji klasifikuju anomalije. Kao krajnja ocjena stanja hidroagregata na osnovu mjerenja vibracija, najčešće se koriste standardi radi uniformisanja procesa ocjene kod različitih mašina sa različitim radnim parametrima [10].



Slika 2. Proces mjerenja i analize vibracija ležajeva hidroturbine u kontekstu Industrije 4.0

Turbinske lopatice, sklone eroziji uslijed kavitacije i abrazije, zahtijevaju vizuelne preglede, ispitivanje drugim nedestruktivnim metodama (penetrantima ili magnetnim česticama) i akustičnu emisiju, dok moderni pristupi prediktivnog održavanja kao dodatne alate koriste digitalne blizance za simulaciju uslova rada i prognozu degradacije materijala [11]. Stator generatora podložan je oštećenju izolacije i djelomičnim pražnjenjima, što se prati termografijom i mjerenjem djelomičnih pražnjenja, dok prediktivni modeli zasnovani na dubokom učenju (posebno LSTM mrežama) omogućavaju procjenu dugoročne pouzdanosti izolacije.

Kod rotora generatora, tipični problemi uključuju neuravnoteženost, mehanička oštećenja i kratke spojeve električnih komponenti rotora, pa se vizuelna kontrola, vibracijska mjerenja i analiza električnih signala kombinuju s modelima podržanim umjetnom inteligencijom za predviđanje radnog vijeka generatora.

Transformatori, čiji životni vijek zavisi od starenja izolacije i kvaliteta ulja, redovno se ispituju analizom otpusnih gasova (DGA) i termografijom, dok se prediktivna analitika zasniva na trendovima degradacije i algoritmima predviđanja. Konačno, hidraulični sistemi, izloženi curenjima i kvarovima ventila i pumpi, nadziru se kroz mjerenja pritiska, protoka i temperature, a SCADA sistemi obogaćeni AI analitikom omogućavaju pravovremeno otkrivanje rizika.

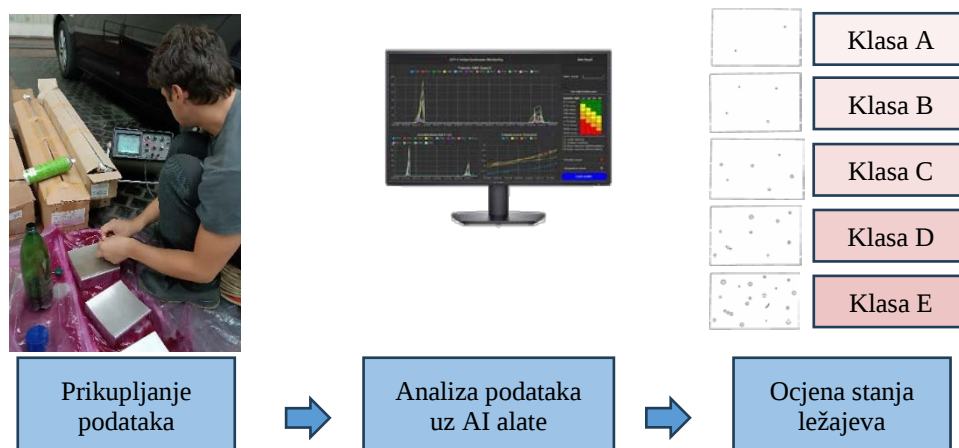
Ovdje su navedeni samo neki od dijelova elektrane i samo neki od postupaka prediktivnog održavanja koji su na njih primjenjivi. Kao što se može vidjeti, neki od postupaka održavanja zahtijevaju direktno učešće čovjeka kao izvršioca postupka kontrole dijelova hidropostrojenja, dok se za neke od postupaka kao glavni način ocjene postavlja automatizovan sistem koji samostalno prikuplja podatke sa senzorskih sistema te na osnovu mjerenih podataka donosi odluke.

3. KONCEPT PREDIKTIVNOG ODRŽAVANJA HIDROELEKTRANA SA ASPEKTA PRIMJENE PRINCIPA INDUSTRIJE 5.0

Za razliku od tradicionalnog održavanja, koje je često reaktivno i zahtijeva zamjenu komponenti tek nakon što otkazu, prediktivno održavanje omogućava pravovremeno otkrivanje znakova degradacije, čime se produžava životni vijek ključne opreme kao što su ležajevi, radno kolo hidroturbine, generatori i transformatori. Industrija 5.0 uvodi i novu dimenziju održivosti – balans između ljudskog znanja i digitalne tehnologije. Inženjeri i operateri u hidroelektranama ne koriste digitalne alate samo da bi smanjili troškove ili povećali pouzdanost sistema već i da bi osigurali da proizvodnja električne energije ostane u skladu s principima ekološke odgovornosti. Naprimjer, optimizacijom rada turbina kroz prediktivno održavanje može se smanjiti pojava kavitacije, što ne samo da produžava vijek trajanja opreme nego i smanjuje gubitke u proizvodnji i minimizira štetan utjecaj na vodene ekosisteme. Pravovremena detekcija ovih procesa omogućava intervenciju prije nego što dođe do značajnijeg pada performansi, čime se čuva energija, ali i prirodni vodni resursi. Tako prediktivno održavanje pomaže u balansiranju tehničke pouzdanosti i očuvanja okoliša, što je jedan od ključnih principa Industrije 5.0.

Uloga čovjeka u središtu prediktivnog održavanja hidroelektrana u okviru Industrije 5.0 ogleda se u sinergiji između ljudske ekspertize i naprednih digitalnih tehnologija. Dok umjetna inteligencija, digitalni blizanci i senzorski sistemi omogućavaju kontinuirano praćenje i predikciju kvarova, čovjek ostaje ključni donosilac odluka koji te podatke tumači u širem tehničkom i ekološkom kontekstu. Inženjeri i operateri svojim iskustvom prepoznaju specifičnosti hidroenergetskog postrojenja, procjenjuju rizike i definišu optimalne mjere održavanja koje balansiraju sigurnost, efikasnost i održivost. Tako ljudska kreativnost, odgovornost i sposobnost za holističko sagledavanje sistema dopunjuju algoritamsku preciznost, čineći prediktivno održavanje ne samo tehnički naprednim već i društveno odgovornim procesom koji osigurava dugoročnu pouzdanost i održivost hidroelektrana.

Kao jedan od primjera može se navesti uloga čovjeka u kontroli stanja kliznih ležajeva kada je nemoguće izvršiti vizuelne preglede i ispitivanja ležajeva NDT (nedestruktivnim) metodama u svrhu prikupljanja podataka i rezultata bez njegovog djelovanja, dok u interakciji sa računarskim rješenjima podržanim vještačkom inteligencijom može brže i efikasnije donijeti ocjenu stanja ležajeva [12].



Slika 3. Proces provjere stanja kliznih ležajeva u kontekstu Industrije 5.0

Otpornost, kao jedan od ključnih stubova Industrije 5.0, u hidroelektranama se posebno ogleda kroz sposobnost sistema da dugoročno zadrži pouzdanost i sigurnost usprkos nepredvidivim okolnostima. Prediktivno održavanje ima centralnu ulogu u jačanju te otpornosti jer omogućava pravovremeno prepoznavanje anomalija i ranih znakova degradacije, čime se sprečavaju iznenadni kvarovi turbina, generatora ili transformatora. Time se minimizira rizik od havarija koje bi mogle izazvati prekide u snabdijevanju električnom energijom i ugroziti stabilnost elektroenergetskog sistema.

Otpornost se ne odnosi samo na tehničku stabilnost već i na operativnu i društvenu dimenziju. Korištenjem digitalnih blizanaca, AI modela i IoT senzora, hidroelektrane razvijaju sposobnost prilagođavanja promjenama – bilo da se radi o fluktuacijama vodostaja, klimatskim izazovima ili rastućim energetske potrebama. U kombinaciji s ljudskim znanjem i iskustvom, ovaj pristup omogućava donošenje brzih i pouzdanih odluka u kriznim situacijama. Tako prediktivno održavanje postaje temelj otpornosti hidroenergetskih sistema: produžava životni vijek opreme, povećava sigurnost, smanjuje ranjivost na vanjske poremećaje i osigurava stabilno snabdijevanje električnom energijom.

4. ZAKLJUČAK

Tranzicija od Industrije 4.0 ka Industriji 5.0 donosi novu paradigmu u održavanju hidroelektrana, jer fokus više nije samo na tehnološkim rješenjima i ekonomskoj efikasnosti nego i na čovjeku, održivosti i otpornosti. Prediktivno održavanje, koje se oslanja na senzorske tehnologije, analitiku podataka i umjetnu inteligenciju, pokazalo se kao ključni alat u ostvarivanju ovih ciljeva.

Pravovremenim prepoznavanjem anomalija i degradacije komponenti omogućava se produženje životnog vijeka opreme, smanjenje otpada i potrošnje energije potrebne za održavanje, čime se direktno doprinosi održivosti sistema. Istovremeno, integracija čovjeka u proces donošenja odluka obezbjeđuje balans između algoritamske preciznosti i ljudske stručnosti, čineći održavanje ne samo tehnički naprednim već i društveno odgovornim.

Otpornost hidroelektrana dodatno se jača kroz sposobnost prediktivnog održavanja da osigura stabilnost rada u kriznim situacijama i kontinuirano snabdijevanje električnom energijom. Na taj način prediktivno održavanje ne predstavlja samo evoluciju metoda upravljanja opremom već i temeljnu kariku u razvoju elektroenergetskih sistema u skladu s vrijednostima Industrije 5.0.

LITERATURA

- [1] Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, *Final report of the Industrie 4.0 Working Group, acatech – National Academy of Science and Engineering*. Dostupno na (18. 8. 2025. godine): <https://www.din.de/resource/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>
- [2] Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, pp 18-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- [3] European Commission (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Dostupno na (18. 8. 2025. godine): https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/2359a188-5702-4831-a529-3dac3f4ab2a3_en
- [4] Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0 – A human-centric solution. *Sustainability*, 11(6), 4371. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- [5] Romero, D. & Stahre, J. (2021). Towards the Resilient Operator 5.0: The Future of Work in Smart Resilient Manufacturing Systems, *Procedia CIRP*, 104, pp 1089-1094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.183>
- [6] Bousdekis, A., Magoutas, B., Apostolou, D. & Mentzas, G. (2015). A Review of Data-Driven Decision-Making Methods for Industry 4.0 Maintenance Applications. *Electronics*, 10(7), 828. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10070828>
- [7] IEA (2020). *Hydropower Special Market Report*. Dostupno na (18. 8. 2025. godine): <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>
- [8] Smith, R. (2001). Statistical Approaches in Machinery Problem Solving, *Eds: R. Keith Mobley, Plant Engineer's Handbook, Butterworth-Heinemann*, pp 1117-1130, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-075067328-0/50064-1>.
- [9] Špago, D., Nezirić, E. & Đidelića, M. (2022.) Ocjena stanja hidroagregata sa Kaplan turbinom analizom mjerenih mehaničkih, električnih i hidrauličkih parametara u stacionarnim i nestacionarnim režimima rada, 7. Konferencija „Održavanje 2022.“, Budva (Crna Gora), 12.-16. septembar 2022.
- [10] Nezirić, E., Isić, S., Špago, D. & Čupina, M. (2025). Comparative Analysis of Hydraulic Machinery Vibration Evaluation Standards. In *International Conference “New Technologies, Development and Applications”* (pp. 500-508). Cham: Springer Nature Switzerland. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95194-7_52
- [11] Padhy, M. K., Saini, R. P. (2008). A review on silt erosion in hydro turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 1974-1987. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.025>
- [12] Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. da P. Basto, J. P. & Alcalá, S. G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 137, 106024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>.

TRANSITION FROM INDUSTRY 4.0 TO INDUSTRY 5.0: PREDICTIVE MAINTENANCE OF HYDROPOWER PLANTS

Emir Nezirić¹, Edin Džihović¹

¹ "Džemal Bijedić" University of Mostar, Faculty of Mechanical Engineering, 88000 Mostar, Bosnia and Herzegovina

Corresponding author: Emir.nezirc@unmo.ba

ABSTRACT

This paper explores the transition from Industry 4.0 to Industry 5.0 through the lens of predictive maintenance in hydropower plants. Industry 4.0 introduced digitalization, automation, and the widespread use of sensor systems and data analytics, enabling predictive maintenance aimed at reducing downtime and optimizing equipment performance. However, the concept of Industry 5.0 expands this framework by emphasizing three fundamental pillars: human-centricity, sustainability, and resilience.

The paper analyzes key components of hydropower plants and their typical predictive maintenance methods, including vibration analysis, thermography, partial discharge diagnostics, and the application of digital twins. Focus is placed on the role of humans, who, in interaction with advanced algorithms and artificial intelligence tools, remain central decision-makers. This synergy ensures a balance between technological precision and human expertise.

Findings indicate that predictive maintenance significantly contributes to extending equipment lifetime, reducing waste, improving energy efficiency, and enhancing operational safety. In this way, hydropower plants become a more reliable and sustainable pillar of the energy system, while predictive maintenance emerges as a key enabler of the Industry 5.0 principles in practice.

KEYWORDS: Industry 5.0, predictive maintenance, hydropower plants, hydropower

KA PAMETNIM RUDNICIMA

Vladimir Simeunović¹, Dragan Stošić¹, Sonja Dimitrijević¹, Vidosav Majstorović²

¹Institut „Mihajlo Pupin“, Beograd

²Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, Beograd

*E-mail: vidosav.majstorovic@gmail.com

REZIME

Pametno rudarstvo (Smart Mining) predstavlja primjenu savremenih tehnologija i digitalnih inovacija u rudarskoj industriji kako bi se poboljšale efikasnost, bezbjednost i održivost. Ova koncepcija uključuje korišćenje Internet of Things (IoT), vještačke inteligencije (AI), robotike, automatizacije i analize velikih podataka (Big Data Analysis). Ključne karakteristike pametnog rudarstva su: (a) automatizacija i robotika – smanjenje uticaja ljudskog faktora korišćenjem autonomne opreme (samoupravljajući kamioni, bušilice), (b) IoT i senzori – praćenje stanja opreme, radnih uslova i životne sredine u realnom vremenu, (c) AI i mašinsko učenje – predviđanje kvarova opreme, optimizacija procesa i analiza geoloških podataka, (d) održivo upravljanje resursima – smanjenje uticaja na životnu sredinu kroz preciznije iskorišćavanje minerala i smanjenje otpada i (e) povezivanje rudarskih operacija – integracija svih segmenata rudnika u jedan digitalni sistem (Digital Twin). Prednosti digitalnog rudnika su: (a) povećana produktivnost, kroz bržu i precizniju eksploataciju resursa, (b) poboljšana bezbjednost, jer su radnici manje izloženi opasnostima, (c) smanjenje troškova, kroz optimizaciju potrošnje energije i resursa i (d) održivost uz manje zagađenje i veću energetska efikasnost. Sa druge strane, moguća ograničenja su: visoki početni troškovi implementacije, potrebe za visokokvalifikovanom radnom snagom i zabrinutost za cyber bezbjednost povezanih sistema. Pametno rudarstvo predstavlja budućnost rudarske industrije, omogućavajući održiv i efikasan način iskorišćavanja mineralnih resursa uz minimalne ekološke posljedice. Ovaj rad daje praktičan primjer jednog razvojnog projekta iz Srbije.

Ključne riječi: Industrija 4.0, pametno rudarstvo, primjena

1. Uvodne napomene

Digitalizacija je ključna riječ koja je dovela do toga da govorimo o modelu Industrije 4.0 u rudnicima, a ona je, dalje, ključna riječ za istraživanje i razvoj modela pametnih rudnika. Sve veća digitalizacija rudnika znači da su njihovi poslovni, inženjerski i proizvodni procesi digitalizovani [1]. Prva istraživanja pokazuju da se digitalizacijom povećava produktivnost mašina i uređaja, kao i samog procesa rada, povećava bezbjednost i efikasnost rudarskih operacija, a time i smanjuju troškovi poslovanja. Model pametnih rudnika obezbjeđuje protok informacija u realnom vremenu između menadžmenta, inženjerskih i poslovnih funkcija rudnika. U današnjim modelima automatizacije (Industrija 3.0) postoji kašnjenje u informacijama (povratnim), a time i odlukama između navedenih nivoa, što otežava menadžerima donošenje optimalnih odluka. U savremenom poslovanju rudnika je potrebna online vidljivost proizvodnje, uvid u kvalitet rude, tačna vremena ciklusa rada, statusa mašine (BTO – bager – transporter – odlagač, na primjer za površinski kop) i drugih važnih operativnih parametara da bi se postigli optimalni poslovni rezultati [2-4]. Primjena elemenata Industrije 4.0 u rudniku, integracija sistema poslovnih aktivnosti u rudniku i na nivou preduzeća, omogućava brzu i tačnu komunikaciju u praćenju i nadgledanju tekućih operacija, a radi njihove optimizacije pomoću BDA (big data analysis – analiza velikih podataka) uz korišćenje modela vještačke inteligencije (artificial intelligence – AI) i mašinskog učenja (machine learning – ML) [5]. Ovaj rad daje okvire modela pametnog rudnika, koji je od tehnologije Industrije 4.0, kao modela za integraciju poslovnih i proizvodnih sistema i procesa na površinskom kopu i u rudniku, stvorio okvir koji dovodi do realizacije pametnog rudarstva u praksi. Cilj ovog rada je da definiše okvire i sadržaj modela pametnog rudnika na bazi elemenata Industrije 4.0. Takođe, kao primjer, ovdje će se navesti neki elementi Industrije 4.0 koji se danas primjenjuju na površinskom kopu „Drmno“, a kao rezultat zajedničkih istraživanja i razvoja Mašinskog fakulteta iz Beograda i Instituta „Mihajilo Pupin“, takođe iz Beograda.

2. PREGLED LITERATURE – OKVIR MODELA PAMETNOG RUDNIKA

U ovom trenutku posmatrano, termin „pametno“ rudarstvo (smart mining – SM) je relativno nov. On je usko povezan sa terminom „pametna“ proizvodnja u metalnoj industriji (smart manufacturing – SM), jer ih čini ista osnovu, model Industrije 4.0, koji danas ima 48 elemenata [6]. Odmah da konstatujemo da sve elemente (48) Industrije 4.0 ne treba primijeniti u rudniku, a naše analize pokazuju da je za okvir modela Industrije 4.0 u rudniku dovoljno njih 18. U tekstu koji slijedi oni će biti eksplicitno i navedeni. Polazeći od ovih činjenica i analogija sa proizvodnjom, u daljem tekstu se daju glavne karakteristike pametnog rudarstva.

Današnji nivo razvoja i primjene elemenata Industrije 4.0 je dovoljan i potreban okvir za razvoj modela pametnog rudnika. Sa druge strane, naš razvojni projekat Industrije 4.0 za površinski kop „Drmno“ nam je poslužio da za njegove elemente Industrije 4.0 objasnimo šta su trendovi razvoja ka pametnom rudniku.

Upravljanje nabavkom i zalihama rezervnih dijelova. Online praćenje stanja zaliha goriva pokazuje količinu goriva koja je dostupna za potrošnju. Uporedo sa ovim, moguće je pratiti koje vozilo/radna mašina ili grupa vozila/radnih mašina troši više goriva od ostalih, pa primjenom analize velikih podataka (Big data analysis – BDA) možemo istražiti zašto je to tako. Zato primjena međufunkcionalnih indikatora ključnih performansi (Key performance indicators – KPI) omogućava mjerenje i prikaz potrošnje goriva po prevezenoj toni, prijeđenim kilometrima, u određenom vremenu i slično.

U ovom konceptu i dobavljači rezervnih dijelova, zahvaljujući BDA modelu, imaju uvid u životni vijek svojih proizvoda (dijelova) koje isporučuju rudniku [7]. Informacije o performansama, na primjer guma za rudarska vozila: cijena otkaza gume po radnim satima, intenzitet habanja gazećeg sloja (u vremenu, po prevučenoj toni tereta), pomažu menadžmentu da odredi koji je brend guma

prikladniji i isplativiji za eksploataciju u uslovima njihovog rudnika. Međutim i dobavljači mogu imati koristiti od ovih informacija, tako što će njihovom dubinskom analizom pomoću mašinskog učenja unaprediti kvalitet svojih guma.

Upravljanje rezervnim dijelovima u rudniku je izuzetno bitno u kontekstu primjene modela Industrije 4.0, jer primjena ERP/MES-a omogućava rudniku da upravlja svojim zalihama na novim osnovama. Koristeći IoT kao i RFID tehnologiju, a uz podršku AI-a, na cloud se prikupljaju sve važne informacije o svim rezervnim dijelovima i njihovom ponašanju u eksploataciji. Tako se, na primjer, za pneumatike (na kamionima) i valjke (na transportnim trakama), koji se najviše troše prate [8, 9]: cijena, vijek trajanja, otkazi (po različitim osnovama), kao i druge karakteristike. Koristeći modele učenja, vrši se predikcija vijeka ovih sistema (gume, trake) i optimizacija upravljanja njihovim zalihama, kao i drugim vitalnim dijelovima (ležajevi, kućišta, lanci itd.). Sa druge strane, i za rezervne dijelove se, svaki ponaosob, razvijaju KPI parametri. Koristeći MES sistem, prati se kvalitet iskopane rude putem upravljanja radnim nalogom (u toku), kao i postupanje pri iznenadnom otkazu, ako se pojavi.

Praćenje radnih mašina (BTO) na površinskom kopu. Istraživanja i razvoj autonomnih vozila, kao i dronova za praćenje i prikupljanje geodetskih podataka od interesa za rudnik, u posljednjoj deceniji se sve više ubrzavaju. Danas se za savremena geodetska snimanja koriste dronovi sa LiDAR (Light Detection and Ranging – svjetlosna detekcija i rangiranje) senzorima, koji na nov način prikupljaju sve geodetske informacije, čime se vrše detaljna mapiranja rudnika, posebno onih sa površinskom eksploatacijom.

Sa druge strane, RTLS platforme (Real-time location system – sistem lociranja u realnom vremenu) su ključni elementi za unapređenje sposobnosti autonomnih vozila i dronova u rudarstvu [10]. Ovdje se, prije svega, radi o povećanju preciznosti navigacije ovih sistema, posebno u teško pristupačnim sredinama. Drugi aspekt ove priče je unapređenje mjera sigurnosti u realnom vremenu, a ovdje se prvenstveno misli na izbjegavanje sudara autonomnih vozila i dronova kada ih je više istovremeno u radu. To se postiže optimizacijom putanja ovih sistema u realnom vremenu korišćenjem ML metode.

Planiranje proizvodnih aktivnosti na polju rudnika se vrši pomoću geografskog informacionog sistema (*Geographic information system – GIS*) čije se informacije dostavljaju poslovođama površinskog kopa koristeći IoT uređaja i RTLS platformu. Na osnovu njih, poslovođe, zajedno sa geolozima, definišu, na primjer, projekat planiranja bušenja jama i njihovo miniranje. Kada se miniranje završi, dronovima se vrši snimanje nove konfiguracije polja rudnika, a podaci se šalju u cloud bazu podataka za potrebe planiranja tehnoloških resursa (Enterprise resource planning – ERP), upravljanje radnim nalogom u rudarstvu (Mining execution system – MES) i potrebe nekih drugih sistema. Na primjer, za rudnike sa jamskom eksploatacijom, povratne informacije poslate u realnom vremenu omogućavaju planerima da definišu nove planove bušenja, prije nego što počne sljedeća smjena [11]. Na ovaj način geolozi i planeri eksploatacije rudnika koriste stvarne podatke o rudarskoj proizvodnji za poređenje i fino podešavanje planiranja rudarskih operacija unutar same jame.

Vozila i rudarska oprema koriste senzore za prikupljanje informacija koristeći IoT o performansama ovih sistema: sati rada motora, sati stajanja (nisu u eksploataciji), pređena kilometraža i efektivan rad (transport ili iskopavanje). Koristeći ove informacije, vozila i mašine dobijaju „pametne“ osobine, jer se može definisati termin planiranog održavanja korišćenjem modela AI-a i ML-a. Dakle, proaktivni nalozi za održavanje se automatski kreiraju u modulu „preventivno održavanje“, kao dijelu MES-a. Tada se dijelovi naručuju, a radovi održavanja se planiraju, zakazuju i izvode kada mašina ne radi. Ovaj prilaz dovodi do značajnog smanjenja vremena zastoja i visokih troškova korektivnog održavanja – otklanjanje iznenadnih otkaza.

Kontrolna tabla pregleda stanja na površinskom kopu u realnom vremenu. Jedan od vitalnih ciljeva svakog rudnika su bezbjedonosni sistemi, koji digitalizacijom dobijaju svoj puni smisao korišćenja (online rad i prikupljanje podataka, bez obzira na mjesto i lokaciju rudarskog entiteta koga

prate). Dakle, radi se o RTLS platformama, koje obezbjeđuju proaktivno sigurnosno okruženje. One su izuzetno važne za rudnike sa podzemnom eksploatacijom, gdje se mogu pojaviti opasni uslovi rada. Sa druge strane, koristeći digitalne blizance (Digital twin – DT), određuju se virtuelne vrijednosti dozvoljenih vrijednosti granica sigurnosnih parametara, uz vizuelizaciju lokacije, što menadžerima i rukovodiocima smjena olakšava efikasno upravljanje saobraćajem, minimizirajući zastoje i obezbjeđujući nesmetani tok saobraćaja u rudniku, posebno na površinskim kopovima [12]. Takođe, digitalne platforme za izbjegavanje sudara u rudnicima (Collision avoidance system – CAS), takođe prate i podržavaju teške rudarske mašine (Heavy machinery equipment – HME), na bazi online alarmnog sistema kao dijela RTLS rješenja. Ovaj koncept se, kao digitalno rješenje (IoT i Wifi), najviše primjenjuje u rudnicima sa površinskim kopom.

U modelu Industrije 4.0 primjenjuje se i sistem za slanje multimedijalnih poruka (Multimedia Messaging Service – MMS) za praćenje radnih mašina, koji se spaja sa globalnim pozicionim sistemom (Global Positioning System – GPS) za njihovo praćenje, koji obezbjeđuje automatsko praćenje voznog parka na osnovu trenutne lokacije na kopu. Trenutnu lokaciju i pomjeranje svake radne mašine prati GPS sistem za praćenje, koji radi u realnom vremenu. GPS platforma tačno određuje vrijeme rada / putovanja i mogućnosti da se re-terminiše raspored kretanja kamiona, ako se on kreće sporije ili brže nego što je planirano. Trenutne lokacije radnih mašina se automatski ažuriraju i prikazuju na mapama u realnom vremenu, jer se pomoću IoT uređaja prenose koordinate položaja mašine u realnom vremenu [13]. Sistem za planiranje i praćenje radnih mašina je povezan se cloud bazom podataka, čime su podaci o praćenju voznog parka online dostupni širom rudnika, trenutno, ali i kao istorija za BDA analize.

Izvjestaji i kontrolne table su u stanju da, između ostalog, prikažu podatke prikupljene iz sistema za donosioc odluka, uz podatke koji se dijele sa nivoa rudnika nazad u sistem rada / proizvodnje u realnom vremenu. Izvjestaji takođe mogu da prikažu ukupan status površinskog kopa u realnom vremenu. Ovi izvještaji su kompatibilni sa svim fiksnim ili mobilnim uređajima na kojima je omogućen web pristup, što ih čini dostupnim u bilo koje vrijeme i sa bilo kog mjesta. Menadžment koristi online izvještaje da prati rudarske operacije iz svojih kancelarija, umjesto da fizički izađe na lice mjesta. Nedjeljnim i mjesečnim izvještajima uglavnom pristupa i koristi ih za optimizaciju generalni direktor i menadžment rudnika, na nedjeljnim i mjesečnim sastancima [5]. Stoga, menadžment i rukovodioci imaju uvid u rad rudnika u realnom vremenu iz udaljenih kancelarija, ili sa bilo kog mjesta u svijetu.

Održavanje u realnom vremenu. Održavanje stanja, kao i otklanjanje iznenadnih otkaza se u digitalnom modelu rudnika efikasno izvodi primjenom DT (Digital twin – digitalni bliznaci) koncepta. On ekspertima na brz i jednostavan vizuelan način pruža uvid u strukturu održavane mašine, čime se operacije održavanja izvode brzo, pouzdano i efikasno [14]. Kada se izvrši automatizacija rudnika na već opisan način, onda primjena DT koncepta bude posljedica toga, a ne novi, naknadni projekat za digitalni rudnik.

Online praćenje OEE (**Overall Equipment Effectiveness – ukupna efektivnost opreme [planirano/izvršeno] u rudniku**) i KPI parametara [6], pokazuje nam u kakvom je operativnom stanju oprema. Ako nije dovoljno iskorišćena, onda menadžment može da preuzme potrebne korake. Tako, na primjer, praćenjem prosječnog vremena između otkaza (mean time between failure – MTBF) i prosječnog potrebnog vremena za popravku (mean time to repair – MTTR), omogućava rudniku da, koristeći BDA model, izbjegne neočekivane i skupe zastoje kroz proaktivno održavanje prema stanju [15]. Praćenjem troškova korektivnog, preventivnog i proaktivnog održavanja, u svakom trenutku imamo utrošak aktivnosti održavanja. Korišćenjem BDA modela imamo mogućnost optimizacije troškova po različitim osnovama. Online praćenjem (IoT) aktivnog rada opreme na kopu i RTLS platformom, imamo informaciju koliko je ona bila dostupna za rad tokom planiranog vremena proizvodnje. Ovo nam otkriva koja oprema obično nije dostupna za rad, pa onda možemo istražiti osnovne razloge za to [16].

Prediktivna analitika velikih podataka (BDA). Najnovija rješenja koja proizilaze iz platforme RTLS, gdje je sa njom integrisan model industrijskog interneta stvari (Industrial internet of things – IIoT), daje novu dimenziju online digitalizacije rudnika u vremenu i prostoru. Primjenom ovog koncepta dolazimo do pametnih rješenja za online praćenje ključnih KPI parametara operativne gotovosti rudnika [17]. Tako nam, na primjer, ova rješenja omogućavaju precizno upravljanje resursima (mašine, oprema, tehničke tečnosti, voda, rezervni dijelovi, kadrovi), a ovaj koncept istovremeno omogućuje prediktivno održavanje mašina i opreme u rudniku. Na ovaj način se sprečavaju veliki zastoji u proizvodnji, optimizuju troškovi i povećavaju parametri operativne gotovosti.

BDA analize, podržane modelima AI-a, u istraživanjima polja minerala i njihovom optimalnom korišćenju se sve više koriste u pametnim rudnicima [18, 19]. Takođe, u ovim pristupima gdje se koristi AI razvijaju se i primjenjuju prediktivni modeli sigurnosnih sistema rudnika, gdje se iz istorijskih podataka ranijih incidenata definišu proaktivni modeli za buduće primjene. Sve ove činjenice su dovele do stvaranja novih najboljih rudarskih praksi u kontekstu primjene modela Industrije 4.0.

On line upravljanje kvalitetom (proizvodnje uglja, rezervnih dijelova – guma i transportnih traka / BTO). RTLS platforme, podržane AI alatima za ML/DML (Deep machine learning – produbljeno mašinsko učenje), pomažu rudarskim kompanijama da ispunjavaju sve strože ekološke zahtjeve, kao i ciljeve održivosti definisane strategijom UN-a o održivosti do 2030. godine. Inteligentne rudarske tehnologije imaju ključnu ulogu u ovim procesima omogućujući smanjenje potrošnje energije, otpada i proizvodnje CO₂ (dekarbonizacija proizvodnje) [19].

Upravljanje proizvodnjom na površinskom kopu se u modelu Industrija 4.0 prati radnim nalogom (work in progres – WIP), čiji status se određuje u realnom vremenu, prateći tako dnevne ciljeve proizvodnje [20]. Praćenjem WIP-a se poslovođama omogućava da intervenišu, u zavisnosti od toga kako se ostvaruju dnevni ciljevi proizvodnje. Tako se ostvaruje MES model bez papira. Status proizvodnje u realnom vremenu omogućava donosiocima odluka da, na primjer, isključe mašinu ako nastanu problemi u vezi sa iznenadnim otkazom (MES/ERP), a poslovođi da pokrene novu „rezervnu“ mašinu.

Poznavanje vremena ciklusa rada mašine i njenih performansi nije uvijek dovoljno, već je potrebno imati i informacije o kvalitetu iskopane rude. Dakle, informacije o kvalitetu rudarenja se dobijaju tako što se porede količine kvalitetnog iskopanog uglja sa ukupnom količinom proizvedenog uglja. Posjedovanje kvalitetnih informacija u realnom vremenu pomaže menadžmentu rudnika da upravlja realnim procesima proizvodnje, koristeći RTLS, IoT i BDA modele.

Efikasnost mašinskog parka rudnika nam prikazuje informacije o iskorišćenosti radnih mašina, koje se u modelu Industrije 4.0 posmatraju kao sajber fizički sistem (cyber-physical system – CPS). Na primjer [21]: prosječna nosivost (kamiona), prosječno iskopavanje bagera, prosječna vrijednost tona koje se transportuju i/ili iskopavaju na sat i vrijeme koje je potrebno kamionu da putuje od utovara rude do njenog odlagališta (vrijeme ciklusa). Ove informacije su važne za planiranje proizvodnje i praćenje ostvarivanja plana proizvodnje, recimo uglja na površinskom kopu.

Veća bezbjednost (ergonomski uslovi) na radu kroz proširenu automatizaciju na bazi Industriju 4.0. ESG (Environmental, Social and Governance) model predstavlja skup principa koji dolaze iz standarda koji organizaciji u primjeni obezbjeđuju korporativnu politiku koja je u skladu sa konceptima održivog razvoja u odnosu na životnu sredinu, društvene odgovornosti i korporativno upravljanje [22]. Ovdje se, prije svega, misli na primjenu skupa standarda: ISO 9001, ISO 14001, OH&S 45001, ISO 22301, ISO 26001, ISO 31000, ISO 37001 i globalne ciljeve održivog razvoja UN-a do 2030. Sve ovo je povezano i sa dekarbonizacijom proizvodnje (CBAM dokument) i zelenom tranzicijom. Ovaj prilaz obezbjeđuje rudnicima dobru praksu u oblasti održivog razvoja i ispunjenja regulatornih zahtjeva koji postaju sve oštriji, a ovo predstavlja poseban problem kod rudnika koji su u eksploataciji, što zahtijeva dodatna ulaganja u sigurnosne sisteme. Sa druge strane, ovakav postupak

rudnicima obezbjeđuje praćenje u realnom vremenu svih važnih procesa proizvodnje, transporta, održavanja i bezbjednosti rada. Kao podrška modelu Industrije 4.0 u rudarstvu, za ove namjene su razvijene i primijenjene posebne digitalne platforme – RTLS, a ova je jedna od najpoznatijih. Ona digitalno pokriva sve kritične tačke entiteta rudnika i online prati i šalje informacije o događajima od interesa korisnika ka cloud platformi, uključujući i KPI parametre za ESG principe.

KPI parametri ESG principa se online prate modelom vertikalne integracije u Industriji 4.0, i to koristeći SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – sistem za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka), ERP, MES, IMS (Integrated management system – integrisani menadžment sistem) (QMS (ISO 9001), EMS (ISO 14001), OH&S (ISO 45001), BDA, MMS, GPS i GIS sistem. Svi oni su integrisani preko jedinstvene baze podataka na cloudu (najčešće privatnom, zbog cyber bezbjednosti) [23]. Osim što omogućava rudarskim sistemima da komuniciraju jedni sa drugima u realnom vremenu, ovo takođe daje ogromne količine podataka koje generišu ovi sistemi, kao i mašine i ostali rudarski uređaji i oprema. Dobijeni podaci se koriste za produbljenu analizu (BDA), definisanje, kreiranje i praćenje KPI parametara i izvještavanje. Podaci u realnom vremenu prikupljeni iz rudnika, proizvodnje i svih drugih vrsta opreme mogu biti dostupni za upotrebu i od strane dobavljača rezervnih dijelova za praćenje performansi i poboljšanje efikasnosti i jačanje njihove veze sa funkcijom održavanja rudnika. Analizom velikih podataka uz korišćenje AI/ML-a, rudnik može da smanji troškove proizvodnje, poveća produktivnost, kao i kvalitet iskopane rude, vršeći geološke analize.

Praćenje stanja u realnom vremenu, omogućeno integracijom lokacijskih sistema u realnom vremenu, na primjer pomoću platforme RTLS, predstavlja izuzetan napredak u planiranju i upravljanju aktivnostima u rudarskoj industriji [24]. Takođe, ovaj model (RTLS) online prati parametre životne sredine: kvalitet vazduha, temperaturu, vlažnost vazduha i brzinu vjetera. Pored toga, kod rudnika koji imaju podzemnu eksploataciju u rizičnim sredinama (metan, podzemne vode ili drugi zagađujući gasovi), obezbjeđuju precizno praćenje zdravstvenih i sigurnosnih parametara putem definisanih protokola.

Poboljšan timski rad u proizvodnom okruženju kroz transparentnost i dostupnost podataka. Primjena vještačke inteligencije u rudniku predstavlja osnovu za primjenu prediktivnih analiza (poslovanja, održavanja, geoloških istraživanja...), čime se značajno unapređuje njegova operativna gotovost. Sve ovo se postiže primjenom modela ML/DML-a [25].

Činjenica je da se u rudnicima, po različitim osnovama, generišu ogromne količine podataka, koji dobijaju svoj puni smisao produbljenim analizama, čime se stvara duboki uvid u sve rudarske procese, kao nikada ranije. Primjenom AI-a, dobijaju se prediktivni modeli održavanja mašina i opreme, prate modeli i trendovi degradacije vitalnih komponenti, čime se sprečavaju iznenadni otkazi, a povećava ukupna operativna gotovost rudnika [26]. Primjenom ERP modela se vrši optimizacija korišćenja resursa, a uz fino terminiranje se raspoređuju mašine i oprema, kao i radna snaga. Na ovaj način se dobijaju i tačni vremenski intervali, kada se javljaju potrebe za angažovanjem dodatnih resursa. Primjenom ovih modela, menadžment daje mogućnosti za uštedu energije optimizacijom potrošnje na mašinama i sistemima koji su veliki potrošači.

Naprijed navedene činjenice ilustriramo, preko KPI parametara, jednim primjerom rudnika uglja sa površinskom eksploatacijom [27]: ukupna otkrivena površina na polju rudnika, iskopane količine otkrivke, iskopane količine uglja, klasa (kvalitet) uglja, indeks potrošnje goriva i maziva, transportovane količine otkrivke (rude), ukupna količina potrošenog goriva i maziva, prosječna količina potrošenog goriva i/ili maziva po radnoj mašini. Izvještaji prikazuju rudarske aktivnosti na kopu u realnom vremenu, omogućavajući menadžmentu da ima jasan uvid u produktivnost rada na kopu, kao i odnos planirano/izvršeno (ERP modul), po različitim osnovama i za različite nivoe.

Poboljšano okruženje kroz optimizovano korišćenje resursa, posebno energije. U modelu Industrije 4.0 koji radi podržan cloudom (po pravilu privatnim, zbog bezbjednosti informacija), radni nalozi (WO) se generišu u ERP, a potom odmah preuzimaju u MES sistem. Nakon toga, pošto se sve

odigrava online, oni postaju WIP (radni nalozi u radu), informacije o njihovom statusu se vraćaju nazad u ERP, a one po pravilu sadrže: količinu i kvalitet iskopane rude, potrošnju tehničkih goriva i maziva itd. Sve ovo se stavlja online na uvid korisnicima u obliku koji im omogućava da lako razumiju i zaključie najvažnije činjenice o statusu proizvodnje i održavanja rudnika. Što se potrošnje goriva tiče, radne mašine su opremljene senzorima za mjerenje i evidentiranje nivoa goriva i maziva, čime se u svakom trenutku prati nivo zaliha i vrši dopuna rezervoara radnih mašina, kao i centralnog rezervoara. Sve ove informacije se generišu u MES a zatim ERP na cloud, sa ID brojem radne mašine, brojem radnih sati, uz potrošnju. Tako se stvaraju BDA baze znanja za AI produbljene analize.

ERP model se koristi za planiranje i terminiranje kapaciteta radnih mašina u rudniku, a njihova provjera se vrši kada se oni prevedu u radni nalog (MES) za proizvodnju. Tada se identifikuju neusklađenosti (po pravilu preopterećenja i ograničenja kapaciteta radnih mašina), pa planer mora da ponovo planira, odnosno re-terminira proizvodne radne naloge. Ovako kreirani proizvodni nalozi sada daju operateru detaljan prikaz planirane proizvodnje, terminirane operacije proizvodnih naloga, planirane količine otkopanog uglja sa datumima (terminima), kao i ukupne količine [28].

Terminirano vrijeme rada radnih mašina u rudniku i planirani rokovi završetka ranih naloga ne zavise više od tačnosti standardizovanih vremena rudarskih operacija, već isključivo od online prikupljenih podataka sa radnih mašina preko senzora IoT-a. Kako su proizvodni nalozi vidljivi u MES-u, operater ima mogućnost da ponovo rasporedi operacije (re-terminira) proizvodnog naloga u slučajevima neplaniranog zastoja radne mašine. Svako ponovno planiranje operacija proizvodnog naloga urađeno u MES-u ažurira datume proizvodnih naloga u ERP-u automatski [29].

Proširene inovativne mogućnosti kroz nove tehnološke mogućnosti u proizvodnji. Jedan od najvažnijih elemenata Industrije 4.0, IoT (internet stvari) ili, tačnije, za primjenu u industriji, IIoT (industrijski internet stvari) je problikovao i rudarstvo, donoseći mu online informacije o efektivnosti i efikasnosti korišćenja resursa [30]. I u modelu Industrije 3.0 smo imali slične podatke, ali oni nisu korišćeni na način kao sada: BDA analize pomoću AI modela.

Digitalizacija obezbjeđuje online praćenje rudarske proizvodnje, čime se menadžmentu omogućava da u bilo kom trenutku zaustavi ili promjeni bilo koju poslovno-proizvodnu aktivnost [10]. Ovo je omogućeno primjenom IoT i Wi-Fi komunikacije, tako što se kretanje radnih mašina, traka i druge opreme, kao i njihov rad, prati u realnom vremenu. Na primjer, informacija o potrebi točenja goriva za radne mašine, kada se dostigne upozoravajući nivo, se šalje kontrolnom centru u realnom vremenu, prije nego što se ove mašine planiraju za sljedeću turu transporta ili proizvodnje. Ova informacija se generiše u MES i vrši korektura ERP termin planova, ako je to potrebno. Održavanje svake radne mašine se planira na osnovu prirode i veličine oštećenja vitalnog dijela (održavanje po stanju ili prediktivno održavanje) i potrebe kapaciteta koje definiše ERP [31].

U današnjem trenutku, digitalizacija je najisplativija strategija za povećanje produktivnosti rudarskih operacija na bazi transformacije njenog poslovnog modela. Polazni entitet od koga se razvija model digitalizacije rudnika je CPS (radna mašina, uređaj) i radno mjesto (menadžer, inženjer, operater). U simbiozi, virtuelni model rudnika i njegovih entiteta (digitalni blizanci) i čovjeka se razvija u model Industrije 4.0, koji će kasnije uz podršku AI-a preći u model Industrije 5.0 za rudnik.

Jedan od ključnih aspekta digitalizacije je eliminisanje „praznih hodova“ u rudarskim operacijama, pa je primjena online ERP/MES modela za Industriju 4.0 (cloud) rješenje za to [32]. Dakle, sinhronizacija proizvodnih, transportnih i operacija održavanja, preko za to namijenjenih platformi, je dodatni aspekt naprijed navedenih modela za alokaciju i optimalno korišćenje resursa. Na ovaj način se povećava i produktivnost u rudniku.

U MES modelu, pomoću koga se upravlja radnim nalogom u rudarskoj proizvodnji, korišćenjem pametnih čitača RFID (Radio frequency identification – identifikacija putem radio frekfencije) i IoT entiteta, sakupljaju se podaci o potrošnji električne energije za mašine i uređaje u realnom vremenu [33]. Time se rudniku omogućava da upravlja potrošnjom električne energije na rentabilan način, uz integrisanje ovih podataka u sistem planiranja proizvodnje rudnika.

Možemo zaključiti da digitalizacija uzima punog maha u rudnicima i da treća decenija 21. vijeka predstavlja doba primjene modela Industrije 4.0 u njima.

3. Case study – jedan primjer

U Tabeli 1. je dat primjer stanja projekta Industrije 4.0 za površinski kop „Drmno“. Zajednički projektni tim ove kompanije, Instituta „Mihajilo Pupin“ i Mašinskog fakulteta redovno je obavještavao naučnu i stručnu javnost u zemlji i inostranstvu o napretku projekta [34-36].

Tabela 1. Stanje razvoja i primjene elemenata Industrije 4.0 na površinskom kopu „Drmno“

Aktivnost (primijenjeno – P, u razvoju – R)	Rad u realnom vremenu	Funkcija / oblast primjene	Karakteristika	Softverska podrška / element Industrije 4.0
Upravljanje porudžbinama (P)	Da	Rezervni dijelovi, gorivo, mazivo, procesne sirovine, ostali materijal	Optimalni nivo zaliha	ERP, MES (WIP)
Praćenje radnih mašina (BTO) na površinskom kopu (P)	Da	Praćenje mašina (bager – transport – odlagač) - CPS	Virtuelni GPS	GPS (MMS)
Kontrolna tabla pregleda stanja na površinskom kopu (P)	Da	Praćenje proizvodnje u realnom vremenu	Virtuelno polje	GPS, GIS, DT
Održavanje mašina (P)	Da	Radne mašine (BTO), rudarska oprema i postrojenja	Senzori	SCADA, ERP, MES (WIP), IoT, DT
Prediktivna analitika velikih podataka (BDA) (R)	Da	Na nivou površinskog kopa, potrošnja goriva, maziva i rezervnih dijelova, optimizacija održavanja radnih mašina (BTO) i ostalih postrojenja. Cijeli lanac vrijednosti na površinskom kopu	Analiza velikih podataka	ERP, BDA, AI (ML)
On line upravljanje kvalitetom (proizvodnje uglja, rezervnih dijelova – guma i transportnih traka / BTO) (R)	Da	Postrojenje za preradu, rudarska proizvodnja, sistem guma i transportnih traka (BTO)	Veliki podaci, vertikalna integracija	ERP, MES, QMS (IMS), BDA
Veća bezbjednost, zaštita prirode (ergonomski uslovi) na radu kroz proširenu automatizaciju na bazi Industrije 4.0 (R)	Da	Svi pogonski i proizvodni sistemi na kopu (prerada, geologija i planiranje rudnika)	Svi sistemi i oprema na površinskom kopu su integrisani (BTO)	ERP, MES, ISO 14001, OH&S (IMS), ESG

Poboljšani timski rad u proizvodnom okruženju kroz transparentnost i dostupnost podataka (P)	Da	Rudarska proizvodnja (BTO), postrojenje za preradu, geologija i planiranje rudnika. Svi pogonski i proizvodni sistemi	Vertikalna integracija	ERP, MES, GPS, IMS
Poboljšano okruženje kroz optimizovano korišćenje resursa, posebno energije (P)	Da	Rudarska proizvodnja (BTO), postrojenje za preradu, geologija i planiranje rudnika	Integracija senzora za praćenje stanja i pametni čitači	MES, EMS
Proširene inovativne mogućnosti kroz nove tehnološke mogućnosti u proizvodnji (R)	Da	Rudarska proizvodnja (BTO), postrojenje za preradu, geologija i planiranje rudnika	Vertikalni, horizontalni i slojevi integracije od kraja do kraja	ERP, MES, IMS, MMS, GPS, GIS
Izveštavanje o zalihama (P)	Da	Svi rezervni dijelovi, gorivo, mazivo, procesne sirovine, ostali materijal	Izveštavanje u realnom vremenu, BDA, vertikalna integracija	ERP, MES

U desnoj koloni Tabele 1. su dati elementi Industrije 4.0, primijenjeni ili u razvoju za ovaj površinski kop. U tački 2 dato je poređenje ovih elemenata sa trendovima razvoja istih u pametnom rudniku.

4. Zaključci

Digitalizacija rudnika je kao nikada ranije otvorila nove mogućnosti optimizacije procesa i operacija u njemu. Koristeći elemente Industrije 4.0, a prije svega modela i tehnike vještačke inteligencije (AI) i mašinskog učenja (ML), rudnik nepovratno ide ka modelu pametnog rudarenja [37, 38]. Koristeći i analizu velikih podataka (BDA), korisnicima se pružaju velike mogućnosti za dalju optimizaciju (čitaj smanjenje troškova) na površinskom kopu. Ovo je svakako izazov za svaki digitalizovani rudnik i dio je svakog projekta pametnog rudnika.

Sa druge strane, naša iskustva u realizaciji projekta za navedeni rudnik su vrlo pozitivna i već sada imamo primjere dobrih praksi za ostale potencijalne korisnike koji će krenuti ovim putem.

Reference

- [1]. Barnewold, Lars & Lottermoser, Bernd (2020). Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. International Journal of Mining Science and Technology. 30. 10.1016/j.ijmst.2020.07.003.
- [2]. Choi, Yosoon (2023). Recent Advances in Smart Mining Technology. Applied Sciences. 13. 3726. 10.3390/app13063726.
- [3]. Norman Dziengel, Top 8 Technology Trends for Smart Mining Operations in 2024, <https://www.inpixon.com/blog/technology-trends-for-smart-mining-operations>.
- [4]. Wang, Guofa & Xu, Yongxiang & Ren, Huaiwei (2019). Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects. International Journal of Mining Science and Technology. 29. 10.1016/j.ijmst.2018.06.005.

- [5]. Lisa Sandoval, Smart Mining: 5 Reasons To Digitalize Your Mine, 2024, <https://www.ceragon.com/blog/smart-mining-5-reasons-to-digitalize-your-mine>.
- [6]. Majstorović, V., Đurićin, D., Mitrović, R., *Industrija 4.0 – Renesansa inženjerstva*, Mašinski fakultet, Beograd, 2022.
- [7]. Yunming Wang, Qiusong Chen, Bibo Dai, Daolin Wang, Guidance and review: Advancing mining technology for enhanced production and supply of strategic minerals in China, *Green and Smart Mining Engineering*, Volume 1, Issue 1, 2024, Pages 2-11, ISSN 2950-5550, <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.03.005>.
- [8]. Geng Zhang, Chun-Hsien Chen, Xiangang Cao, Ray Y. Zhong, Xinyu Duan, Pengfei Li, Industrial Internet of Things-enabled monitoring and maintenance mechanism for fully mechanized mining equipment, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 54, 2022, 101782, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101782>.
- [9]. Niforos, Marina & Vasiliu-Feltes, Ingrid & Szegő, Daniel & Mason, Jim & Burzykowska, Anna & Vingerhoets, Koen & Damvakeraki, Tonia (2022). Blockchain for Supply Chain Transparency.
- [10]. Bnouachir, Hajar & Meriyem, Chergui & Machkour, Nadia & Zegrari, Mourad & Aziza, Chakir & Deshayes, Laurent & Semmar, Atae & Medromi, Hicham (2020). Intelligent Fleet Management System for Open Pit Mine. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 11. 10.14569/IJACSA.2020.0110543.
- [11]. Izhar Mithal Jiskani, Qingxiang Cai, Wei Zhou, Syed Ahsan Ali Shah, Green and climate-smart mining: A framework to analyze open-pit mines for cleaner mineral production, *Resources Policy*, Volume 71, 2021, 102007, 10.1016/j.resourpol.2021.102007.
- [12]. Bnouachir, Hajar & Meriyem, Chergui & Machkour, Nadia & Zegrari, Mourad & Aziza, Chakir & Deshayes, Laurent & Semmar, Atae & Medromi, Hicham (2020). Intelligent Fleet Management System for Open Pit Mine. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 11. 10.14569/IJACSA.2020.0110543.
- [13]. McKinsey & Company (2021), The Future of Mining: Digital and Sustainable, <https://www.mckinsey.com/au/our-insights/australia-and-new-zealand-perspectives/mining-the-future-mckinsey-at-imarc-2024>.
- [14]. Deloitte (2022), Tracking the Trends: Smart Mining and Digital Transformation, <https://www.deloitte.com/global/en/Industries/mining-metals/research/tracking-the-trends.html>.
- [15]. Porselvi, T., Sai Ganesh Cs, Janaki B, Priyadarshini K and Shajitha Begam S. *IoT Based Coal Mine Safety and Health Monitoring System using LoRaWAN*. 2021 3rd International Conference on Signal Processing and Communication (ICPSC) (2021): 49-53.
- [16]. Mutovina, N., Nurtay, M., Kalinin, A., Tomilov, A. & Tomilova, N. (2024). Application of Artificial Intelligence and Machine Learning in Expert Systems for the Mining Industry: Literature Review of Modern Methods and Technologies. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202408.1432.v1>.
- [17]. Smart Mines: The 6 Benefits of Making Your Mine Digital, <https://www.worldsensing.com/knowledge-center/smart-mines-benefits/>.
- [18]. ABB, The future of mining, 2025, <https://new.abb.com/mining/future-of-mining>.
- [19]. Manohara, K. M., Nayan Chandan, D. C., Pooja, S. V., Sonika, P., Ravikumar, K. I. (2022), IOT based Coal Mine Safety Monitoring And Alerting System, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ICEI – 2022 (Volume 10 – Issue 11)*, <https://www.ijert.org/research/iot-based-coal-mine-safety-monitoring-and-alerting-system-IJERTCONV10IS11144.pdf>.
- [20]. Thayumanavan, Porselvi & Cs, Sai Ganesh & B, Janaki & K, Priyadarshini & S, Shajitha. (2021). *IoT Based Coal Mine Safety and Health Monitoring System using LoRaWAN*. 49-53. 10.1109/ICSPC51351.2021.9451673.
- [21]. Mohammed Hasan Ali, Waleed Khalid Al-Azzawi, Mustafa Jaber, Sura Khalil Abd, Ahmed Alkhayyat, Zaid Ibrahim Rasool, Improving coal mine safety with internet of things (IoT) based Dynamic Sensor Information Control System, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 128, 2022, 103225, ISSN 1474-7065, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103225>.
- [22]. Thilagavathi, T. & Arockiam, Dr. (2023). Internet of Things Based Coal Mine Safety Monitoring System. *IJARCCCE*. 12. 10.17148/IJARCCCE.2023.12404.
- [23]. Mining Technology (2023), Top 10 Smart Mining Innovations in 2023, <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1800>.
- [24]. Caitlin C. Corrigan, Svetlana A. Ikonnikova, A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization, *The Extractive Industries and Society*, Volume 17, 2024, 101440, ISSN 2214-790X, <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>.

- [25]. Ghosh, Ritwick (2022). Applications, Promises and Challenges of Artificial Intelligence in Mining Industry: A Review. 10.36227/techrxiv.21493761.v1.
- [26]. Bui, X. N., Bui, H. B., Nguyen, H. (2021). A Review of Artificial Intelligence Applications in Mining and Geological Engineering. In: Bui, X. N., Lee, C., Drebenstedt, C. (eds) Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 109. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60839-2_7.
- [27]. Shetty, V., Shabari Shedthi, B. & Shashishekar, C. (2023). Application and Challenges of Machine Learning Techniques in Mining Engineering and Material Science. Journal of Mines, Metals and Fuels, 71(11), 1989–2000. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2023/36099>.
- [28]. Dimitrakopoulos, R. (2018), Advances in Applied Strategic Mine Planning, Springer Cham, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69320-0>.
- [29]. Kwame Awuah-Offei, Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations, Journal of Cleaner Production, Volume 117, 2016, Pages 89-97, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.035>.
- [30]. Mahmoudi Kouhi, R., Tariq Najeeb, A., Taherdangkoo, R. et al. A survey study on the adoption and perception of artificial intelligence in the mining industry. Discov Appl Sci 7, 713 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07342-1>.
- [31]. Pouya Nobahar, Chaoshui Xu, Peter Dowd, Roohollah Shirani Faradonbeh, Exploring digital twin systems in mining operations: A review, Green and Smart Mining Engineering, Volume 1, Issue 4, 2024, Pages 474-492, ISSN 2950-5550, <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.09.003>.
- [32]. Don, Mihiran & Wanasinghe, Thumeera & Gosine, Ray & Warrian, Peter. (2025). Digital Twins and Enabling Technology Applications in Mining: Research Trends, Opportunities, and Challenges. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2025.3526881.
- [33]. Alessandro Bertoni, Raj Jiten Machchhar, Tobias Larsson, Bobbie Frank, Digital Twins of Operational Scenarios in Mining for Design of Customized Product-Service Systems Solutions, Procedia CIRP, Volume 109, 2022, Pages 532-537, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.290>.
- [34]. Vidosav Majstorovic, Vladimir Simeunovic, Zarko Miskovic, Radivoje Mitrovic, Dragan Stosic, Sonja Dimitrijevic, Smart Manufacturing as a framework for Smart Mining, Procedia CIRP, Volume 104, 2021, Pages 188-193, 10.1016/j.procir.2021.11.032.
- [35]. Vidosav, Majstorovic & Simeunović, Vladimir & Mitrovic, Radivoje & Stosic, Dragan & Dimitrijevic, Sonja & Miskovic, Zarko. (2022). How to apply the ERP model for Smart Mining? MATEC Web of Conferences. 368. 10.1051/mateconf/202236801015.
- [36]. Majstorovic, V., Simeunovic, V., Mitrovic, R., Stosic, D., Dimitrijevic, S., Miskovic, Z. (2023). Development of Cloud ERP Model and Its Application in Smart Mining. In: Burduk, A., Batako, A., Machado, J., Wyczółkowski, R., Antosz, K., Gola, A. (eds) Advances in Production. ISPEM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 790. Springer, Cham. 10.1007/978-3-031-45021-1_3.
- [37]. Alessandro Rollo, Is smart mining an industry of the future? White paper, 2024, <https://www.vaneck.com/de/en/is-smart-mining-an-industry-of-the-future-whitepaper.pdf>.
- [38]. Nick Valetov, et al, Mining 4.0: The Future of Smart, Safe, and Sustainable Operations, <https://k-mine.com/articles/mining-4-0-the-future-of-smart-safe-and-sustainable-operations/>.

TOWARDS SMART MINES

Vladimir Simeunović¹, Dragan Stošić¹, Sonja Dimitrijević¹, Vidosav Majstorović²

¹Mihajlo Pupin Institute, Belgrade

²University of Belgrade - Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade

*E-mail address: vidosav.majstorovic@gmail.com

ABSTRACT

Smart Mining is the application of modern technologies and digital innovations in the mining industry to improve efficiency, safety and sustainability. This concept includes the use of the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), robotics, automation and Big Data Analysis. The key features of smart mining are: (a) automation and robotics - reducing the impact of the human factor, using autonomous equipment (self-driving trucks, drills), (b) IoT and sensors - monitoring the condition of equipment, working conditions and the environment in real time, (c) AI and machine learning - predicting equipment failures, optimizing processes and analyzing geological data, (d) sustainable resource management - reducing the impact on the environment through more accurate exploitation of minerals and reducing waste, (e) connected mining operations - integration of all mine segments into one digital system (Digital Twin). The benefits of a digital mine are: (a) increased productivity, through faster and more accurate exploitation of resources, (b) improved safety, because workers are less exposed to dangers, (c) cost reduction, through optimization of energy and resource consumption, and (d) sustainability with less pollution and greater energy efficiency. On the other hand, possible limitations are: high initial implementation costs, the need for a highly skilled workforce, and concerns about the cyber security of connected systems. Smart mining represents the future of the mining industry, enabling a sustainable and efficient way of exploiting mineral resources with minimal environmental consequences. This paper gives a practical example of a development project from Serbia.

Keywords: Industry 4.0, Smart Mining, Application

INTELIGENTNI TRANSPORTNI SISTEMI (ITS)

Suad Sućeska

Brčanska 7, 71000 Sarajevo,
Bosna i Hercegovina
E-mail: suad_s@bih.net.ba

SAŽETAK

Članak daje informacije o vrlo složenom obliku digitalizacije jedinstvenom za transportnu djelatnost: inteligentnim transportnim sistemima (ITS). Ovi sistemi koriste različite vrste mreža preko kojih komuniciraju razni hardveri, softveri i komunikacijski uređaji. Ciljevi upotrebe ITS-a su poboljšanje sigurnosti, informiranosti, udobnosti i ekonomičnosti transporta uz smanjenje broja nezgoda, zagušenosti i zagađenosti zraka uzrokovanih saobraćajem. Veliki ITS sistemi, tzv. ITS koridori, se prostiru kroz više država. ITS sistemi se trenutno koriste u razvijenim državama Evropske unije (EU) i svijeta, a ugrađeni su i na nekoliko dionica autoputeva u Bosni i Hercegovini.

Ključne riječi: transport, digitalizacija, ITS, sigurnost, EU

1. UVOD

Digitalizacija je prisutna u svim djelatnostima. Opšte prednosti koje ona donosi su: smanjenje troškova, skraćanje trajanja poslovnih procedura, stalna dostupnost usluge (24/7), jednostavnost upotrebe i prestanak upotrebe papirnih formulara. Za djelatnost transporta je karakteristična vrlo složena vrsta digitalizacije: inteligentni transportni sistemi (ITS).

2. INTELIGENTNI TRANSPORTNI SISTEMI - ITS

Izraz inteligentni transportni sistemi je službeno prihvaćen 1990-ih godina [1].

Inteligentni transportni sistemi se sastoje iz više servisa povezanih sa transportom i upravljanjem saobraćajem, koje mogu koristiti svi učesnici u saobraćaju. Ovi sistemi sadrže veoma raznovrstan hardver i softver, koji su povezani raznim vrstama komunikacijskih mreža.

Inteligentni transportni sistemi se trenutno koriste u razvijenim državama Evropske unije (EU) i svijeta. U EU se formiraju i ITS koridori, koji se prostiru kroz više država. Namjena ITS-a je da se korištenjem novih IK tehnologija poboljša sigurnost, informiranost, udobnost i ekonomičnost transporta, a smanji broj saobraćajnih nezgoda, zagušenost saobraćaja i zagađenost zraka koju on uzrokuje [2].

Ovim sistemima je opremljeno i nekoliko dionica autoputeva u Bosni i Hercegovini, a u Sarajevu se trenutno radi na uvođenju adaptivnog upravljanja saobraćajem.

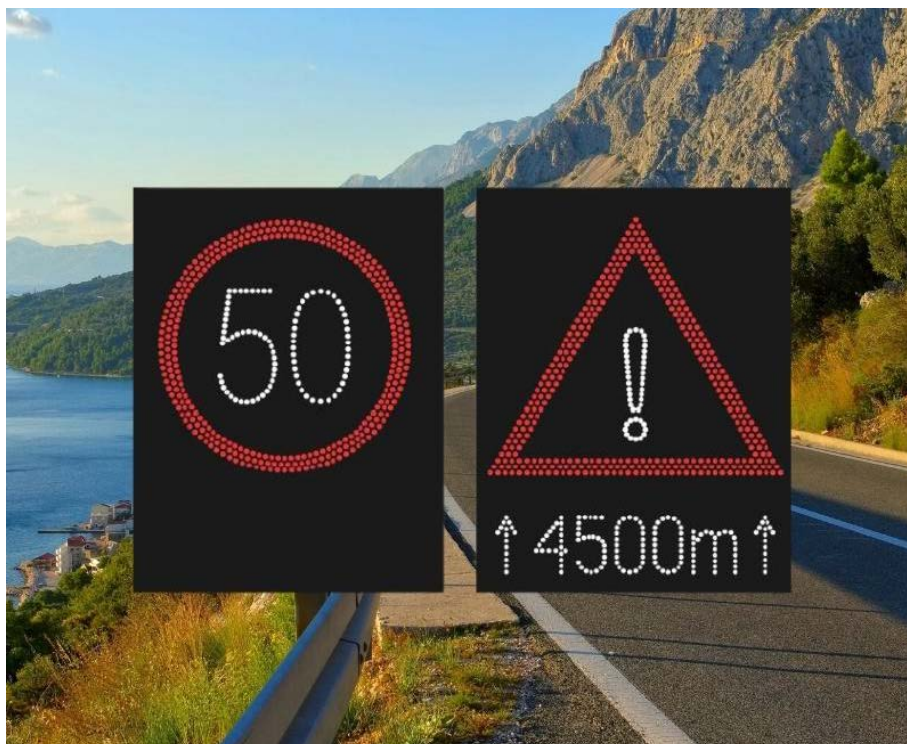
2.1. IKT komponente ITS-a

Inteligentni transportni sistemi su veoma složene IKT strukture. Sastoje se iz više komunikacijskih mreža koje služe za povezivanje, nadzor i upravljanje različitim elementima saobraćajne infrastrukture. Mogu se klasificirati u dvije grupe: žičane i bežične mreže.

Žičane mreže uključuju optičke kablove i Ethernet mreže koje se koriste za pouzdan i brz prijenos podataka između saobraćajnih kontrolnih centara, semafora, nadzornih kamera i senzora. Optički kablovi se koriste za prijenos velikih količina podataka (podaci videonadzora).

Bežične mreže uključuju mobilne mreže (4G, 5G), Wi-Fi i druge bežične tehnologije za povezivanje uređaja na terenu s centralnim sistemima, gdje nije moguće ili ekonomično koristiti žičane veze.

Pomoću navedenih mreža povezani su razni senzori i uređaji: mini meteorološke stanice, brojači prometa, električne rampe, uređaji za mjerenje visine vozila, semafori, promjenjivi svjetlosni znakovi (VMS), LED displeji, razne vrste nadzornih kamera i drugo.



Slika 1: Promjenjivi svjetlosni znakovi

Na frekventnijim putevima koristi se brojač prometa koji bilježi tačan broj vozila koji njima prođe.



Slika 2: Brojač prometa [3]

Meteorološke stanice sadrže senzore za dobivanje podataka o stanju zraka (temperatura, vlažnost, CO₂, brzina vjetera...). Osim zraka, mjeri se i stanje na kolovozu pomoću senzora ugrađenih u kolovozne trake.



Slika 3: Cestovne meteorološke stanice

Senzori za kontrolu visine su veoma korisni za prolazak vozila kroz dijelove puta sa ograničenjem visine (tunele, nadvožnjake). U slučaju da ukupna visina vozila, uključujući i teret, prelazi dozvoljenu visinu, to vozilo se obavještava i ne dozvoljava mu se prolaz kroz tu dionicu puta. Detektori visine vozila baziraju na IR beskontaktnoj tehnologiji, a postavljaju se na portale prije dionice sa ograničenjem visine [3].

ITS koristi razne vrste kamera. Osim kamera koje služe za nadzor neke lokacije na putu, tu su i kamere sa odgovarajućim pratećim sistemima koji mogu odrediti brzinu, snimiti brojeve registarskih tablica, pa čak i uočiti da li se koristi zaštitni pojas ili se pri vožnji upotrebljava mobitel [4]. Uobičajeni sistemi koji se koriste za videonadzor obavezno uključuju sistem za automatsku detekciju incidenata (AID). Ovaj sistem u stvarnom vremenu otkriva saobraćajne incidente i prekršaje [5].



Slika 4: Centar za upravljanje i kontrolu saobraćaja

Podaci dobiveni putem kamera, senzora i drugih uređaja su dostupni centru za upravljanje i kontrolu saobraćaja (Slika 4). Iz ovih centara je moguće kontrolirati i upravljati tokom saobraćaja. Ovim se poboljšavaju efikasnost i sigurnost saobraćaja, a smanjuju se potrošnja goriva, zagušenja, vrijeme i troškovi transporta.

2.2. ITS koridori

Dio razvoja inteligentnih transportnih sistema EU su ITS koridori. Oni se prostiru kroz više zemalja članica EU. Njihovo funkcioniranje zahtijeva interoperabilnost instaliranih ITS-ova, koja se postiže korištenjem jedinstvenih tehnologija i standarda [6]. Prednosti ITS koridora su: povećanje sigurnosti na putevima, smanjenje broja nesreća, smanjenje broja i dužine trajanja zastoja, poboljšanje protoka saobraćaja i optimizacija ruta, smanjenje potrošnje goriva i emisija CO₂. Navedene prednosti se postižu stvaranjem jedinstvenog digitalnog saobraćajnog prostora koji omogućuje:

- razmjenu podataka o saobraćaju u realnom vremenu (gužve, nesreće, radovi na cesti),
- primjenu kooperativnih sistema (C-ITS) koji omogućavaju komuniciranje između vozila (V2V) i između vozila i saobraćajne infrastrukture (V2I) – semafori, pametni znakovi,
- integriranje različitih ITS usluga: pametno parkiranje, sistemi za elektronsku naplatu putarine (e-tolling) i inteligentni sistem za upravljanje brzinom.

U EU su izgrađeni sljedeći ITS koridori: MedTIS, Ursa Major, Crocodile, Arc Atlantique, Next-ITS 3 [7, 9].

Rezultati ispitivanja na ITS koridoru Ursa Major (UM) u periodu od jedne godine su pokazali da je upotreba ITS-a smanjila broj saobraćajnih nesreća za 34%, a emisije CO₂ za 22% [8].

2.3. National Access Point – NAP

Evropska unija je direktivom o ITS-u od juna 2023. obavezala države članice na uspostavljanje nacionalne pristupne tačke (National Access Point – NAP). NAP je dio ITS-a koji služi za sakupljanje podataka i pružanje raznih saobraćajnih informacija. Neki od korisnih podataka koji se mogu dobiti pomoću ITS-a su: vremenski uslovi, gustina saobraćaja, online video, obavještenja o udesima i zastojsima na putu, obavještenja o izmjeni rute u slučaju zastoja i slično. Ove informacije su bitne transportnim firmama, vozačima kamiona i autobusa, kao i ostalim učesnicima u saobraćaju. NAP takođe poboljšava efikasnost i sigurnost saobraćaja, a reducira potrošnju goriva, zagušenja, vrijeme trajanja i troškove transporta.

2.4. eCall

Jedan od servisa inteligentnih transportnih sistema Evropske unije je eCall. Prednosti njegove upotrebe su:

1. brži dolazak hitnih službi: vrijeme dolaska hitnih službi se u urbanim sredinama smanjuje za 40%, a u ruralnim za do 50%,
2. tačna lokacija nesreće: sistem eCall zajedno s pozivom automatski šalje precizne podatke o lokaciji vozila, uključujući GPS koordinate, smjer kretanja, vrijeme nesreće, pa čak i identifikacijski broj vozila (VIN). Ovo omogućava hitnim službama da brzo stignu na tačno mjesto nesreće, čak i na mjestima gdje je teško opisati lokaciju,
3. spašavanje života i smanjenje broja i težine ozljeda: skraćanje vremena odziva i precizno lociranje nesreće direktno utiču na smanjenje broja smrtnih slučajeva i težine ozljeda,
4. automatsko slanje poziva za pomoć: sistem eCall djeluje automatski i šalje poziv za pomoć i u situacijama kada su putnici onesviješteni, ozlijeđeni ili zarobljeni u vozilu i ne mogu sami pozvati pomoć. On se, takođe, može aktivirati i ručno, pritiskom na dugme, kada se poziva iz vozila koje nije učesnik u udesu, a nalazi se u blizini saobraćajnog udesa,
5. smanjenje zastoja i sekundarnih nesreća: brz dolazak hitnih službi na mjesto nesreće omogućava brže uklanjanje vozila i normalizaciju saobraćaja. To smanjuje zastoje i rizik od nastanka sekundarnih nesreća koje se često događaju zbog naglog usporavanja saobraćaja ili neosiguranih mjesta nesreće.

Sistem eCall je obavezan za sve nove automobile u EU od 1. aprila 2018. godine, a u Bosni i Hercegovini se trenutno ne koristi.

2.5. Nove usluge ITS-a

ITS se nastavlja razvijati. Uvode se i nove usluge. Jedna od novih usluga je C-ITS (Cooperative-ITS). C-ITS omogućava automatsku razmjenu podataka između vozila (V2V), vozila sa saobraćajnom infrastrukturom (V2I) i između drugih učesnika u saobraćaju pomoću bežičnih komunikacijskih tehnologija [10, 11]. Ovaj ITS servis treba da riješi neke od problema u saobraćaju kao što su zagušenja, potrošnja energije, emisije CO₂ i drugih štetnih gasova. On, takođe, poboljšava i sigurnost u saobraćaju. C-ITS, dakle, uključuje vozila i druge učesnike u saobraćaju u ITS tako da mogu direktno komunicirati i međusobno i sa objektima saobraćajne infrastrukture. Ovo će donijeti nove pogodnosti koje se odražavaju na dijeljenje informacija i njihovo korištenje za koordinaciju djelovanja. Rezultat ove kooperativnosti vozila i saobraćajne infrastrukture treba poboljšati sigurnost na putevima, efikasnost saobraćaja i udobnost vožnje. Kooperativnost ostvarena u C-ITS je pokrenula kreiranje nove vrste mobilnosti: CCAM (kooperativna, povezana i automatizirana mobilnost) [12].



Slika 5: C-ITS

3. ZAKLJUČAK

Inteligentni transportni sistemi su posebna vrsta digitalizacije, karakteristična samo za transportnu djelatnost. Oni sadrže mnogo raznovrsnih hardvera, softvera i komunikacija. Sastoje se iz više servisa, koje mogu koristiti svi učesnici u saobraćaju. ITS treba poboljšati sigurnost, informiranost, udobnost i ekonomičnost transporta, a smanjiti broj nezgoda, zagušenja i zagađivanje zraka uzrokovanih saobraćajem. Trenutno se koriste u razvijenim državama Evropske unije i svijeta, a ugrađeni su i u nekoliko dionica autoputeva u Bosni i Hercegovini.

LITERATURA:

- [1] Ertico. (april 2025.). *ITS Memorandum* [brošura]. <https://ertico.com/sites/default/files/2025-06/ERTICO-ITS-Memorandum-2025.pdf>
- [2] EUEIP – European ITS Platform. (2021). <https://www.its-platform.eu/>
- [3] BS Telecom Solutions. (august 2025.). <https://bstelecom.ba/>
- [4] Autonet. (4. 1. 2024.). Nove bi kamere trebale imati sposobnost „zaviriti“ i u putničku kabinu. <https://www.autonet.hr teme/oprez-na-poznatij-i-prometnoj-cesti-postavljene-dvije-nove-kamere/>
- [5] UNECE. (februar 2012.). *Intelligent Transport Systems for Sustainable Mobility* [brošura]. https://digitallibrary.un.org/record/753049/files/Intelligent_Transport_Systems_for_Sustainable_Mobility.pdf
- [6] Napcore. (7. 6. 2023.). *DATEX II*. <https://www.datex2.eu/>
- [7] EU EIP. (august 2025.). *Corridor Projects*. <https://www.its-platform.eu/corridor-projects/>
- [8] CEDR. (mart 2022.). *Intelligent Transport Systems for Safe, Green and Efficient Traffic on the European Road Network* [brošura]. <https://www.its-platform.eu/wp-content/uploads/ITS-Platform/EUEIPBook/EUEIPbook.pdf>
- [9] EU EIP. (11. 5. 2023.). *Achievements of the URSA MAJOR Corridor*. <https://www.its-platform.eu/its-corridors/ursa-major/>
- [10] C-ITS Deployment Group. (7. 6. 2023.). *C-ITS Deployment Group welcomes the update of the ITS Directive 2022*. <https://c-its-deployment-group.eu/mission/statements/2021-12-20-its-directive-2022>
- [11] Rijkswaterstaat Ministerstvo infrastrukture i upravljanje vodama Nizozemske. (august 2025.). *Cooperative ITS Corridor*. <https://intercor-project.eu/wp-content/uploads/sites/15/2017/03/Factsheet-C-ITS-Corridor-English-November-2016.pdf>
- [12] European Commission. (august 2025.). *Cooperative, connected and automated mobility (CCAM)*. https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/smart-mobility/cooperative-connected-and-automated-mobility-ccam_en

Intelligent Transport Systems (ITS)

Suad Sućeska

Brčanska 7, 71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: suad_s@bih.net.ba

ABSTRACT

The article provides information on a very complex form of digitalization unique to the transport industry: Intelligent Transport Systems (ITS). These systems use various types of networks through which communicate various hardware, software and communication devices. Large ITS systems, so-called ITS corridors, extend across several countries. The goals of using ITS are to improve safety, information, comfort and economy of transport; while reducing the number of accidents, congestion and air pollution caused by traffic. ITS systems are currently used in developed countries of the European Union (EU) and the world and have been installed on several sections of highways in Bosnia and Herzegovina.

KEY WORDS: transport, digitalization, ITS, safety, EU