

INDUSTRIJA 4.0 KAO POKRETAČ INOVACIJA U AUTOMOBILSKOJ PROIZVODNJI: ISKUSTVA KINE, INDIJE I SJEDINJENIH AMERIČKIH DRŽAVA

INDUSTRY 4.0 AS A CATALYST FOR INNOVATION IN AUTOMOTIVE MANUFACTURING: COMPARATIVE EXPERIENCES FROM CHINA, INDIA, AND THE UNITED STATES

ISAK KARABEGOVIĆ¹

Pregledni rad
DOI: 10.5937/VI25009K

Rezime: Razvoj Industrije 4.0 temeljno mijenja globalnu automobilsku industriju, čineći digitalizaciju, automatizaciju i robotiku ključnim pokretačima inovacija i konkurentnosti. Ovaj rad analizira uticaj i stepen implementacije tehnologija Industrije 4.0 u tri vodeće zemlje s različitim razvojnim profilima – Kini, Indiji i Sjedinjenim Američkim Državama. Kroz komparativni pristup, istražuje se veza između godišnje proizvodnje vozila, intenziteta primjene industrijskih robota i širine integracije pametnih proizvodnih rješenja. Poseban naglasak stavljen je na ulogu robotike, uključujući industrijske i kolaborativne robote, kao ključne tehnologije koje određuju efikasnost, fleksibilnost i inovativnost proizvodnih procesa. Analiza obuhvata i osnovne komponente Industrije 4.0 – kiber-fizičke sisteme, Internet stvari (IoT), digitalne tvornice, umjetnu inteligenciju (AI) i digitalne blizance – koje zajedno omogućavaju sinergiju između čovjeka, mašina i podataka. U radu se prikazuju trendovi u robotizaciji i digitalnoj integraciji proizvodnih pogona, uz poređenje nacionalnih politika i investicionih prioriteta. Rezultati istraživanja pokazuju da Kina prednjači u apsolutnoj proizvodnji i instalacijama robota, Sjedinjene Američke Države ulažu u razvoj visokoautomatizovanih i inteligentno povezanih proizvodnih sistema, dok Indija ubrzano gradi kapacitete kroz selektivnu i prilagođenu implementaciju tehnologija Industrije 4.0. Zaključuje se da različiti pristupi digitalnoj transformaciji oblikuju specifične modele konkurentnosti, tehnološke samostalnosti i održivog razvoja u automobilske industriji.

Ključne riječi: Industrija 4.0, automobilska industrija, robotika, automatizacija, pametna proizvodnja, Kina, Indija, Sjedinjene Američke Države

Abstract: The rapid evolution of Industry 4.0 is fundamentally reshaping the global automotive sector, positioning digitalization, automation, and robotics as core drivers of innova-

¹ Isak Karabegović, Akademija nauka i umetnosti Bosne i Hercegovine, Bistrik 7, Sarajevo, Bosna i Hercegovina, isak1910@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-9440-4441

tion and competitiveness. This paper examines the implementation and impact of Industry 4.0 technologies in three leading vehicle-producing countries with distinct industrial trajectories – China, India, and the United States. Through a comparative approach, the study explores the relationship between annual vehicle production, the intensity of industrial robot adoption, and the integration of smart manufacturing solutions. Special attention is given to robotics—both industrial and collaborative—as a key enabler of efficiency, flexibility, and innovation in production systems. The analysis also highlights the fundamental components of Industry 4.0, including cyber-physical systems, the Internet of Things (IoT), digital factories, artificial intelligence (AI), and digital twins, which collectively enable the synergy between humans, machines, and data. The paper presents recent trends in robotization and digital integration within automotive manufacturing, accompanied by an overview of national policies and investment priorities. Findings reveal that China leads in absolute vehicle output and robot installations, the United States focuses on highly automated and digitally connected production systems, while India is rapidly developing its capacities through selective and adaptive implementation of Industry 4.0 technologies. The study concludes that differing approaches to digital transformation are shaping unique models of competitiveness, technological sovereignty, and sustainable development in the automotive industry.

Key Words: Industry 4.0, automotive industry, robotics, automation, smart manufacturing, China, India, United States

1. Uvod

Industrija 4.0 predstavlja najznačajniju transformaciju proizvodnih sistema u savremenoj historiji industrijalizacije. Ovaj koncept, utemeljen na integraciji digitalnih, fizičkih i bioloških sistema, redefinira načine na koje se proizvodi dizajniraju, izrađuju i plasiraju na tržište. U kontekstu automobilske industrije, Industrija 4.0 donosi duboke promjene kroz primjenu kiber-fizičkih sistema (CPS), Interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije (AI), digitalnih blizanaca i robotike, čime se povećava produktivnost, efikasnost i prilagodljivost proizvodnih procesa [1-3]. Digitalizacija i automatizacija omogućavaju prelazak s tradicionalne masovne proizvodnje na pametne, umrežene i visoko prilagodljive proizvodne lance. Ovi trendovi nisu samo tehnološke inovacije, već i strateški instrumenti nacionalne konkurentnosti, posebno u sektorima sa visokom dodanom vrijednošću kao što je automobilska industrija [4-6]. Globalna automobilska industrija suočava se s trostrukim izazovom – digitalnom transformacijom proizvodnje, tranzicijom ka održivoj mobilnosti i promjenom globalnih lanaca vrijednosti. U tom kontekstu, primjena principa Industrije 4.0 postaje odlučujući faktor koji razlikuje vodeće proizvođače od onih u fazi prilagođavanja. Industrijska robotika, kao centralna tehnologija ove revolucije, omogućava visok stepen automatizacije, preciznosti i fleksibilnosti, što je posebno važno u procesima montaže, zavarivanja, lakiranja i kontrole kvaliteta [7, 8]. Prema podacima International Federation of Robotics (IFR),

automobilska industrija kontinuirano bilježi najveću gustinu robotizacije na globalnom nivou, čime postaje prirodno okruženje za proučavanje učinaka Industrije 4.0. Odabir Kine, Indije i Sjedinjenih Američkih Država kao slučajeva za analizu temelji se na njihovom komplementarnom položaju u globalnoj industrijskoj hijerarhiji. Kina predstavlja svjetskog lidera u apsolutnom obimu proizvodnje vozila i instalacijama industrijskih robota, uz snažnu državnu podršku inicijativama tehnološke automatizacije [9,10]. Sjedinjene Američke Države ističu se tehnološkim inovacijama, razvojem pametnih fabrika i integracijom IoT i AI tehnologija u visokoautomatizovanim proizvodnim sistemima [2]. Nasuprot tome, Indija zauzima poziciju brzorastućeg tržišta u fazi ubrzane digitalne transformacije, gdje selektivna implementacija tehnologija Industrije 4.0 ima za cilj povećanje produktivnosti i modernizaciju tradicionalnih proizvodnih kapaciteta. Glavna istraživačka pitanja koja se postavljaju u ovom radu jesu: (1) Kako se tehnologije Industrije 4.0 implementiraju u automobilskim industrijama Kine, Indije i Sjedinjenih Američkih Država?; (2) Koje su razlike u intenzitetu primjene industrijskih robota i pametnih tehnologija između ovih zemalja?; (3) U kojoj mjeri nacionalne strategije digitalne transformacije doprinose konkurentnosti i održivosti automobilskeg sektora? Cilj rada je da pruži komparativnu analizu stepena integracije tehnologija Industrije 4.0 i da identifikuje obrasce koji određuju uspjeh ili ograničenja u njihovoj implementaciji. Fokus je stavljen na robotiku kao centralnu komponentu, ali se analizira i širi kontekst digitalne infrastrukture, obrazovne osnove i investicijskih politika koje podržavaju tehnološku transformaciju.

Metodološki okvir rada zasniva se na kombinaciji deskriptivne, komparativne i longitudinalne analize. Korišćeni su statistički podaci iz relevantnih međunarodnih izvora, uključujući International Federation of Robotics (IFR), Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA), te nacionalne baze podataka i industrijske izvještaje. Također, koristi se literaturna analiza načelnih studija (peer-review), sa posebnim osloncem na radove koji istražuju robotiku, AI i primjenu pametne proizvodnje u automobilskeg pogonima [11-13]. Analiza obuhvata kvantitativne pokazatelje proizvodnje vozila i gustine robotizacije (broj robota na 10.000 zaposlenih), kao i kvalitativne pokazatelje koji se odnose na politike inovacija i digitalizacije. Struktura rada organizovana je u nekoliko tematskih cjelina.

Nakon ovog uvodnog dijela, drugo poglavlje pruža teorijski okvir i pregled ključnih tehnologija Industrije 4.0, s posebnim naglaskom na robotiku kao jezgro pametne proizvodnje. Treće poglavlje objašnjava metodologiju istraživanja i izvore podataka. U naredna tri poglavlja analiziraju se pojedinačne studije slučaja: Kina, Sjedinjene Američke Države i Indija. Sedmo poglavlje donosi komparativnu diskusiju i poređenje ključnih pokazatelja. Na kraju, zaključak sintetizuje glavne nalaze i ukazuje na buduće pravce istraživanja u kontekstu digitalne transformacije globalne automobilske industrije.

2. Teorijski okvir i konceptualne osnove Industrije 4.0

Industrija 4.0 (4IR – Fourth Industrial Revolution) predstavlja novu eru u evoluciji proizvodnih sistema, u kojoj se granice između fizičkog i digitalnog svijeta sve više brišu. Temelji se na integraciji kiber-fizičkih sistema (Cyber-Physical Systems, CPS), robotska tehnologija, interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije (AI), velike količine podataka (Big Data), simulacije i digitalnih blizanaca, automatizacije i robotike.

Ove tehnologije omogućavaju proizvodnim pogonima da postanu pametni, fleksibilni, samoregulatorni, realno-vremenski reagirajući i efikasni u potrošnji resursa, te da bolje odgovore na zahtjeve tržišta i održivosti.

2.1. Definicija i evolucija Industrije 4.0

Industrija 4.0 definira se kao koncept koji objedinjuje moderne digitalne tehnologije i proizvodne procese radi automatizacije, povezanosti, vizualizacije i automnog upravljanja. CPS i IoT omogućavaju razmjenu podataka između mašina, korisničkih uređaja i infrastrukture; AI i mašinsko učenje pružaju sposobnost analiziranja tih podataka i donošenja odluka; digitalni blizanci doprinose simulaciji i predikciji ponašanja sistema u realnom vremenu. Evolucija počinje od prvih industrijskih revolucija (parna mašina, električna energija, automatizacija i informatizacija), do sadašnje faze u kojoj je ključna povezanost, interoperabilnost i adaptivnost [14].

2.2. Ključne tehnologije Industrije 4.0

- Kiber-fizički sistemi (CPS): integracija fizičkih uređaja i softverskih sistema kako bi se omogućilo praćenje i kontrola proizvodnih procesa u realnom vremenu.
- Robotska tehnologija: uključuje primjenu industrijskih, kolaborativnih i mobilnih robota za automatizaciju proizvodnih i logističkih procesa. Roboti u Industriji 4.0 karakterizirani su visokom preciznošću, adaptivnošću i mogućnošću interakcije s ljudima i drugim mašinama putem naprednih senzora i AI algoritama. Njihova integracija doprinosi povećanju produktivnosti, smanjenju grešaka i poboljšanju sigurnosti na radnom mjestu.
- Internet stvari (IoT): senzori, uređaji, strojevi – međusobno povezani, prikupljaju podatke i šalju u analitiku; omogućava praćenje, upravljanje resursima, održavanje i automatizaciju.

Umjetna inteligencija (AI) i mašinsko učenje: analitika podataka, prediktivna održavanja, optimizacija procesa i odlučivanje; AI je omogućio autonomne sustave i poboljšanje fleksibilnosti proizvodnje.

- Digitalni blizanci i simulacija: kreiranje virtualnih modela proizvodnih sistema ili pojedinačnih strojeva; omogućavaju testiranje i optimizaciju bez prekida realnog procesa.
- Big Data i analitika u realnom vremenu: obrada velikog obima podataka dolazi od senzora, IoT, proizvodnih procesa; upotreba analitike za unapređenje kvaliteta, otkrivanje kvarova, smanjenje otpada i efikasnije korištenje energenata.

Literatura ukazuje da je svaka od ovih tehnologija zasebno predmet istraživanja i implementacije, a da je uspješna integracija svih njih u celovit sistem ključna za pun potencijal Industrije 4.0 [15, 16].

2.3. Uloga robotike i automatizacije u transformaciji proizvodnje

Robotika čini srž automatizacije u Industriji 4.0 — industrijski roboti, kolaborativni roboti, autonomni robotski sistemi i automatizovani radni tokovi. Primjena robotike omogućava visok stepen preciznosti, konzistentnosti, smanjenje grešaka, bržu proizvodnju i minimalizaciju ljudskog faktora u opasnim ili ponavljajućim zadacima. Robotika uz IoT i AI postiže prediktivno održavanje i adaptivne proizvodne linije. Također, robotika se koristi kao instrument za povećanje efikasnosti energije, smanjenje otpada i poboljšanje kvaliteta – čime se robotika direktno povezuje ne samo s produktivnošću nego i s ciljevima održivosti. Jedan pregled dokumentuje napredak u sistemima robotike u kontekstu pametne proizvodnje, te izazove kao što su interoperabilnost, sigurnost, održavanje i kvalifikacije radne snage za rad u robotski automatizovanim sistemima [17].

2.4. Povezanost Industrije 4.0 i održivog razvoja u automobilske industriji

Industrija 4.0 nije samo tehnološka paradigma; ona ima snažne veze s održivim razvojem - ekološkim, ekonomskim i socijalnim dimenzijama. U automobilske industriji, implementacija tehnologija kao što su IoT, AI, robotika i digitalni blizanci doprinosi smanjenju potrošnje energije, optimizaciji materijala, smanjenju otpada i emisija, te boljem upravljanju resursima kroz održavanje u realnom vremenu. Također ima uticaj na ekonomske dimenzije kroz povećanje produktivnosti i konkurentnosti, te socijalne kroz stvaranje novih radnih mjesta u naprednim tehnologijama, dok istovremeno prelazi rizike automatizacije radnih zadataka. Pregled radova [17-19] pokazuje da je, iako literatura sve obuhvatnija, odnos između Industrije 4.0 tehnologija i održivih praksi još uvijek djelomično fragmentiran, sa značajnim prostorom za istraživanje u automobilske industriji.

3. Metodologija i izvori podataka

3.1. Komparativni pristup i izbor indikatora

Za analizu industrijske robotizacije u automobilske industriji primijenjen je komparativni pristup koji omogućava usporedbu različitih zemalja i regija na temelju

ključnih indikatora. Ovaj pristup omogućava identifikaciju obrazaca, trendova i varijacija u robotizaciji proizvodnje vozila.

Odabrani indikatori uključuju godišnju proizvodnju vozila, broj instaliranih industrijskih robota, gustinu robotizacije (broj robota na 10.000 zaposlenih) te integraciju pametnih tehnologija i politika digitalizacije. Ovi pokazatelji omogućuju sveobuhvatan uvid u razinu automatizacije i digitalizacije u automobilskoj industriji.

3.2. Izvori podataka

Podaci za analizu prikupljeni su iz renomiranih izvora:

- Međunarodna federacija robotike (IFR): Pruža globalne statistike o industrijskim robotima, uključujući broj instalacija, gustoću robotizacije i tržišne analize [20].
- Međunarodna organizacija proizvođača motornih vozila (OICA): Nudi podatke o godišnjoj proizvodnji vozila po zemljama i regijama [21].
- Nacionalne baze podataka: Pružaju specifične informacije o industrijskoj robotizaciji i proizvodnji vozila na nacionalnoj razini.
- Akademska literatura: Služi kao sekundarni izvor za razumijevanje teorijskih okvira i prethodnih istraživanja u području robotizacije i digitalizacije automobilske industrije.

3.3. Kriteriji za procjenu

- Godišnja proizvodnja vozila

Ovaj indikator mjeri ukupnu proizvodnju vozila u određenoj godini, pružajući uvid u veličinu i kapacitet automobilske industrije u različitim zemljama. Podaci se prikupljaju od OICA-e i nacionalnih statističkih ureda [21]. U kontekstu globalne proizvodnje vozila, u analiziranim zemljama: Kina, Sjedinjene Američke Države, i Indija, prikazana je u tabeli 1. Tabela 1 prikazuje godišnju proizvodnju vozila u ovim državama za 2023. godinu i ukupnu svjetsku proizvodnju.

Tabela 1. Proizvodnja motornih vozila u Kini, USA, Indiji i Svijetu u (2024)

Zemlja	Proizvedena vozila (2024)
Kina	31.281.592
Sjedinjene Američke Države	10.562.198
Indija	6.014.692
Ukupno u svijetu	93.546.599

Izvor: OICA (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers), 2024

- Broj instaliranih industrijskih robota

Ovaj kriterij ocjenjuje broj industrijskih robota instaliranih u proizvodnim pogonima. Podaci se temelje na izvještajima IFR-a, koji pružaju detaljne statistike o instalacijama robota po zemljama i industrijama. U tabeli 2 prikazana je imple-

mentacija industrijskih robota u zemljama: Kina, Sjedinjene Američke Države, i Indija, kao i ukupna implementacija u svijetu [22].

Tabela 2. Implementacija industrijskih robota u Kini, USA, Indiji i svijetu u (2024)

Zemlja	Implementacija industrijskih robota (2024)
Kina	295.000
Sjedinjene Američke Države	34.000
Indija	9.100
Ukupno u svijtu	541.000

- Gustina robota na 10.000 zaposlenih u industriji

Gustina robotizacije mjeri broj robota na 10.000 zaposlenih u industriji, što omogućava usporedbu razine automatizacije među različitim zemljama.

U tabeli 3 prikazana je implementacija industrijskih robota na 10.000 zaposlenih radnika u industriji u zemljama: Kina, Sjedinjene Američke Države, i Indija, kao implementacija u svijetu. Ovi podaci također dolaze iz [23, 24].

Tabela 3. Gustina industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u industriji u Kini, USA, Indiji i svijetu u (2023)

Zemlja	Implementacija industrijskih robota na 10.000 zaposlenih radnika u industriji (2023)
Kina	470
Sjedinjene Američke Države	295
Indija	10
Ukupno prosjek u svijtu	162

- Integracija pametnih tehnologija i politika digitalizacije

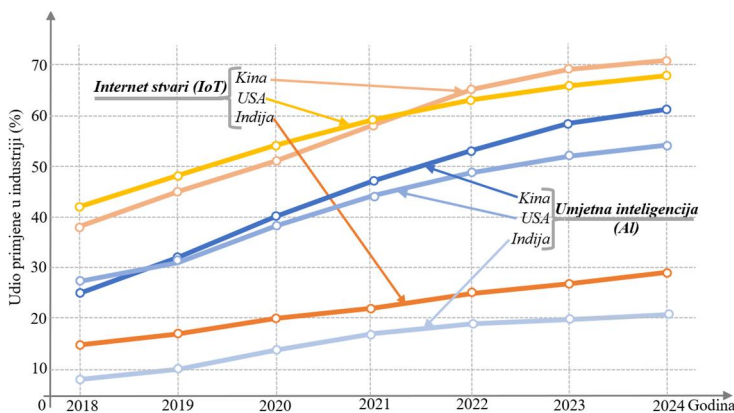
Ovaj indikator procjenjuje stupanj integracije pametnih tehnologija, poput Interneta stvari (IoT), umjetničke inteligencije (AI) i digitalnih platformi u proizvodne procese. Integracija pametnih tehnologija predstavlja jedan od najvažnijih pokazatelja stepena digitalne transformacije savremene industrije.

Ona obuhvata primjenu Interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije (AI), u proizvodnim procesima. Ovi elementi zajedno čine osnovu pametne industrije i omogućavaju optimizaciju proizvodnje, smanjenje troškova, prediktivno održavanje i povećanje fleksibilnosti sistema.

Tabela 4. Indikatori procjene stupnja integracije pametnih tehnologija (2024)

Indikator	SAD	Kina	Indija	Izvor / Napomena
Udio pametnih fabrika u ukupnoj industriji (%)	38%	42%	17%	PwC (2023); OECD (2024)
Primjena IoT sistema u proizvodnim linijama (%)	68%	71%	29%	McKinsey (2023); IFR (2024)
Primjena AI i prediktivne analitike u proizvodnji (%)	54%	61%	21%	WEF (2024); Statista (2024)
Investicije u digitalnu infrastrukturu (mlrd. USD)	125	210	27	IMF Digital Economy Report (2024)
Broj pametnih industrijskih zona / klastera	48	62	22	UNIDO (2024)
Ulaganja u R&D (% BDP-a)	3.5%	2.6%	0.9%	OECD (2024)
Broj industrijskih IoT uređaja (mil.)	1,150	1,460	310	Statista (2024)
Razina digitalne zrelosti industrije (skala 1–5)	4.6	4.4	3.1	Deloitte Industry 4.0 Index (2024)

Procjena integracije pametnih tehnologija u industriju provodi se kombinacijom kvantitativnih i kvalitativnih metoda, koristeći podatke iz međunarodnih baza [25-28] i [29-32], te iz nacionalnih strategija digitalizacije. Poseban naglasak stavlja se na razvoj politika koje povezuju javni i privatni sektor, potiču ulaganja u istraživanje i razvoj (R&D), te razvijaju digitalne kompetencije radne snage. U tabeli 4 su prikazani indikatori procjene stupnja integracije pametnih tehnologija (2024).



Slika 1. Trend rasta integracije IoT i AI tehnologija u industriji (2018-2024)

Poređenje prikazano u tabeli 4 i na slici 1 pokazuje da Kina i Sjedinjene Američke Države prednjače u globalnoj integraciji pametnih tehnologija, iako se njihovi modeli značajno razlikuju [25-28] i [29-32]. SAD se oslanja na tržišno vođene inovacije i snažan privatni sektor, dok Kina primjenjuje državno planiranje i

nacionalne razvojne programe. Indija je u fazi konsolidacije digitalne infrastrukture, ali pokazuje visoku stopu rasta i izražen potencijal za ubrzani napredak.

Podaci i trendovi ukazuju da Kina i SAD dominiraju u implementaciji pametnih tehnologija, ali kroz različite pristupe:

- Sjedinjene Američke Države ulažu u decentralizovane inovacijske ekosisteme, pri čemu privatni sektor ima ključnu ulogu u procesu digitalne transformacije.
- Kina primjenjuje strateški državni pristup, masovno implementira 5G tehnologiju, razvija domaće AI čipove i predvodi u globalnoj implementaciji Interneta stvari (IoT).
- Indija ostvaruje napredak kroz inicijative usmjerene na digitalizaciju sektora malih i srednjih preduzeća, oslanjajući se na međunarodna partnerstva i snažnu IT outsourcing bazu.

Kumulativni podaci ukazuju na prelazak iz faze digitalne implementacije u fazu inteligentne industrijske optimizacije, u kojoj AI i IoT više ne predstavljaju podršku, već postaju integralni dio poslovne logike. Sve tri zemlje jasno pokazuju da digitalne politike i ulaganja u istraživanje i razvoj (R&D) imaju presudnu ulogu u jačanju konkurentnosti i industrijske otpornosti. Ipak, Kina sve više preuzima vodeću ulogu u globalnoj digitalnoj ekonomiji zahvaljujući kombinaciji koherentne industrijske strategije i tehnno-ekonomske sinergije.

4. Kina: Globalni lider u automatizaciji i pametnoj proizvodnji

Trendovi u proizvodnji vozila i ulaganjima u automatizaciju

Kina je tokom proteklih osam godina učvrstila svoju poziciju globalnog lidera u proizvodnji vozila i implementaciji robotskih tehnologija. Kao najveći svjetski proizvođač automobila, ona ostvaruje značajan udio u ukupnoj globalnoj proizvodnji vozila, dok istovremeno postaje najveće tržište i proizvođač industrijskih robota.

Ovaj dvostruki rast odražava strateško usklađivanje Kine s konceptom Industrije 4.0, u kojem su automatizacija, razmjena podataka i napredne tehnologije proizvodnje ključni elementi. Međutim, tržište automatizacije suočava se s izazovima, uključujući smanjenje rasta u 2024. godini, što zahtijeva prilagodbu strategija i inovacija [33].

Nacionalne strategije: „Made in China 2025“ i „New Generation AI Plan“

Podstaknuta nacionalnim strateškim inicijativama, kao što su Made in China 2025 i njeni nasljedni programi, Kina intenzivno sprovodi implementaciju tzv. „omogućavajućih tehnologija“ - robotike, Interneta stvari (IoT), velikih podataka (Big Data), vještačke inteligencije (AI), digitalnih blizanaca (Digital Twins) i 5G

mreža. Kineski proizvođači automobila (BYD, Geely, SAIC i dr.) značajno ulažu u robotizirane proizvodne linije koje integriraju fizičku proizvodnju s digitalnim sistemima nadzora i upravljanja, čime se povećava brzina reakcije, fleksibilnost i kontrola kvaliteta. „New Generation AI Plan“ usmjeren je na razvoj naprednih tehnologija poput umjetničke inteligencije, s ciljem integracije AI u različite industrijske sektore, uključujući proizvodnju. Ove strategije omogućavaju Kini da postigne visoku digitalnu zrelost i konkurentnost na globalnom tržištu [34,35]

Godišnja proizvodnja vozila i uloga kolaborativnih robota u automobilskom sektoru

Proizvodnja motornih vozila u Kini varirala je u skladu s globalnim tržišnim kretanjima. Nakon dostizanja vrhunca neposredno prije pandemije COVID-19, sektor je zabilježio pad tokom 2018-2019. godine, a zatim i izraženiji pad u 2020. godini usljed globalnih poremećaja izazvanih pandemijom. Od 2021. godine proizvodnja se postepeno oporavlja, dostižući ili blago premašujući ranije maksimalne nivoe tokom perioda 2023-2024. godine, kako pokazuje tabela 5.

U tabeli 5 prikazan je trend implementacije industrijskih robota na godišnjem nivou u Kini, kao i implementacija industrijskih robota u automobilskom sektoru u posljednjih osam godina [20-23, 36–38].

Na osnovu podataka prikazani u tabeli 5 zaključujemo da se iz godine u godinu implementacija industrijskih robota povećava u svim industrijskim granama, a i u automobilskej industriji.

Table 5. Proizvodnja vozila i instalacija industrijskih robota u Kini (2017–2024)

Godina	Proizvodnja vozila (miliona)	Implementacija industrijskih robota (jedinica)	Implementacija industrijskih robota u automobilskoj inudtriji (jedinica)
2017	~29.0	138.000	42.000
2018	~28.1	154.000	39.000
2019	~25.7	140.000	31.000
2020	~25.2	168.000	30.000
2021	~26.1	243.000	58.000
2022	~27.0	290.000	73.000
2023	~28.3	276.000	65.000
2024	~30.0	295.000	57.000

U 2017. godini u Kini je implementirano 138.000 jedinica robota, a osam godina kasnije u 2024 godini implementirano 295.000 jedinica robota što predstavlja 54% od implementiranih industrijskih robota u svijetu. Kina je u svijetu lider po imple-

mentaciji industrijskih robota. Ovi roboti omogućavaju visoku preciznost i efikasnost u montaži, zavarivanju i lakiranju vozila. Kolaborativni roboti (cobots) također igraju značajnu ulogu u saradnji s ljudskim radnicima, povećavajući fleksibilnost i sigurnost proizvodnih linija [39].

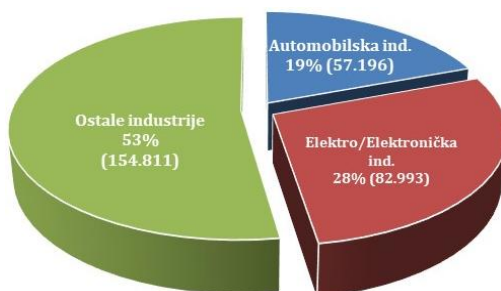
Distribucija robota po industrijskim sektorima

Na osnovu prikazanih podataka na slici 2 može se zaključiti da je Kina od 2020. godine već premašila globalni prosjek u pogledu implementacije industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u proizvodnji [20-23, 36–38].



Slika 2. Trend gustine industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u Kini u periodu 2017–2024.

Dok je 2011. godine gustina robota u Kini iznosila svega 18 jedinica, do 2024. godine zemlja je dostigla treće mjesto na globalnoj ljestvici sa 520 jedinica na 10.000 zaposlenih, odmah iza Republike Koreje (prvo mjesto, 1.012 jedinica) i Singapura (drugo mjesto, 770 jedinica). Očekuje se da će ovaj trend rasta implementacije industrijskih robota u Kini imati dalji uzlazni tok.



Slika 3. Trend implementacije industrijskih robota u automobilskoj, električnoj/elektronskoj i drugim industrijama u Kini tokom 2024. godine

Prema podacima po industrijskim granama prikazanih na slici 3, sektor električne i elektronske industrije ostaje najveći korisnik robota u Kini; tokom 2024. godine instalirano je 82.993 jedinica (28%). Automobilska industrija slijedi sa oko 57.196 jedinica (19%) [22]. Domaći proizvođači robota sve više osvajaju tržišni udio, ne samo u snabdijevanju automobilske industrije, već i u širem spektru kineske proizvodnje.

Trendovi robotizacije u automobilskoj industriji

Tokom proteklih osam godina, gustina robota u kineskoj automobilskoj industriji značajno je porasla, prateći globalne trendove. Udio instalacija robota u automobilskoj industriji u ukupnim svjetskim brojkama ostaje značajan, što pokazuje da ovaj sektor i dalje predstavlja osnovu primjene robotike. Sve veće usvajanje kolaborativnih robota (cobots), sistema kontrole kvaliteta zasnovanih na vještačkoj inteligenciji (AI), digitalnih blizanaca (digital twins) i automatiziranih lanaca snabdijevanja ukazuje na istovremeni kvantitativni rast i kvalitativno unapređenje [40–43].

Kineska razvojna putanja tokom posljednjih osam godina jasno pokazuje da su rast proizvodnje vozila i implementacija robotike međusobno povezani i uzajamno podsticajni procesi. Kontinuiranim ulaganjima u robotiku i tehnologije Industrije 4.0, Kina ne samo da širi svoje proizvodne kapacitete, već i podiže tehnološke standarde automobilske industrije, čime se pozicionira kao globalna industrijska sila i vodeći svjetski akter u oblasti automatizacije.

5. Sjedinjene Američke Države: Digitalna integracija i tehnološka konvergencija

Trendovi u proizvodnji vozila i ulaganjima u automatizaciju

Sjedinjene Američke Države (SAD) predstavljaju globalnog lidera u digitalnoj transformaciji proizvodnje, naročito u automobilskoj industriji, gdje su kompanije kao što su General Motors (GM), Ford i Tesla usmjerile znatna ulaganja u automatizaciju i digitalne proizvodne procese. Ove kompanije su među prvima implementirale napredne robotske sisteme, autonomne montažne linije i digitalno upravljane procese koji omogućavaju veći stepen fleksibilnosti i preciznosti u proizvodnji [43].

Tesla, primjerice, koristi visoko automatizirane sisteme za zavarivanje i lakiranje karoserija, dok GM primjenjuje robotiku i analitiku podataka kako bi optimizirao tok materijala i smanjio zastoje u proizvodnji [45]. Time SAD postaju primjer uspješne sinergije između tradicionalne industrijske proizvodnje i digitalnih tehnologija, čime se postiže povećanje produktivnosti i kvaliteta proizvoda.

Nacionalne politike (Advanced Manufacturing Initiative, Smart Manufacturing Leadership Coalition)

Na nacionalnom nivou, razvoj pametne proizvodnje u SAD-u je institucionalno podržan kroz programe kao što su Advanced Manufacturing Initiative, Manufacturing USA, i Smart Manufacturing Leadership Coalition - SMLC. Ovi programi promovišu saradnju između industrije, akademske zajednice i vladinih institucija kako bi se ubrzala implementacija naprednih tehnologija u proizvodne procese.

Američko Ministarstvo trgovine i Ministarstvo energetike podržavaju projekte koji uključuju razvoj digitalnih blizanaca, vještačke inteligencije (AI), Interneta stvari (IoT) i 5G infrastrukture s ciljem unapređenja proizvodne efikasnosti [45]. Programi poput Clean Energy Smart Manufacturing Innovation Institute – CESMII, podstiču kompanije da koriste pametne senzore, analitiku i automatizovane kontrolne sisteme, čime se smanjuje potrošnja energije i optimizuju procesni parametri [46].

Godišnja proizvodnja vozila i uloga kolobarotivnih robota u automobilskom sektoru

Automobilska industrija u Sjedinjenim Američkim Državama istorijski je predstavljala centralni pokretač industrijske automatizacije.

Tabela 6. Proizvodnja vozila i instalacija industrijskih robota u Sjedinjenim Američkim Državama (2017–2024)

Godina	Proizvodnja vozila (miliona)	Implementacija industrijskih robota (jedinica)	Implementacija industrijskih robota u automobilskoj inudtriji (jedinica)
2017	~11.19	36.437	12.524
2018	~10.99	40.373	14.472
2019	~10.53	33.378	12.870
2020	~8.82	31.000	10.500
2021	~9.17	39.987	9.782
2022	~10.06	40.576	14.467
2023	~10.61	38,303	12.283
2024	~11.21	34.000	13.700

Proizvodnja vozila u zemlji pokazuje ciklične varijacije koje su u velikoj mjeri pod uticajem globalnih ekonomskih kretanja, poremećaja u lancima snabdijevanja i promjena u domaćoj potražnji. Trendovi u godišnjim instalacijama robota ilustruju sve veću oslonjenost na automatizaciju kako u automobilskoj, tako i u neautomobilskoj industriji.

Tabela 6 prikazuje podatke o proizvodnji vozila, ukupnim godišnjim instalacijama robota i instalacijama robota isključivo u automobilske industriji za period 2017–2024 [20–23, 36–38]. Kao što je prikazano u tabeli, ukupne instalacije robota dostigle su vrhunac 2018. godine, sa više od 40.000 jedinica, prije nego što su zabilježile pad tokom 2019. i 2020. godine zbog trgovinskih tenzija i pandemije COVID-19. Faza oporavka započela je 2021. godine, podržana povećanom potražnjom za automatizacijom u različitim industrijskim sektorima. Iako automobilska industrija i dalje dominira u primjeni robota, druge grane poput elektronike, obrade metala, plastike i hemijske industrije bilježe rastući udio u ukupnim instalacijama. Posebno su 2022. i 2023. godina označile značajan oporavak, s brojem instalacija koji je premašio 40.000 jedinica, što ukazuje na obnovljene investicije u tehnologije automatizacije. Industrijski roboti imaju ključnu ulogu u transformaciji američke automobilske industrije. U posljednjoj deceniji bilježi se snažan porast upotrebe kolaborativnih robota (cobots) koji omogućavaju direktnu saradnju čovjeka i mašine, čime se povećava sigurnost i produktivnost radnika [47]. Ford i GM koriste kolaborativne robote u procesima sklapanja motora i završne montaže, dok Tesla razvija vlastite robotske platforme za visokoprecizne zadatke, uključujući autonomno testiranje komponenti i AI-baziranu kontrolu kvaliteta [43]. Napredak u AI analitici, senzorici i digitalnim blizancima omogućava sve veći stepen integracije fizičkih i virtuelnih sistema, što doprinosi povećanju preciznosti i prediktivnom održavanju mašina.

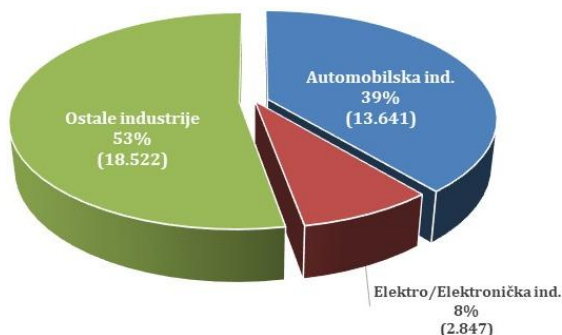
Distribucija robota po industrijskim sektorima

Pored apsolutnog broja instalacija, pokazatelj gustine robota - izražen kao broj robota na 10.000 zaposlenih u proizvodnji - pruža uvid u strukturni nivo automatizacije. Slika 4. prikazuje razvoj gustine robota u Sjedinjenim Američkim Državama u periodu od 2017. do 2024. godine.



Slika 4. Trend gustine industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u USA u periodu 2017–2024.

Kao što je prikazano na slici 4, gustina robota u Sjedinjenim Američkim Državama kontinuirano raste, povećavajući se sa 200 jedinica na 10.000 zaposlenih u 2017. godini na procijenjenih 312 jedinica u 2024. godini [20-23, 36–38]. Najizraženiji rast zabilježen je između 2019. i 2021. godine, uglavnom zato što su kompanije ubrzale procese automatizacije kao odgovor na nedostatak radne snage i poremećaje u proizvodnji izazvane pandemijom. Ovaj trend naglašava strateški značaj industrijske robotike za očuvanje konkurentnosti i otpornosti američke proizvodnje.



Slika 5. Trend implementacije industrijskih robota u automobilske, električne/elektronske i druge industrije u SAD-u tokom 2024. godine

Struktura instalacija u SAD-u pokazuje koncentraciju u nekoliko ključnih sektora: automobilske industriji (najveći pojedinačni udio), industriji elektronike i električnih proizvoda, obradi metala i mašinskom inženjerskom te industriji plastike i hemikalija. Udio automobilske industrije u ukupnim instalacijama varira, ali je u većini godina iznosio trećinu ili više od ukupnog broja novih instalacija kao što pokazuje slika 5. u 2024 godini [22]. Paralelno s tim, raste primjena robota u sektoru elektronske proizvodnje zbog povećane potražnje za preciznošću i većom proizvodnjom elektronskih komponenti za električna vozila (EV) i elektroniku općenito.

Ukupno posmatrano, struktura instalacija robota u 2024. godini ukazuje na dvije ključne dinamike:

- Kvantitativna ekspanzija – automobilska industrija predvodi većinu instalacija.
- Kvalitativna transformacija – primjene robotike postaju sve sofisticiranije kroz upotrebu kolaborativnih robota (cobota), integraciju vještačke inteligencije u vizuelnoj inspekciji i kontroli kvaliteta te razvoj automatizovanih proizvodnih ćelija prilagođenih potrebama proizvodnje električnih vozila.

Ovi procesi ističu centralnu ulogu robotike u očuvanju konkurentnosti američke proizvodnje, ali i sektorske promjene koje odražavaju širu tehnološku i industrijsku transformaciju.

Trendovi u robotici u automobilskoj industriji

Automobilska industrija u Sjedinjenim Američkim Državama pokazuje nekoliko jasnih trendova [48–50]:

- Kontinuiranu modernizaciju proizvodnih linija kroz zamjenu ili nadogradnju tradicionalnih robota naprednijim sistemima sposobnim za fleksibilnu proizvodnju.
- Povećanu upotrebu kolaborativnih robota (cobota) za zadatke koji zahtijevaju finu manipulaciju i montažu.
- Integraciju vještačke inteligencije u procese vizuelne inspekcije i kontrole kvaliteta.
- Rast instalacija robota povezan s tranzicijom ka električnim vozilima, koja zahtijeva nove procese sklapanja i automatizovane proizvodne ćelije.

Ovi trendovi ukazuju ne samo na kvantitativni porast broja robota, već i na značajno povećanje tehnološke sofisticiranosti njihovih primjena. Američki automobilski i širi proizvodni sektor intenzivno implementira ključne tehnologije Industrije 4.0, uključujući industrijske robote, IoT senzore i platforme, analitiku proizvodnje zasnovanu na velikim podacima (Big Data), digitalne blizance (Digital Twins) i algoritme umjetne inteligencije za vizuelnu inspekciju i optimizaciju procesa. Proizvođači automobila i njihovi dobavljački lanci ulažu u fleksibilne, modularne proizvodne ćelije koje integrišu robote sa naprednim sistemima za kontrolu i nadzor u realnom vremenu. Ovakva integracija omogućava bržu prilagodbu novim modelima i varijantama vozila, skraćuje vrijeme podešavanja i poboljšava dosljednost kvaliteta.

6. Indija: Selektivna implementacija i tehnološki napredak

Trendovi u proizvodnji vozila i ulaganjima u automatizaciju

Indija je tokom posljednjih godina doživjela značajan porast proizvodnje vozila, usljed jakih domaćih i izvozačkih potražnji, kao što su tržišta električnih vozila (EV) i komponenti za automobile. Kompanije poput Tata Motors, Mahindra & Mahindra, Maruti Suzuki i drugih ulažu u modernizaciju proizvodnih pogona, automatizaciju i digitalizaciju procesa, uključujući robotiku, IoT senzore, AI-basirane sustave za kontrolu kvaliteta, te digitalne blizance [51]. Međutim, robotizacija se dešava selektivno - najintenzivnije u velikim grupama automobilske proizvodnje i dijelova, dok se manje kompanije i dalje oslanjaju na tradicionalnije metode proizvodnje.

Nacionalne politike implementacije Industrije 4.0

Indijska vlada je pokrenula nekoliko ključnih politika i programa s ciljem poticanja Industrije 4.0, robotizacije i povećanja konkurentnosti manufakture. Među

najistaknutijima su Make in India, Production Linked Incentive (PLI) Scheme, i Nacionalna politika elektronike. Ove politike nude porezne olakšice, subvencije, standardizaciju, poticanje domaće proizvodnje, kao i olakšavanje uvođenja digitalnih tehnologija u industrijske pogone [52]. Postoje i inicijative za osposobljavanje radne snage u digitalnim vještinama, posebno u sektoru automobilske proizvodnje, gdje je potreban veći broj tehničara za upravljanje automatizovanim i robotiziranim linijama.

Godišnja proizvodnja vozila i uloga kolaborativnih robota u automobilskom sektoru

Iako su precizne godišnje brojke proizvodnje vozila u posljednje tri-četiri godine dostupne, najznačajniji pokazatelj je rast u broju instalacija robota u automobilskoj industriji. Često se primjenjuju kolaborativni roboti (coboti) u zadacima poput zavarivanja, montaže, lakiranja, brušenja, vizuelnih aplikacija i kontrole kvaliteta; primjer je kompanija Bajaj Auto koje je instaliralo blizu 120 robotskih ruku (kolaborativnih) u različitim pogonima za zadatke kao što su zavarivanje, vizija, i bolting [53]. Međutim, primjena industrijskih robota i dalje je skromna, s najvećom koncentracijom instalacija upravo u automobilskom sektoru. Kako zemlja unapređuje svoje inicijative „Make in India“ i „Digital India“, očekuje se da će integracija robotike i tehnologija Industrije 4.0 značajno ubrzati, smanjujući jaz između Indije i vodećih industrijskih nacija.

Tabela 7 prikazuje trendove u proizvodnji vozila i instalacijama industrijskih robota u Indiji u periodu od 2017. do 2024. godine [20-23, 36–38].

Tabela 7. Proizvodnja vozila i instalacije industrijskih robota u Indiji (2017–2024)

Godina	Proizvodnja vozila (miliona)	Implementacija industrijskih robota (jedinica)	Implementacija industrijskih robota u automobilskoj inudtriji (jedinica)
2017	~ 4,78	3.424	2.115
2018	~ 5,17	4.771	2.109
2019	~ 4,51	4.299	1.851
2020	~ 3,39	3.216	744
2021	~ 4,39	5.142	1.560
2022	~ 5,45	5.353	1.475
2023	~ 5,85	6.510	3.537
2024	~ 6,01	9.123	4.073

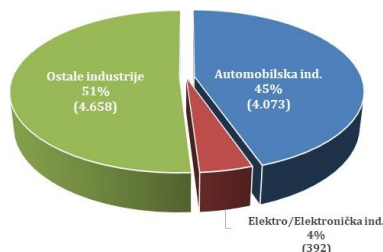
Proizvodnja vozila pokazuje ukupni rast sa približno 4,78 miliona jedinica u 2017. na 6,01 milion jedinica u 2024. godini, uprkos povremenim oscilacijama izazvanim pandemijom COVID-19 i poremećajima u lancima snabdijevanja. Prema

padacima iz tabele 7 u 2023. godini Indija je instalirala 6.510 industrijskih robota, od čega je automobilski sektor preuzeo oko 54,3%% instalacija (≈ 3.537 robota) [54]. U 2024. godini broj instalacija je porastao na 9.123 jedinica, a automobilski sektor je učestvovao sa $\approx 44,6\%$ svih instalacija. U 2024., broj instalacija je porastao na 9.123 jedinica, a automobilski sektor je učestvovao sa $\approx 44,6\%$ svih instalacija.

U automobilskom sektoru, instalacije robota su u početku bile niske, krećući se oko 2.000 jedinica, sa naglim padom na 744 jedinice u 2020. godini zbog prekida proizvodnje izazvanih pandemijom. Od 2021. godine nadalje, broj instalacija robota u automobilskoj industriji značajno je porastao, dostigavši 4.073 jedinice u 2024. godini, što ukazuje na ubranu modernizaciju i viši stepen integracije automatizacije u proizvodnim linijama. Sveukupno, tabela 7 naglašava dvostruku putanju Indije brzi rast proizvodnje vozila praćen postepenim, ali još uvijek skromnim usvajanjem industrijskih robota, posebno u automobilskom sektoru. Dok proizvodnja vozila u Indiji brzo raste, primjena industrijskih robota ostaje relativno ograničena, naročito u automobilskoj industriji. Nasuprot tome, implementacija robota u Indiji koncentrisana je uglavnom na automobilski i opšti industrijski sektor, što istovremeno ukazuje na mogućnosti za širenje i potrebu za ubrzanom industrijskom modernizacijom. Ukupno posmatrano, Indija predstavlja tržište u razvoju gdje rast proizvodnje znatno nadmašuje stepen automatizacije, što sugerise značajan potencijal za buduća ulaganja u robotiku i tehnologije Industrije 4.0. U 2022. godini, Indija je imala gustinu robota od samo 7 jedinica na 10.000 zaposlenih u proizvodnom sektoru. Ovaj nivo je zanemarljiv u poređenju sa zemljama kao što su Kina, Sjedinjene Američke Države, zbog čega detaljna analiza trendova za period 2017–2024. godine ima ograničenu informativnu vrijednost.

Distribucija robota po industrijskim sektorima

Automobilski sektor dominira u distribuciji instalacija robota u Indiji. U 2023/2024, između 42–45% instalacija robota dolazi iz automobilske industrije [22,52]. Slijede sektori kao što su elektronika i električni uređaji, guma i plastika (rubber & plastics), te industrija metala (metalworking), koji bilježe rastući udio.



Slika 6. Trend implementacije industrijskih robota u automobilskoj, električnoj/elektronskoj i drugim industrijama u Indiji tokom 2024. godine

Iako su ti sektori još uvijek iza automobila po obimu, njihov rast pokazuje da se robotizacija širi van tradicionalnih automobilske domene [54, 55]. Slika 6 pokazuje da je u 2024. godini primjena industrijskih robota u Indiji najveća u sektoru opće industrije, sa instaliranih 4.658 jedinica, što odražava širenje primjene automatizacije izvan tradicionalnih sektora automobilske i elektronske industrije [35].

Automobilska industrija slijedi sa 4.073 robota, što ukazuje da proizvodnja vozila i dalje ostaje ključni pokretač industrijske automatizacije u zemlji. Sektor električne i elektronske opreme ima manji udio, sa 392 jedinice, što pokazuje da je primjena automatizacije u visokotehnološkoj proizvodnji još uvijek ograničena u poređenju s drugim industrijama.

Trendovi u robotici u automobilskoj industriji

Glavni trendovi u automobilskoj industriji Indije uključuju:

- Povećana primjena kolaborativnih robota (cobots): kompanije koriste robote koji rade u interakciji sa ljudskim radnicima za zadatke koji zahtijevaju preciznost i fleksibilnost [57].
- Integracija IoT, AI i digitalnih blizanaca u proizvodne procese radi optimizacije, prediktivnog održavanja i kontrole kvaliteta. Ovi trendovi su vidljivi u većim kompanijama koje imaju resurse da investiraju u „smart factory“ modele.
- Fokus na lokalnu proizvodnju komponenti automobilske industrije, što podstiče uvoz tehnologija robotike i automatizacije u pogone proizvođača komponenti, a ne samo kompletnih vozila.
- Rastuća gustoća robota, iako još uvijek značajno niža nego u vodećim državama: Indija ima još vrlo nizak broj robota po 10.000 zaposlenih u proizvodnji, što ukazuje da potencijal za rast postoji [54, 57].

7. Komparativna analiza i diskusija

Komparativna analiza između Kine, Indije i Sjedinjenih Američkih Država otkriva različite razvojne modele u pogledu automatizacije, robotizacije i digitalne transformacije industrije. Kina se pozicionirala kao globalni lider u implementaciji pametne proizvodnje zahvaljujući snažnim državnim strategijama poput „Made in China 2025“ i „New Generation AI Plan“, dok SAD prednjače u integraciji naprednih tehnologija kroz tržišno vođene inovacije i privatne investicije.

Indija, s druge strane, bilježi ubrzan rast u proizvodnji vozila, ali uz sporiju stopu implementacije automatizacije, što ukazuje na postepenu, selektivnu transformaciju industrije. Kina i SAD pokazuju visoku gustoću robota i kontinuiran rast produktivnosti, dok Indija zaostaje s tek nekoliko robota na 10.000 zaposlenih u proizvodnji.

U 2024. godini, Kina je premašila 295.000 novih robotskih instalacija, SAD oko 34.000, dok Indija bilježi oko 9.000, što odražava različite nivoe tehnološke zrelosti. Robotika u Kini i SAD-u ne samo da povećava produktivnost, već omogućava razvoj inovativnih modela proizvodnje - poput autonomnih fabrika i kolaborativnih sistema čovjek-mašina. U Indiji, primjena robota ima prvenstveno ulogu modernizacije, a ne još transformacije poslovnih modela.

Kada su u pitanju nacionalne strategije i modeli digitalne transformacije, SAD se oslanjaju na javno–privatne inicijative poput Advanced Manufacturing Initiative i Smart Manufacturing Leadership Coalition, dok Kina primjenjuje centralizovani pristup s fokusom na stratešku samodovoljnost. Indija kombinuje elemente oba modela kroz Make in India i Digital India.

Geopolitičke i ekonomske implikacije tehnološke diferencijacije, oblikuju globalne lance vrijednosti, gdje Kina jača svoju poziciju dobavljača naprednih tehnologija, dok SAD čuvaju prednost u istraživanju i softverskim rješenjima. Indija nastoji da smanji zavisnost od uvoza i razvije domaću tehnološku bazu. Zajednički trendovi uključuju rast ulaganja u automatizaciju, razvoj umjetne inteligencije i digitalnih platformi. Divergentni pristupi ogledaju se u stepenu državne intervencije, tempu implementacije i strateškoj orijentaciji prema globalnoj konkurentnosti i tehnološkoj suverenosti.

8. Zaključak

Komparativna analiza Kine, Sjedinjenih Američkih Država i Indije pokazala je da se globalna automobilska industrija nalazi u dinamičnoj fazi transformacije pod uticajem automatizacije, robotike i digitalnih tehnologija.

Kina prednjači zahvaljujući strateškim državnim inicijativama i ubrzanoj implementaciji pametne proizvodnje, SAD održavaju konkurentsku prednost kroz inovacije i fleksibilne modele tržišno vođene robotizacije, dok Indija predstavlja rastuće tržište s brzim razvojem proizvodnje, ali ograničenim stepenom automatizacije. Robotika se potvrđuje kao ključni pokretač budućnosti automobilske industrije – omogućava veću produktivnost, bolju kontrolu kvaliteta, fleksibilnost proizvodnih procesa i prelazak na održive tehnologije, uključujući električna vozila. Integracija kolaborativnih robota (cobota), umjetne inteligencije i digitalnih tvornica omogućava ne samo smanjenje troškova i zastoja, već i veću otpornost na globalne poremećaje poput pandemija ili prekida u lancima nabavke.

Sa stanovišta industrijske politike, rezultati ukazuju na potrebu za strateškim ulaganjima u istraživanje, razvoj i obrazovanje kadrova u oblasti robotike i automatizacije. Zemlje koje uspješno povežu državnu podršku, privatne inovacije i međunarodnu saradnju moći će ostvariti održiv industrijski rast i tehnološku

nezavisnost. Za buduća istraživanja preporučuje se dublja analiza međusobne povezanosti robotike, umjetne inteligencije i zelene tranzicije u automobilske industriji.

Posebnu pažnju treba usmjeriti na socio-ekonomske efekte visoke automatizacije – uključujući promjene u strukturi zaposlenosti, nove vještine i etičke aspekte integracije čovjeka i tehnologije. U konačnici, robotika ne predstavlja samo tehnološki alat, već i ključnu komponentu održive, pametne i konkurentne industrije budućnosti.

9. Literatura

- [1] Karabegović I, Kovačević A, Banjanović-Mehmedović L. et al. *Integration Industry 4.0 in Business and Manufacturing*; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2020.
- [2] Barari A. & Tsuzuki M. S. G. Smart Manufacturing and Industry 4.0. *Applied Sciences*, 13(3), 1545. <https://doi.org/10.3390/app13031545>, 2023.
- [3] Karabegović I, Karabegović E, Mahmić M, Husak E. The Implementation of Industry 4.0 by Using Industrial and Service Robots in the Production Processes. Chapter 1 in: Karabegović I, Kovačević A, Banjanović - Mehmedović L, Dašić P. (Eds), *Integration Industry 4.0 in Business and Manufacturing*, IGI Global, Hershey PA, USA. 1-30. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2725-2.ch001>, 2020.
- [4] Liu D. & Cao J. Determinants of Collaborative Robots Innovation Adoption in Small and Medium-Sized Enterprises: An Empirical Study in China. *Applied Sciences*, 12(19), 10085. <https://doi.org/10.3390/app121910085>, 2022.
- [5] Xia Q, Zhang B, Zhang X. et al. Investigation on robotic cells design improvement in the welding process of body in white. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 8(322-333). <https://doi.org/10.1007/s41315-023-00317-8>, 2024.
- [6] Galin R. & Meshcheryakov R, 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/10.1088/1757899X/537/3/032073>, 2019.
- [7] Karabegović I, Majstorović V. (Eds), *Industrija 4.0: Digitalna transformacija oblikuje budućnost (Industry 4.0: Digital Transformation Shaping the Future)*, Društvo za robotiku u Bosni i Hercegovini, Bihać, Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Sarajevo, 2024.
- [8] Bagheri Rad N. & Behnamian J. Real-time multi-factory scheduling in industry 4.0 with virtual alliances. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106636>, 2023.
- [9] Andreoni A, Frattini F. & Prodi G. Getting robots in ‘our own hands’: Structural drivers, spatial dynamics and multi-scalar industrial policy in China. *Competition & Change*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/10245294241261878>, 2024.

- [10] Chen Y, Dai X, Fu P, Luo G. & Shi P. *A review of China's automotive industry policy: Recent developments and future trends. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 11(5), 867–895. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.-2024.09.001>, 2024.
- [11] Papulova Z, Gažova A, Šufliarsky L, Implementation of Automation Technologies of Industry 4.0 in Automotive Manufacturing Companies. *Procedia Computer Science*, 200, 1488-1497. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.350>, 2022.
- [12] Jadoon G, Ud Din I, Almogren A. & Almajed H. Smart and Agile Manufacturing Framework, A Case Study for Automotive Industry. *Energies*, 13(21), 5766. <https://doi.org/10.3390/en13215766>, 2020.
- [13] Tao B, Zhao X. & Ding H. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study. *Science China Technological Sciences*, 62, 1388-1400. <https://doi.org/10.1007/s11431-019-9510-1>, 2019.
- [14] Piccarozzi M, Aquilani B. & Gatti C. Industry 4.0 in Management Studies: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(10), 3821. <https://doi.org/10.3390/su10103821>, 2018.
- [15] Jagatheesaperumal S, Rahouti M, Ahmad K, Al-Fuqaha A. & Guizani M. The Duo of Artificial Intelligence and Big Data for Industry 4.0: Review of Applications, Techniques, Challenges, and Future Research Directions. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.02425>, 2021.
- [16] Bai C, Dallasega P, Orzes G, Sarkis J, Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective, *International Journal of Production Economics*, Article 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>, 2020.
- [17] Soori M, Ghaleh Jough F, Dastres R. & Arezoo B. Intelligent Robotic Systems in Industry 4.0, A Review. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*. <https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024007>, 2024.
- [18] Ghobakhloo M, Iranmanesh M, Grybauskas A. & Vilkas M. Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. *Business Strategy and the Environment*, 30(8), 4237-4257. <https://doi.org/10.1002/bse.2867>, 2021.
- [19] Naseem M. H. & Yang J. Role of Industry 4.0 in Supply Chains Sustainability: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13(17), 9544. <https://doi.org/10.3390/su13179544>, 2021.
- [20] International Federation of Robotics (IFR), Global robot density in factories doubled in seven years (press release / World Robotics Executive Summary) https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-density-in-factories-doubled-in-seven-years?utm_source=chatgpt.com, 2024.
- [21] OICA (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers), 2024, Retrieved September 27, from <https://www.oica.net/category/production-statistics/-2023-statistics/>, 2025.

- [22] International Federation of Robotics (IFR), 2025, Presentation of World Robotics 2025 Industrial Robots, https://ifr.org/downloads/press_docs/PressConference-2025_presentation.pdf
- [23] International Federation of Robotics (IFR), *World Robotics 2024 – Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org>, 2024.
- [24] Karabegović I, 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>, 2025.
- [25] Karabegović I, Karabegović E, Mahmić M, Husak E. Implementation of Industry 4.0 and Industrial Robots in the Manufacturing Processes. In: Karabegović, I. (eds) *New Technologies, Development and Application II*. NT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 76. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0_1, 2020.
- [26] McKinsey & Company. *The rise of smart manufacturing: Integrating AI and IoT in global production*. McKinsey Global Institute Reports. Retrieved from <https://www.eseye.com/resources/blogs/the-rise-of-smart-manufacturing-insights-from-eseyes-state-of-iot-adoption-report/>, October 10, 2024.
- [27] PwC. *Digital trends in operations survey 2024: Why most companies don't get the results they expect from digital transformation*. PricewaterhouseCoopers International Limited. Retrieved from <https://supply-chaindigital.com/operations/pwc-digital-trends-in-operations-2024>, 2024.
- [28] PwC. *Global digital trust insights 2024: Creating confidence in an AI-driven world*. PricewaterhouseCoopers International Limited. Retrieved from <https://www.pwc.com/hu/hu/kiadvanyok/assets/pdf/pwc-2024-global-digital-trust-insights.pdf>, 2024.
- [29] World Economic Forum. *Shaping the Future of Advanced Manufacturing and Production: Insights from the Global Lighthouse Network*. WEF White Paper Series. <https://www.weforum.org/videos/shaping-the-future-of-advanced-manufacturing/>, 2024.
- [30] OECD. (2024). *OECD Digital Economy Outlook 2024 (Volume 1): Embracing the Technology Frontier*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a1689dc5-en>, 2024.
- [31] NITI Aayog. *National Strategy for Artificial Intelligence – #AIForAll (Revised 2023)*. Government of India. Retrieved from <https://www.niti.gov.in/sites/default/files/2023-03/National-Strategy-for-Artificial-Intelligence.pdf>, 2023.
- [32] Shah S. Madni, H. H. S, Hashim Z. Bt. M, S. Ali, J. Faheem, M. *Factors influencing the adoption of industrial internet of things for the manufacturing and production small and medium enterprises*. Retrieved October 5, 2025, from: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/cim2.12093>, 2024

- [33] MIRDATABANK. 2024, *China's automation market trends 2024*. MIRDATA-BANK News. Retrieved October 6, 2025, from: <https://www.mirdatabank.ca/News/NewsDetail?id=150117>, 2024.
- [34] Karabegović I, Husak E, Karabegović E, Mahmić M, China is the leading country in the world in the implementation of robotic technology as the basic technology of Industry 4.0. In: Rackov M, Miltenović A, Banić M. (Eds), *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering - KOD 2024*. Mechanisms and Machine Science, **174**. Springer, Heidelberg. ISBN 978-3-031-80511-0: 612–621. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80512-7_60, 2024.
- [35] China Briefing. *Understanding China's AI manufacturing roadmap & implications on FIEs*. Retrieved October 10, 2025, from: <https://www.china-briefing.com/news/understanding-chinas-ai-manufacturing-roadmap-implications-on-fies/>, 2024.
- [36] International Federation of Robotics (IFR), *World Robotics 2018 – Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org>, 2018.
- [37] Karabegović I, Karabegović E. The Role of Collaborative Service Robots in the Implementation of Industry 4.0, *International Journal of Robotics and Automation Technology*, Vol.6., pp.40-46. <https://doi.org/10.31875/2409-9694.2019.06.5>, 2019.
- [38] International Federation of Robotics (IFR), *World Robotics 2023 – Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org>, 2023.
- [39] Robotics247. *Report: Collaborative robots market poised for new growth cycle*. Retrieved October 10, 2025, from: https://www.robotics247.com/article/report_collaborative_robots_market_poised_for_new_growth_cycle, 2024.
- [40] Yao J. F, Yang Y, Wang X. C. et al. Systematic review of digital twin technology and applications. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, **6**, 10. <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4>, 2023.
- [41] Karabegović I, The Role of Industry 4.0 in the Modernization of Industrial production in China, *Journal of Scientific and Engineering Research* **4**(9):177-186. <http://jsaer.com/download/vol-4-iss-9-2017/JSAER2017-04-09-177-186.pdf>, 2017.
- [42] Malik A. A. & Brem A. Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **68**, 102092. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102092>, 2021.
- [43] Miranda J, Brynjolfsson E, Seamans R, Buffington C. & Goldschlag N. *Adoption of automation technologies by U.S. firms: Evidence from the 2019 Annual Business Survey* (Working Paper No. CES-22-12R). U.S. Census Bureau, Center for Economic Studies (CES), & National Center for Science and Engineering Statistics (NCSES). <https://www2.census.gov/ces/wp/2022/CES-WP-22-12R.pdf>, 2022.
- [44] Stevens, M. *Supporting robotics adoption would boost the U.S. economy*. Information Technology & Innovation Foundation (ITIF). <https://itif.org>, May 30. 2023.
- [45] U.S. Department of Commerce. *CHIPS for America announces new proposed \$285 million award for CHIPS Manufacturing USA Institute for Digital Twins*,

- Headquartered in North Carolina.* <https://www.com-merce.gov/news/pressreleases/2024/11/chips-america-announces-new-proposed-285-million-award-chips>, November 19 2024.
- [46] U.S. Department of Energy. Energy Department Manufacturing Institute selects projects to advance U.S. leadership in smart manufacturing. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-manufacturing-institute-selects-projects-advance-us-leadership-0>, July 7, 2020.
 - [47] Rose J, Lukic V, Knizek C, Milon T, Melecki A. & Choset H. *Advancing robotics to boost U. S. manufacturing competitiveness*. Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2018/advancing-robotics-boost-us-manufacturing-competitiveness>, October 25, 2018.
 - [48] You J, Wu Z, Wei W, Li N. & Yang Y. Evolution of Industrial Robots from the Perspective of the Metaverse: Integration of Virtual and Physical Realities and Human–Robot Collaboration. *Applied Sciences*, 14(14), 6369. <https://doi.org/10.3390/app14146369>, 2024.
 - [49] Karabegović I, Karabegović E, Mahmić M Husak, E, Innovative Automation of Production Processes in the Automotive Industry, *International Journal of Engineering Works* 5(11): 240-247. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1486145>, 2018.
 - [50] Puttero S, Verna E, Genta G. & Galetto M. Collaborative robots for quality control: an overview of recent studies and emerging trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02600-w>, 2025.
 - [51] Straits Research. India Industry 4.0 market size, share & trends report by 2033. Straits Research. <https://straitsresearch.com/report/india-industry-4-0-market>, 2023.
 - [52] Industrial Automation India. *India's Robot Installations Surge 7% in 2024, Automotive Sector Leads IFR Report*. Industrial Automation India. <https://www.industrialautomationindia.in/news/india-industrial-robotics-installations-2024-automotive-sector-leads>, 2025.
 - [53] Autocar Professional. *Enabling eco-system needed before India Auto Inc can fully embrace Industry 4.0*. Autocar Professional. <https://www.autocarpro.in/news-national/enabling-eco-india-auto-embrace-industry-23879>, 2024.
 - [54] IBEF. *India's rise of the robots: Country among top 10 markets in installations*. India Brand Equity Foundation. <https://www.ibef.org/news/india-s-rise-of-the-robots-country-among-top-10-markets-in-installations>, June 9. 2025.
 - [55] Angel One. *India Joins Global Top 10 for Robot Installations: Automotive, Rubber, and Metal Sectors Drive Growth*. Angel One. <https://www.angelone.in/news-market-updates/india-joins-global-top-10-for-robot-installations-automotive-rubber-and-metal-sectors-drive-growth>, June 2025.

- [56] Autocar Professional. *Enabling eco-system needed before India Auto Inc can fully embrace Industry 4.0*. Autocar Professional. <https://www.autocarpro.in/news-national/enabling-eco-india-auto-embrace-industry-23879>, 2024.
- [57] RIS Policy Brief. India's robot market and Industry 4.0 readiness (Policy Brief No. 103). Research and Information System for Developing Countries. <https://www.-ris.org.in>, May 2021.