

# Razvoj primene veštačke inteligencije u proizvodnom inženjerstvu – jedan pogled

VIDOSAV D. MAJSTOROVIĆ, redovni član Svetske akademije za  
proizvodno inženjerstvo (CIRP), Pariz, Francuska  
ORCID: 0000-0001-9534-8461

Pregledni rad  
UDC: 658.52:004.85  
DOI: 10.5937/tehnika2405573M

*Veštačka inteligencija (AI) je danas postala najvažniji element modela Industrija 4.0 u primeni, a na putu izgradnje pametne fabrike. Njena istorija je duga oko osam decenija, a posebna oblast njenog istraživanja i razvoja je i proizvodno inženjerstvo, u kome se AI primenjuje od sredine osadesetih godina prošlog veka. Ekspertni sistemi (ES) su bili prvi alat AI primenjen u ovoj oblasti. Cilj ovog rada je da se izvrši sistemska analiza stanja razvoja i primene AI u proizvodnom inženjerstvu, gde se AI izvorno koristi kao pomoć inženjeru planeru i projektantu, različitih inženjerskih proizvoda, procesa i sistema. Takođe, ona se koristi i za upravljanje procesima i sistemima u proizvodnom inženjerstvu. Polazeći od toga, rad je tako strukturisan da daje odgovore na sledeća pitanja: šta je AI i kako se razvijala, kako su nastali i kako su se razvijali modeli AI u tehnološkim sistemima proizvodnog inženjerstva, šta su današnji modeli i perspektive primene AI u njima, kao i mogući pravci budućih istraživanja u ovoj oblasti. Kao posebna tačka ovog rada prikazani su i neki rezultati naših istraživanja u ovoj oblasti.*

**Ključne reči:** veštačka inteligencija, mašinsko učenje, tehnološki sistemi, proizvodno inženjerstvo, planiranje, projektovanje, upravljanje

## 1. UVODNE NAPOMENE

Veštačka inteligencija (AI) je grana nauke o inteligenciji, koja široko obuhvata dve oblasti: prirodnu i veštačku. Prirodna inteligencija je nauka o otkrivanju procesa i modela inteligentnog ponašanja živih sistema, dok veštačka inteligencija, ili AI, je i nauka i inženjerstvo za stvaranje inteligentnih softverskih sistema i mašina. Ove dve oblasti istraživanja su povezane i doprinele su jedna drugoj, tokom prethodnih osam decenija razvoja.

Sa druge strane, AI je osnova za razvoj i primenu pametne proizvodnje. Šta je pametna proizvodnja? Ona predstavlja upotrebu naprednih tehnologija, uz vršenje analize podataka za poboljšanje proizvodnih procesa, povećanje efikasnosti i optimizaciju proizvodnje [1]. Takođe, ona integriše različite tehnologije: AI, Internet stvari (IoT), analitiku velikih podataka (BDA), robotiku i računarstvo u oblaku u proizvodno okruženje.

---

Adresa autora: Vidosav Majstorović, redovni član  
svetske Akademije za proizvodno inženjerstvo (CIRP), 9  
rue Mayran, Pariz, Francuska

e-mail: vidosav.majstorovic@sbb.rs

Rad primljen: 25.07.2024.

Rad prihvaćen: 06.09.2024.

Ključne karakteristike pametne proizvodnje su: (a) integracija sistema - Povezivanje različitih proizvodnih sistema i procesa kroz IoT i druge tehnologije, kako bi se stvorilo kohezivno i sinhronizovano proizvodno okruženje, za rad u online režimu, (b) analitika velikih podataka. Ovde se AI koristi za analizu ogromnih količina podataka generisanih tokom proizvodnih procesa. Ovo pomaže u identifikaciji obrazaca pojave događaja, predviđanju potreba za održavanjem, optimizaciji rasporeda proizvodnje i poboljšanju ukupne efikasnosti, (c) automatizacija i robotika - primena robotike i automatizacija obavljanja zadataka, koji se ponavljaju sa visokom preciznošću i pouzdanošću, čime se smanjuju ljudske greške i povećava produktivnost, (d) IoT i umrežavanje. Korišćenjem IoT uređaja vrši se prikupljanje podataka u realnom vremenu sa mašina, opreme, procesa i proizvoda u fabrici. Ovi podaci se koriste za praćenje, upravljanje i donošenje odluka, (e) napredne proizvodne tehnologije - su aditivna proizvodnja (3D štampa), digitalni blizanci (virtuelni modeli fizičkih sredstava) i proširena stvarnost (AR) u svrhe projektovanja, simulacije i održavanja, (f) integracija lanca snabdevanja – poboljšanje upravljanja lancem snabdevanja kroz vidljivost i koordinaciju u realnom vremenu, omogućavajući brži odgovor na zahteve tržišta i skraćujući vreme isporuke, i (g) energetska efikasnost i održivost - optimizacija

upotrebe energije i potrošnje resursa radi smanjenja uticaja na životnu sredinu i poboljšanja održivosti proizvodnje.

Pametna proizvodnja je nova paradigma tehnoloških sistema, a njeno utemeljenje i primena u proizvodnji, zasniva se na alatima i tehnikama AI, što je posebno došlo do izražaja u modelu Industrija 4.0.

Pametna proizvodnja ima više definicija, a jedna od često korišćenih je [2, 3]: „Pametna proizvodnja koristi kognitivno računarstvo, industrijski IoT i naprednu analitiku za optimizaciju proizvodnih procesa na načine koji ranije nisu bili mogući. Pomaže organizacijama da poboljšaju osnovne poslovne metrike kao što su produktivnost, pouzdanost isporuke, kvalitet, sigurnost poslovanja i dobit, dok istovremeno smanjuje vreme zastoja i troškove poslovanja“.

Tehnologije pametne proizvodnje duboko „gledaju“ u proizvodni proces i poslovno okruženje, kao nikada ranije, kako bi izvukle informacije koje imaju opipljivu vrijednost za proizvođača.

Cilj ovog rada je da sistemski analizira modele razvoja i primene AI u proizvodnom inženjerstvu, a on sadrži sledeće celine: (i) istorijski razvoj primene AI u proizvodnom inženjerstvu, (ii) detaljnu analizu današnjih modela primene AI, (iii) neke rezultate naših istraživanja u ovoj oblasti, (iv) zaključke i buduća istraživanja.

## 2. PREGLED RAZVOJA PRIMENE AI U PROIZVODNOM INŽENJERSTVU

Istorija razvoja primene AI u proizvodnom inženjerstvu je duga više od sedamdeset godina, i obuhvata pet etapa, tabela 1 [3-7].

Tabela 1. Istorijski pregled razvoja AI u proizvodnom inženjerstvu (dopunjeno prema [3-7])

Period	Karakteristike	Elementi AI primjene u proizvodnom inženjerstvu
Rani AI razvoj i primena (1950 – 1970. god.) (nivo 1).	1950-te god: Definisan je termin Veštačka inteligencija /AI) i definisani su temeljni koncepti AI.	Bez primene
	1960-te god: Prva istraživanja AI i razvoj modela za rešavanje problema i simboličko razmišljanje.	Osnovna primena na upravljačkim jedinicama (UJ) mašina alatki za numeričko upravljanje (NC).
	1970-te god: Ekspertni sistemi se javljaju kao istaknuta AI aplikacija. Oni koriste pravila zasnovana na znanju za rešavanje specifičnih problema.	Pružaju podršku u odlučivanju u inženjerskim proizvodnim procesima (projektovanje, planiranje i upravljanje).

Robotika i automatizacija (1980 – 1990. god) (nivo 2).	1980-te god: Industrijski roboti su počeli da se integrišu u proizvodne procese, upravljani kompjuterskim sistemima.	Rani AI algoritmi za optimizaciju zadataka kao što su zavarivanje, farbanje i montaža.
	1990-te god: AI tehnike, kao što je mašinsko učenje počele su da se primenjuju u proizvodnom inženjerstvu.	Pomoću njih se vrši kontrola kvaliteta, optimizacija procesa i prediktivno održavanje. Takođe došlo je do napretka u kompjuterskom vidu za automatizovanu inspekciju.
Sistemi zasnovani na znanju (1990 – 2000. god) (nivo 3).	Ekspertni sistemi su nastavili da se razvijaju, pomažući da se definišu i primenjuju znanja specifična za domen u proizvodnim kontekstima (inženjerstvo znanja).	Ovi sistemi su pružili veliku podršku u donošenju odluka zasnovanu na pravilima i heuristici (projektovanje proizvoda, planiranje procesa i upravljanje proizvodnjom).
AI vođena podacima (od 2000. god do danas) (nivo 4).	2000-te god, su označile pomak ka modelima AI vođenim podacima, podstaknuti dostupnošću velikih skupova podataka i napretkom u računarskoj snazi.	
	Tehnike mašinskog učenja kao što su neuronske mreže, metod podržavajućih vektora i stabla odlučivanja, postale su sve popularniji za zadatke kao što su prediktivno održavanje, detekcija otkaza i optimizacija proizvodnih procesa.	
	Analitika i alati za optimizaciju zasnovani na AI, počeli su da se integrišu u proizvodne operacije, omogućavajući njihov uvid u realnom vremenu i kontinualno poboljšanje.	
Industrija 4.0 i pametna proizvodnja (2010. do danas) (nivo 5).	Koncept Industrije 4.0 naglašava integraciju AI, IoT-a, računarstva u oblaku i sajber-fizičkih sistema (CPS) u proizvodnji.	
	AI igra ključnu ulogu u razvoju pametnih fabrika, u kojima su međusobno povezane mašine i sistemi, komuniciraju i donose odluke autonomno na osnovu podataka i analitike u realnom vremenu.	
	Primena AI obuhvata: projektovanje i planiranje proizvoda, procesa i sistema, prediktivnu analitiku za održavanje, prilagodljive proizvodne procese, autonomne robote i upravljanje lancem nabavke.	

AI u proizvodnji je evoluirala od rane automatizacije i ES, do sofisticiranih aplikacija vođenih podacima koje povećavaju produktivnost, kvalitet i agilnost u proizvodnim okruženjima. Današnji napredak u AI tehnologijama nastavlja da oblikuje budućnost proizvodnog inženjerstva, vodeći ga ka inteligentnijim, efikasnijim i prilagodljivijim proizvodnim sistemima – kognitivnim tehnološkim sistema.

### 3. PRIMENA AI U PROIZVODNOM INŽENJERSTVU – ANALIZA LITERATURE

Poslednje dve decenije (od početka 21. veka) razvoja i primene AI u proizvodnom inženjerstvu, predstavlja „zlatno“ doba u ovoj oblasti. Zahvaljujući razvoju ICT i njene primene u proizvodnom inženjerstvu, stvorene su osnove za široka istraživanja i primenu AI u ovoj oblasti, što naredna analiza i pokazuje.

Ova sistemska analiza je vršena prema metodologiji PRISMA [7], a naša pitanja si bila: Q1. Koje tehnike i alati AI se primenjuju u proizvodnom inženjerstvu, i Q2. Kako AI poboljšava donošenje odluka, planiranje, analize i upravljanje procesima u proizvodnji. Za njih je bilo definisano: vremenski period analize, tip studije, AI modeli, metodologija pretrage i ocena kvaliteta studije. Uzorak je obuhvatio 286 radova, a postavljene kriterijume su zadovoljila 34 rada.

Sveobuhvatno posmatrano, sistemska analiza primene AI u proizvodnom inženjerstvu, ovde je izvršena kroz sledeće prilaze: (i) primena agenata, (ii) koncepti i integralni modeli primene AI u proizvodnom inženjerstvu, (iii) modeli učenja, (iv) generativna AI i njena primena, i (v) primena ChatGPT u proizvodnom

inženjerstvu. Analiza koja sledi odnosi se na sve navedene prilaze.

#### 3.1. Primena agenata kao AI tehnike u proizvodnom inženjerstvu

Upravljanje distribuiranom proizvodnjom, zasnovanom na agentima, je bila popularna AI tehnika primenjena na početku ovog veka. U tadašnjim, tradicionalnim centralizovanim sistemima upravljanja proizvodnjom, supervizor je donosio odluke o planiranju proizvodnje, terminiranju i raspodeli resursa.

Nasuprot ovome, u modelu agenata se distribuiraju odluke na više agenata, koji međusobno komuniciraju, kako bi postigli optimalne rezultate proizvodnje. Tradicionalni metodi optimizacije često uzimaju u obzir samo jedan domen (planiranje procesa ili terminiranje) i zanemaruju ograničenja drugog domena.

Ovo može dovesti do neoptimalnih ili čak nevažećih planova proizvodnje, zbog dinamičke prirode opterećenja mašina u realnom vremenu i uslova u pogonu. Zato je primena AI agenata, mnogo bolje rešenje. U ovoj analizi su prikazana dva karakteristična pregleda prilaza primene ove AI tehnike, tabela 2.

Tabela 2. Pregled primene agenata

Oblast	Ref./ god.	Metod	Cilj	Primena
Planiranje i terminiranje proizvodnje	[8] 2006	Primena agenata	Povećanje tačnosti planiranja i terminiranja proizvodnje	Upravljanje proizvodnjom u pogonu
Rekonfigurabilni tehnološki sistem	[9] 2009	Sistem multi agenata	Inteligentno upravljanje proizvodnjom	Distribuirano upravljanje proizvodnjom

U sistemima planiranja i terminiranja proizvodnje baziranim na agentima, primijenjeni protokoli pregovaranja agenta zahtijevaju od pojedinačnih agenata da odgovore na dolazne ponude. Zbog toga u ovom modelu je izuzetno bitno da su razvijeni baza znanja, mehanizam rezonovanja i zaključivanja [8]. Takođe, zbog autonomne i kooperativne prirode agenata, funkcije planiranja i terminiranja se mogu integrisati od višeg nivoa ka nižim. Primenom modela agenata, razvija se inovativan, agiln i rekonfigurabilni model tehnološkog sistema [9]. Tako je dobijen inteligentni distribuirani model upravljanja proizvodnjom.

Na kraju, za ovaj period analize, prva decenija ovog veka, možemo reći da je model agenata bio dominantni pristup primene AI u proizvodnji.

#### 3.2. Koncepti i modeli primene AI u proizvodnom inženjerstvu

U drugoj deceniji ovog veka je došlo do transformacije svetske privrede i ekonomije, zasnovane na digitalizaciji i AI. U proizvodnom inženjerstvu AI je proizvela velike promene u celom lancu vrednosti, a posebno u: donošenju odluka, projektovanju proizvodnje, planiranju i upravljanju proizvodnjom, održavanju, kontroli kvaliteta, uz smanjenje zastoja i troškova proizvodnje, povećanje operativnih parametara poslovanja.

U ovom poglavlju se detaljno analiziraju studije koje su razmatrale različite aspekte primene AI u proizvodnji, na nacionalnom, regionalnom ili globalnom nivou. Ovo nam može pomoći da utvrdimo naše

stanje, poredeći ga sa njima, i da na osnovu toga definišemo našu politiku u ovoj oblasti.

Tabela 3. Pregled studija o primeni AI (politike, nacionalni programi, dobra praksa)

Način	Ref. / god.	Metod	Cilj	Primena
Global Manufacturing and Industrialisation Summit (GMIS)	[10] 2020	Kontekst Industrije 4.0	Smernice za primenu AI	Definisanje četiri nivoa primene AI
Fondacija za autonomnu proizvodnju	[11] 2020	Autonomna proizvodnja	Inteligentne mašine	Samosvojna proizvodnja i održavanje
Zrelost Industrije 4.0	[12] 2020	Integracija sa funkcijama u fabrici	Model fabrike budućnosti	Široka primena modela dubokog učenja
AI kao podrška pametnoj proizvodnji	[13] 2020	Pametna proizvodnja	Unapređenje modela proizvodnje	Nacionalna politika i strategija za primenu AI
Konvergenција AI i proizvodnih tehnologija	[14] 2021	Modeliranje nelinearnih problema AI dubokim učenjem	Podići efikasnost i kvalitet proizvodnih tehnologija	Primena na različitim vrstama proizvoda
EU lider u primeni AI	[15] 2021	U modelu Industrija 4.0	Konkurentska prednost EU proizvodnje	Visoko tehnološke fabrike
Modeli dubokog učenja	[16] 2022	CNN	Pametni proizvodi	Pametna proizvodnja
Duboko učenje	[17] 2022	CNN, RBM, RNN	Pametna proizvodnja	Održavanje i kontrola kvaliteta
Analiza tehnika ML	[18] 2023	Primeri dobre prakse	Smanjiti rizike primene	Pametna proizvodnja
Bela knjiga – AI u EU proizvodnji	[19] 2023	Model zrelosti AI u proizvodnji	Ocena EU kompanija za primenu AI	Definicija KPI parametara AI
Izazovi u primeni AI	[20] 2023	Projektni model primene	Uspešna primena AI	Šest aspekata koji utiču na uspeh AI projekta u fabrici
DT za fabriku	[21] 2024	IDEFO model	Fabrika kao DT	Primena AI preko DT za fabriku
Primena generativne AI	[22] 2024	Podsticanje proizvođača	Politika primene generativne AI	Primena u proizvodnji

Prva studija [10] je prikazala analizu primene AI u 28 zemalja, tabela 3, a način na koji je definisana je bio, GMI Samit, na kome je održano više desetina panela na različite aspekte AI nejene primene u proizvodnji.

Ona je definisala i višenivovski model primene AI u proizvodnji: (i) AI šampioni, završena digitalna transformacija sa jasnom strategijom dalje primene AI, (ii) AI inovatori, jasna digitalna strategija transformacije, uključujući i AI, realizuje se po fazama. Projekat ulazi u punu primenu, (iii) AI i digitani pratioci, su organizacije koje imaju horizontalnu digitalnu integraciju (prodaja, nabavka, inženjerstvo, proizvodnja), ali ne i vertikalnu integraciju (CAD, CAPP, CAM, MES, ERP). Isto se odnosi i na elemente AI u primeni, i (iv) AI i digitalni početnici, su one organizacije koje u projekat transformacije još nisu ušle. Menadžment nema strategiju za ovaj Projekat, njihov opstanak na tržištu je pod znakom pitanja. Dokument [11] Fondacije za autonomnu proizvodnju polazi od primese da mašine u proizvodnji treba učiniti inteligentnim za donošenje odluka a u vezi sa svim pitanjima proizvodnje i održavanja. To znači da je uspostavljen i primenjen model Industrije 4.0, a podržan modelima AI, karakteriše na sledeći način ovaj model proizvodnje: (i) kontinualna optimizacija proizvodnog procesa, uz njegovu online dijagnostiku, (ii) brza reakcija na promenu parametara kvaliteta proizvodnje, (iii) bliska koordinacija mašina u procesu, (iv) intervencije ljudi koje mogu biti izvor grešaka, ukloniti, na primer reprogramiranje, (v) usavršavati proces samodijagnostike mašina, i (vi) primeniti uže tolerancijske granice kontrole. AI predstavlja zrelost primene Industrije 4.0 u praksi [12]. Ova paradigma se zasniva na sledećim činjenicama: (i) prediktivno održavanje. Primenom modela dubokog mašinskog učenja (DML) i analize velikih podataka (BDA), postižu se velike uštede i smanjuju zastoji, (ii) obezbeđenje kvaliteta i inspekcija. Primenom kompjuterske vizije i modela DML vrši se analiza i prepoznavanje grešaka na proizvodima, posle proizvodnih operacija i na liniji montaže, (iii) optimizacija lanaca nabavke. AI modeli se ovde mogu efikasno koristiti za upravljanje zalihama, predviđanje potreba i terminiranje isporuka, (iv) primena generativne AI u inženjerskim aktivnostima. Brza izrada prototipa i unapređenje proizvoda, (v) digitalni blizanci i simulacija. AI modelima u ovoj oblasti se smanjuju troškovi održavanja, predviđaju otkazi i optimizuje potrošnja energija, i (vi) AI modeli za informacionu bezbednost. Dalekoistočne zemlje (Japan, Južna Koreja, Kina, Tajvan i Indija) su krajem prošle decenije donele nacionalne programe za AI, koji su uključivali i njenu primenu u proizvodnji [13]. Ovi Programi su definisali model Pametne proizvodnje, kao okvir modela fabrike, zasnovanog za AI. U ovom trenutku primena AI u proizvodnji pokriva širok spektar modela mašinskog učenja, gde je ključ uspeha prepoznavanje obrazaca za visoko nelinearne podatke, analiza nestrukturiranih podataka, robusnost ponavljajućih zadataka i visoka interoperabilnost [14].

Radi ilustracije napred navedenih činjenica, navedeni su sledeći primeri: upravljanje autonomnim vozilom, robot za montažu u automobilskoj industriji, prediktivno održavanje vetro-generatora, upravljanje kvalitetom proizvodnje u čeličani i upravljanje kvalitetom proizvodnje poluprovodnika. Svi navedeni primeri govore o visokom potencijalu konvergencije AI i različitih problema iz proizvodnje koji mogu biti rešeni. Analize prikazane u [15] pokazuju da EU više primenjuje AI u proizvodnji od industrijski razvijenih zemalja Dalekog istoka, kao i Severne Amerike, u proseku oko 30%. Ove činjenice govore o značaju simbioze istraživanja, razvoja i primene AI u proizvodnji kroz model Industrija 4.0, koji je kao model „rođena“ u EU. Dalje analize pokazuju da se AI u EU najviše primenjuje u inteligentnom održavanju (MES), kontroli kvaliteta i inspekciji (MES) i planiranju i upravljanju proizvodnjom (ERP). Studija [16], govori o izazovima i mogućnostima primene modela dubokog učenja u pametnoj proizvodnji. Analiza pokazuje da je CNN najbolji model, a izazovi su: kvalitet podataka, bezbednost podataka i pouzdanost modela učenja. Sve ove analize su izvršene za primenu AI u održavanju, kontroli kvaliteta, kolaborativnim robotima i lancima nabavke.

Produbljena analiza primene modela dubokog učenja (DML) u pametnoj proizvodnji je izložena u studiji [17]. Najnovija istraživanja pokazuju da se u modelima pametne proizvodnje, samo 2% podataka od svih generisanih, relevantno za korišćenje i donošenje odluka, tako da se ovi prilazi nazivaju i podacima vođeni sistemi na bazi AI, podržani dubokim učenjem (CNN, RBM, RNN). Sve ovo je ilustrovano primerima iz održavanja i kontrole kvaliteta. Studija [18] daje detaljni pregled primene tehnika mašinskog učenja sa primenom u pametnoj proizvodnji. Međutim primeri dobre prakse, imaju i velike izazove u primeni, o kojima treba voditi računa: prikupljanje i menadžment podacima, ljudski resursi (eksperti za ML), infrastruktura (hardware, software), rizici informacione bezbednosti i poslovni modeli dobavljača. Model zrelosti primene AI u EU kompanijama je prikazan u [19]. Za njega su definisani KPI parametri, na nivou procesa, CPS, fabrike, koji je povezan sa RAMI modelom integracije po horizontali i vertikali. Model zrelosti ocenjuje proces, CPS i fabriku u pet dimenzija: produktivnost, vreme izlaska na tržište, uloga radnika, otpornost, društvo i životna sredina. U studiji [20] su analizirani različiti aspekti primene AI u pametnoj proizvodnji, a neki od najvažnijih izazova su: kvalitet podataka za modele dubokog učenja, integracija AI modela u funkcije i sisteme fabrike, troškovi primene, spremnost okruženja fabrike za primenu AI modela, zakonska i etička pravila i ograničenja, i otpor zaposlenih prema promenama. Sve ovo dovodi do toga da sa Projektom AI u fabrici treba vrlo pažljivo

postupati. Poseban izazov za primenu AI u fabrici je uraditi to pomoću inteligentnog modela DT fabrike [21]. Fabrika je modelirana kao hijerarhijski sistem preko IDEFO modela, a zatim je za sve komponente razvijen virtuelni dvojnik. Ceo sistem je laboratorijski proveren na jednom primeru. Studija [22] govori o primeni generativne AI u proizvodnji u SAD, koju je uradilo Udruženje proizvodnih inženjera SAD. Naime, smatra se da je generativna AI neposredna budućnost primene AI u proizvodnji, pa na nacionalnom nivou treba uspostaviti politiku i strategiju za podsticanje njene primene, što je u studiji i detaljno navedeno.

Dakle, zaključujući analizu ovog poglavlja možemo da konstatujemo sledeće: (i) industrijski razvijene zemlje imaju svoje nacionalne i regionalne strategije i programe za primenu AI u proizvodnji, (ii) model Industrije 4.0 je najbolja baza i okvir za primenu AI u proizvodnji, a posebno model pametne proizvodnje, koji se razvija iz ovog koncepta, i (iii) sve rečeno govori da i Srbija treba da se ozbiljno pozabavi ovim trendovima i pristupima, a sve sa ciljem razvoja i izgradnje nove industrije.

### 3.3. Analiza modela učenja primenjenih u proizvodnom inženjerstvu

Suština današnje primene AI u proizvodnji, je primena različitih modela učenja, posebno onih koji se odnose na duboko učenje, radi rešavanja različitih inženjerskih, poslovnih i menadžerskih problema. Zato je ova oblast izdvojena kao posebna celina, a primeri primene ovih modela su dati u tabeli 4.

Nadgledano (duboko učenje) i nenadgledano učenje su ranije vrlo korišćeni modeli učenja za primenu AI u proizvodnji. Jedan primer primene ovih modela je dat u [23], a on se odnosi na predviđanje kvaliteta tehnološkog procesa u valjaonici čelika. Radi modeliranja procesa valjanja online se prate: sila valjanja, brzina i temperatura procesa, a svi ovi parametri se prate preko šest karakteristika. Korišćene su sledeće tehnike učenja: duboko učenje – Bajesovi klasifikatori, drvo odluka, K najbliži sused i metod podržavajućih vektora, i učenje – K srednjih vrednosti. Uzorak za definisanje učenja je obuhvatio 470 primera merenja, a rezultati u primeni su bili odlični, što je i pokazano. U studiji [24] je opisan klaster model za unapređenje kvaliteta proizvoda kroz sve njegove faze proizvodnje (livenje, obrada plastičnim deformisanjem, obrada rezanjem i termička obrada). Kao model dubokog učenja korišćen je metod podržavajućih vektora, pri čemu je uzorak učenja obuhvatio 45 parametara sa 360 uzoraka. Tako je uspostavljen model za online praćenje kvaliteta proizvoda kroz navedene faze proizvodnje. Model inteligentne proizvodnje, podržan AI se zasniva na četiri paradigme [25]: (i) inteligentna kolaborativna proizvodnja vođene modelom, (ii)

usluga u oblaku, zasnovana na znanju za preduzeće, (iii) kooperativni radionički oblaka čovek-mašina-materijal, i (iv) autonomne inteligentne proizvodne jedinice (CPS). Tako na primer prva paradigma znači

da je cloud model svih vrsta proizvodnih resursa/kapaciteta, pa zatim inteligentnu tehnologiju oblaka treba koristiti za automatsko usklađivanje zahteva za proizvod i zahteva za resursima/uslugama.

Tabela 4. Pregled primene AI modela učenja u proizvodnji

Način	Ref. / god.	Metod	Cilj	Primena
Tri parametra procesa	[23] 2013	4 Modela učenja	Bolji kvalitet valjanog čelika	Upravljanje kvalitetom procesa
45 parametara procesa	[24] 2013	Metod podržavajućih vektora	Isti kvalitet svakog proizvoda	Praćenje kvaliteta 4 tehnološka procesa
Paradigme inteligentne proizvodnje	[25] 2017	Duboko učenje	Inteligentna proizvodnja	Kolaborativna proizvodnja vođena modelom
Razvoj primene ML u pametnoj proizvodnji	[26] 2018	ANN/CNN	Stanje primene ML u industriji SAD	Digitalna proizvodnja
Razvoj modela dubokog učenja	[27] 2018	Ekstremno pojačavanje gradijenta (XG Boost)	Unapređenje kvaliteta proizvodnje	Pametna proizvodnja u Bosh-u
Primena elemenata Industrije 4.0	[28] 2018	CNN, metod podržavajućih vektora, model slučajne šume, rekurentna NN i Bjaesovi klasifikatori	Inteligentno odlučivanje	Pametna proizvodnja
Industrijski inteligentni model	[29] 2018	„ABCDE“ model	Izgradnja AI platforme za pametnu proizvodnju	Inteligentni CPS (mašina alatka)
Primena u MES modelu	[30] 2019	CNN	Razvoj inteligentne proizvodnje	Inteligentno upravljanje u pogonu (MES)
Otkrivanje grešaka na montaži	[31] 2019	XG Boost, model slučajne šume i metod podržavajućih vektora	Otkrivanje grešaka	Montažna linija Volkswagena
Prediktivno održavanje	[32] 2019	Online praćenje stanja	Nova model održavanja	Nega mašina

Na osnovu ovoga definisati inteligentnu infrastrukturu za proizvod – podršku. Takođe, ti operativni centri inteligentnih proizvodnih platformi u oblaku moraju podržati vođene modelom kolaborativne aktivnosti ukupnog životnog ciklusa proizvoda: istraživanje i razvoj, proizvodnja, upravljanje proizvodnjom, logistika i usluge podrške. Svi navedeni elementi su podržani različitim modelima AI učenja. Studija, izložena u [26] je obuhvatila analizu preko 4000 referenci iz oblasti napredne proizvodnje, sa aspekta primene i mogućnosti primene modela mašinskog učenja. Date su preporuke za bržu primenu ovih modela u naprednoj proizvodnji, i to kao: podrška menadžemta u primeni i njihovo veće korišćenje za donošenje odluka, uspostavljanje i korišćenje digitalne baze znanja, primena na životni ciklus proizvoda i osnova od koje treba početi za uspešnu primenu ML je digitalna proizvodnja. U proizvodnji se generiše obilje podataka, iz različitih izvora i u različitoj formi, pa ih kao takve treba urediti i pripremiti za korišćenje u modelima učenja [27]. Zato se izgradnja modela učenja

za pametnu proizvodnju sastoji od četiri koraka: (i) prikupljanje sirovih podataka, (ii) njihova obrada i uređivanje, (iii) razvoj i testiranje modela učenja (70% se koristi za razvoj modela učenja, a 30% za njegovo testiranje (verifikacija)), i (iv) primena modela u praksi, kroz njegovu validaciju. Ona (validacija) obuhvata sledeće korake: tačnost, osetljivost, preciznost i F – mera. Sve ovo je ilustrovano sa primerom modela dubokog učenja iz pametne proizvodnje Bosh-a. Studija [28] daje pregled primene modela dubokog učenja u proizvodnji. Elementi Industrije 4.0, kao što su internet stvari (IoT), veliki podaci (BDA), digitalni bliznaci (DT) i cloud računarstvo (CC), čine idealan okvir za primenu modela dubokog učenja, kao što su: CNN, metod podržavajućih vektora, model slučajne šume, rekurentna NN i Bjaesovi klasifikatori, u pametnoj proizvodnji. Ovi prilazi dubokog učenja u ovoj studiji su ilustrovani primerima iz: kontrole kvaliteta i inspekcije, prediktivnog održavanja i dijagnostike stanja. Jedan prilaz razvoju modela industrijske AI, je definisan kao „ABCDE“ model, i

izložen je u [29]. Značenje oznaka u modelu je: A – analitika tehnologije, čini srž modela AI eco proizvodnog sistema (podaci, software/hardware platforma, CPS, B – tehnologija velikih podataka (BDA), C – cloud i cyber tehnologija, D – domen znanja, E – dokaz. Tehnologija velikih podataka i cloud su bitni elementi modela koji obezbeđuju izvor podataka koji čine platformu za AI. Znanje iz domena i dokazi su ključni elementi zbog: (i) razumevanja problema i fokusiranja moći AI na njegovo rešavanje, (ii) razumevanja sistema i prikupljanja pravih podataka, (iii) razumevanje fizičkih značenja parametara i njihove veze u modelu, i (iv) razumevanja promene ovih parametara od jednog do drugog CPS-a. Sve navedno je ilustrovano primerom primene na CNC mašini alatki, kao pilot modelu CPS sistema. Razvoj i primena modela Industrije 4.0 u pogonu je okrenuta inteligentnom razvoju MES modela, što je nalaizirano u [30]. I za njegovu primenu nophodno je korišćenje modela dubokog učenja, pre svega CNN modela. Jedan primer primene modela dubokog učenja u automobilske industriji je prikazan u [31]. Radi se o montažnoj liniji Volkswagena, gde je uzorak obuhvatio 18.148 jedinica proizvoda sa 29 karakteristika. Razvijeni model je omogućio otkrivanje grešaka pri montaži sa tačnošću od 98.25% što je bilo zadovoljavajuće. Studija [32] prikazuje primenu modela dubokog učenja za prediktivno održavanje (online praćenje stanja mašine i intervenisanje prema potrebi). U radu je pokazano da se za praćenje stanja (negu mašina), za modele dubokog učenja najviše koriste konvolucione neuronske mreže (CNN) i rekurentne neuronske mreže (RNN). Očekuje se da će se istraživanja u ovoj oblasti

Tabela 5. Pregled primene generativnih AI (GenAI) modela u proizvodnom inženjerstvu

Način	Ref. / god.	Metod	Cilj	Primena
Poslovni i tehnološki procesi	[33] 2023	GenAI analitika	Transformacija procesa	U modelu Industrija 4.0
Model od tri nivoa	[34] 2023	Integracija	Autonomni sistem	Fabrike budućnosti
GenAI model	[35] 2024	CAD model	Novi model projektovanja	Projektovanje proizvoda
Arhitektura GenAI modela	[36] 2024	Četiri nivoa	Unapređenje poslovanja	Pametna fabrika
GenAI kao podrška Industriji 4.0	[37] 2024	Integracija	Primena GenAI koncepta	Fabrika sa modelom Industrija 4.0
Identifikacija 10 oblasti menadžmenta inovacijama	[38] 2024	Novi model upravljanja inovacijama	Brža primena inovacija u praksi	Menadžment inovacijama

Za nekoliko elemenata Industrije 4.0 je izvršena primena GenAI, i to: predviđanje potražnje i marketinška strategija, projektovanje novih proizvoda, optimizacija radne snage i njihovih veština, poboljšanje kontrole kvaliteta i prediktivno održavanje [33]. GenAI omogućava menadžerima da transformišu proizvodnju optimizacijom procesa, poboljšanjem projektovanja

razvijati u sledećim pravcima: (i) za velike skupove podataka otvorenog koda razvijace se CNN modeli do 150 slojeva, sa po 10 skrivenih slojeva, (ii) veće korišćenje domena znanja (ne samo znanja iz procesa), (iii) vizuelizacija podataka učenja, (iv) transfer znanja dubokog učenja, (v) uravnoteženje klasa znanja o stanju (zdravlju) mašina.

Na kraju analize modela učenja primenjenih u proizvodnji, možemo izvuće sledeće zaključke: (i) modeli dubokog učenja su danas široko primenjeni, posebno u održavanju i kontroli kvaliteta, i (ii) očekuje se da će šira primena elemenata Industrije 4.0 podstaći dalji razvoj i primenu modela dubokog učenja u proizvodnji.

### 3.4. Generativna AI i njena primena u proizvodnom inženjerstvu

Generativni AI (GenAI) modeli obično koriste algoritme mašinskog učenja za analizu obrazaca i odnosa u postojećim podacima, a zatim generišu novi sadržaj koji je ljudima često teško ili nemoguće napraviti, što je prilaz koji se odnosi i na proizvodnju. Tako se danas istražuju i razvijaju generativni modeli AI za: projektovanje proizvoda i projektovanje za aditivnu proizvodnju (AM), nauka o materijalima, optimizacija poslovnih i tehnoloških procesa, robotika i automatizacija, prediktivno održavanje, kontrola kvaliteta i upravljanje lancima snadbevanja.

Ograničenja u primeni ovih AI modela mogu biti: kvalitet podataka, interoperabilnost, skalabilnost i cyber bezbednost. Pregled izabranih primera primena generativne AI je dat u tabeli 5.

proizvoda, poboljšanjem kvaliteta proizvoda, podižući tako primenu inovacija u proizvodnji. Istovremeno, GenAI tehnologije olakšavaju prediktivnu analitiku za predviđanje potražnje, kao i poboljšanje marketinške strategije i identifikovanje tržišnih trendova. Sve navedeno je ilustrovano sa nekoliko primera. Posebno interesantna analiza je prikazana u studiji [34], koja se

odnosila na mesto i ulogu GenAI u fabrikama budućnosti. Predlaže se model od tri nivoa: asistencija, preporuka i autonomni sistemi. Asistencija znači da GenAI treba da generiše programski kod za mašinu alatku, a inženjer samo da ga pregleda, dok preporuka znači da GenAI pomogne tehničaru održavanja da u prediktivnom modelu izabere potrebne instrukcije održavanja, korak po korak, uključujući i rezervne delove. I najzad, autonomni sistemi u fabrici budućnosti podržani GenAI, su oni koji će imati samoregulaciju sposobnosti i prilagođavanje nepoznatim situacijama.

Za fabriku budućnosti AI će biti kamen temeljac njenog poslovanja, a ključni model će biti GenAI [35]. Evo kako taj novi prilaz – GenAI izgleda na projektovanju proizvoda. GenAI donosi revolucionarne promene u projektovanju proizvoda, donoseći jedinstven spoj kreativnosti i efikasnosti. Preciznije, generativni alati za pretvaranje teksta u sliku pomažu projektantima da premoste jaz između koncepata i modela spremnih za proizvodnju. Posao inženjera projektanta proizvoda je da definiše specifične ciljeve projektovanja, uzimajući u obzir metrike projektovanja, kao što su: ciljevi održivosti, troškovi proizvodnje, usklađenost proizvoda sa zahtevima kupca (tržišta) i uslova proizvodnje. GenAI sistemi generišu različite opcije projektovanja na osnovu ovih unapred definisanih parametara.

U studiji [36] je prikazana arhitektura GenAI modela, koja obuhvata četiri nivoa: (i) hardware infrastruktura, (ii) rad na platformi IIoT (industrijski internet stvari) PTC ThingWorx koja upravlja podacima poslovnog (prodaja, nabavka), inženjerskog (CAD, CAM, PLM) i proizvodnog informacionog sistema (ERP, MES), (iii) modeli mašinskog učenja za GenAI – Azure OpenAI Service, i (iv) razvoj aplikacija za

specifične probleme organizacije. U studiji [37] se govori o tome kako model Industrija 4.0 može da bude baza za primenu GenAI koncepta. U tom smislu se predlaže da svaka organizacija, koja krene ovim putem, mora definisati poseban projekat integracije. Studija [38] opisuje buduće mogućnosti istraživanja u vezi sa primenom GenAI u menadžment inovacija, gde je identifikovano deset oblasti primene ovog modela u inovacijama.

Završavajući ovu analizu, možemo da zaključimo sledeće: (i) GenAI je novi model primene AI u proizvodnji, čije mogućnosti i primeri primene se još istražuju, i (ii) može se reći da prva iskustva o njemu govore da je ovaj prilaz više orjentisan korisniku od drugih modela dubokog učenja, što predstavlja dobro osnovu za njegovu bržu penetraciju u proizvodnju.

### 3.5. Primena ChatGPT u proizvodnom inženjerstvu

ChatGPT je moćan jezički model AI, koji se može primijeniti u različitim industrijama za automatizaciju zadataka, poboljšanje efikasnosti i poboljšanje korisničkog iskustva.

Tako na primer u pametnoj fabrici, ovaj alat AI nam može biti od koristi za: (i) pomoć MES-u generiranjem izvještaja, pružanjem povratnih informacija u realnom vremenu i omogućavanjem daljinskog nadzora i kontrole proizvodnih procesa, (ii) pomoć ERP sistemima generiranjem izveštaja, pružanjem personalizovane korisničke podrške i optimizacijom logistike lanca snabdevanja, (iii) pomoć QMS-u analizom podataka iz procesa kontrole kvaliteta kako bi se identifikovali nedostaci i uzroci grešaka, i (iv) pomoć PLM-u generiranjem digitalnih blizanaca proizvoda ili sistema, omogućavajući praćenje i simulaciju u realnom vremenu, proizvodnje i održavanja. Jedan pregled primene ovog modela AI je prikazan u tabeli 6.

Tabela 6. Pregled primene ChatGTP modela u proizvodnom inženjerstvu

Način	Ref. / god.	Metod	Cilj	Primena
Prikupljanje i analiza znanja	[39] 2023	Pretraživanje znanja	Definisanje značaja za pojmove (26)	Znanja o Industriji 5.0
IoT	[40] 2023	Analiza informacija iz proizvodnje	Generisanje izveštaja	Proizvodnja
Prezentacija znanja	[41] 2023	Odgovori na pitanja	Obuka inženjera	Pomoć inženjeru
Platforma poslovnog i tehnološkog znanja	[42] 2023	Online upravljanje	Podrška pametnoj proizvodnji	Model Industrije 4.0

Dakle, možemo da konstatujemo da se primena AI u proizvodnji sve više kreće od algoritamske ka lingvističkoj inteligenciji, gdje interaktivne aktivnosti između ljudi i mašine igraju aktivnu i važnu ulogu na mreži u realnom vremenu. ChatGPT je pokazao svoju efikasnost u pružanju sveobuhvatnih informacija i znanja o Industriji 5.0 [39]. Za definisanih 26 ključnih reči (AI za naprednu automatizaciju, metaverse učenje

i optimizacija, ...), dati su zadovoljavajući odgovori iz velike baze znanja koja je korišćena. Studija [40] govori o izazovima primene ovog modela AI u različitim oblastima, ali je za nas interesantan kontekst primene IoT u proizvodnji. Tačnije, kako informacije koje dolaze iz proizvodnje, mogu biti iskorišćene za primenu ovog alata, što je već navedeno u uvodu ovog poglavlja. Proizvodnja obuhvata veliki broj složenih



zadataka, koji zahtevaju veliko znanje i iskustvo za izvršenje. S brzim razvojem AI, posebno sa pojavom jezičkih modela kao što je ChatGPT, otvaraju se nove mogućnosti za obezbeđenje znanja kroz razgovor [41]. U ovoj studiji je pokazano da ChatGPT kao generativni model, pruža obećavajuće kreacije na sveobuhvatan, kreativan, i objektivan način, pokazujući na taj način svoj potencijal da podrži radove sažimanja, sinteze i stvaranja. Takođe studija je prikazala i troslojni model razvijen za potrebe proizvodnje i obuke inženjera. ChatGPT će u konceptu Industrije 4.0 biti platforma poslovnog i tehnološkog znanja koja će biti od velike pomoći inženjerima i menadžerima da online upravljaju pametnom proizvodnjom [42].

Zaključujući analizu ovog poglavlja možemo da konstatujemo da je ovaj model (ChatGPT) u povoju, pa se tek očekuju nova iskusva o njegovoj primeni u proizvodnji.

Na kraju ove detaljne analize možemo da konstatujemo da AI u proizvodnji ulazi u novu fazu razvoja i primene, u tabeli 1, navedena kao nivo 5, koji se odnosi na pametnu proizvodnju, a osnovu te primene čini model GenAI.

#### 4. NEKI REZULTATI NAŠIH ISTRAŽIVANJA

Ova analiza se odnosi samo na rezultate istraživanja autora u ovoj oblasti. Naime, sa zadovoljstvom možemo da konstatujemo da je još sredinom osamdestih godina prošlog veka, pod rukovodstvom prof. dr Vladimira Milačića, na Mašinskom fakultetu u Beogradu počeo da se realizuje istraživački program – Inteligentni tehnološki sistemi, gde je prvoimenovani autor imao značajno mesto i ulogu. Kao mlad istraživač, uradio je i odbranio doktorsku tezu 1988. godine, iz oblasti razvoja ekspertnog sistema za održavanje mašina alatki (EXMAS), što je verifikovano i najznačajnijim referencama tog vremena [43 - 45]. On je bio knowledge-based sistem, zasnovan na IF-THEN pravilima, kojih je bilo 264. Baza znanja je imala dva domena znanja: činjenice i pravila. ES je imao tri modula: (i) komunikacioni interface, (ii) shell ES (bazu znaja i inference engine), (iii) procesor (prepoznavanje dijagnoze i planova održavanja), a razvijen je u Prolog jeziku. Istraživanja u oblasti ES su nastavljena i u oblasti inspekcije na CMM [46], razvojem modela za inspekciju kutijastih delova na CMM (EXINS), takođe verifikovan najznačajnijom referencom u tom vremenu. I ovaj ES je imao sličnu strukturu kao prethodni, ali je ovde bio specifičan zadatak – definisanje Plana inspekcije za kutijaste delove, koji je obuhvatio tolerancije dužina, uglova, oblika i položaja. I ovaj ES je verifikovan na CMM Zeiss Opton 850, tokom devedesetih godina prošlog veka. Kasnije, ova istraživanja su nastavljena, da bih krajem druge decenije ovog veka ovaj autor razvio originalni model

virtuelne proizvodne metrologije (CPM<sup>3</sup> – Cyber physical manufacturug metrology model), takođe verifikovan u velikom broju referenci najznačajnijih međunarodnih časopisa, a i Monografijom [47], koju je izdao Springer, a za nju je dobijena Nagrada grada Beograda za nauku, 2019. god, kao jedno od najvećih nacionalnih priznanja za nauku. Ovaj model je obuhvatio i inteligentni plan inspekcije, kao direktnu primenu AI u ovoj oblasti.

Ovaj kratak pregled nam govori o tome da i na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na Katedri za proizvodno mašinstvo, postoji zavidna istorija o razvoju i primeni AI u proizvodnom inženjerstvu – održavanje i kvalitet.

#### 5. AI U PROIZVODNOM INŽENJERSTVU – ŠTA DALJE ?

Budućnost proizvodnje je pametna proizvodnja, ili drugačije, puna primena modela Industrije 4.0 u pametnoj fabrici. U takvom sledu događaja, uloga AI će biti velika i značajna, što znači da će ona primenjivati za [19, 20, 34]: (i) digitalnu proizvodnju, koja će biti zasnovana na AI, gde će kreirati digitalne verzije fizičkih proizvoda, omogućavajući virtuelnu izradu prototipa, simulaciju i testiranje, pre realne proizvodnje, (ii) projektovanje za proizvodnju, AI će pomoći da se stvore proizvodi pogodni za proizvodnju, koji će zadovoljiti sve zahteve kupca, ekologije uz štednju resursa, (iii) optimizacija procesa proizvodnje, AI može analizirati proizvodne podatke kako bi se optimizirali proizvodni procesi, smanjujući potrošnju energije, otpad i troškove, (iv) inteligentno planiranje proizvodnje, zasnovano na AI može optimizirati proizvodne resurse, na osnovu predviđanja potražnje, ograničenja lanca snabdevanja i proizvodnih kapaciteta, (v) optimizacija lanca snabdevanja, se pomoću AI vrši tako da se optimiziraju zalihe, logistika i rute isporuke, smanjujući troškove i skraćujući vreme isporuke, kao i upravljanje rizikom, (vi) automatizacija i kolaborativni roboti, koriste AI algoritme za optimizaciju zadataka montaže, zavarivanja i inspekcije. Koboti sa AI povećavaju produktivnost i smanjuju troškove rada, (vii) proširena stvarnost (AR) i digitalni blizanci (DT) podržani AI se koriste za simulaciju procesa, mašina i sistema, a radi njihovog održavanja, (viii) praćenje stanja i prediktivno održavanje, koriste algoritme mašinskog učenja za analizu podataka o performansama opreme, predviđajući kada je održavanje potrebno i proaktivno planirajući održavanje, smanjujući zastoje i povećavajući ukupnu efikasnost opreme, (ix) kontrola i obezbeđenje kvaliteta, AI se koristiti za analizu podataka o kvalitetu proizvoda u realnom vremenu, otkrivanje nedostataka i grešaka, uz omogućavanje brzih korektivnih radnji za poboljšanje kvaliteta proizvoda, (x) analitika podataka zasnovana na AI će anali-

zirati velike količine proizvodnih podataka (BDA), kako bi se identifikovali trendovi, obrasci ponašanja i korelacije, omogućavajući donošenje odluka na osnovu podataka, i (xi) sajber - sigurnosni sistemi podržani AI mogu otkriti prijetnje i odgovoriti na njih u realnom vremenu, štiteći se od sajber-napada.

Ovo su neki pravci budućih oblasti primene AI u pametnoj fabrici, a kako tehnologija AI (GenAI, ChatRTG) nastavlja da se razvija, možemo očekivati da će se u budućnosti pojaviti još inovativnije aplikacije, kao platforme AI za pametne fabrike. Ovakvi modeli su već sada u eksperimentalnoj fazi razvoja (AWS, Azure, IBM Maximo AI, SAP Leonardo i druge).

## 6. ZAKLJUČAK

Pošto je osnovni kontekst ovog rada AI u proizvodnom inženjerstvu, u zaključku možemo da ukažemo i na trendove budućeg razvoja AI, koji će imati i direktnog uticaja na njenu primenu u pametnoj proizvodnji. Nekoliko osnovnih trendova razvoja AI su: (i) opšta AI (GAI), se odnosi na hipotetičke sisteme AI, koji će da poseduju AI rešenja nalik ljudskoj sposobni da rasuđuje, uči i primenjuje znanje u širokom spektru zadataka. U tom slučaju GAI bi mogao nadmašiti ljudsku inteligenciju u mnogim područjima, (ii) edge AI, se odnosi na upotrebu AI i mašinskog učenja u graničnim oblastima, gde se podaci generišu i obrađuju u realnom vremenu, bez potrebe za centraliziranom obradom, (iii) transfer učenja, je tehnika u kojoj AI modeli mogu učiti iz jednog zadatka ili domena i primeniti to znanje na drugi povezani zadatak ili domen, bez potrebe za ponovnim učenjem, i (iv) kvantna AI, se zasniva na kvantnom računarstvu, koje ima potencijal da unapredi AI, obezbeđujući nove metode za mašinsko učenje, optimizaciju i simulaciju, što bi moglo dovesti do otkrića u oblastima kao što su pametna proizvodnja, medicina, finansije i klimatsko modeliranje.

Sve navedene činjenice govore o velikoj perspektivi razvoja i primene AI i u pametnoj fabrici.

## LITERATURA

- [1] Lihui Wang, From Intelligence Science to Intelligent Manufacturing, *Engineering*, Volume 5, Issue 4, Pages 615-618, 10.1016/j.eng.2019.04.011, 2019.
- [2] Kiritsis D, Hodkiewicz M, Lazaro O, Lee J, N, J, eds. Data-Driven Cognitive Manufacturing - Applications in Predictive Maintenance and Zero Defect Manufacturing. Lausanne: Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/978-2-88966-583-9>, 2021.
- [3] Vidosav D. Majstorović, *Cognitive Manufacturing, Keynote Lecture, Conference Proceedings Mechanical Technologies and Structural Materials*, Split, Croatia, 21 - 22 September 2023. [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <http://www.strojarska-tehnologija.hr>.
- [4] Julie Basello and Shannon Feeley, The History of AI in Manufacturing, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://blog.radwell.com/the-history-of-ai-in-manufacturing>.
- [5] Evelyn Dujack, AI in manufacturing: Where it's been and where it's going, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.controleng.com/articles/ai-in-manufacturing-where-its-been-and-where-its-going/>.
- [6] The Rise of AI in Manufacturing: A Brief History, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.khenda.com/post/the-rise-of-ai-in-manufacturing-a-brief-history>.
- [7] Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA), [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.prisma-statement.org/>.
- [8] Shen, Weiming & Wang, Lihui & Hao, Qi. (2006). Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: A state-of-the-art survey. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, IEEE Transactions on. 36. 563 - 577. 10.1109/TSMCC.2006.874022.
- [9] Leitão Paulo. Agent-Based Distributed Manufacturing Control: A State-of-the-Art Survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 22. 979-991. 10.1016/j.engappai.2008.09.005, 2009.
- [10] Dr. Bashar El-Jawhari, et al., PwC's An introduction to implementing AI in manufacturing, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.pwc.com/gx/en/industrial-manufacturing/pdf/intro-implementing-ai-manufacturing.pdf>, 2020.
- [11] Brian McCarson, Eight Key Considerations when Implementing AI in Manufacturing, Planning for Success in your Journey to Implementing AI, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.rtin-sights.com/wp-content/uploads/2020/09/-AI-in-Manufacturing-Ebook-092-020-3.pdf>, 2020.
- [12] AI in Manufacturing, Moving from Aspirations to Implementations, White paper, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.connection.com/manufacturing#form>.
- [13] AI Enablement on the way to smart manufacturing, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www2.deloitte.com/content/dam/-Deloitte/cn/Documents/cip/deloitte-cn-cip-ai-manufacturing-application-survey-en-200116.pdf>, 2020.
- [14] Kim, Sung & Kong, Jun & Lee, Jiho & Lee, Seungchul. Recent Advances of Artificial Intelligence in Manufacturing Industrial Sectors: A Review. *International Journal of Precision Engineering and*

- Manufacturing*. 23. 10.1007/s12541-021-00600-3, 2021.
- [15] Scaling AI in Manufacturing Operations, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.-sogeti.ie/explore/reports/scaling-ai-in-manufacturing-operations/>, 2021.
- [16] Xu J, Kovatsch M, Mattern D, Mazza F, Harasic M, Paschke A, Lucia S. A Review on AI for Smart Manufacturing: Deep Learning Challenges and Solutions. *Appl. Sci.* 12, 8239. 10.3390/app12168-239, 2022.
- [17] Pawar Prajakta & Adhav, Mr & Naik, Miss & Choudhari, Miss & Tonge, Miss. (2022). Methods and Applications of Deep Learning for Smart Manufacturing. *GIS Science Journal*. Volume 9, Issue 5, pp 641-655. [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: [https://www.resea-rchgate.net/publication/362520050\\_Meth ods\\_and\\_Appli-catio-ns\\_of\\_Deep\\_Learning\\_for\\_Smart\\_Manufacturing](https://www.resea-rchgate.net/publication/362520050_Meth ods_and_Appli-catio-ns_of_Deep_Learning_for_Smart_Manufacturing), 2022.
- [18] Plathottam, Siby Jose & Rzonca, Arin & Lakhnori, Rishi & Iloeje, Chukwunwike. A review of artificial intelligence applications in manufacturing operations. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*. 5. 10.1002/amp2.10159, 2023.
- [19] Makris S. Alexopoulos, et al, (Artificial Intelligence In Manufacturing, White paper, Prepared by the Artificial Intelligence in Manufacturing Network – AIM - NET. 10.13140/RG.2.2.23010.13763, 2023.
- [20] Balasubramanian, S & Scholar II, Research. Integration of Artificial Intelligence in the Manufacturing Sector: A Systematic Review of Applications and Implications. *International Journal of Production Technology and Management*. Vol. 14. Pages 1-11. 10.17605/OSF.IO/3XPWN, 2023..
- [21] Urgo Marcello, Walter Terkaj and Gabriele Simonetti. Monitoring manufacturing systems using AI: A method based on a digital factory twin to train CNNs on synthetic data. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 50, 249 - 268. 10.1016/j.cirpj.2024.03.005, 2024.
- [22] Kathryn Wengel, Working Smarter: How Manufacturers Are Using Artificial Intelligence. White paper. [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://nam.org/wp-content/uploads/2024/05/NAM-AI-Whi tepaper-2024-1.pdf>, 2024.
- [23] Lieber Daniel & Stolpe, Marco & Konrad, Benedikt & Deuse, Jochen & Morik, Katharina. Quality Prediction in Interlinked Manufacturing Processes based on Supervised & Unsupervised Machine Learning. *Procedia CIRP*. 7. 193–198. 10.1016/j.procir.2013.05.033, 2013.
- [24] Wuest, Thorsten & Irgens, Chris & Thoben, Klaus-Dieter. An approach to quality monitoring in manufacturing using supervised machine learning on product state data. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 25. 1167-1180. 10.1007/s10845-013-0761-y, 2014.
- [25] Li, Bo & Hou, Bao-cun & Yu, Wen-tao & Lu, Xiaobing & Yang, Chun-wei. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*. 18. 86-96. 10.1631/FITEE.1601885, 2017.
- [26] Sharp Michael & Ak Ronay & Hedberg, Thomas. A Survey of the Advancing Use and Development of Machine Learning in Smart Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 48. 10.1016/j.jmsy.-2018.02.004, 2018.
- [27] Carbery, C. M, Woods, R., & Marshall, A. H. A New Data Analytics Framework Emphasising Pre-processing in Learning AI Models for Complex Manufacturing Systems. In Z. Yang, D. Yang, K. Li, M. Fei, & D. Du (Eds.), *Intelligent Computing and Internet of Things - First International Conference on Intelligent Manufacturing and Internet of Things and 5th International Conference on Computing for Sustainable Energy and Environment, IMIOT and IC-SEE 2018*, Proceedings (pp. 169-179). (Communications in Computer and Information Science; Vol. 924). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2384-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2384-3_16), 2018.
- [28] Wang J, et al. *Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications*. Volume 48, Part C, July 2018, Pages 144-156, 10.1016/-j.jmsy.-2018.-01.003, 2018.
- [29] Lee, Jay & Davari, Hossein & Singh, Jaskaran & Pandhare, Vibhor. (2018). Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*. 18. 10.1016/j.mfglet.2018.09.002.
- [30] Nascimento, Alexandre & Porto-Bellini, Carlo.. Editorial - Artificial intelligence and industry 4.0: The next frontier in organizations. *BAR - Brazilian Administration Review*. 15. 10.1590/18077692bar-2018180152, 2018.
- [31] Peres Ricardo & Barata J. & Leitão Paulo & Garcia, Gisela. Multistage Quality Control Using Machine Learning in the Automotive Industry. *IEEE Access*. 7. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2923405, 2019.
- [32] Zhao Rui & Yan, Ruqiang & Chen, Zhenghua & Mao, Kezhi & Wang, Peng & Gao, Robert. Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 115. 10.1016/j.ymsp.2018.05.050, 2019.
- [33] Doanh Doung Cong, Dufek Zdenek, Ejdays Joanna, Ginevičius Romualdas, Korzynsk, Pawel, Mazurek Grzegorz, Paliszkievicz Joanna, Wach, Krzysztof and Ziemba Ewa. Generative AI in the Manufacturing Process: *Theoretical Considerations Engineering Management in Production and Services*, vol.15, no.4, pp.76-89. 10.2478/emj-2023-0029, 2023.

- [34] Daniel Kuper, et al., Generative AI's Role in the Factory of the Future, Boston Consulting Group, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.bcg.com/publications/2023/gen-ai-role-in-factory-of-future>, 2024.
- [35] Generative AI in Manufacturing: 5 Industry-Transforming Use Cases, Amazuta, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://www.azumuta.com/blog/generative-ai-in-manufacturing-5-industry-transforming-use-cases/>, 2024.
- [36] Amol Adgaonkar, et al., GenAI Ushers Human-Like Intelligence in Manufacturing, ML Journal, [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://manufacturingleadershipcouncil.com/genai-ushers-human-like-intelligence-in-manufacturing-36245/>, 2024.
- [37] Jeff Winter, How AI is speeding the Rise of "Industry 4.0", [citirano 2024, Jul 25]. Raspoloživo na: <https://social-innovation.hitachi/en-us/think-ahead/manufacturing/ai-for-smart-manufacturing-industry-4-0/>, 2024.
- [38] Mariani Marcello & Dwivedi Yogesh. Generative artificial intelligence in innovation management: A preview of future research developments. *Journal of Business Research*. 175. 114542. 10.1016/j.jbusres.2024.114542, 2024.
- [39] Wang Fei-Yue & Yang Jing & Wang Xingxia & Li Juanjuan & Han Qing-Long. Chat with ChatGPT on Industry 5.0: Learning and Decision-Making for Intelligent Industries. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 10. 831-834. 10.1109/JAS.2023.123552, 2023.
- [40] Gill Sukhpal Singh & Kaur Rupinder. ChatGPT: Vision and challenges. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, Volume 3, 2023, Pages 262-271. 10.1016/j.iotcps.2023.05.004, 2023.
- [41] Wang Xingzhi & Anwer Nabil & Dai Yun & Liu Ang. ChatGPT for design, manufacturing, and education. *Procedia CIRP* 119 (2023) 7–14 10.13140/RG.2.2.35077.22244, 2023.
- [42] Javaid, Mohd & Haleem, Abid & Singh, Ravi. A study on ChatGPT for Industry 4.0: Background, Potentials, Challenges, and Eventualities. *Journal of Economy and Technology*. 1. 10.1016/j.ject.-2023.-08.001, 2023.
- [43] V. D. Majstorovic, V. R. Milacic, and I. Z. Race, Building expert system for diagnosis and maintenance in FMS, *Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, 1988, pp. 1126-1129 vol.2, 10.1109/ROBOT.1988.12211.
- [44] V. D. Majstorovic, V. R. Milacic, An Expert System for Diagnosis and Maintenance in FMS, *CIRP Annals*, Volume 38, Issue 1, Pages 489-492, 10.1016/S0007-8506(07)62752-8, 1989.
- [45] V. D. Majstorović, Expert systems for diagnosis and maintenance: The state-of-the-art, *Computers in Industry*, Volume 15, Issues 1–2, Pages 43-68, 10.1016/0166-3615(90)90084-3, 1990.
- [46] O. P. Bojanic, D. V. Majstorović, R. V. Milačić, CAD/CAI Integration with Special Focus on Complex Surfaces, *CIRP Annals*, Volume 41, Issue 1, Pages 535-538, 10.1016/S0007-8506-(07)61262-1, 1992.
- [47] Stojadinović S, Majstorović, V. An intelligent inspection planning system for prismatic parts on CM-Ms, Springer International Publishing., ISBN 978-3-030-12806-7, 10.1007/978-3-030-12807-4, 2019.

## SUMMARY

### THE DEVELOPMENT OF THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PRODUCTION ENGINEERING - ONE GLANCE

*Artificial intelligence (AI) has today become the most important element of the Industry 4.0 model in application, and on the way to building a smart factory. Its history is about eight decades long, and a special area of its research and development is manufacturing engineering, in which AI has been applied since the mid-1980s. Expert systems (ES) were the first AI tools applied in this field. The aim of this work is to perform a systematic analysis of the state of development and application of AI in manufacturing engineering, which (AI) is originally used as an aid to the engineer, planner and designer of various engineering products. It is also used to manage processes and systems in manufacturing engineering. Starting from that, the work is structured in such a way as to provide answers to the following questions: what is AI and how was it developed, how were AI models created and how were they developed in the technological systems of manufacturing engineering, what are today's models and prospects for applying AI in them, as well as possible directions of future research in this area. As a special point of this work, some results of our research in this area are presented.*

**Key Words:** *Artificial intelligence, Machine learning, Technological systems, Manufacturing, Planning, Design, Management.*