

# Analiza primjene digitalnog blizanca u industriji

---

**Tkalec, Robert**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:403101>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Robert Tkalec**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Hrvoje Cajner, dipl. ing.

Student:  
Robert Tkalec

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Hrvoju Cajneru na ukazanoj pomoći i danim savjetima tijekom izrade ovog projekta.

Robert Tkalec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Robert Tkalec**

JMBAG: **0035230725**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza primjene digitalnog blizanca u industriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of the application of digital twin in industry**

Opis zadatka:

Koncept digitalnog blizanca pojavio se prije nešto više od desetak godina donoseći različite koristi poput praćenja stanja sustava u stvarnom vremenu i točnijeg predviđanja. Pojam digitalnog blizanca najčešće se prepoznaje kao virtualna kopija fizičkog sustava (proizvoda), no velikim dijelom odnosi se i na virtualizaciju procesa. Međutim, široka primjena je otežana zbog faktora poput razvijanja novih standarda, sigurnosnih problema i ovisnosti o drugim tehnologijama. Iz navedenoga, u posljednje vrijeme razvila se dublja rasprava te su se pokrenula istraživanja mogućnosti integracije novih tehnologija te analiza budućih trendova. U radu je potrebno dati presjek razvoja koncepta digitalnog blizanca, a posebice u pogledu teorijskog okvira i praktične primjene. Također, potrebno je analizirati ključne čimbenike, uz određena ograničenja, koji su doprinijeli širokoj primjeni digitalnih blizanca, a s fokusom na proizvodne procese. Istražujući recentnu stručnu i znanstvenu literaturu dati sažetak razvoja koncepta digitalnog blizanca s naglaskom na primjenu u industriji.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

izv. prof. dr. sc. Hrvoje Čajner

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY.....	VI
1.UVOD.....	1
2.PREGLED KONCEPTA.....	2
2.1. Osnove digitalnih blizanaca.....	2
2.2. Povijest i razvoj koncepta digitalnog blizanca.....	4
2.3. Digitalni blizanac procesa.....	5
2.4. Komponente i arhitektura sustava rada.....	7
3. TEHNOLOŠKA INFRASTRUKTURA.....	11
3.1. Senzori i IoT.....	12
3.2. Umjetna inteligencija i strojno učenje.....	15
3.3. Analiza i tokovi podataka.....	19
4. PRIMJENA DIGITALNIH BLIZANACA U INDUSTRIJI.....	21
4.1. Usporedba različitih industrijskih sektora.....	21
4.1.1. <i>Proizvodnja</i> .....	23
4.1.2. <i>Medicina</i> .....	23
4.1.3. <i>Pametni gradovi</i> .....	25
4.1.4. <i>Automobilska industrija</i> .....	26
4.2. Izazovi i ograničenja.....	27
4.3. Prednosti i budućnost digitalnih blizanaca.....	29
4.4. Kvantitativni pokazatelji uspješnosti implementacije.....	30
5. ANALIZA PRIMJERA DIGITALNOG BLIZANCA U INDUSTRIJI.....	32
5.1. Dizajn i inženjering automobila.....	32
5.1.1. <i>Pozitivni učinci DT-a na automobilsku industriju</i> .....	33
5.1.2. <i>Prepreke i budućnost automobila</i> .....	34
5.2. Analiza proizvodne linija.....	36
6.ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40

**POPIS SLIKA**

<b>Slika 1.</b> Osnovni prikaz digitalnog blizanca [16] .....	2
<b>Slika 2.</b> Digitalni model, sjena i bliznac [14] .....	3
<b>Slika 3.</b> Lenta vremena razvoja DT-a [13] .....	4
<b>Slika 4.</b> Presjek proizvodnog procesa [9] .....	7
<b>Slika 5.</b> Presjek arhitekture rada [9] .....	9
<b>Slika 6.</b> Dijagram Internet stvari [14] .....	12
<b>Slika 7.</b> Razvoj broja IoT uređaja [14].....	13
<b>Slika 8.</b> Tehnike strojnog učenja [12] .....	15
<b>Slika 9.</b> Utjecaj umjetne inteligencija na IoT [12] .....	17
<b>Slika 10.</b> Shematski prikaz DT-a i AI komponente [24] .....	18
<b>Slika 11.</b> Raspodjela globalne trgovine digitalnih blizanaca [7].....	21
<b>Slika 12.</b> Udio zastupljenosti digitalnih blizanaca u pojedinim industrijama [30] .....	22
<b>Slika 13.</b> Proces liječenja korištenjem DT-a [27] .....	24
<b>Slika 14.</b> Usporedba tehnologija DT-a u automobilskoj industriji [8].....	26
<b>Slika 15.</b> Tipovi integracije sektora DT-a i poslovnih jedinica [1] .....	28
<b>Slika 16.</b> Dijagram poboljšanja nakon uvođenja DT-a.....	30
<b>Slika 17.</b> Usporedba uštede vremena korištenjem DT-a [35].....	31
<b>Slika 18.</b> Shematski prikaz inženjeringa proizvodnje automobila koristeći DT [6] .....	33
<b>Slika 19.</b> Model budućih automobilskih tvornica [29] .....	35
<b>Slika 20.</b> Shema fizičke proizvodne linije [36] .....	36
<b>Slika 21.</b> Komponente cilindra [36] .....	37
<b>Slika 22.</b> Digitalni bliznac procesa proizvodne linije [36] .....	38
<b>Slika 23.</b> Prepoznavanje anomalije od strane DT-a [36] .....	38

## **POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1.</b> Tehnologije zadužene za rad DT-a [14] .....	11
<b>Tablica 2.</b> Tehnologije zadužene za analizu podataka [14] .....	20



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
DT	Digital Twin
IoT	Internet of Things
MR	Mixed reality
CAD	Computer-aided design
IT	Information Technology
API	Application Programming Interface
SQL	Structured Query Language
AI	Artificial Intelligence
KPI	Key Performance Indicator

## **SAŽETAK**

Ovaj rad obuhvaća detaljnu analizu digitalnih blizanaca u industriji, s osobitim naglaskom na proizvodne procese i njihovu primjenu. Istaknut će se osnovne definicije digitalnih blizanaca, povijest razvoja koncepta te komponente i arhitektura sustava rada. Uz to, s pomoću različitih grafova, tablica i slika nastoji se dodatno približiti pozadinski sustav rada, kao što su umjetna inteligencija i strojno učenje, implementacija senzora i IoT te tokovi podataka ključni za nesmetani rad digitalnog sustava. U nastavku, analizirat će se primjena digitalnih blizanaca u različitim industrijama, razmatrajući čimbenike koji potiču razvoj te izazove i ograničenja s kojima se suočavaju. Naposljetku, razradom konkretnih primjera povezat će se svi elementi ovog sustava te će se prikazati praktični aspekti implementacije u suvremenim industrijama.

Ključne riječi: Digitalni blizanac, arhitektura sustava, umjetna inteligencija, Internet Stvari

## **SUMMARY**

This paper includes a detailed analysis of digital twins in industry, with a special emphasis on production processes and their application. The basic definitions of digital twins, the history of development, their components, and the architecture of the operating system will be highlighted. Additionally, through various graphs, tables, and images, efforts will be made to further elucidate the underlying operating system, such as artificial intelligence and machine learning, sensor implementation, IoT, and data flows that are crucial for the smooth operation of the digital system. Furthermore, the application of digital twins in different industries will be analyzed, considering the factors driving their development, as well as the challenges and limitations they face. Finally, by elaborating on specific examples, all elements of this system will be connected, and practical aspects of implementation in contemporary industries will be demonstrated.

Key words: Digital twin, architecture of the system, Artificial Intelligence, Internet of Things

## 1.UVOD

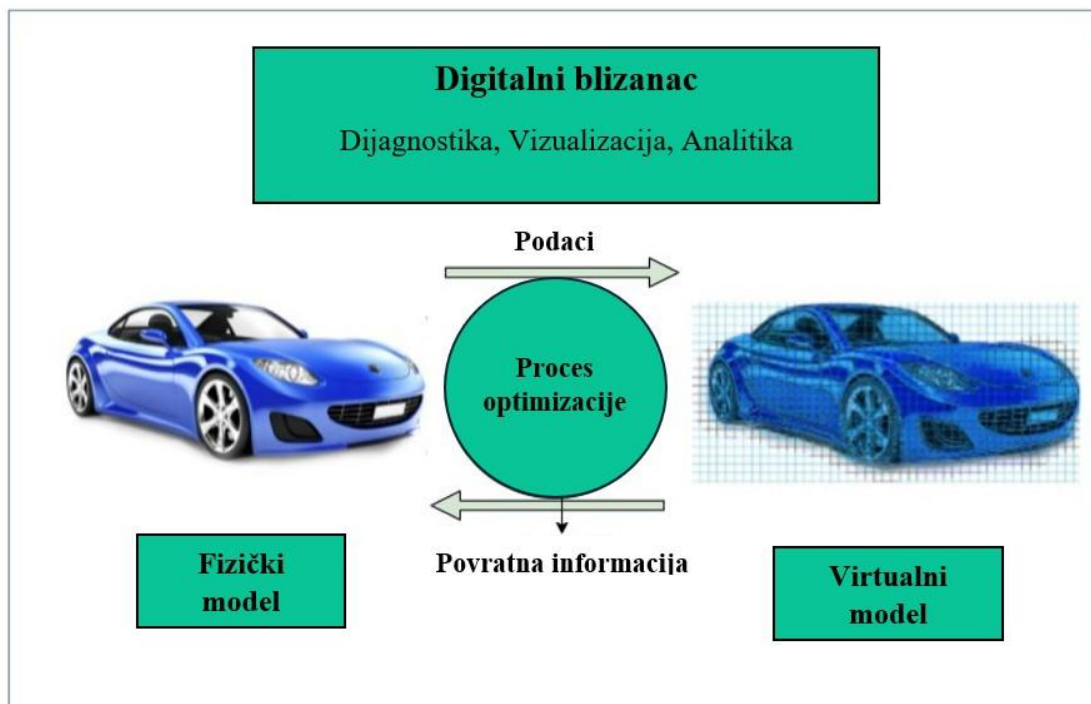
Suvremeno se doba svakodnevno suočava s novim izazovima i inovacijama u različitim granama industrije, pa tako slijedno tome, dolazi i do značajnog razvoja informatičkih tehnologija, kao što su računalstvo u oblaku (*eng. Cloud*), Internet stvari (*eng. Internet of Things*) i umjetna inteligencija (*eng. Artificial Intelligence*). Proizvodni procesi postaju sve više digitalni te kako se ovaj trend razvija, mnoge se tvrtke često bore odrediti što bi trebale činiti kako bi operativno i strateški ostvarile značajnu vrijednost. Ova tranzicija dovela je do razmišljanja te predlaganja različitih strategija razvoja proizvodnje, uključujući Industriju 4.0 i proizvodnju temeljenu na cyber-fizičkom sustavu. Ključni faktor u implementaciji pametne proizvodnje i povezivanja digitalnih i fizičkih procesa upravo je digitalni blizanac. Takav koncept predstavlja realno vrijeme gotove slike fizičkog objekta ili procesa, čime se omogućava optimizacija svih segmenata proizvodnje. Kako se opisana tehnologija iznimno brzo razvijala, poduzeća su naišla na probleme implementacije istih zbog neprilagođenosti velikom protoku podataka te visokih troškova. Međutim, u posljednjih nekoliko godina prakticiranje kolaborativne tehnologije postalo je globalno pristupačnije te su suvremene industrije značajno krenule s implementacijom različitih digitalnih alata i sučelja. Ovakav pristup omogućava poduzećima da imaju potpuni pregled nad svojim proizvodima, od njihovog dizajna i razvoja pa sve do kraja životnog ciklusa proizvoda. Također, osigurava se bolje razumijevanje sustava kao pozadinske baze proizvoda. Uz to, DT pružaju tvrtkama brže rješavanje fizičkih problema, predviđanje ishoda s većom točnošću, naprednije dizajniranje proizvoda te, na kraju, bolje služe svojim kupcima. [9] Osim digitalnih blizanaca fizičkog proizvoda, važan je i koncept digitalnog blizanca procesa koji povećava radnu vrijednost isporučenu od strane digitalnih blizanaca proizvoda. Digitalni oblik procesa kompleksnija je razina digitalne transformacije, koja multiplicira koristi digitalnih blizanaca proizvoda kroz tvornicu i lanac opskrbe. Ovaj koncept omogućava napredna proizvodna rješenja koje sami proizvođači ne podržavaju, pružajući tvrtkama mogućnost optimizacije na razini strojeva, lanca opskrbe te ukupnog industrijskog pogona. [11]

## 2.PREGLED KONCEPTA

U uvodnom dijelu definiranja digitalnog blizanca razmotrit će se osnove samog DT-a, njegova povijest i razvoj koncepta, proces DT-a te komponente i arhitektura rada sustava.

### 2.1. Osnove digitalnih blizanaca

Digitalni blizanac definira se kao virtualna kopija ponašanja sustava u njegovom radnom okruženju. Taj sustav, koji može biti proizvod, proizvodni proces ili lanac opskrbe, predstavljen je kolekcijom digitalnih modela i podataka. [1] Međutim, industrija definirana digitalnog blizanca na više načina. Prema nekim izvorima u proizvodnji, ovaj sustav predstavlja integrirani model izgrađenog proizvoda koji je namijenjen da prikaže sve proizvodne nedostatke i kontinuirano se ažurira. S druge strane, neki primjeri definiraju digitalni blizanac kao senzorski model fizičkog objekta koji simulira objekt u realnom vremenu. [9] [Slika 1]

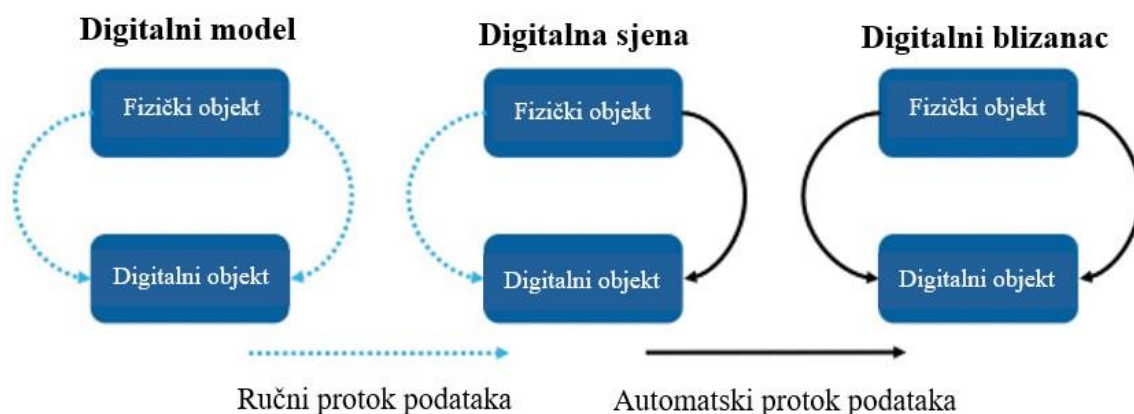


**Slika 1.** Osnovni prikaz digitalnog blizanca [16]

Sama virtualna kopija temelji se na prikupljanju podataka s više različitih uređaja, odnosno implementaciji Internet stvari (*IoT*), s brзом vezom kako ne bi bilo kašnjenja u ažuriranju digitalno blizanca. Važna značajka digitalnog blizanca je da podaci mogu putovati i prema i od digitalnog modela. Oni koji putuju prema modelu čine ga dinamičnim, odnosno točnim odrazom fizičkog objekta; te podaci koji putuju od njega omogućuju korisnicima da vrše promjene u postrojenju, opremi ili sustavu provođenjem istih na digitalnom blizancu. [10]

Kako bi se razvio i implementirao ovakav sustav u svakodnevni rad, potrebno je provesti nekoliko etapa. Prvi korak uključuje analizu postojećeg stanja sustava unutar tvrtke i definiranja praktičnih potreba. Time se dobiva uvid u financijske mogućnosti, pošto implementacija digitalnog blizanca, i kasnije njegovo održavanje, iziskuje visoke resursne kapacitete. Cjelokupni sustav sastoji se od velikog broja dimenzija za karakterizaciju dinamike, funkcionalnosti i ponašanja, dok istovremeno postoji ograničena računalna snaga i kapacitet pohrane podataka. Stoga, u početnoj fazi, ulaganje u DT teži prema osnovnim funkcionalnostima koje imaju trenutne praktične koristi. Drugi korak se fokusira na dizajn i specifikacije sustava, odnosno odgovara na pitanje koliko je kvalitetnu virtualnu kopiju potrebno izgraditi. Konkretnije, koliko je potrebna preciznost u modeliranju kako bi bila usklađena s drugim modulima i DT-ovima. Zadnji korak prije implementacije je određivanje prikladne tehnike modeliranja kako bi se zadovoljile prijašnje potrebe. [5]

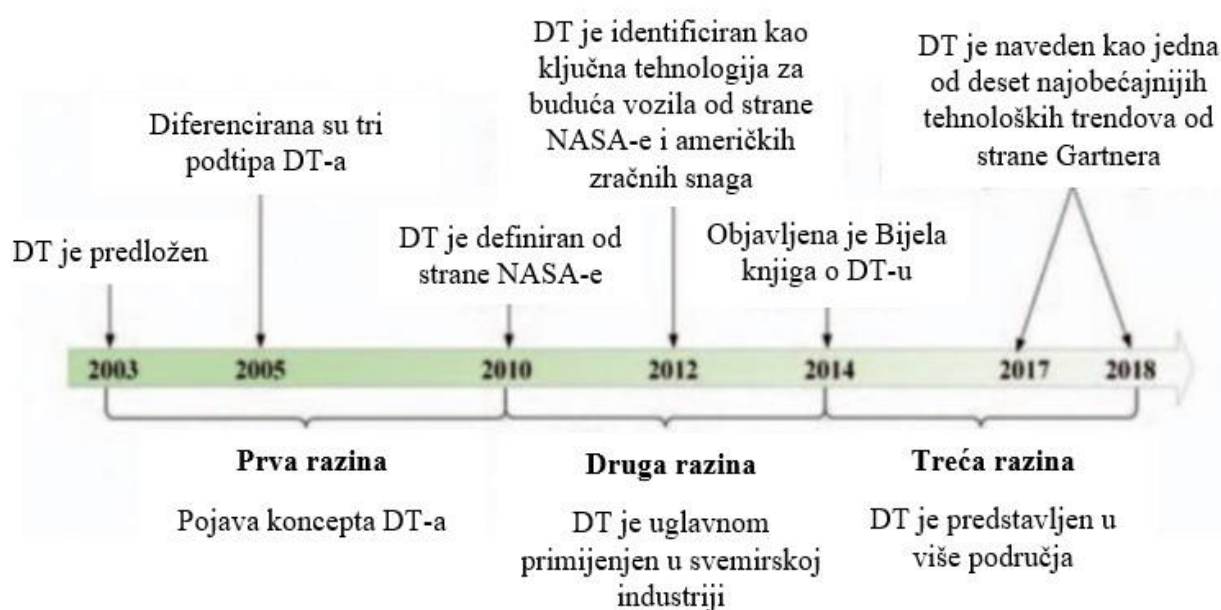
Kada se govori o definicijskom pojmu digitalnog blizanca, često dolazi do pogrešnog shvaćanja srodnih pojmova kao što su digitalna sjena i digitalni model. Stoga, bitno je razlikovati tri razine digitalnog blizanca. Prva razina je u obliku digitalnog modela, složenija razina je u obliku digitalne sjene te konačna razina u obliku potpuno funkcionalnog digitalnog blizanca. [Slika 2.] Digitalni model definira se kao digitalna verzija prethodno postojećeg ili planiranog fizičkog objekta gdje ne postoji automatska razmjena podataka između fizičkog i digitalnog modela. S druge strane, sjena je digitalni prikaz objekta koji ima jednosmjerni protok između fizičkog i digitalnog objekta, odnosno promjena stanja fizičkog objekta dovodi do promjene digitalnog objekta, ali ne i obrnuto. Konačno, blizanac predstavlja potpuno integrirani tok podataka u oba smjera između fizičkog i digitalnog objekta. [14]



**Slika 2.** Digitalni model, sjena i blizanac [14]

## 2.2. Povijest i razvoj koncepta digitalnog blizanca

Koncept digitalnog blizanca, odnosno interes za takvu tehnologiju, eksponencijalno je krenuo rasti početkom 2002. godine, kako u industriji, tako i u akademskoj zajednici. [4] Nakon tehničkog poboljšanja uveden je i u zrakoplovstvo. Model DT-a nastao je iz NASA-inog programa Apollo, koji je izgradio dva stvarna identična svemirska vozila. Jedan od njih lansiran je u svemir kako bi izvršio misiju, dok je drugi ostao na Zemlji, omogućujući inženjerima da preslikaju uvjete lansiranog vozila. [Slika 3.] Ideja je da svemirsko vozilo koje ostaje na Zemlji može biti zamijenjeno digitalnim modelom ogledala kako bi se pružili dublji uvidi kroz simulacije visoke pouzdanosti.



**Slika 3.** Lenta vremena razvoja DT-a [13]

Tijekom 2005. godine došlo je do ideje kako bi se digitalni blizanc mogao podijeliti u tri podtipa: prototip, instanca i agregat. Međutim, zbog raznih tehničkih ograničenja, u narednih 5 godina bilo je vrlo malo relevantnih izvještaja. Nakon nekoliko godina implementiranja i istraživanja digitalnih blizanca od strane NASA-e i američkog zrakoplovstva, broj istraživačkih studija konstantno je rastao. 2014. godine objavljena je Bijela knjiga o DT-u i široko je publicirana trodimenzionalna struktura DT-a. Naknadno je DT uveden u više područja izvan zrakoplovne industrije, poput automobilske industrije, nafte i plina, te zdravstva i medicine. U posljednjih nekoliko godina, mnoge su ugledne organizacije posvetile veliku važnost DT-u, pri čemu je Gartner 2017. i 2018. godine DT smatrao jednom od 10 najperspektivnijih tehnoloških trendova u sljedećem desetljeću. [13]

Kada se govori o najsuvremenijem dobu, ankete pokazuju da 75 posto naprednih industrija ima već usvojene tehnologije digitalnih blizanaca koje funkcioniraju na minimalno srednjoj razini složenosti. Na primjer, velike zrakoplovne tvrtke razvijaju sustav za optimizaciju geometrijskih komponenti temeljenog na strojnome učenju koji ima mogućnosti simulacije tisuće različitih konfiguracija velikom brzinom s namjerom identifikacije uštede na težini, kao i poboljšanja aerodinamičkih elemenata. Također, značajan razvoj novih koncepata digitalnih blizanaca prisutan je i u automobilskom te medicinskom sektoru gdje se radi na multifizičkom modelu ljudskog srca za podršku pri razvoju lijekova i medicinske opreme. Kod automobilske industrije prisutan je razvoj koncepta s kojim bi kompanije mogle provoditi simulacije u realnom vremenu vezane uz dizajn proizvoda, čime se osiguravaju svi zahtjevi kupca. Uz to, razvijaju se i testiraju multifizički modeli turbina za omogućavanje predviđanja trošenja u stvarnom vremenu, podešavanja performansi te optimizaciju vijeka trajanja. No, nisu svi sektori jednako spremni implementirati ovakvu vrstu tehnologije. Sektori poput automobilske i zrakoplovne industrije uvelike prednjače u naprednom korištenju DT-a, dok s druge strane, sektori poput logistike i energetike tek razvijaju svoje prve konceptualne modele. [1]

### **2.3. Digitalni bliznac procesa**

Digitalni bliznac procesa obuhvaća cijeli sustav rada proizvodnje određenog proizvoda, čime poboljšava dosadašnje mogućnosti tehnologije fokusirane samo na fizički objekt proizvoda. Takav bliznac koristi mješovitu stvarnost (MR), visokoučinkovito računarstvo, koje omogućuje analizu performansi tijekom procesa, i umjetnu inteligenciju s ciljem optimizacije cijelog proizvodnog procesa, a ne samo opreme usko povezane s fizičkim objektom. Također, ovakvim pristupom može se u bilo kojoj fazi proizvodnje detaljno ispitati vrijednosti koje su dostupne u stvarnom vremenu. Uz to, proizvođači mogu koristiti imerzivne holograme za istovremeni rad s virtualnim i fizičkim modelima i procesima. [11]

Korisnici digitalnih blizanaca procesa svoju učinkovitost mogu postići i primjenom principa industrije 4.0 gdje su tvornice međusobno povezane i oprema je online, inteligentna i sposobna za suradnju u vertikalno integriranoj organizaciji. Implementacijom ovih principa, omogućuje se proizvođačima razvoj vertikalne i horizontalne integracije te end-to-end inženjeringa. Vertikalna integracija je novitet u svijetu digitalnih blizanaca kojim se može virtualno povezati interni procesi i istovremeno raditi na virtualnim i fizičkim modelima kako bi odmah izvršili promjene u procesu. Horizontalna integracija osigurava holografsko okruženje pomoću kojeg proizvođači lako mogu pristupiti procesima diljem lanca opskrbe, a inženjeri dizajna mogu koristiti mješovitu stvarnost kako bi doživjeli način funkcioniranja proizvoda tijekom procesa.

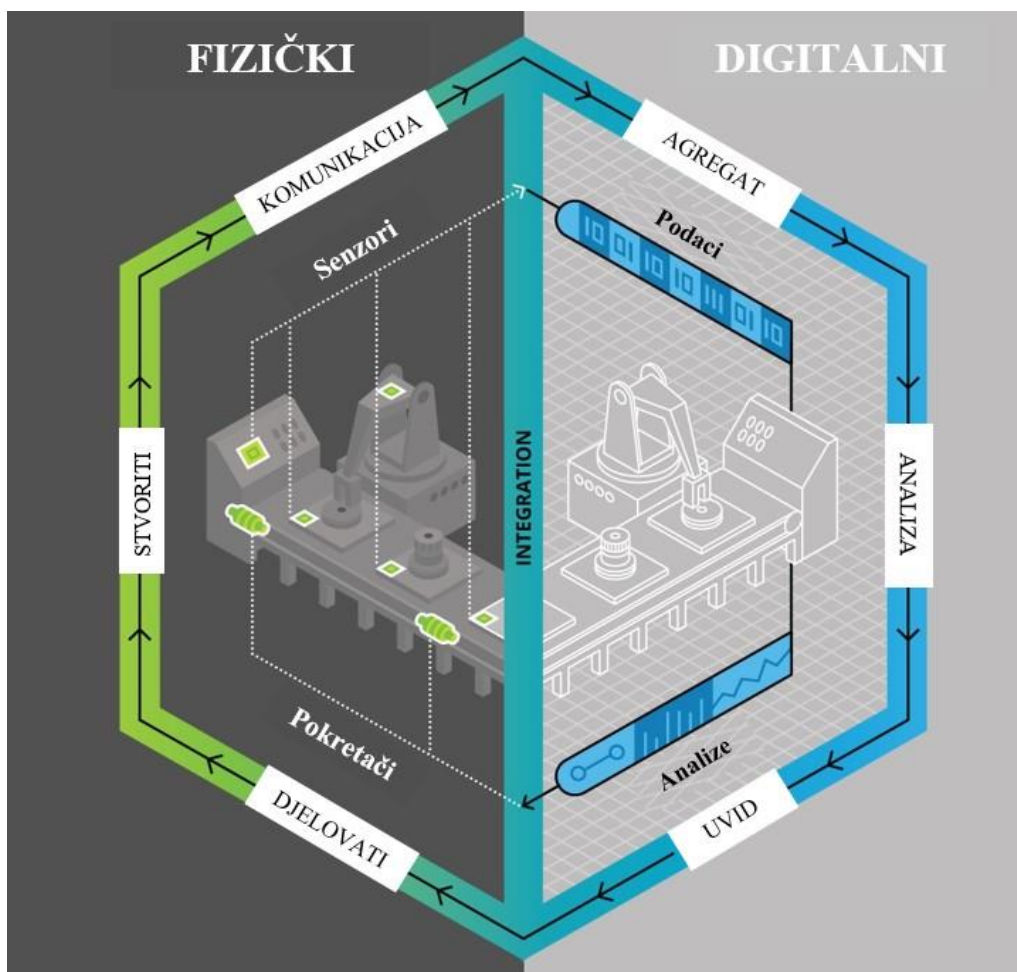


Naposljetku, end-to-end inženjering omogućuje da inženjeri dizajna jedne organizacije mogu komunicirati s inženjerima proizvodnje druge organizacije. Mogu iskoristiti uvide stečene iz inteligentne mješovite stvarnosti i podataka iz interakcija digitalnog blizanca procesa kako bi simulirali promjene dizajna i kontinuirano poboljšavali kvalitetu proizvoda i performanse tvornice. [11] Menadžeri postrojenja koriste digitalne blizance procesa kako bi razumjeli i analizirali kako svi različiti dijelovi unutar postrojenja ili procesa surađuju. Koriste se za praćenje performansi, vremena i koordinacije između svih jedinica te za sinkronizaciju sustava; na primjer, ako jedan dio postrojenja proizvodi svoj proizvod prebrzo, moglo bi se završiti s viškom određenih komponenti, što dovodi do logističkih problema poput skladištenja i transporta. S digitalnim blizancem procesa, može se modelirati utjecaj promjena unosa, kao što su brzina ubacivanja sirovina, temperatura, vibracije jedinica itd., te vidjeti kako one utječu na rezultate, bez rizika od trošenja resursa na neuspjele eksperimente ili prekidanja radnih tokova. [10]

Važan je naglasak značajnog poboljšanja prednosti virtualnog proizvoda implementacijom digitalnog blizanca procesa koji omogućuje napredak u tri područja razvoja proizvoda: na razini stroja, na razini tvornice i na razini lanca opskrbe. Stroj, u kombinaciji s digitalnim procesima, prima poboljšane informacije iz cijele tvornice te mu pružaju veće mogućnosti za samopopravljanje i prediktivno održavanje. Na primjer, CNC stroj koji je dio digitalnog blizanca procesa može sam reagirati na potrebne popravke te da je, na temelju povijesti stroja i proizvodne linije, prijevremena obustava rada najbolje rješenje. Također, strojevi povezani na cijeli proces mogu koristiti podatke kako bi produbili svoje učenje i donosili odluke u kontekstu, kao i komunicirali s ostalim strojevima, ali i operaterima. Digitalni blizanac procesa, svojom integracijom kroz cijelu proizvodnu liniju, omogućuje inženjerima na udaljenim lokacijama kontrolu nad kontinuiranim poboljšanjem kvalitete proizvoda te performansi postrojenja i opreme. Time inženjer ne mora provoditi vrijeme pregledavajući podatke iz cijele tvornice na temelju kojih bi donio odluke, nego digitalni blizanac procesa ponudi rješenja za potrebno održavanje stroja. Ova razina suradnje podržava informiranije donošenje odluka i izbjegava nepotrebna zaustavljanja linije. Međutim, lanac opskrbe je područje gdje digitalni blizanac procesa dodaje najveću vrijednost. On omogućuje digitalnu integraciju unutar internih procesa tvornice u trenutku rada strojeva i proizvodne linije. Korištenjem takve tehnologije unutar tvornice, proizvođač može brzo prilagoditi cijeli proces ako je potreban novi proizvod na liniji. Brza prilagodba novih proizvoda s ciljem zadovoljavanja potražnje kupca rezultira bržim vremenom lansiranja samog proizvoda. [10]

## 2.4. Komponente i arhitektura sustava rada

Digitalni blizanci kreirani su za modeliranje složenih objekata i procesa koji se na mnogo načina integriraju sa svojom okolinom te je teško predvidjeti ishode tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda. Uz to, mogu biti stvoreni u različitim kontekstima kako bi služili različitim ciljevima. Na primjer, digitalni blizanci mogu se koristiti za simulacije specifičnih i složenih sredstava u uporabi, kao što su mlazni motori te kamioni velikih dimenzija za potrebe rudarstva, kako bi pratili i procijenili trošenja sredstva tijekom rada proizvoda. Naime, implementacija digitalnih blizanaca u proizvodni proces povlači najveće interese njihove primjene. Model prikazan na slici 4 predstavlja proizvodni proces kao presjek fizičkog okruženja i njegovog odgovarajućeg digitalnog blizanca. Veliki broj senzora raspoređenih kroz fizički proizvodni proces sinkronizirano prikupljaju podatke u širokom spektru dimenzija; od karakteristika ponašanja opreme i samog tijeka rada do uvjeta okoline unutar tvornice. Prikupljeni podaci se u stvarnome vremenu prenose i agregiraju od strane aplikacije digitalnog blizanca. [9]



**Slika 4.** Presjek proizvodnog procesa [9]

Aplikacija digitalnog blizanca kontinuirano analizira dolazne tokove podataka i tijekom određenog razdoblja, analize mogu ustanoviti neprihvatljive trendove u stvarnoj izvedbi procesa određene dimenzije kada se usporede s idealnim rasponom prihvatljivih performansi. Model proizvodnog procesa prikazan na slici 4 definiran je s pet komponenti:

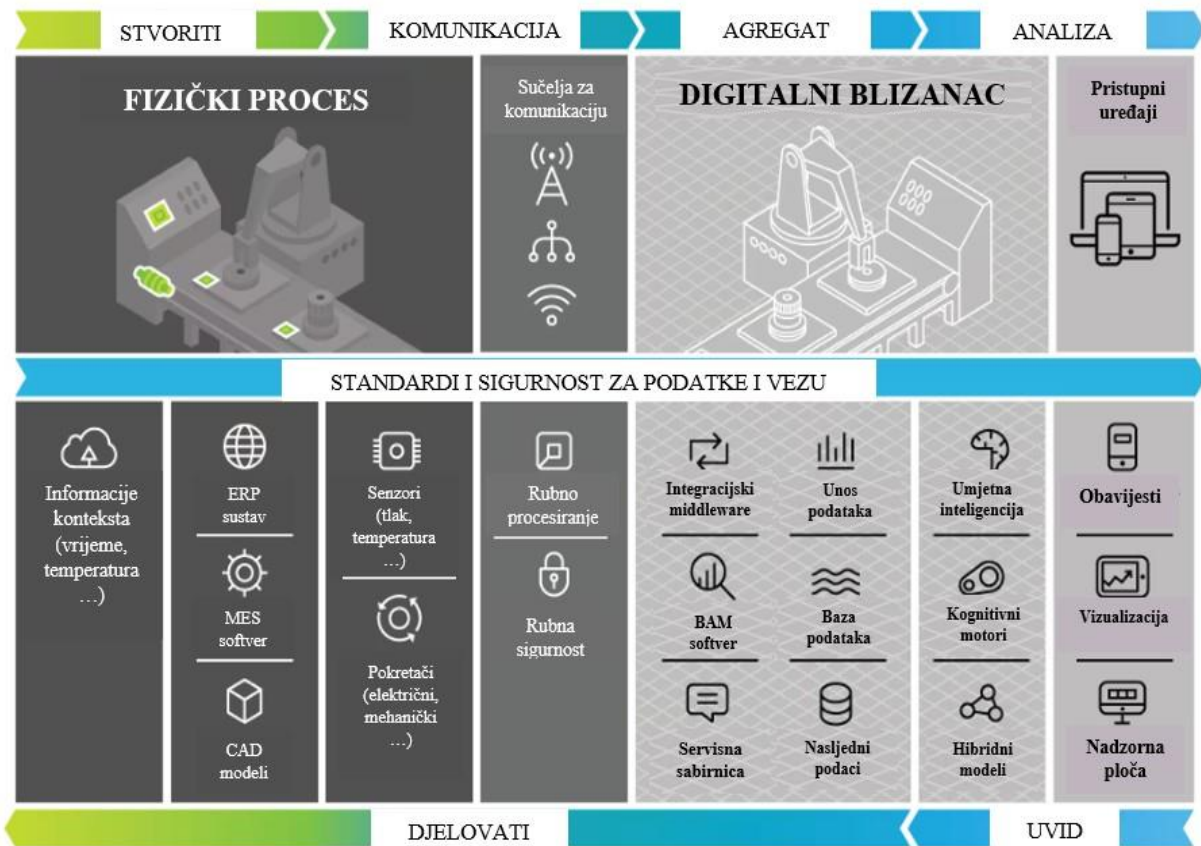
- Senzori i pokretači
- Podaci
- Integracija
- Analitika
- Aplikacija DT

Senzori postavljeni kroz cijeli proizvodni sustav generiraju signale i alarme koji omogućuju digitalnoj strani procesa prikupljanje lokalnih i operativnih informacija koji se odnose na fizički dio procesa u stvarnome vremenu. Prikupljene informacije, odnosno podaci u stvarnome vremenu sa senzora, agregiraju se i povezuju s postojećim podacima iz poduzeća, kao što su popis materijala, tehničke specifikacije i sustavi poduzeća. Sadržaj podataka može biti širokog spektra; od inženjerskih crteža, veza za vanjske izvore podataka, pa sve do zapisa o pritužbama kupaca. Prijenos podatak prikupljenih preko senzora u digitalni svijet izvršava se putem tehnološkog procesa integracije koji se sastoji od rubnih uređaja, komunikacijskih sučelja i sigurnosti. Nadalje, digitalni blizanc dobiva uvide u potrebne podatke na temelju različitih tehnika analitike koje se koriste za analizu i razvrstavanje podataka putem algoritamskih simulacija. Nakon primanja i sortiranja svih potrebnih podataka, digitalni blizanc integriranom aplikacijom kombinira navedene komponente sa slike 4 u digitalni model fizičkog svijeta i procesa u gotovo stvarnom vremenu. Cilj spomenute tranzicije je identificirati neprihvatljiva odstupanja od optimalnih uvjeta koja predstavljaju slučaj za optimizaciju poslovanja. Također, mogu se identificirati različite prilike za uštedom troškova, postizanjem veće učinkovitosti ili poboljšanjem kvalitete. U situaciji gdje je akcija opravdana u stvarnome vremenu, digitalni blizanc je provodi putem pokretača koji pokreću fizički proces.

No, stvaranje samog digitalnog blizanca počinje s dizajnom budućeg procesa. Trebale bi se koristiti standardne tehnike dizajna procesa kako bi se pokazalo kako poslovni procesi, ljudi koji omogućuju te procese, informacije, poslovne aplikacije te fizička sredstva međusobno djeluju. Potrebno je kreirati dijagrame koji povezuju tijek procesa s aplikacijama, potrebnim podacima i vrstama senzorskih informacija potrebnih za stvaranje digitalnog blizanca. Kreirani dizajn nadopunjuje se atributima vezanima uz moguća poboljšanja troškova ili vremena. [9]

Konceptualna arhitektura digitalnog blizanca prikazana na slici 5 može se smatrati “nevidljivom” stranom omogućavanja rada komponenti koje čine model proizvodnog procesa prikazanog na slici 4. Međutim, osnovni principi prikazani na modelu proizvodnog procesa mogu se primijeniti i na drugim konfiguracijama digitalnog blizanca. Arhitektura rada digitalnog blizanca može se opisati kroz šest koraka:

1. Stvaranje
2. Komunikacija
3. Agregacija
4. Analiza
5. Uvid
6. Djelovanje



**Slika 5.** Presjek arhitekture rada [9]

Cjelokupni proces i priprema rada navedenog sustava započinje korakom stvaranja. Ovaj korak obuhvaća opremanje fizičkog dijela procesa brojnim sensorima koji očitavaju i kontroliraju ključne ulaze iz fizičkog dijela procesa i okoline. Mjerenje senzorom može se klasificirati u dvije kategorije: mjerenje okolišnih i vanjskih podataka koji utječu na operativni dio fizičkog

procesa, kao što su tlak, razina vlage i temperatura; te operativna mjerenja koja se odnose na fizičke kriterije izvedbe proizvodnog sredstva kao što su pomak, moment i vlačna čvrstoća. Također, da bi se unaprijedio informativni dio digitalnog blizanca, signali sa sensorima mogu se nadopuniti različitim CAD modelima, informacijama temeljenim na sustavima opskrbnog lanca ili sustava za planiranje resursa poduzeća. Time se osigurava širok raspon kontinuirano ažuriranih podataka koje digitalni blizanac koristi kao ulaz za analizu. [9]

Korak komunikacije pruža podršku u dvosmjernoj integraciji, odnosno povezanosti između fizičkog procesa i digitalne platforme. Integrirana mrežna komunikacija jedna je od ključnih promjena koja je pridonijela razvoju digitalnog blizanca, te se sastoji od tri podkomponente: komunikacijskog sučelja, krajnje obrade i sigurnosti. Komunikacijsko sučelje pomaže u prijenosu podataka iz funkcije senzora u funkciju integracije. Definiranje postavki ovoga rada vrlo je kompleksno zbog velikog broja mogućnosti postavljanja senzora koji osigurava uvid u podatke. Obrada na rubu sastoji se od sučelja koji povezuje senzore i sve podatke o prijašnjim procesima te obrade signala i podataka koje prosljeđuje na platformu. Kao i u ostalim tehnološkim područjima, sigurnost je ključan faktor u nesmetanom radu sustava. Krajnja sigurnost se također sastoji od sučelja koje se temelji na različitim sigurnosnim pristupima, kao što su vatrozid (*eng. firewall*), aplikacijski ključevi, certifikati uređaja i enkripcije. [9]

Za održavanje unosa podataka u repozitorij podataka, obrađenih i pripremljenih za analitiku zadužen je korak agregacije. Obrada i agregacija podataka mogu se izvršavati u stvarnome svijetu ili u oblaku. Nakon pripreme podataka slijedi njihova analiza i vizualizacija. Provedena analitika se prikazuje na nadzornoj ploči ističući neprihvatljive razlike u izvedbi modela digitalnog blizanca i fizičkog svijeta u jednom ili više područja. Naposljetku, korak akcije vraća uvide iz prethodnog koraka fizičkom sredstvu i digitalnom blizancu. Uvidi prolaze kroz dekodere i zatim se unose u pokretače na procesu sredstva koji su odgovorni za mehanizme kretanja i kontrole čime se dovršava zatvorena petlja između fizičkog svijeta i digitalnog blizanca. [9]

### 3. TEHNOLOŠKA INFRASTRUKTURA

Brzi razvoj tehnologije posljednjih godina obilježen je pojavom i implementacijom industrije 4.0 i njezinih ideja u raznim sektorima. Koncept tehnologije digitalnog blizanca; odnosno integriranje komponenti, strojeva i sustava unutar određene infrastrukture; privlači sve veću pozornost u globalnim raspravama. To uključuje analizu podataka u stvarnom vremenu i virtualno testiranje složenih sustava prije njihove fizičke implementacije. U ovom će se poglavlju dati presjek tehnološke pozadine zadužene za omogućavanje rada digitalnih blizanca u proizvodnji, kao što su umjetna inteligencija, strojno učenje, IoT te senzorska tehnologija. [17] U tablici 1 prikazane su tehnološke domene rada digitalnog blizanca i njihove referentne tehnologije koje omogućavaju funkcionalnost sustava.

**Tablica 1.** Tehnologije zadužene za rad DT-a [14]

Domena	Omogućavajuća tehnologija
Aplikacijska	Arhitektura modela i vizualizacija
	Software i APIs
	Prikupljanje podataka i prethodna obrada
Middleware	Tehnologija spremanja
	Obrada podataka
Mrežna	Komunikacijska tehnologija
	Bežična komunikacija
Objektna	Hardware platforma
	Senzorska tehnologija

Prva domena je aplikacijska i sastoji se od 3 sloja: arhitektura modela i vizualizacija, software i APIs te prikupljanje podataka i prethodna obrada. Prvi sloj je ključan je za stvaranje modela fizičkog entiteta te omogućuje vizualizaciju i modeliranje arhitekture digitalnog blizanca. Drugi sloj, software, je prijelazan te je prisutan kao pomoć pri modeliranju arhitekture digitalne strane procesa. Posljednji dio aplikacijske domene potreban je kako bi se osiguralo pravilno prikupljanje podataka za ispravnu upotrebu IoT-a. Middleware domena sastoji se od tehnologije spremanja koja je zadužena za pohranu podataka putem SQL baze podataka te obrade podataka koja je zadužena za prijenos informacija između middleware domene i mrežne domene. Mrežni dio sustava sastoji se od bežične komunikacije te komunikacijske tehnologije, koja je ključna za osiguranje prijenosa prikupljenih podataka između ostalih domena. Zadnji dio, odnosno objektna domena osigurava prikupljanje podataka putem senzora. [14]

### 3.1. Senzori i IoT

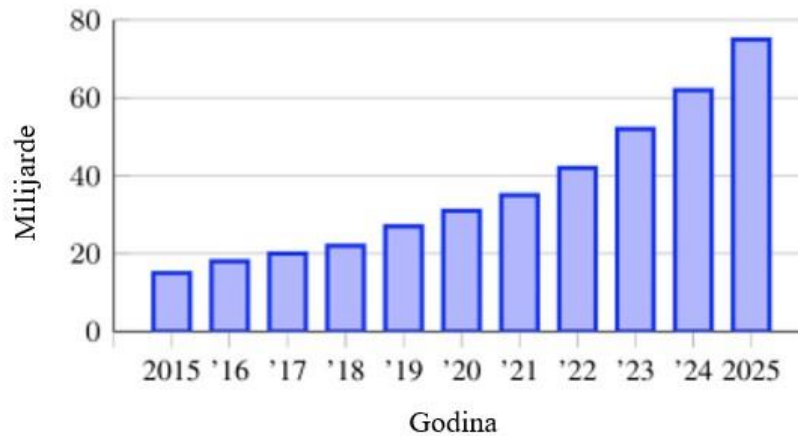
Internet stvari (*eng. Internet of Things*) je pojam koji označava bilo kakve uređaje povezane s internetskom mrežom. Cilj ove tehnologije je pružanje objektima osjećaj inteligencije i sposobnosti prikupljanja informacija iz njihovog okruženja. Neki od tipova objekata koji su često aktivni u ovoj tehnološkoj povezanosti prikazani su na slici 6. [14]



Slika 6. Dijagram Internet stvari [14]

Ideja da su svi objekti, odnosno uređaji međusobno povezani omogućuje IT osoblju praćenje i nadzor svega što prethodi pametnom okruženju. Jedan od prvih primjera gdje se integrirao internet stvari je automat Coca-Cole s ciljem uvida jesu li pića spremna i dovoljno ohlađeno za kupnju i konzumaciju. [14]

Broj uređaja povezanih internetom broji se iz godine u godinu te pokazuje eksponencijalan rast primjene ove tehnologije. Dijagram na slici 7 prikazuje rast broja uređaja proteklih deset godina te predviđa da će u 2025. godini broj biti preko 75 milijardi, dok će industrija vrijediti preko 5 trilijuna dolara. Ovakav značajan broj povezanih uređaja doprinosi viziji i unaprjeđenju proizvodnje praćene digitalnim blizancima. [14]



**Slika 7.** Razvoj broja IoT uređaja [14]

Digitalni bliznac i IoT dinamičan su par koji se međusobno upotpunjuju i pomažu jedno drugome u ostvarivanju potencijala proizvodnog procesa. Kombinacija senzora i IoT-a ponaša se kao sustav živaca ugrađen u stvarni objekt čime prenose svaki njegov pokret i utjecaj okoline. Oni prikupljaju informacije poput uvjeta okoline; točnije tlaka, temperature i vlažnosti; te operativnih parametara i pokazatelja stanja opreme. Prolazak podataka kroz komunikacijske protokole i pristupnike postaje vitalni dio digitalnog blizanca čime se omogućuje inteligentna optimizacija, prediktivno održavanje i praćenje u stvarnome vremenu, održavajući sinkronizaciju virtualnog modela s fizičkim objektima procesa. Kao rezultat spomenute komunikacije, IoT uređaji i digitalni blizanci zajedno stvaraju koristan alat za unaprjeđenje učinkovitosti proizvodnih procesa, smanjenje troškova i poboljšanje pouzdanosti u raznim industrijskim sektorima. No, uvidi dobiveni od digitalnog blizanca mogu pružiti nerealno stanje uzrokovano lošom kvalitetom dobivenih podataka. Iz tog razloga, potrebno je osigurati točne i dosljedne podatke koji se postižu održavanjem i kalibracijom podataka, pročišćivanjem i filtriranjem samih podataka te uvođenjem standardizacije, tj. uspostavljanjem zajedničkih protokola i formata podataka kako bi se osigurala glatka interpretacija i integracija. Ulaganje u kvalitetu podataka neizbježan su dio upravljanja digitalnim blizancima jer neispravni podaci mogu rezultirati lošim odlukama i mogućim rizicima. [19]

S druge strane, bitno je naglasiti i nekoliko razloga za potrebom digitalnih blizanaca prema sustavu IoT-a. Neobrađeni podaci internet stvari mogu djelovati veoma nerazumljivo zbog čega digitalni blizanci pretvaraju podatke u korisne uvide. Nadalje, digitalni blizanci omogućuju na temelju prikupljenih podataka optimizirati operativni dio procesa, raspodjelu resursa te raspored održavanja u stvarnome vremenu koje ne bi bilo dostupno



implementiranjem samo pametnih uređaja. Ovo pruža mogućnost sprječavanja potencijalni kvarova prije nego što se oni dogode i maksimiziranja učinkovitosti stroja prilagođavanjem njegovih postavki na temelju podataka o stvarnoj izvedbi. Povećanje učinkovitosti može se postići i međusobnim povezivanjem s drugim digitalnim blizancima. Time se stvara sveobuhvatna mreža inteligentnih sredstava čime se potiče suradnja i razmjena informacija. Također, digitalni blizanci, kao što je već spomenuto, stvaraju uvide temeljene na prikupljenim podacima koji se mogu koristiti za stvaranje inovativnih modela usluga. [19]

Ključni dio svakog digitalnog blizanca su senzori koji omogućuju prikupljanje i prijenos informacija i podataka iz stvarnog svijeta u virtualni model. Bez senzora digitalni blizanci ne bi mogli rekreirati u virtualnom obliku točan i dinamičan fizički model. Sensorima se prati širok spektar podataka; poput tlaka, temperature, vlažnosti, kvalitete zraka, razine zvuka te operativnih dijelova proizvodnog procesa. U nastavku će se analizirati najčešći tipovi senzora, odnosno njihove uloge te u kojim se industrijskim sektorima implementiraju. Senzori razine tekućina ili nekog drugog sredstva relativno su jednostavan primjer gdje ovi uređaji mjere jesu li, npr. skladišteni plinovi, unutar dozvoljenih granica nekog spremnika. Koriste se uglavnom kod digitalnih blizanaca koji uključuju eksploataciju prirodnih resursa. Mjerenje i praćenje uvjeta okoline, poput temperature, tlaka i vlažnosti, također se implementira u gotove sve proizvodne sustave. IoT temperaturni senzori podižu elemente na višu razinu pretvarajući mjerenje temperature u digitalni signal koji se prenosi na računalo za vizualizaciju i obradu. Uz to, sve se više integriraju senzori za kvalitetu zraka, odnosno za praćenje prihvatljivih razina ozona, ugljičnog monoksida, sumporovog dioksida i onečišćenja uzrokovanih česticama. Kao rješenje za prediktivno održavanje sustava, senzori zvuka imaju značajnu ulogu. Dolaze u raznim funkcijama, ali svi su sposobni registrirati zvučne valove kao električne signale i prenijeti te informacije na nadzornu ploču koju sadrži digitalni blizanac. Napredniji zvučni senzori također mogu snimati zvuk, dok drugi mogu procijeniti frekvenciju zvuka pomoću mjerača. Jedan od najraširenijih senzorskih uređaja je infracrveni senzor koji se koristi u građevini, medicini i industriji kućne sigurnosti. Njihov rad temelji se ili na pasivnom primanju zraka ili aktivnim emitiranjem i primanjem zračenja. Pasivne verzije mogu se koristiti kod digitalnih blizanaca namijenjenih za kućne potrebe kao što je praćenje temperaturnih zona. S druge strane, uobičajeni primjer za aktivne infracrvene senzore su automatska vrata koja koriste infracrvene zrake za otvaranje kada se objekt nalazi u blizini. [18]

### 3.2. Umjetna inteligencija i strojno učenje

Učenje je proces koji je usko vezan uz ljudska bića te se općenito definira kao stjecanje znanja ili razumijevanje vještina putem studija i iskustva. Kada se analiziraju strojevi, oni nisu po prirodi inteligentni te su dizajnirani za obavljanje specifičnih zadataka danih od strane čovjeka. No, glavni cilj razvoja strojeva je pomoći ljudima u svakodnevnim aktivnostima, bilo to proizvodni procesi u industrijskim sektorima ili privatne potrebe. Iz tog razloga važno je da strojevi mogu prepoznati probleme, rješavati ih i donositi sukladne zaključke. Strojno učenje postalo je jedno od najvažnijih područja informacijske tehnologije s dostupnošću ogromnih količina podataka za pametnu analizu podataka. Strojno učenje, kao dio umjetne inteligencije, ima za cilj omogućiti strojevima da učinkovito izvršavaju zadatke putem primjene i korištenja inteligentnog softvera, a različite tehnike strojnog učenja prikazane su na slici 8. [12]



**Slika 8.** Tehnike strojnog učenja [12]

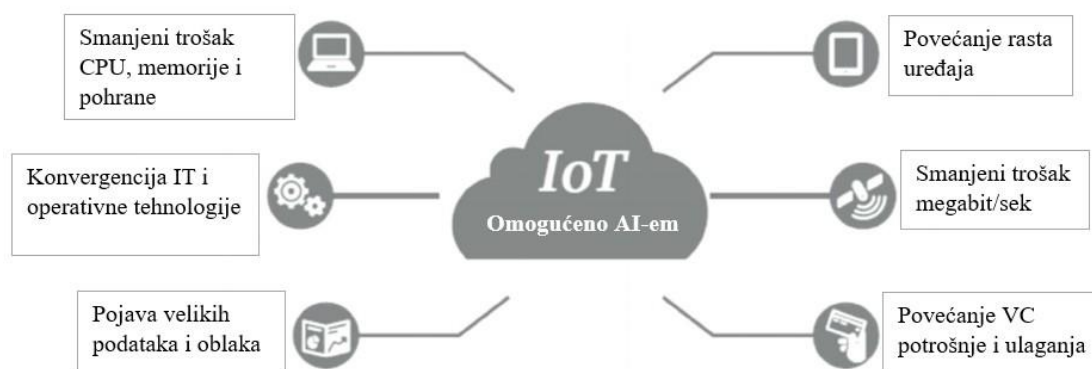
Nadzirano učenje je tehnika strojnog učenja u kojoj model uči iz klasificiranog skupa podataka koji sadrži uređene parove ulaz-izlaz te svaki ulaz u skupu ima njemu odgovarajući izlaz. Zadatak modela je naučiti odnos između ulaza i izlaza, čime se omogućuje modelu da donosi predviđanja na novim, neviđenim podacima primjenom naučenog preslikavanja. Ova tehnika učenja pruža niz prednosti, kao što su učinkovitost koja proizlazi iz predviđanja ishoda na temelju prošlih podataka te jednostavnost razumijevanja i implementacije. Također, ovaj način učenja povlači i negativne strane, poput zahtjeva za velikom količinom označenih podataka koje može biti skupo i vremenski zahtjevno te potrebom šireg konteksta o željenim podacima. Učenje bez nadzora je tehnika strojnog učenja koja koristi ulazne podatke bez označenih odgovora s ciljem otkrivanja strukture unutar samih podataka. Za razliku od nadziranog učenja,

gdje podaci za učenje uključuju i izlazni dio, algoritmi kod ove tehnike nastoje naučiti odnose izravno iz ulaznih podataka. Ovaj tip strojnog učenja vrlo je fleksibilan jer se može nositi s promjenama u ulaznim podacima zbog neovisnosti o unaprijed definiranim oznakama. Također, može identificirati uzorke i odnose u podacima koji nisu odmah vidljivi. S druge strane, učenje ovom tehnikom može rezultirati neispravnim tumačenjem, odnosno rezultati mogu biti dvosmisleni i teži za tumačenje u usporedbi s nadziranom tehnikom. Naposljetku, podržano učenje je tip strojnog učenja gdje softver uči kako i koje odluke donositi izvršavajući akcije procjenjujući ishode kroz nagrade ili kazne s ciljem optimizacije ukupne nagrade prikupljene tijekom vremena. Prednost ovog tipa je visoka prilagodljivost gdje se softveri jednostavno mogu prilagoditi novim okruženjima ili promjenama u postojećim. Uz to, donošenje odluka temelji se na naučenim iskustvima, a ne unaprijed definiranim pravilima, što može biti praktično u složenim okruženjima gdje je ručno određivanje ponašanja zahtjevan i neefikasan proces. [20]

Tehnologija digitalnog blizanca i strojno učenje dvije su sofisticirane tehnologije koje, kada se zajednički implementiraju, imaju sposobnost potpuno transformirati industrijske sektore. Razvoj algoritma i modela koji omogućuje računalima da uče i donose razna predviđanja i odluke na temelju podataka područje je koje pokriva strojno učenje, dok digitalni blizanac generira virtualni ekvivalent, odnosno blizanca stvarnog objekta ili procesa. Integracija strojnog učenja rezultira velikim brojem poboljšanja tehnologije digitalnog blizanca, kao što su kvalitetnija analiza podataka, mogućnost optimizacije i simulacije te prediktivnog održavanja. Algoritmi strojnog učenja analiziraju podatke prikupljene od strane digitalnog blizanca s ciljem otkrivanja nedopuštenih odstupanja. Također, algoritmi i modeli mogu prepoznati neuobičajena ponašanja u stvarnom vremenu na temelju povijesti podataka. Kada se govori o optimizaciji i simulaciji, algoritmi mogu odrediti najučinkovitije postavke, uvjete rada ili operativne uvjete analiziranjem povijesti podataka te učenjem iz uzoraka. Takva mogućnost manipulacije podacima može se upotrijebiti i na području prediktivnog održavanja, koje u suvremenom dobu ima značajnu ulogu, kako zbog potražnje visoke efikasnosti, tako i zbog visokog obujma proizvodnje. Algoritmi uvidom u povijest podataka i trenutne operativne podatke prikupljene od strane digitalnog blizanca mogu identificirati kada je potrebno otkazivanje ili popravak određenog sredstva. [21]

Umjetna inteligencija (*eng. Artificial Intelligence*) je sposobnost digitalnog računala ili robota upravljano računalom za obavljanje zadataka koji se obično povezuju s inteligentnim bićima. Ovaj termin se često primjenjuje na sustave koji su temeljeni na intelektualnim procesima karakterističnima za ljude, poput otkrivanja značenja, donošenja odluka ili generalizacije. Od razvoja digitalnih računala pokazao se eksponencijalni rast u sposobnosti računala da obavlja razne zadatke, no unatoč stalnom napretku u brzini obrade i kapacitetu memorije računala još uvijek ne postoje programi koji mogu nadmašiti fleksibilnost ljudi u obavljanju zadatka. [22]

Naglim porastom inovacija i uvođenjem naprednih tehnologija, AI se značajno pojavljuje kao dio IoT-a. Internet stvari omogućen umjetnom inteligencijom značajno doprinosi izbjegavanju neželjenih kašnjenja te pomaže u povećanju organizacijske učinkovitosti. Na slici 9 prikazano je na koje je sve načine AI djelovao unutar implementacije IoT-a. [12]

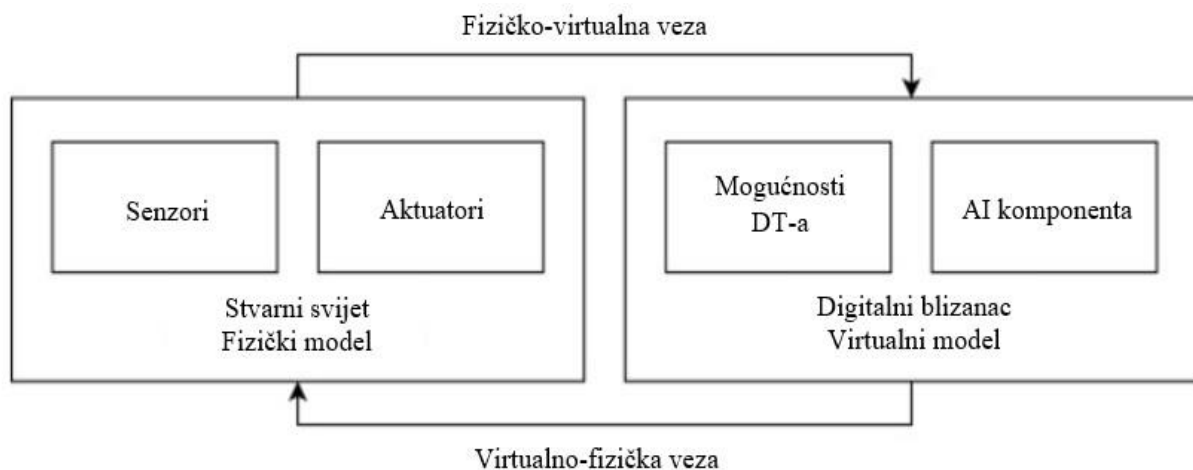


**Slika 9.** Utjecaj umjetne inteligencija na IoT [12]

Arhitektura digitalnog blizanca, odnosno njezina izrada vrlo je zahtjevan i dugotrajan proces te iziskuje mnogo resursa. Uz to, ovaj proces nerijetko uključuje i projektiranje i razvoj novih modela koji može trajati i do godinu dana. U spomenutoj situaciji, gdje je arhitektura DT-a razvijena kao čvorovi i bridovi u vremenskom grafu, veliku podršku pružaju mogućnosti umjetne inteligencije, poput platformi za razvoj softvera ili veliki jezični modeli koji mogu generirati kod za digitalnog blizanca i time uvelike ubrzati razvojni proces. Koncept rada digitalnih blizanaca ovisi o protoku podataka iz različitih izvora čije upravljanje može biti zahtjevno. Ovaj problem jednostavno se rješava ugrađivanjem velikih jezičnih modela koji imaju mogućnost značajnog sažimanja podataka uz zadržavanje najbitnijih informacija. Kao primjer, u proizvodnom procesu, generativna umjetna inteligencija može organizirati podatke iz zapisa održavanja te vizualno prikazati opremu i operativni dio, nakon čega digitalni blizanc postiče mogućnost analize podataka, identifikacije zapisa ili anomalija koje nisu jasno vidljive iz neuređenih podataka. [23]

Na slici 10 prikazan je shematski model digitalnog blizanca, prikazujući dvosmjerni protok informacija između digitalnog modela i stvarnog sustava, koji ima dodatak komponente umjetne inteligencije. Stvarni, odnosno fizički sustav sadrži senzore i aktuatora koji čine aktivni dio te ih digitalni blizanc može kontrolirati. Umjetna inteligencija je komponenta integrirana u digitalni sustav te ispunjava prediktivne zadatke, na primjer pružanja određenih prognoza na temelju podataka o temperaturi ili operativnih podataka u stvarnom vremenu.

Fizička i virtualna strana dvosmjerno su povezane, gdje virtualno-fizička veza predstavlja povratnu petlju od digitalnog blizanca koja šalje povratne informacije fizičkom svijetu na temelju unutarnje obrade i donošenja racionalnih odluka. S druge strane, fizičko-virtualna veza predstavlja tok podataka koji opskrbljuju digitalnog blizanca na temelju mjerenja iz stvarnog svijeta. [24]



**Slika 10.** Shematski prikaz DT-a i AI komponente [24]

Primjena umjetne inteligencije u digitalnim blizancima globalno je primjenjiv teorijski i tehnički sustav, u područjima poput dizajna proizvoda, proizvodnje opreme, medicinske analize, automobilske i zrakoplovne industrije. Kao što je već spomenuto, koncept digitalnih blizanca izvorno je predstavljen za implementaciju u zrakoplovne i svemirske industrije. Stvarni model zrakoplova uspostavlja se u digitalnom prostoru, a zatim se primjenjuje tehnologija umjetne inteligencije za analizu statusa zrakoplova u digitalnom prostoru na temelju čega se stvarni status leta i zrakoplov mogu sinkronizirati. Provođenjem ove procedure, svaki se proces polijetanja i slijetanja simulira i pohranjuje te, uz analizu podataka od strane AI tehnologije, može se jednostavno donijeti odluka treba li provesti neku vrstu održavanja i je li zrakoplov spreman za let. Područje automobilske industrije koje je danas sve više aktualno,

a uvelike ovisi o umjetnoj inteligenciji je autonomna vožnja. U realnom svijetu, tehnologija autonomne vožnje može smanjiti prometne nesreće te znatno povećati učinkovitost korištenja vremena i prostora u prometu. No, razvojem visoke razine tehnologije potrebne za takve sposobnosti vozila, digitalni blizanci koji simuliraju vožnju u digitalnom obliku postali su neizbježan dio procesa. Pošto se ova vrsta tehnologije implementira u područje koje može biti izuzetno opasno, automobili moraju proći rigorozne virtualne simulacijske testove kako bi se osigurala maksimalna sigurnost.

S kontinuiranim razvojem tehnologije inteligentne proizvodnje, razina informatizacije proizvodne industrije postupno se poboljšava. S ciljem osiguravanja da tvrtka ima sposobnost upravljanja cijelim proizvodnim procesom, poduzeća moraju ojačati upravljačke i kontrolne mjere svakog modula u proizvodnoj postrojbji. Kako se iz dana u dan povećava potražnja kupaca i sveukupni volumen tržišta, poduzeća se suočavaju s velikom količinom podataka, zahtjevima za podacima i strukturama podataka u proizvodnom procesu, što rezultira otežanom analizom i upravljanjem podacima. Stoga, razvoj moderne informacijske tehnologije, poput velikih podataka, IoT-a i umjetne inteligencije potaknuli su mnoga poboljšanja te transformaciju tradicionalne proizvodnje u inteligentnu, koja je mnogo prikladnija za suvremene uvjete. [26]

### **3.3. Analiza i tokovi podataka**

Termin analize podataka generaliziran je pojam koji obuhvaća sve analitičke koncepte s naglaskom na prikupljanje i prezentiranje podataka za analizu kako bi se stekli dublji uvidi. Kako bi se uopće krenulo u analizu podataka, potrebni su početni i operativni podaci koje treba pretvoriti u korisne i upotrebljive informacije. Takvu transformaciju podataka moguće je izvršiti s nekoliko potrebnih koraka; zahtjevi, prikupljanje, obrada i čišćenje podataka. Na početku procesa potrebno je definirati kakve podatke treba prikupiti i kako će se oni koristiti. Kada se teorijski odredi kakvi će se podaci koristiti, treba identificirati na kojem će se području procesa prikupiti i na koji način. Prikupljeni podaci zatim prolaze kroz fazu obrade u kojoj se sortiraju prema specifičnim zahtjevima. Završna faza osigurava da se prikupljeni i sortirani podaci pročiste, budući da mogu imati značajne praznine ili pogrešne informacije. [14] Tehnologije koje omogućuju analizu podataka slične su IoT-u u puno segmenata, ali im se dijelovi poput vizualizacije i algoritamske strane analitike malo razlikuju. U tablici 2 prikazani su funkcionalni blokovi i tehnologije koje omogućuju analizu podataka.

**Tablica 2.** Tehnologije zadužene za analizu podataka [14]

Domena	Omogućavajuća tehnologija
Objektna	Prikupljanje i prethodna obrada podataka
	Repozitorij podataka
Middleware	Skladišni objekti
	Obrada podataka
	Tehnike analize i algoritmi
Mrežna	Tehnologija bežične mreže
Aplikacijska	Hardware i vizualizacija podataka
	Aplikacija za analizu podataka

Proces započinje u objektnom području koje ima najmanje tri sloja. Prvi sloj prisutan je za prikupljanje podataka, odnosno bavi se prethodnom obradom podataka za buduća analitička rješenja. Samo prikupljanje podataka omogućava se putem raznih alata i metoda za osjetila podataka te digitalnom obradom signala. Drugi sloj je spremište podataka koje omogućuje pohranu i poveznica je za bazu podataka. Zadnji sloj predstavlja skladišne objekte koji imaju zadaću pohranjivanja velikih količina podataka putem poslužiteljskih pohrana. Middleware područje povezano je s objektnim koje također ima tri sloja, među kojima prvi sloj predstavlja povezanost domena. Također, sastoji se od obrade podataka koja predstavlja glavni dio za funkcionalnost same analitike podataka, pohrane na oblaku i glavnih middleware arhitektura. Nadalje, sloj analize i algoritama omogućuje zadatke rudarenja podataka, strojnog učenja, statistike i upita prikupljenih podataka.

Mrežno područje zaduženo je za prikazivanje tehnologija koje omogućuju protokole povezivanja s naglaskom na bežičnu komunikaciju te na koji način osiguravaju učinkovito prikupljanje i obradu podataka iz prethodnih slojeva. Zadnje područje u procesu toka i analize podataka je aplikacija koja također ima dva sloja. Prvi sloj su hardware i vizualizacije pomoću kojih se dobiva opipljiva tehnologija za bilježenje podataka i provođenje strojnog učenja ili statistike analize. Naposljetku, aplikacijski sloj ističe aplikacije vezane uz analitiku podataka kao što su autonomna vozila ili prepoznavanje slika. [14]

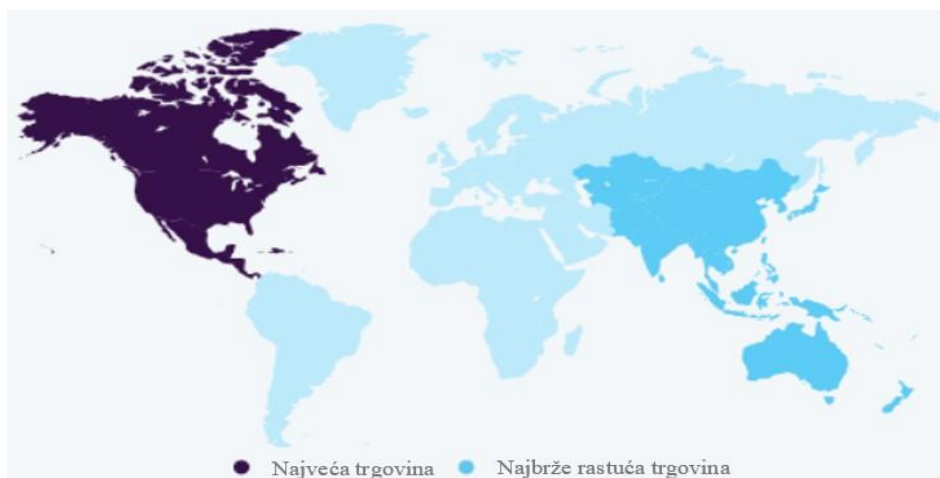
## 4. PRIMJENA DIGITALNIH BLIZANACA U INDUSTRIJI

Kako je suvremena industrija ušla u razvojni proces sveukupne digitalizacije, odnosno gdje proizvodni procesi usmjereni na poboljšanje kvalitete proizvoda, učinkovitosti i performansi sve više ovise o digitalnom dizajnu, javlja se problem izgradnje komunikacijskog kanala između fizičkog i digitalnog svijeta. Upravo je digitalni blizanac rješenje kao učinkovit način za ostvarivanje spoja između stvarnog procesa ili objekta te digitalne strane. [13] [27] Implementacija takve vrste tehnologije ne samo da pruža priliku za brže inovacije, već značajno mijenja tradicionalni model industrije. Zadnjih godina ova se tehnologija uglavnom koristi u visokovrijednim industrijama, poput svemirske ili industrije nafte i plina. Sa sve većim korištenjem 5G mreže i industrijskih IoT platformi, tehnologija digitalnih blizanaca neizbježno će se implementirati u narednih 5 do 8 godina. [27]

### 4.1. Usporedba različitih industrijskih sektora

Idući dio ovog rada imat će fokus na potencijalnu primjenu digitalnih blizanaca u različitim industrijskim granama; raspravljajući o domenama, sektorima i specifičnim problemima implementacije tehnologije digitalnih blizanaca u pojedinim područjima.

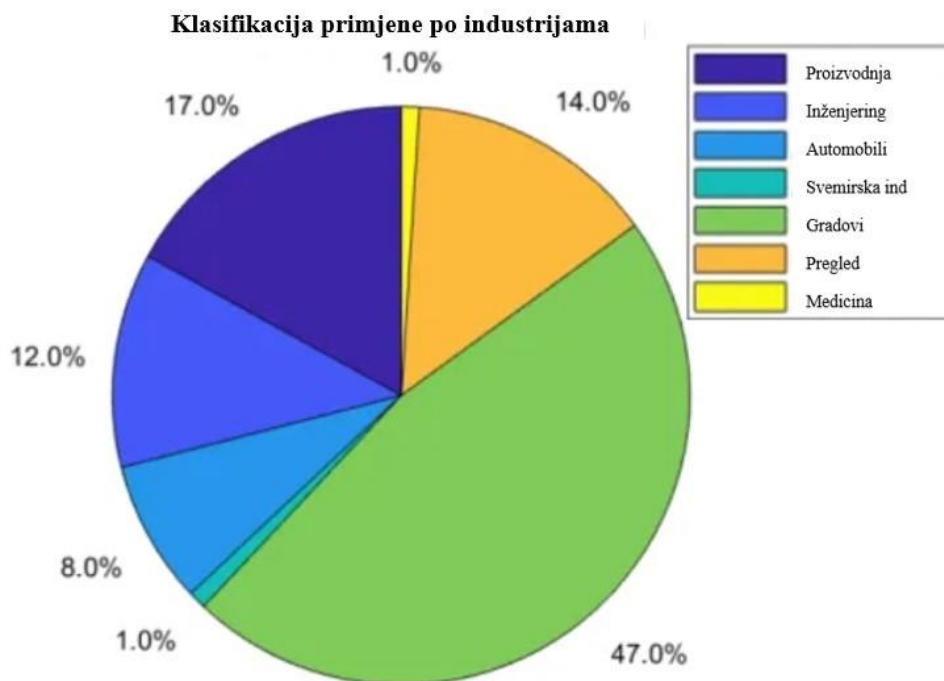
Tehnologija digitalnih blizanaca trenutno je jedan od najtraženijih poslovnih alata; te, prema IoT Analytics-u, tržište softvera za digitalne blizance poraslo je za 71% od 2020. do 2022. godine. [30] Također, predviđa se da će veličina tržišta digitalnih blizanaca doseći 193,7 milijuna dolara do 2030. godine. [31] Na priloženoj slici 11 prikazana je karta svijeta koja pruža uvid u globalnu raspodjelu trgovine digitalnih blizanaca. Regija Sjeverne Amerike dominirala je tržištem i činila je oko 34% ukupnog udjela u 2023. godini. [7]



**Slika 11.** Raspodjela globalne trgovine digitalnih blizanaca [7]



Kako je prikazano na slici 12, primjena digitalnih blizanaca vrlo je široka, od urbanih prostora i gradova kao najzastupljenijih sve do medicine koja je zastupljena svega 1%. Također, danas sve više jača implementacija u automobilskoj industriji, proizvodnji i svemirskoj opremi. [30] [3] Kao što će iduća analiza primjene pokazati, postoje primjene za multifunkcionalne digitalne blizance u raznim industrijama. Tvrtke poput maloprodajnih trgovaca te proizvođača zrakoplovnih i automobilskih dijelova usvojile su digitalne blizance i uspješno ih koriste. [30] Takva mogućnost upotrebe digitalnih blizanaca značajno otvara nove poglede na sadašnje i buduće procese, gdje npr. operateri mogu provesti sve vrste testova i simulacija. U spomenutim situacijama može se ispitati bilo kakav aspekt procesa, kao na primjer poboljšanje performansi uređaja korištenjem drugačije baterije, ili utječe li redosljed na proizvodnoj liniji na efikasnost samog procesa. [31] Kroz idućih nekoliko koraka ovog rada prikazat će se presjek implementacije DT-a u različitim industrijskim sektorima.



**Slika 12.** Udio zastupljenosti digitalnih blizanaca u pojedinim industrijama [30]

#### **4.1.1. Proizvodnja**

Digitalni bliznaci sve se više koriste za poboljšanje procesa u proizvodnji, gdje se stvaranjem virtualne replike industrijskog procesa, operateri mogu efikasnije ocijeniti podatke i analizirati trendove performansi u jedinici vremena. Konkretni primjer koji se danas uvelike prakticira je praćenje proizvodnih linija. Poduzeća ih mogu koristiti za praćenje ključnih pokazatelja uspješnosti (*eng. KPI*) kao što su tlak, temperatura i brzina. Također, koriste se i za prediktivno održavanje zbog mogućnosti praćenja okolišnih uvjeta koji često budu uzrok anomalija, odnosno kvarova linije. [3]

Zanimljiv primjer pruža tvrtka Rolls-Royce koja koristi digitalne blizance u svojem programu "IntelligentEngine" koji stvara digitalne blizance za svaki motor koji proizvedu. Takvim pristupom mogu prikupljati podatke iz više od deset parametara putem aktivnih senzora te time imaju mogućnost praćenja performansi motora u stvarnom vremenu tijekom letova ili vožnji automobila bez potrebnih zastoja. [3]

Implementacija digitalnih blizanaca u proizvodne procese omogućava niz beneficija, kao što su smanjeno vrijeme zastoja i troškovi održavanja i popravka, odnosno zamjene. Također, ovakav način rada učinkovitije koristi resurse, uključujući smanjenje potrošnje vlastite energije, vode i sirovina pošto su svi dijelovi procesa optimizirani. Kao što je već spomenuto, digitalni blizanci u stvarnome vremenu uočavaju anomalije u procesu koje bi mogle ukazivati na „usko grlo“. Uz to, kako suvremeno doba donosi sve veću neizvjesnost u svijetu proizvodnje i trgovine, digitalni blizanci osiguravaju bolje strateško planiranje simuliranjem različitih scenarija, kao što je promjena tržišta i njihove potražnje. [10]

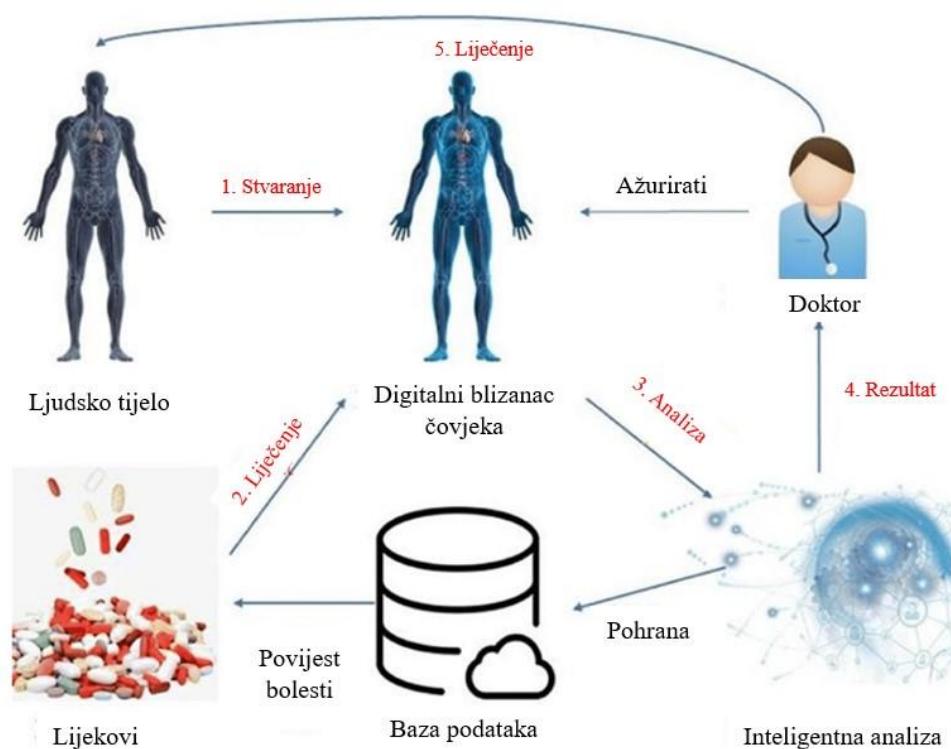
#### **4.1.2. Medicina**

Kako je već ranije spomenuto, zastupljenost digitalnih blizanaca na području medicine vrlo je mala, svega 1%. No, pitanje implementacije digitalnih blizanaca u zdravstvo ne smije se zanemarivati, već obratiti najveću pozornost kako bi se životni standard svakog pojedinca maksimalno poboljšao. Prikazivanje potencijalne primjene blizanaca u zdravstvenom sektoru pokazuje da njihova primjena nije ograničena samo na industrijsku proizvodnju. [14]

Istraživački rad, koji je predstavio Dickon Ross zajedno s kompanijom Hewlett-Packard, prikazuje stvaranje avatara ljudi na nekoliko načina pomoću AI tehnologije i IoT sustava. Iz perspektive zdravlja, tehnologija digitalnog blizanca u kombinaciji s AI algoritmima može se koristiti za predviđanje učinaka specifičnih promjena u načinu života na zdravlje osobe, preporučujući određene promjene na temelju analize AI-a. [14]

U novijim okruženjima predstavljeni su radni prototipi autonomne kirurgije koji koriste IoT i povezivanje u okviru industrije 4.0 za stvaranje digitalnog blizanca pacijenta. Spomenuti prototip koristi robotsku ruku, virtualnu stvarnost u okruženju s 4G mrežom s ciljem što preciznijeg izvođenja operacije. Bitno je napomenuti kako navedena ideja donosi niz problema, kao što je integracija samog prototipa s digitalnim blizancem. [14]

Uz to, digitalni blizanci također mogu omogućiti precizna medicinska djelovanja za budućnost, točnije prilagođenu medicinu za svakog pojedinog pacijenta istog stanja. Time se dobiva niz različitih opcija liječenja uz optimalnu upotrebu medicinskih resursa, kao što je korištenje minimalne potrebne količine lijekova uz smanjenje nuspojava. Takva personalizirana medicina može se postići korištenjem digitalnih blizanaca čiji je proces prikazan na slici 13. Prvi korak je prikupljanje podataka o tijelu pacijenta kako bi se izgradio njegov digitalni model. Zatim slijedi korištenje podataka iz baze podataka gdje se pronalaze uobičajeni lijekovi za određenu bolest kako bi se testirali na digitalnom modelu čovjeka. Nakon toga doktor dobiva rezultate inteligentne analize i ažurira digitalni bliznac pacijenta na temelju vlastite procjene. Ovaj proces se ponavlja sve dok se ne pronađe najbolji lijek koji se zatim pohranjuje u bazu podataka. [27]



**Slika 13.** Proces liječenja korištenjem DT-a [27]

### 4.1.3. Pametni gradovi

Suvremeno doba susreće se sa eksponencijalnim rastom urbanizacije, to jest društvo se nalazi u svijetu gdje preko 50% stanovništva čini urbanizirani dio. Istodobno, urbanizacija raste brže nego u prošlosti te se procjenjuje da će do 2050. godine dvije trećine stanovništva živjeti u gradovima. Brzi rast urbanizacije, gdje struktura gradova postaje sve složenija, predstavlja značajan izazov za mnoge gradske sustave. S porastom broja velikih gradova, njihovo upravljanje postaje sve teže te popularizacija pametnih gradova postaje sve složenija. [27]

Iz navedenih razloga, te vidljivo iz grafikona na slici 12, implementacija digitalnih blizanaca u svakodnevnicu velikih gradova postaje sve poželjnija. Pojava digitalnih blizanaca pruža mogućnosti u lakšem razvoju pametnih gradova koji imaju karakteristike višedimenzionalne percepcije, višedimenzionalnih podataka i inteligencije. Naime, ovakav sustav temelji se na povezanosti više različitih sustava digitalnih blizanaca, to jest podaci iz različitih izvora grade različite digitalne blizance. Na primjer, jedan dio blizanaca zadužen je za praćenje podataka o prometu i kretanju ljudi, dok drugi dio prati podatke o vremenskim uvjetima kako bi se bolje predvidjelo stanje okoliša u gradu. [27]

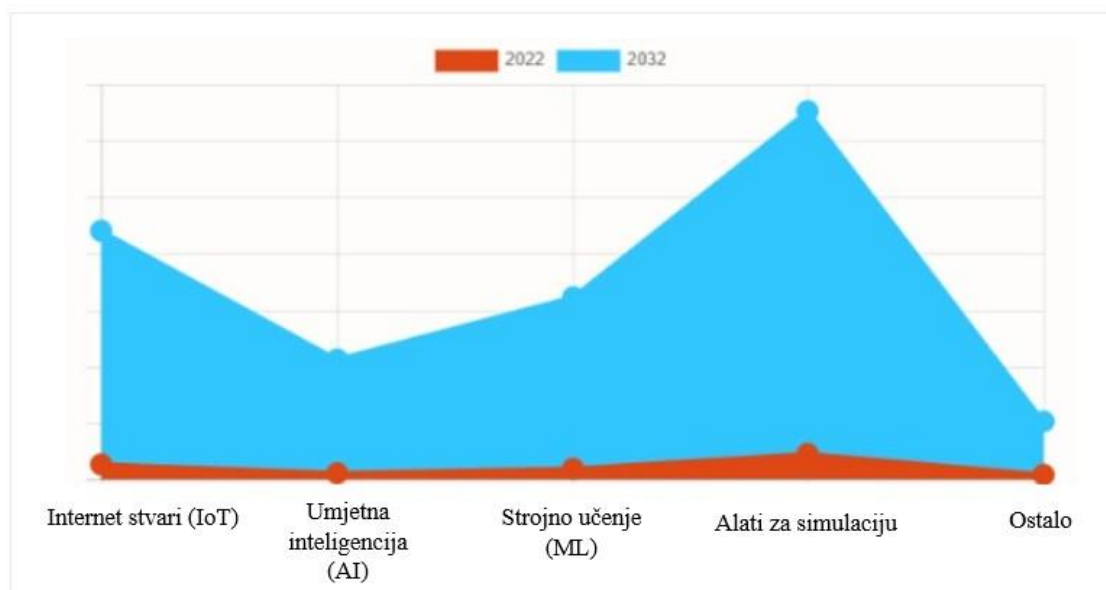
Primjena digitalnih blizanaca u pametnim gradovima je višeznačna, među kojima je najistaknutija vizualizacija samog grada. Kada se govori o pametnim gradovima, korištenje digitalnih blizanaca donosi ne samo intuitivniji gradski nadzor, već i kreiranje modela za predviđanje budućnosti grada. Na primjer, ako se poveća promet na jednom području, kakav će biti utjecaj na buku i kvalitetu zraka u odnosu na ostatak grada. Takav način rada zahtijeva mogućnost velikog broja opažanja koja definiraju uzročno-posljedične veze i matematičke modele između različitih čimbenika. [27]

Kako bi ideja pametnih gradova bila uspješna, prvo je potrebno modelirati postojeće gradove. Sam razvoj pametnih gradova, odnosno izgradnja modela digitalnog blizanca gradova, vrlo je težak zadatak, budući da su gradovi previše složeni. Za izgradnju pametnih gradova s digitalnim blizancima, potreban je visoko digitaliziran grad kao početna točka. Također, osnova za mogućnost upravljanja i razvijanja pametnih gradova je Internet stvari koji gradovima pruža bazu podataka za implementaciju digitalnih blizanaca. Na temelju IoT-a s računalstvom u oblaku, mogu se ostvariti veliki ekonomski razmjeri, standardizacija primjene, te softverska i uslužna rješenja, ubrzavajući učenje za operacije pametnih gradova. [27]

#### 4.1.4. Automobilska industrija

Život u suvremenom dobu nije moguć bez upotrebe automobila te se u proteklih desetak godina intenzivno radi kako bi se automobilska industrija dovela do savršenstva. Takav usmjereni rad uvelike se očituje i u tržišnoj vrijednosti automobilske industrije. Prema studijama predviđa se da će tržišna vrijednost porasti s 0,46 milijardi američkih dolara u 2020. godini na 5,06 milijardi američkih dolara u 2025. godini. [6]

Automobilska industrija se kroz povijest suočavala s mnogim poteškoćama, od skupih proizvodnih grešaka do dugotrajnih razvojnih ciklusa. Analizirajući navedene probleme, ideje novih tehnologija, poput digitalnog blizanca, mogu imati ključnu ulogu u budućem razvoju. Digitalni bliznac stvara virtualnu sliku stvarnog automobila ili nekih njegovih dijelova, što omogućuje provođenje raznih simulacija i testova u realnom vremenu. [6] S njima kompanije imaju omogućeno praćenje performansi svih automobilskih komponenti, sustava te cijelih vozila. Prikupljanjem i analizom podataka sa senzora ugrađenih u fizičke resurse, digitalni blizanci pružaju kontinuirano praćenje različitih parametara kao što su tlak, temperatura i vibracije. Ovo praćenje omogućuje automobilskim kompanijama otkrivanje bilo kakvih anomalija ili odstupanja od očekivanih performansi te na temelju toga donošenje raznih proaktivnih mjera prije nego se pojavi kritični problem. [8] Na slici 14 prikazana je usporedba zastupljenosti različitih tehnologija digitalnog blizanca u automobilske industrije u 2022. godini i 2024. godini.



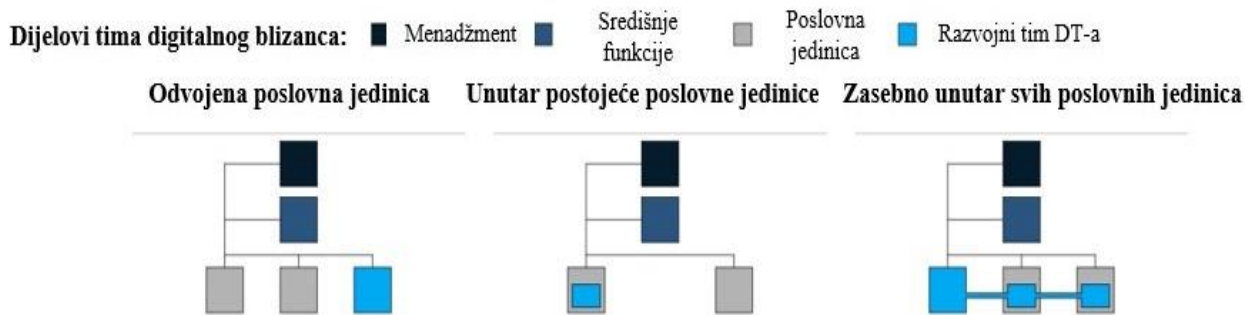
**Slika 14.** Usporedba tehnologija DT-a u automobilske industrije [8]

## 4.2. Izazovi i ograničenja

Izgradnja sustava koji podržava rad digitalnih blizanaca može biti vrlo složen proces. Korisnici koji se susreću s digitalnim blizancem u ranoj fazi implementacije prijavljuju veliki broj izazova u njihovom radu; kao što je integracija tehnologija potrebnih za njihovo funkcioniranje u postojeće okruženje. Također, digitalni blizanci zahtijevaju nove načine rada, posebice unutar funkcija istraživanja i razvoja (R&D). Time uspješan program digitalnih blizanaca zahtijeva mogućnost upravljanja promjenama, uz podršku višeg menadžmenta, te značajan tim koji će pratiti ključne trenutke, razvijati nove procese i podržavati njihovo usvajanje u organizaciji. [1]

S ciljem prevladavanja ovih potencijalnih izazova i prepreka, kompanije mogu uvesti fazni pristup usvajanja tehnologija digitalnih blizanaca. Početne tri faze su podijeljene na tehnološke izazove, gdje se vrši odabir platforme, dizajna arhitekture i integracije. Faze u nastavku procesa fokusiraju se na organizacijsku transformaciju potrebnu za podršku novim procesima i načinima rada. [1] Faza koja započinje konkurentskom inteligencijom i definiranjem opsega, identificira na razini organizacije vrste rješenja digitalnih blizanaca dostupnih u njezinom sektoru i procjenjuje koliko svaka vrsta nudi vrijednosti. Iduća faza, dizajn arhitekture i definiranje softverskog stoga, sastoji se od identificiranja specifične softverske komponente, odnosa i sučelja koja će organizaciji trebati kako bi ostvarila svoje ciljeve vezane uz implementaciju digitalnih blizanaca. Dizajniranjem softverskog stoga pružaju se relevantne mogućnosti, koristeći kombinaciju postojećih alata za digitalni dizajn i novih, naprednih elemenata. Faza razvoja softvera mora biti na najvišoj razini, gdje će organizacija razviti procese i sposobnosti sustava potrebnih za razvoj i integraciju platforme digitalnog blizanca.

Na slici 15 prikazani su načini integracije tehnologija digitalnih blizanaca u organizacijama, gdje tim može odabrati jedan od tri prikaza. Tim zadužen za digitalne blizance može biti strukturiran kao zasebna poslovna jedinica te je odgovorna za stvaranje vlastitog portfelja digitalnih sredstva koja se također prodaju zajedno s njima odgovarajućim fizičkim sredstvima. Nadalje, tim može biti integriran u već postojeću poslovnu jedinicu, gdje je fokus na razvoju i podršci aplikacijama digitalnih blizanaca povezanih s proizvodima iste poslovne jedinice. Kao treći izbor, tim može djelovati kao potpuno zasebni centar koji podržava razvoj aplikacije unutar postojećih poslovnih jedinica. Ovakav pristup uvelike pomaže tvrtkama da efikasno skaliraju svoja djelovanja u području digitalnih blizanaca, čime osiguravaju dosljedne procese i tehnološke komponente. [1]



**Slika 15.** Tipovi integracije sektora DT-a i poslovnih jedinica [1]

Kroz više istraživanja, kao i u samoj praksi, identificiran je velik broj prepreka u implementaciji i radu s digitalnim blizancima. Provedeni testovi i analize usredotočeni su u najvećoj mjeri na procesnu industriju, iako drugi industrijski sektori također uključuju nekoliko istaknutih prepreka. Prvi problem, koji je danas podosta raširen, odnosi se na prijelaz sa stare na novu i najmoderniju tehnologiju. Ova kategorija prepreka uključuje i problem integracije novih sustava u postojeće, kao i problem integracije različitih dijelova postojećih sustava. Suvremeno se doba temelji na velikom broju informacija i podataka pohranjenih na oblaku, što uz mnogo benefita donosi i ozbiljne problem. Jedan takav problem je sigurnost koji obuhvaća sve rizike povezane s prikupljanjem, razmjenom, pohranom i obradom podataka, kao i zaštitom intelektualnog vlasništva. [4] A. Rasheed u svom istraživanju ističe potrebu za transparentnošću podataka i predlaže Blockchain kao učinkovito rješenje za osiguranje sigurnosti i transparentnosti. [25] [4]

Nadalje, problemi performansi direktno su povezani s ograničenjima u softverskim i hardverskim resursima koji osiguravaju učinkovit protok podataka između fizičkih i digitalnih sustava, čime se ostvaruje puni potencijal tehnologije digitalnog blizanca u industrijskim aplikacijama. Uz to, bitno je spomenuti i organizacijske probleme koji obuhvaćaju izazove s kojima se tvrtke susreću za vrijeme rada novih tehnologija kao što je digitalni bliznac. Ovaj tip problema usko je povezan s nestabilnosti na tržištu rada u posljednjih nekoliko godina, što je uzrokovalo odlazak velikog broja visoko obučanih i kvalificiranih ljudi. Ova pojava također utječe i na drastično povećanje troškova rada za tvrtke u ovoj vrsti industrije. [4]

### 4.3. Prednosti i budućnost digitalnih blizanaca

Implementacija tehnologije digitalnih blizanaca u sadašnje uobičajene industrijske procese donosi niz revolucionarnih prednosti. Sposobnost digitalnog blizanca da omogući progresivno učenje i zabilježi prešutno znanje, pruža ključnu prednost pohranjivanja i strukturiranja informacija na način koji inženjeri i operateri mogu razumjeti. [2]

Kao što je već spomenuto ranije, glavni cilj implementiranja digitalnih blizanaca je postizanje autonomnih operacija koje se podržavaju kroz nekoliko segmenata. Za prvu točku može se uzeti uključivanje radne snage putem obavijesti i vizualnih prikaza koje osiguravaju bolje donošenje odluka. Također, takvi kontekstualni tipovi podataka korisnicima pružaju brže i pametnije djelovanje gdje se fokus usmjerava na ključan problem. Nadalje, omogućava se učenje od radne snage putem digitaliziranog znanja koje dolazi kao niz strukturiranih podataka te razvijanje platforme i upravljanja za skaliranje. Treba istaknuti mogućnost integracije sustava čovjeka i stroja gdje nova tehnologija uvelike podržava takav način rada te prisutnost kognitivne tvornice koja identificira optimalne radnje. Ovo radi na način da sustav preporučuje odgovarajuće radnje kombinirajući reakcije čovjeka i stroja. Kada se analizira sam operativni dio, bitno je naglasiti mogućnost optimizacije i evolucije operacija samoučećim i autonomnim sustavima zatvorene petlje. Takvi sustavi zatvorene petlje dizajnirani su da osjete, djeluju, razumiju i uče ljudsko ponašanje. [2]

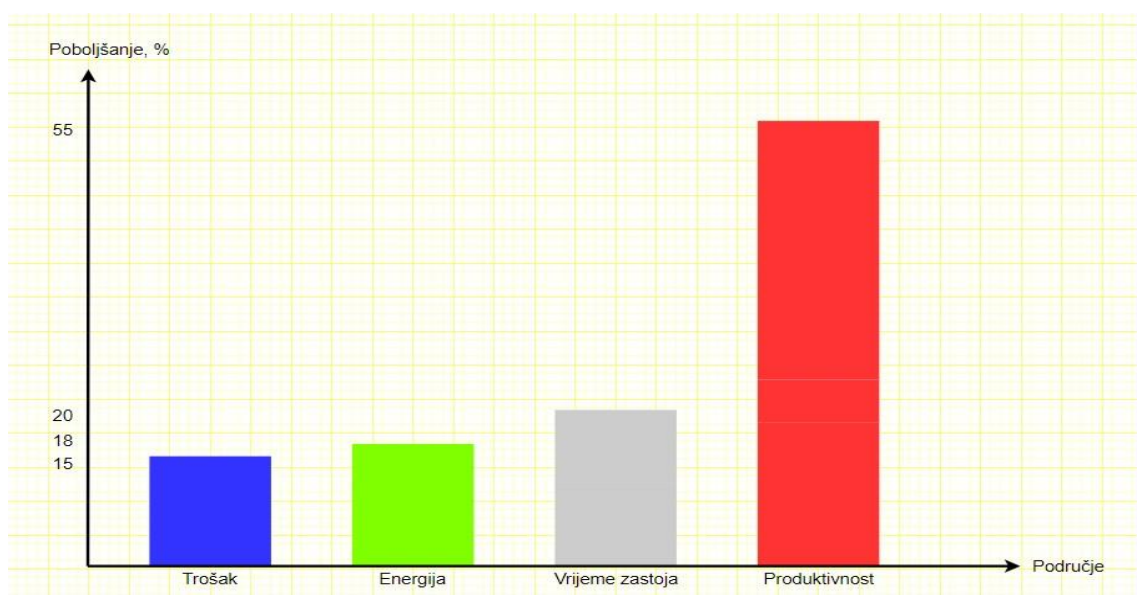
Tehnološko doba u kojem se trenutno nalazimo mijenja se velikom brzinom te tako stojimo na korak do novih tehnoloških otkrića i inovativnih ideja čime tehnologija digitalnog blizanca dobiva sve više na značenju. Budući trendovi digitalnih blizanaca mogu se sve lakše predvidjeti i definirati te kao osnovni primjer može se uzeti buduće širenje u nove industrijske sektore, odnosno digitalni blizanci će izaći iz svojih početnih okvira i ući u neistražena područja životnog okruženja. Njihova prilagodljivost potaknut će inovacije u raznim sektorima gdje će moći rješavati do sada nepristupačne probleme. Također, današnji život svakog čovjeka povezan je s bezbroj podataka i njihovim spremanjem putem digitalnih platformi. Kombinacijom platformi i digitalnih blizanaca osigurat će se sigurna pohrana podataka, mogućnost njihove obrade i univerzalna dostupnost. Uz to, popularna 5G mreža revolucionirat će okruženje digitalnih blizanaca; gdje će se visokim brzinama, niskom latencijom i masovnom pokrivenošću osigurati besprijekorni prijenos podataka između digitalne strane blizanaca i njihovog fizičkog dijela. Zaključno, mogućnost razvoja i uspjeha ovakve vrste tehnologije je obećavajuća te se može reći da je era digitalnih blizanaca tek započela. [28]



#### 4.4. Kvantitativni pokazatelji uspješnosti implementacije

Usporednom industrijskih procesa prije i poslije implementacije industrije 4.0 i tehnologije digitalnih blizanaca, podržani od strane umjetne inteligencije, strojnog učenja, 5G mreže i Internet stvari, mogu se iščitati značajna poboljšanja na području energije, vremena zastoja, troškova i produktivnosti. U naprednim zemljama poput Francuske, Japana, Njemačke i Kine, projekti vezani za industriju 4.0 i digitalne blizance, koji se odnose na autonomne procese i uštedu energiju, stalno rastu. Ušteda energije jedna je od najistaknutijih tema kada se govori o poboljšanju energetske učinkovitosti industrijskih procesa. [32]

Prema izvješćima PricewaterhouseCoopersa (PWC) [33], poboljšanja vođena podacima za učinkovitost resursa i energije očekuju se s povećanjem od 18%. Također, navedeno je kako industrije vođene tim podacima već generiraju više od 110 milijardi eura dodatnih prihoda u Europi. Uz to, procijenjeno je da industrije koje implementiraju industriju 4.0 i tehnologije digitalnih blizanaca poboljšavaju produktivnost u tehničkim znanostima za 45 – 55%. [32] Uz provedene analize energetske učinkovitosti i same produktivnosti proizvodnje, bitno je naglasiti i iznimna poboljšanja u ekonomskim područjima. Dobar primjer za ovu analizu je zrakoplovna industrija, koja je uporabom digitalnih blizanaca smanjila vrijeme zastoja i održavanja za 20%, čime se značajno smanjuju troškovi. Točnije, sektor proizvodnje identificirao je kako proizvodne linije uporabom digitalnih blizanaca rezultiraju s 15% smanjenja ukupnih troškova. [34] Na slici 16 prikazan je dijagram koji definiran odnos poboljšanja u određenim područjima industrijske proizvodnje nakon implementacije digitalnih blizanaca.



Slika 16. Dijagram poboljšanja nakon uvođenja DT-a

Kao dodatak u ovoj analizi, uzet će se primjer iz studijskog istraživanja provedenog na području kampusa Arena2036 gdje će se analizirati rekonfiguracija iWarehouse-a izvršena na dva načina. Prvi se način sastoji od rekonfiguracije koji uključuje sinkronizaciju modela digitalnog blizanca s pomoćnim sustavom, dok drugi način obuhvaća uobičajene procese u industriji, bez podrške visoke industrije 4.0 i digitalnog blizanca. Proces rekonfiguracije započinje bez korištenja digitalnog blizanca proučavanjem ponašanja sustava i identifikacijom njegovih komponentni. Idući korak je stručna rasprava o potrebnim modifikacijama i komponentama u sustavu kako bi se ispunili potrebni zahtjevi kupca. Nakon toga se naručuju odgovarajuće komponente i modificira iWarehouse. S druge strane, kod rekonfiguracije pomoću digitalnog blizanca, prvi korak je korištenje pomoćnog sustava za detekciju promjena. U kratkom vremenu, pomoćni sustav uspješno može dovršiti analizu PLC kontrolnog softvera u referentnom trenutku i stvarnom stanju te ispravno identificirati sve promjene koje su se dogodile u iWarehouse-u. Na slici 18 prikazana su vremena dijelova procesa rekonfiguracije iWarehouse-a bez korištenja digitalnog blizanca i s korištenjem.

Koraci procesa	Trošak sati	Koraci procesa	Trošak sati
Start		Start	
Faza planiranja 1: analiza ponašanja i dokumentacija postojeće konstrukcije	6.8 sati	Sinkronizacija modela Digitalnog blizanca putem pomoćnog sustava i prilagodba	2 sata
Faza planiranja 2: istraživački podaci i stručne rasprave za planiranje konverzije	15.5 sati	Planiranje rekonfiguracije koristeći digitalni blizanc	3 sata
Faza planiranja 3: istraživački podaci i stručne rasprave za odabir novih komponenti	10.5 sati	Planiranje rekonfiguracije koristeći digitalni blizanc	
Naručivanje komponenti i fizičko postavljanje	80 sati	Automatska generacija SPS programa koristeći digitalni blizanc	0.5 sati
PLC programiranje i testiranje ponašanja sustava tijekom puštanja u rad	10.4 sata	Virtualno puštanje u rad i SiL simulacija	2 sata
Vrijeme za ispravljanje grešaka	22.8 sati	Naručivanje komponenti i fizičko postavljanje	80 sati
U radu		U radu	
1. rekonfiguracijski proces bez upotrebe digitalnog blizanca	Ukupno: 146 sati	2. rekonfiguracijski proces korištenjem sinkroniziranog digitalnog blizanca	Ukupno: 87.5 sati

**Slika 17.** Usporedba uštede vremena korištenjem DT-a [35]

## 5. ANALIZA PRIMJERA DIGITALNOG BLIZANCA U INDUSTRIJI

Kako bi se najbolje razumio rad digitalnog blizanca, njegove prednosti i mane, analizirat će se konkretan primjer cjelokupnog procesa, u ovom slučaju u automobilskoj industriji, gdje je u svim operativnim dijelovima prisutan digitalni blizanac. Za primjer analize odabrana je automobilska industrija iz razloga što je današnji svakodnevni život nezamisliv bez nekakvog oblika transportnog vozila te uz to, proizvodnja i tržište automobila iz godine u godinu eksponencijalno raste donoseći nove ideje i nova pitanja.

S obzirom na veliki iskorak u području umjetne inteligencije, internet stvari i velikih podataka, bitno je postići sposobnost nošenja s novom generacijom informacija, tehnologija i geografskih podataka. Kombiniranjem spomenutih tehnologija s tehnologijom digitalnih blizanaca ključan je element u digitalnim trendovima automobilske industrije te predvodi u primjenama u prometu za održavanje, planiranje i sigurnost sudionika. [16] U automobilskoj industriji, digitalni blizanci koriste se za simulaciju i testiranje novih dizajnerskih koncepta prije njihovog konstruiranja, optimizaciju proizvodnih procesa te predviđanje ponašanja proizvoda u različitim uvjetima. [6]

### 5.1. Dizajn i inženjering automobila

Digitalni blizanci u automobilskoj industriji omogućuju mrežno praćenje fizičkih montažnih linija, gdje operater dobiva nadzor i mogućnost upravljanja složenim sustavima ili okruženjima. Takvim načinom rada mogu se u stvarnom vremenu identificirati uska grla na montažnoj liniji, neučinkovitosti ili bilo kakvi specifični problemi, što rezultira smanjenim zastojima te nižim troškovima održavanja. Također, prije pokretanja procesa proizvodnje, odnosno postavljanja proizvoda na liniju, digitalnim blizancima mogu se provesti realistične simulacije i scenariji iz prakse za procjenu učinka promjena ili novih konfiguracija prije njihove implementacije. [15] Proces dizajna i inženjeringa proizvodnje automobila prikazan je u shematskom obliku na slici 18 te se može podijeliti u četiri dijela. Prvi korak je tzv. dizajn u ranoj fazi gdje tvrtka stvara virtualne prototipove vozila i njegovih komponenti kako bi se testirao i usavršio dizajn. Ovim postupkom se uvelike smanjuje nepredvidiv proces dizajniranja te se minimiziraju potencijalne pogreške. Drugi korak je optimizacija performansi u kojem operateri simuliraju i kasnije po potrebi optimiziraju performanse vozila u različitim uvjetima u kojima se vozila mogu naći. Optimizacija se odnosi na sve dijelove automobila, od motora, aerodinamike, potrošnje goriva, pa sve do udobnosti sudionika u vožnji. Treći korak je sigurnosno testiranje gdje virtualne replike automobila prolaze različite testove sudara i drugih

sigurnosnih testova bez da tvrtke moraju trošiti fizičke prototipove. Zadnji korak je optimizacija proizvodnje u kojem se dobiva optimalni raspored montažnih linija, potrebnih operatera te dizajna alata i strojeva. [6]



**Slika 18.** Shematski prikaz inženjeringa proizvodnje automobila koristeći DT [6]

### 5.1.1. Pozitivni učinci DT-a na automobilsku industriju

Korištenje digitalnih kopija montažnih linija, odnosno digitalnih blizanaca, u proizvodnji može pomoći proizvođačima u pronalaženju i najsitnijih problema koji su na prvu nemogući za prepoznati, nego tek kada se vozilo pošalje u rad. Također, suradnja s digitalnim blizancima povećava preciznost i eliminira greške uzrokovane ljudskim faktorom iz cijelog proizvodnog sustava. U nastavku će se spomenuti neka od najbitnijih područja pozitivnog utjecaja digitalnih blizanaca u automobilskoj industriji.

Velikim razvojem cjelokupne industrije iz godine u godinu, povećava se i standardizacija kontrole kvalitete, pa tako implementacija digitalnih blizanaca uvelike pomaže u tom području. Praćenje proizvodnog procesa u stvarnom vremenu omogućuje proizvođačima da uoče bilo kakve neispravnosti s kvalitetom proizvoda. Za primjer kompanije koja koristi ovu tehnologiju može se uzeti BMW. Oni koriste digitalne blizance kako bi identificirali uska grla u svom proizvodnom lancu te na taj način održavaju visoki standard kvalitete, dok istovremeno smanjuju troškove i vrijeme zastoja. Također, uz kontrolu kvalitete bitno je povezati i proaktivno održavanje gdje digitalni blizanci pomažu u praćenju performansi proizvoda i identificiraju potencijalne probleme s održavanjem. Time se sprječava nastajanje većeg kvara koji može uzrokovati ekonomske štete, pa čak i zaustavljanje proizvodnje. [6]

Digitalni blizanci omogućuju proizvođačima da pokrenu virtualnu obuku svojih radnika pomoću virtualnih simulacija te na taj način, proizvođači mogu pomoći radnicima da usavrše svoje vještine prije nego što rade na fizičkoj opremi. Konkretni primjer gdje se radnici na taj način obučavaju je Ford Motors koji pruža VR program obuke za simuliranje scenarija iz stvarne proizvodnje. Nadalje, digitalni blizanci imaju mogućnost i upravljanjem cijelog lanca

opskrbe na način da stvaraju digitalnu repliku pomoću koje proizvođači automobila mogu u realnom vremenu promatrati kretanje sirovina, gotovih proizvoda i elemenata. Time se dobiva poboljšana obrada narudžbi, kraće vrijeme isporuke i poboljšano upravljanje zalihama. Na kraju procesa proizvodnje kompletnog automobila, digitalni blizanci se koriste i za personalizaciju vozila prilagođenu željama kupca. Tako na primjer, unutrašnje značajke automobila mogu biti promijenjene u nekoliko sekundi ovisno o potrebi kupca bez rada fizičkog primjerka. [6]

### **5.1.2. Prepreke i budućnost automobila**

U svakoj pojavi neke nove ideje ili elementa u industriji postoje početni izazovi, pa su tako i kod digitalnih blizanaca u automobilskoj industriji prisutne mnoge negativne strane pri implementaciji ove tehnologije u konvencionalnu proizvodnju vozila. Izazovi su prisutni u različitim dijelovima proizvodnje, od tehničkog sektora, sigurnosti i privatnosti, pravnih pitanja i regulativa, pa sve do organizacije unutar kompanije. Kao što je već spomenuto, digitalni se blizanci temelje na velikom broju senzora gdje je vjernost podataka ključna. Digitalni blizanac s netočnim ili nedovoljno preciznim podacima neće ispravno prikazati vozilo, što može značajno utjecati na njegove operativne sposobnosti u budućem korištenju. Na primjer, podaci o specifičnim komponentama, kao što je ubrizgavanje goriva ili vijek trajanja ležaja, ključni su za simulaciju i optimizaciju performansi cijelog sustava. Uz samu točnost podataka, bitna je sposobnost digitalnog blizanca da može interpretirati podatke iz različitih izvora, kao što su IoT uređaji, senzori, baze podataka i mnogi drugi. Svi ti prikupljeni podaci čine ogromnu količinu informacija koju treba negdje pohraniti, te ako se pribroji da je automobilska industrija jedna od najvećih danas, dolazi do problema složenosti spremanja i analize podataka u stvarnom vremenu. Također, računalna složenost jedna je od glavnih ograničenja kod simulacija u stvarnom vremenu. Model digitalnog blizanca vozila zahtijeva velik broj izračuna te njegovo stvaranje, za današnja računala, može biti dosta intenzivno. [6]

Kao što je već spomenuto, nisu samo tehnički izazovi prisutni u radu digitalnog blizanca, već su tu i pravna pitanja, poput usklađenosti podataka i intelektualnog vlasništva. Primjena naprednih tehnologija predstavlja izazov u pridržavanju ovih zakonskih pitanja. Stoga je ključno uspostaviti smjernice i norme za korištenje digitalnih blizanaca, na primjer uključiti suradnju s regulatornim tijelima i organizacijama za standardizaciju. Kod suradnje dvije ili više tvrtke važno je postaviti na snagu odgovarajuće propise i sporazume jer su veliki rizici da druga tvrtka koristi nečije intelektualno vlasništvo u svoju korist bez prethodnog dopuštenja. [6]

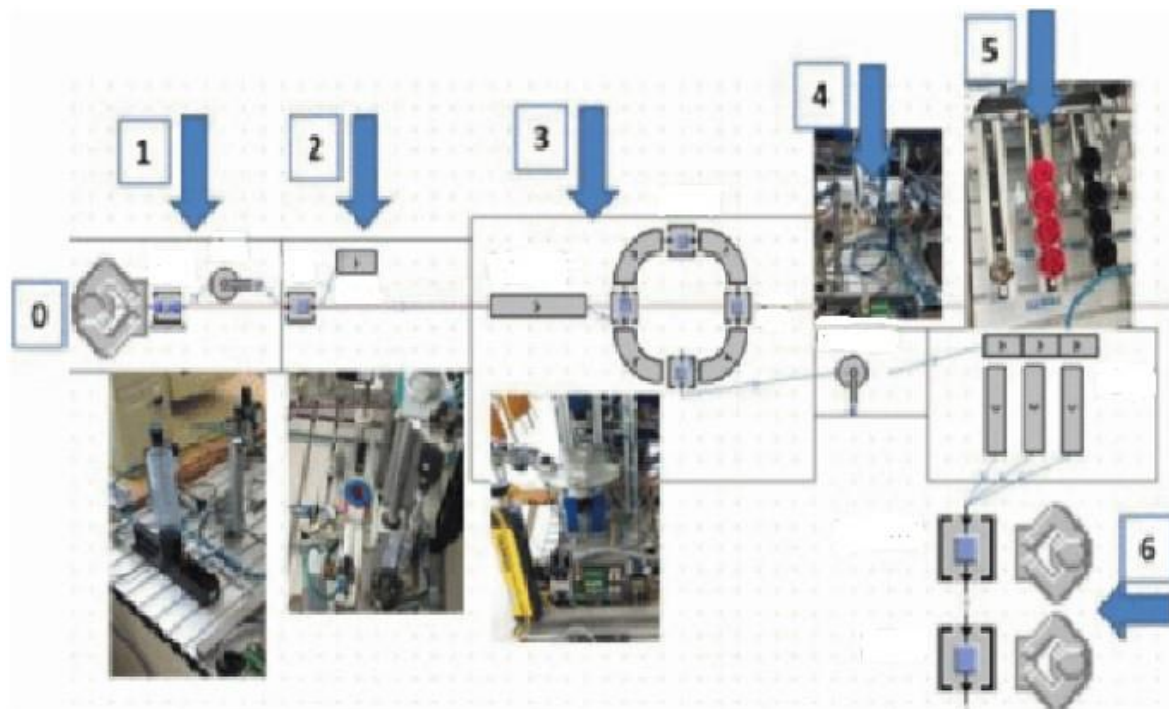
Budućnost tvrtki koje trenutno koriste i razvijaju tehnologiju digitalnih blizanaca imaju veliki potencijal s brojnim prilikama koje im se po putu otvaraju, poput BMW-a, Porschea, Ford Motorsa i Toyote. Faktori koji pokreću rast tvrtki u ovom području su povećana upotreba IoT uređaja, eksponencijalni napredak kod umjetne inteligencije i strojnog učenja te sve veća pokrivenost 5G mrežom. Napredak u umjetnoj inteligenciji puno više pomaže automobilskim kompanijama koje već sada implementiraju digitalne blizance zbog mogućnosti točnijih predviđanja i pametnijih donošenja odluka. Osim toga, sve veća potražnja i potreba za prediktivnim održavanjem u automobilskim industrijama stvara prilike za one kompanije koje u radu koriste digitalne blizance. Pomoću njih lakše se identificiraju potencijalni problemi prije nego li dođe do većih eskalacija, što je u današnjem obujmu proizvodnje automobila veliki ekonomski udarac, čime smanjuju zastoje i produžuju životni vijek opreme. [29] Na slici 19 prikazan je model buduće tvornice automobila koja je u potpunosti implementirala digitalne blizance u svoju proizvodnju.



**Slika 19.** Model budućih automobilskih tvornica [29]

## 5.2. Analiza proizvodne linija

Za potpuno razumijevanje mogućnosti tehnologije digitalnog blizanca, analizirat će se još jedan primjer koji će predstavljati digitalnog blizanca dinamičke proizvodne linije. Ovaj projekt digitalnog blizanca osmišljen je na Institutu za automatizaciju, mjerenje i primijenjenu informatiku na fakultetu strojarstva u Bratislavi. Koncept se temelji na fizičkoj proizvodnoj liniji [Slika 20.] i njenom digitalnom kopijom čija je glavna značajka sučelje putem kojeg se izmjenjuju podaci. [36]



**Slika 20.** Shema fizičke proizvodne linije [36]

Proizvodna linija, odnosno lanac simulirao je proizvodnju pneumatskih cilindara [Slika 21.] i počinje s vezom stanice. Ovaj dio predstavlja proces same fizičke proizvodnje. Stanice su bile poredane redom: posuda, manipulator, ispitivanje visine radnog predmeta, procesna stanica, manipulator i stanica za sortiranje koja se sastoji od 4 pokretne trake. Posljednja radna stanica bila je ručna montaža, gdje su se kombinirali ručni dijelovi poput opruge, klipa i tijela cilindra. Također, simulirana proizvodna linija proizvodila je tri vrste cilindra, jedan s metalnim tijelom i dva s plastičnim tijelom. Kako bi se lakše prepoznavali cilindri, tijela su se radila u različitim bojama. [36]

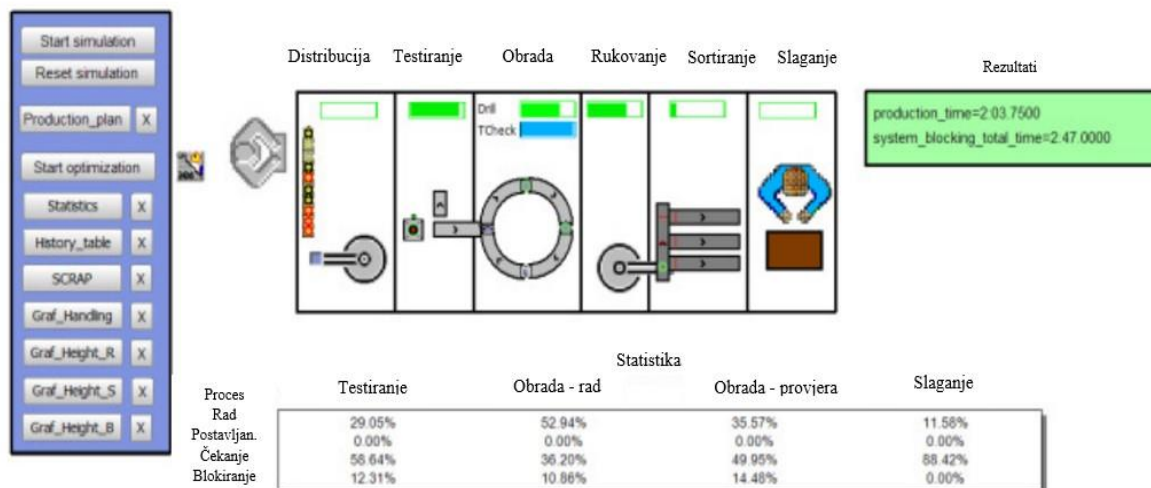


**Slika 21.** Komponente cilindra [36]

S druge strane, digitalni dio temelji se na alatu za simulaciju nazvanom Plant Simulation (PS) razvijen od strane SIEMANS-a. Ovaj model predstavlja detaljnu virtualnu kopiju fizičkog procesa koji je uključen u sastavljanje hidrauličkih klipova. Izlaz iz fizičkog dijela procesa bio je prijenos informacija o vremenima kretanja određenog dijela u pohranu podataka. Svaki dio procesa bio je detaljno mapiran kako bi digitalni bliznac mogao ispravno prihvatiti i interpretirati prikupljene podatke procesa.

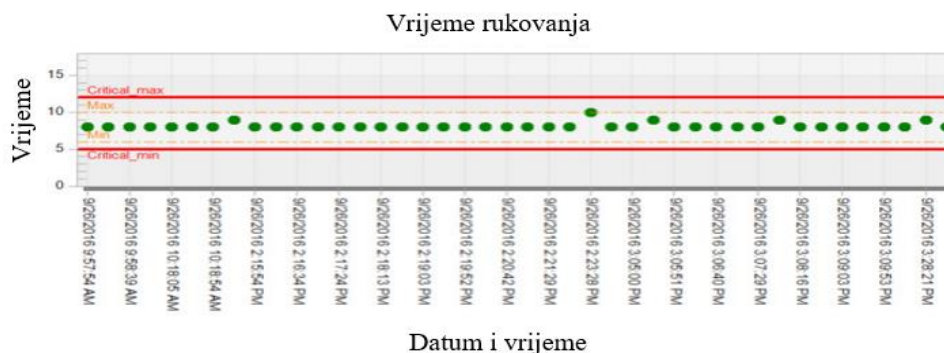
Sam proces započinje operatorom koji opskrbljuje liniju te stavlja komponente u sustav, odnosno posude, prema proizvodnom planu. Drugi dio procesa temelji se na ruci koja uzima komponente iz posude i prosljeđuje ih dalje, a njezini vremenski taktovi šalju se digitalnom blizancu. Nakon ovog dijela, digitalna strana procesa [Slika 22.] može postaviti svoju radnu vrijednost na trajanje procesa manipulacije. Kao dio drugog dijela procesa, odnosno manipulacije ruke, prisutan je i test koji procjenjuje mjerenje veličine pojedine komponente. Vremenski taktovi pojedinih radnji posloženi su tako da vrijeme ulaza na test nije identično vremenu izlaza jer se vremenska oznaka stvara tek nakon što je ruka u položaju jedan, točnije u prostoru posude; a testna stanice će početi raditi u tom trenutku, ali s 2 sekunde razmaka. Ovim načinom diktiranja vremenskih okvira, svi procesi se mogu na kraju mapirati kako bi se izbjegla netočna interpretacija prijenosa podataka. Na kraju, preneseni podaci korišteni su za postavljanje točnih vrijednosti u simulacijskom modelu. [36]





**Slika 22.** Digitalni blizanac procesa proizvodne linije [36]

Razvijanjem digitalne strane proizvodne linije, imamo mogućnost provoditi mnoge eksperimente bez izravne povezanosti s fizičkim dijelom. Pomoću digitalnog blizanca možemo vidjeti što će se dogoditi ako se promijeni određeni parametar u procesu te kontinuirano pratiti posljedični sustav. Točnije, model nam omogućuje modificiranje bilo kojeg proizvodnog parametra, a zatim praćenje ponašanja sustava bez rizika od ekonomskih gubitaka na fizičkoj proizvodnoj liniji. Kada govorimo o benefitima implementacije digitalnog procesa, prva velika prednost je što digitalni blizanac prikuplja i procjenjuje stvarni proizvodni proces čime se osigurava konstantna ažuriranost parametara u simulaciji, ali također pruža mogućnost intervencije u slučaju da proces ne radi prema zadanim očekivanjima. Kako bi se bolje razumio rad sustava, može se uzeti primjer kratkog testa u kojem digitalni blizanac prepoznaje anomalije. Test se temelji na zadržavanju manipulatora u radnom položaju tako da se ručno zadržava. Nakon toga slijedi prepoznavanje anomalije od strane digitalnog blizanca koje je prikazano na slici 23. U slučaju da se ovakav rad nastavi, digitalni blizanac pravovremeno upozorava operatera te daje upute za ispravljanje greške. [36]



**Slika 23.** Prepoznavanje anomalije od strane DT-a [36]

## 6.ZAKLJUČAK

Digitalni blizanci u industriji predstavljaju inovativnu tehnologiju koja mijenja konvencionalni način proizvodnje, omogućavajući velike napretke u optimizaciji procesa i unaprjeđenje svih faza životnog ciklusa konačnog proizvoda. Prikazom osnovnih pojmova i elemenata koji čine ovaj sustav, pokazano je da digitalni blizanac nije samo prolazni val inovativne ideje, već bitan faktor u budućem razvoju industrijskog sektora, pa čak i u svakodnevnom životu čovjeka. Pomoću njih stvaraju se virtualne kopije fizičkih sustava koje se dalje mogu koristiti za simulacije, analize i optimizacije bez potrebe za fizičkim djelovanjem, čime se značajno smanjuju troškovi i vremenski zastoji. Tehnološka infrastruktura digitalnih blizanaca, koja uključuje senzore, IoT uređaje, umjetnu inteligenciju i strojno učenje, omogućuje napredan i nesmetan rad sustava, uz ne samo repliciranje fizičkih objekata, već i dinamičkih procesa. Primjena digitalnih blizanaca već je prisutna u nekim industrijskim sektorima, poput medicine, pametnih gradova, automobilske industrije i proizvodnje. U spomenutim industrijama već su vidljive mnoge prednosti, poput mogućnosti detaljnih analiza i optimizacija proizvodnih procesa, smanjujući time neefikasnost rada. S druge strane, kako se ova vrsta tehnologije nalazi u početnoj fazi razvoja, prisutan je velik broj izazova, uključujući visoke početne troškove implementacije i potrebe za stručnim osobljem koje može upravljati kompleksnim sustavima. Također, takvi sustavi zahtijevaju visok stupanj integracije s postojećim sustavima i kontinuirano održavanje i nadogradnje prikladnim tehnološkim elementima, čime se znatno usporava razvoj implementacije digitalnih blizanaca. Zaključno, digitalni blizanci u industriji predstavljaju potencijalno visoki napredak u tehnološkim mogućnostima buduće proizvodnje. Iako ovaj sustav digitalizacije nosi sa sobom velik broj izazova, njegove prednosti i buduća primjena neosporno će se širiti u vremenima koja dolaze.

## LITERATURA

- [1] Digital Twins: The key to smart development (2023.)  
<https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/digital-twins-the-key-to-smart-product-development>  
(pristupljeno 15.6.2024.)
- [2] How digital twins enable autonomous operations (2024.)  
<https://www.accenture.com/us-en/insights/industry-x/manufacturing-systems-architecture> (pristupljeno 2.7.2024.)
- [3] 10 Amazing Examples of Digital Twin Technologies for Industries (2024.)  
<https://www.toobler.com/blog/digital-twin-examples> (pristupljeno 29.6.2024.)
- [4] Perno, M., Hvam, L., Haug, A., (2022.) Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers.  
*ScienceDirect*, Volume 134, No. 103558.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361521001652#sec0065>  
(pristupljeno 21.6.2024.)
- [5] Jiang, Y., Yin, S., Li, K., Luo, H., Kaynak, O., (2021.) Philosophical Transactions of The Royal Society: Industrial applications of digital twins. *The Royal Society*, Volume 379, No. 2207  
<https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2020.0360>  
(pristupljeno 30.6.2024.)
- [6] The Role of Digital Twin in the Automotive Industry in 2024 (2024.)  
<https://www.toobler.com/blog/digital-twin-automotive-industry>  
(pristupljeno 29.6.2024.)
- [7] Digital Twina Market Size & Trends (2024.)  
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-twin-market>  
(pristupljeno 25.7.2024.)
- [8] Digital Twins in Automotive Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Type, by Application, by Technology : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2023-2032 (2023.)  
<https://www.alliedmarketresearch.com/digital-twins-in-automotive-market-A107608> (pristupljeno 25.7.2024.)

- [9] Parrott, A., Warshaw, L., (2017.) Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match. *Deloitte Insights*  
<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html..html> (pristupljeno 18.6.2024.)
- [10] Voelp, D., (2022.) The types of digital twins used in process manufacturing. *Precognize* <https://precog.co/blog/types-of-digital-twins/#:~:text=As%20a%20reminder%2C%20a%20digital,in%20updating%20the%20digital%20twin> (pristupljeno 20.6.2024.)
- [11] The Process Digital Twin: A step towards operational excellence. (2017)  
<https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/Digital%20Twin%20Vision.pdf>  
(pristupljeno 20.6.2024.)
- [12] Raheem, F., Iqbal, N., (2022.) Artificial Intelligence and Machine Learning for the Industrial Internet of Things (IIoT). *ResearchGate*  
[https://www.researchgate.net/publication/358677674\\_Artificial\\_Intelligence\\_and\\_Machine\\_Learning\\_for\\_the\\_Industrial\\_Internet\\_of\\_Things\\_IIoT](https://www.researchgate.net/publication/358677674_Artificial_Intelligence_and_Machine_Learning_for_the_Industrial_Internet_of_Things_IIoT)  
(pristupljeno 25.6.2024.)
- [13] Tao, F., Zhang, M., Nee, A.Y.C, (2019.) Digital Twin Driven Smart Manufacturing. *Academic Press*
- [14] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C., (2020.) Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9103025>  
(pristupljeno 1.6.2024)
- [15] Twyn: Revolutionizing automotive manufacturing process with digital twins.  
<https://twyn.org/digital-twins-in-the-automotive-industry/#:~:text=Digital%20Twin%20technology%20in%20the%20automotive%20industry%20transforms%20remote%20diagnostics,issue%20identification%2C%20and%20predictive%20maintenance> (pristupljeno 1.8.2024.)
- [16] Ali, W.A., Fanti, M.P., Roccotelli, M., Ranieri L., (2023.) A Review of Digital Twin Technology for Electric and Autonomous Vehicles. *Appl. Sci.* 2023, 13(10), 5871. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/10/5871> (pristupljeno 1.6.2024.)

- [17] Moshood, T., D., Rotimi, J., OB., Shahzad, W., Bambgade, J., A., (2024.) Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry. *ScienceDirect*, Volume 77, No. 102519. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X24000678> (pristupljeno 21.6.2024.)
- [18] 10 IoT Sensors and What They Bring to The Digital Twins (2021.) <https://www.linkedin.com/pulse/10-iot-sensors-what-bring-digital-twins-3dcityscapes> (pristupljeno 18.6.2024.)
- [19] What is a digital twin and why is it important to IoT ? (2024.) <https://www.einfochips.com/blog/what-is-a-digital-twin-and-why-is-it-important-to-iot/#:~:text=The%20Internet%20of%20Things%20and,decision%20support%20for%20physical%20assets> (pristupljeno 18.6.2024.)
- [20] Simplilearn: Different types of Machine Learning <https://www.simplilearn.com/tutorials/machine-learning-tutorial/types-of-machine-learning> (pristupljeno 19.6.2024.)
- [21] Digital twin technology and machine learning (2023.) <https://medium.com/@sahilbhutada28/digital-twin-technology-and-machine-learning-f68c31ee6ef> (pristupljeno 18.6.2024.)
- [22] Britannica. <https://www.britannica.com/technology/artificial-intelligence/Reasoning> (pristupljeno 18.6.2024.)
- [23] Cosmas, A., Cruz, G., Cubela, S., Huntington, M., Rahimi, S., Tiwari, S. (2024.) Digital twins and generative AI: A powerful pairing. *McKinsey Digital* <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/tech-forward/digital-twins-and-generative-ai-a-powerful-pairing> (pristupljeno 20.6.2024.)
- [24] Kreuzer, T., Papapetrou, P., Zdravkovic, J., (2024.) Artificial intelligence in digital twins – A systematic literature review. *ScienceDirect*, Volume 151, No. 102304. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169023X24000284> (pristupljeno 21.6.2024.)
- [25] Rasheed, A., Omer, S., Kvamsdal, T., (2020.) Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*, Volume 8. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8972429> (pristupljeno 1.6.2024.)

- [26] Lv, Z., Xie, S., (2022.) Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. *Digital Twin*.  
<https://digitaltwin1.org/articles/1-12> (pristupljeno 21.6.2024.)
- [27] Gou, J., Lv, Z., (2022.) Application of Digital Twins in multiple fields. *Springer Link*, Volume 81, pages: 26941–26967.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-022-12536-5>  
(pristupljeno 25.7.2024.)
- [28] The Future of Digital Twins: Emerging Trends and Innovations (2023.)  
<https://techaheadcorp.medium.com/the-future-of-digital-twins-emerging-trends-and-innovations-7ae22a23197a> (pristupljeno 18.6.2024.)
- [29] Top Digital Twin Companies – Unveiling the Future Growth and Opportunities. <https://www.marketsandmarkets.com/blog/SE/Top-Digital-Twin-Companies-Unveiling-the-Future-Growth-and-Opportunities>  
(pristupljeno 30.7.2024.)
- [30] O'brien, S., (2023.) 5 Digital Twin Use Cases. *IEEE Computer Society*  
<https://www.computer.org/publications/tech-news/trends/digital-twin-use-cases#771e09b4-33ea-4542-b6de-6c862f1b59c7> (pristupljeno 1.8.2024.)
- [31] Ranjan, S., (2023.) 50+ Use Cases of Digital Twins Across Industries. *Toobler*. <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-use-cases>  
(pristupljeno 29.6.2024.)
- [32] Theng, S., Y., Touš, M., Leong, W., D., How, B., S., Lam, H., L., Maša, V., (2021.) Recent advances on industrial data-driven energy savings: Digital twins and infrastructures. *ScienceDirect*, Volume 135, No. 110208.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120304974>  
(pristupljeno 4.9.2024.)
- [33] *Industry 4.0: Building the digital enterprise* (2016.)  
[https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing\\_page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf](https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing_page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf) (pristupljeno 4.9.2024.)
- [34] Gupta, K., (2024.) Exploring the Economics of Digital Twin Implementation: Balancing Costs and Benefits  
<https://medium.com/@kunjitgupta/exploring-the-economics-of-digital-twin-implementation-balancing-costs-and-benefits-2024-1a6a06555eff>  
(pristupljeno 4.9.2024.)

- [35] Ashtari, B., Weyrich, M., (2020.) Digital Twin of manufacturing systems: a case study on increasing the efficiency of reconfiguration. *ResearchGate*  
[https://www.researchgate.net/publication/341877901\\_Digital\\_Twin\\_of\\_manufacturing\\_systems\\_a\\_case\\_study\\_on\\_increasing\\_the\\_efficiency\\_of\\_reconfiguration](https://www.researchgate.net/publication/341877901_Digital_Twin_of_manufacturing_systems_a_case_study_on_increasing_the_efficiency_of_reconfiguration)  
(pristupljeno 5.9.2024.)
- [36] Vachalek, J., Bartalsky, L., Rovny, O., Šišmišova, D., Morhač, M., Lokšik, M., (2017.) The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. *IEEE Xplore*  
[https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7976223?casa\\_token=0rCIBxxVwpkAAAAA:hVAI9GKQ214QskXUUCOE6N54bC7cueY5O7Em\\_kHWWWAwrLNWNqzWzHJhe63l2qjWSYabCsS\\_MIoRtA](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7976223?casa_token=0rCIBxxVwpkAAAAA:hVAI9GKQ214QskXUUCOE6N54bC7cueY5O7Em_kHWWWAwrLNWNqzWzHJhe63l2qjWSYabCsS_MIoRtA) (pristupljeno 5.9.2024.)