

# Primjena inovativnih tehnologija u unapređenju proizvodne logistike

---

**Staničić, Marko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:408108>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-09**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**MARKO STANIČIĆ**

**PRIMJENA INOVATIVNIH TEHNOLOGIJA U  
UNAPRJEĐENJU PROIZVODNE LOGISTIKE**

**DIPLOMSKI RAD**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 8. lipnja 2022.

Zavod: Zavod za transportnu logistiku  
Predmet: Logistički sustavi u prometu

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 6995

Pristupnik: Marko Staničić (0135247807)  
Studij: Inteligentni transportni sustavi i logistika  
Smjer: Logistika

Zadatak: Primjena inovativnih tehnologija u unapređenju proizvodne logistike

### Opis zadatka:

U radu će se analizirati mogućnosti primjene inovativnih tehnologija u svrhu unapređenja procesa proizvodne logistike. Također će se detaljno prikazati mogućnosti i ograničenja inovativnih tehnologija u procesima proizvodne logistike. Identificirat će se pokretači i prepreke inovativnih tehnologija u proizvodnoj logistici i objasniti odnosi između različitih tehnologija.

Mentor:



doc. dr. sc. Tomislav Rožić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit

---

**Sveučilište u Zagrebu**  
**Fakultet prometnih znanosti**

**DIPLOMSKI RAD**

**PRIMJENA INOVATIVNIH TEHNOLOGIJA U  
UNAPRJEĐENJU PROIZVODNE LOGISTIKE**

**APPLICATION OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN  
IMPROVING PRODUCTION LOGISTICS**

Mentor: doc. dr. sc. Tomislav Rožić

Student: Marko Staničić

JMBAG:0135247807

Zagreb, rujan 2022.

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu analizirat će se primjena inovativnih tehnologija s ciljem unaprjeđenja proizvodne logistike. Definirani su pojmovi logistički sustav i proizvodni sustav te podsustav proizvodne logistike. Također su definirani osnovni zadaci, ciljevi i aktivnosti proizvodne logistike. Postavljena pretpostavka ovo diplomskog rada je da su kibernetičko-fizički sustavi i Internet stvari i usluga temeljne tehnologije koje omogućavaju značajno unaprjeđenje proizvodne logistike. Utvrđeni su trenutni zahtjevi tržišta i tehnološke mogućnosti za budućnost proizvodne logistike u okviru postavljenih temeljnih tehnologija. Razvijanjem temeljnih tehnologija omogućuje se pojava inteligentnih objekata. U radu su definirane i objašnjene hardverske i softverske tehnologije koje su neophodne za funkciju inteligentnih objekata. Na primjeru inteligentnog objekta iz prakse, koji se sastoji od mikrotvornice i pripadajućeg digitalnog blizanca, prikazane su mogućnosti unaprjeđenja proizvodne logistike.

**KLJUČNE RIJEČI:** proizvodna logistika, kibernetičko-fizički sustavi, Internet stvari i usluga, inteligentni objekti.

## SUMMARY

In this thesis, the application of innovative technologies with the aim of improving production logistics was studied. The terms logistics system and production system and subsystem of production logistics are defined. Basic tasks, goals and activities of production logistics are also defined. The premise of this thesis is that cybernetic-physical systems and the Internet of Things and Services are fundamental technologies that enable a significant improvement in production logistics. The current market requirements and technological possibilities for the future of production logistics within the set basic technologies are listed. The development of basic technologies enables the appearance of intelligent objects. In this paper, the hardware and software technologies that are necessary for the function of intelligent objects are defined and explained. On the example of an intelligent facility from practice, which consists of a microfactory and its associated digital twin, the possibilities of improving production logistics are presented.

**KEY WORDS:** Production logistics, Cyber-Physical-Systems, Internet of Things and Services, Intelligent objects.

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD  | 1  |
| 2. PROIZODNA LOGISTIKA KAO FAZNO-SPECIFIČAN PODSUSTAV LOGISTIKE  | 3  |
| 2.1. Definicija logistike  | 3  |
| 2.2. Definicija proizvodnje  | 4  |
| 2.3. Proizvodna logistika  | 6  |
| 2.3.1 Osnovni zadaci i ciljevi proizvodne logistike  | 8  |
| 2.3.2. Aktivnosti proizvodne logistike   | 9  |
| 3. KIBERNETIČKO-FIZIČKI SUSTAVI UNUTAR INTERNETA STVARI I USLUGA KAO MOGUĆNOSTI UNAPREĐENJA PROIZVODNE LOGISTIKE | 11 |
| 3.1. Promjenjivi zahtjevi tržišta  | 11 |
| 3.1.1. Individualizacija   | 11 |
| 3.1.2. Volatilitnost   | 12 |
| 3.1.3. Učinkovitost energenata i resursa   | 13 |
| 3.2. Nove tehnološke mogućnosti za budućnost proizvodne logistike  | 13 |
| 3.3. Kibernetičko-fizički sustavi ( <i>Cyber-Physical-Systems – CPS</i> )  | 14 |
| 3.4. Internet stvari i usluga ( <i>Internet of Things and Services – IoTS</i> )                                  | 17 |
| 3.4. Inteligentni objekti i sustavi  | 19 |
| 4. HARDVERSKE TEHNOLOGIJE I FUNKCIJE INTELIGENTNIH OBJEKATA PROIZVODNE LOGISTIKE                                 | 21 |
| 4.1. Automatsko identificiranje i lociranje  | 21 |
| 4.2. Komunikacija između strojeva i uređaja  | 23 |
| 4.3. Opskrba energijom   | 24 |
| 4.4. Osjetila i pokretanja   | 26 |

|   |    |
|---|----|
| 4.5. Obrada informacija i podataka.....   | 29 |
| 4.6. Interakcija čovjeka i stroja.....  | 30 |
| 5. SOFTVERSKE TEHNOLOGIJE I FUNKCIJE INTELIGENTNIH OBJEKATA<br>PROIZVODNE LOGISTIKE ..... | 32 |
| 5.1. Umjetna inteligencija.....   | 32 |
| 5.2. Autonomija djelovanja.....   | 35 |
| 5.3. Napredna analiza podataka .....  | 38 |
| 5.4. Digitalne integrirane platforme.....   | 39 |
| 6. PRIMJENA INOVATIVNIH TEHNOLOGIJA NA PRIMJERU IZ PRAKSE – DIGITALNI<br>BLIZANAC 40      |    |
| 6.1. Factory-as-a-Service (FaaS) .....  | 41 |
| 6.2. Značajke digitalnog blizanca .....   | 43 |
| 6.3. Koncept digitalnog blizanca .....  | 44 |
| 6.4. primjena digitalnog blizanca na primjeru MSF testne stanice.....                     | 45 |
| 6.5. Rezultati PRIMJENE DIGITALNOG BLIZANCA NA PRIMJERU MSF TESTNE<br>STANICE 49          |    |
| 7. ZAKLJUČAK .....  | 55 |
| POPIS LITERATURE .....  | 57 |
| POPIS SLIKA .....   | 62 |
| POPIS TABLICA .....   | 63 |
| POPIS GRAFIKONA .....   | 64 |



# 1. UVOD

Industrija proizvodnje i proizvodna logistika su trenutno podložne promjenama uzrokovanim tekućim globalnim trendovima kao što su globalizacija, urbanizacija, individualizacija i demografske promjene. Ovi globalni trendovi će u budućnosti predstavljati značajne izazove u cijelom proizvodnom okruženju. Porast globalno povezanih poslovnih aktivnosti povećat će složenost unutar proizvodnih i logističkih mreža. Nestabilna potražnja i proizvodi prilagođeni potrošačima dodatno će utjecati na logističke procese te procese proizvodnje i planiranja. Navedeni izazovi zahtijevaju prilagođeni pristup strukturi i procesima proizvodne logistike te dizajniranju i proizvodnji samih proizvoda.

Cilj ovog rada je izdvojiti tehnologije koje bi svojim funkcijama ponudile konkretna rješenja za trenutne izazove i mogućnosti unaprijeđena proizvodne logistike. Definirane tehnologije i funkcije ne predstavljaju potpuni pregled svih mogućnosti, već potencijal inteligentnih objekata u okviru tehnologija kibernetičko fizičkih sustava i Interneta stvari i usluga. Na primjeru iz prakse izdvojen je jedan inteligentni objekt u formatu mikro tvornice i pripadajućeg digitalnog blizanca te su, na temelju tog primjera, navedene mogućnosti za unaprjeđenje proizvodne logistike.

U prvom poglavlju “Proizvodna logistika kao fazno-specifičan podsustav logistike“ definirani su pojmovi “logistika“, “proizvodnja“ i “proizvodna logistika“. Objašnjene su faze logistike i pozicija proizvodne logistike, kao podsustava, u sustavu logistike. Navedeni su temeljni zadaci i ciljevi te prateće aktivnosti proizvodne logistike.

U sljedećem poglavlju pod nazivom “Kibernetičko fizički sustavi unutar Interneta stvari i Usluga“ navedeni su promjenjivi zahtjevi tržišta koji uključuju individualizaciju, volatilitet i učinkovitost energenata i resursa. Navedene su nove tehnološke mogućnosti za budućnost proizvodne logistike te su izdvojeni Kibernetičko fizički sustavi i Internet stvari i usluga kao temeljne tehnologije za unaprjeđenje proizvodne logistike. Objašnjen je pojam “inteligentni objekt“ kao fizička manifestacija temeljnih tehnologija

U sljedećem poglavlju pod nazivom “Hardverske tehnologije i funkcije inteligentnih objekata proizvodne logistike“ navedene su tehnologije i funkcije koje se ugrađuju u inteligentne objekte u obliku hardverskih komponenti.

U sljedećem poglavlju pod nazivom “ Softverske tehnologije i funkcije inteligentnih objekata proizvodne logistike“ navedene su tehnologije i funkcije koje se ugrađuju u inteligentne objekte u obliku softverskih komponenti.

U poglavlju pod nazivom “Primjena inovativnih tehnologija na primjeru iz prakse – digitalni bliznac“ objašnjena je uloga FaaS-a i digitalnog bliznaca na primjeru mikrotvornice i odgovarajućeg digitalnog blizanca. U radu se raspravlja o scenariju FaaS-a, scenariju proizvodne faze i povezane probleme s elementima proizvodnje u ovoj fazi. Konstruiran je scenarij sustava koji će izvršiti aplikacija digitalnog bliznaca za rješavanje definiranih problema. U poglavlju je detaljno opisan dizajn konfiguracije aplikacije i arhitektura sustava te su definirani postupci za učinkovit rad i upravljanje sustavom.

## 2. PROIZODNA LOGISTIKA KAO FAZNO-SPECIFIČAN PODSUSTAV LOGISTIKE

U ovome poglavlju definirani su pojmovi “logistika” i “proizvodnja ” koje autor smatra da su temeljni sustavi i njihovo shvaćanje je neophodno za razumijevanje ovog rada. Pojam “proizvodna logistika” promatran je u ovom radu kao podsustav logistike, odnosno, kao jedna od faze logistike. Objasnjeni su temeljni zadaci i ciljevi te prateće aktivnosti proizvodne logistike.

### 2.1. Definicija logistike

Porijeklo pojma logistike može se pratiti od 19. stoljeća kada je logistika definirana kao planiranje zaliha i organizacija vojnih trupa i strategija. Smatra se da je francuski izraz “*logis*”, koji se prevodi kao smještaj vojnih trupa, korijen izraza logistike.[1] U današnje vrijeme logistika je izraz koji ima puno opsežnije značenje i nije samo usko vezana za vojni sektor te, kao upravljačka disciplina, predstavlja jedan od glavnih faktora u razvoju globalne ekonomije i gospodarstva. Logistika se dugo vremena smatrala samo organizacijom skladištenja, rukovanja i prijevozom ljudi i tereta. Međutim, u današnje vrijeme, logistika se suočava s velikim odgovornostima kao što su demografske i klimatske promjene te održivosti i učinkovitosti poslovanja. [2]

Definicija logistike koju je autor izabrao kao relevantnu u ovome radu glasi: “holističko planiranje, kontrola, koordinacija, izvršenje i praćenje svih unutarnjih i vanjskih tokova informacija i robe unutar nekog sustava”. [2] Logistika se sastoji od dva temeljna načela, odnosno, usmjerenosti na tok i sustavnog razmatranja međusobnih odnosa logističkih elemenata. Za bolje razumijevanje prvog temeljnog načela logistike potrebno je uzeti u obzir i definiciju logistike koju koristi Udruga stručnjaka za upravljanje opskrbnim lancem<sup>1</sup>: “dio procesa opskrbnog lanca koji planira, provodi i kontrolira učinkovit i djelotvoran tijek i skladištenja sirovina, zaliha u procesu, gotovih proizvoda, i s tim povezanih informacija, od točke izvora do točke potrošnje, u svrhu zadovoljenja zahtjeva korisnika”. [3] Usmjerenost na tok, koja je navedena u ovoj definiciji, predstavlja prvo temeljno načelo logistike i karakteristična je za logistiku u usporedbi s drugim znanstvenim

---

<sup>1</sup> CSCMP (engl. Council of Supply Chain Management Professionals) je vodeće globalno udruženje stručnjaka za upravljanje lancem opskrbe

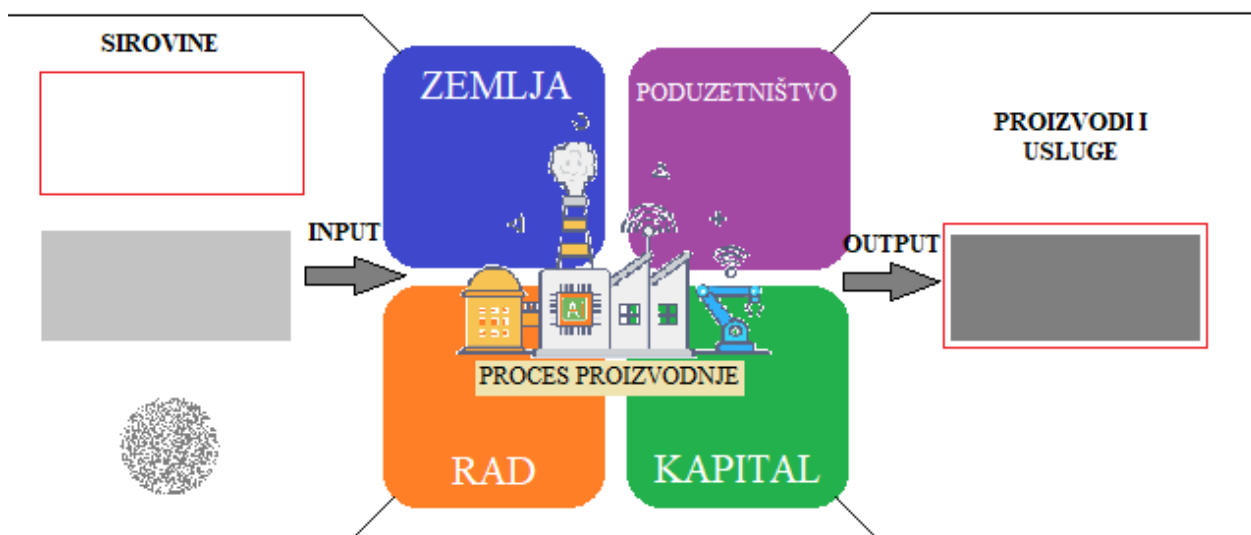
disciplinama. Usmjerenost na tok podrazumijeva protok predmeta, ljudi, informacija i vrijednosti kroz mreže aktivnosti i procesa.[4]

Drugo temeljno načelo logistike je njezin holistički pogled na aktivnosti, sustave i mreže. Upravljanje i izvođenje pojedinačnih skladišnih ili prijevoznih procesa, na primjer unutar tvornice, uvijek je bio primarni zadatak logistike. Poseban način logističkog razmišljanja je razmatranje nekoliko procesa istovremeno kao jedan tok u mreži i njegova koordinacija s ciljevima cijelog sustava.[1] Ovaj fenomen se naziva sustavno razmišljanje i njime se razmatraju odgovori na pitanje kako se rješavaju logistički zadatci, a ne koji se logistički zadatci rješavaju. Podrijetlo sustavnog razmišljanja se nalazi u biologiji, gdje definira određeni broj međusobno povezanih elemenata. Glavna karakteristika sustavnog razmišljanja je spoznaja da nije moguće objasniti cijeli sustav objašnjavajući njegove dijelove, već se moraju uzeti u obzir i međusobni odnosi pojedinih elemenata u sustavu. [3]

## **2.2. Definicija proizvodnje**

Proizvodnja je zaseban sustav i nije dio sustava logistike, ali određeni procesi oba sustava se prekapaju i njihove funkcionalnosti su međusobno povezane. Kako bi se mogla definirati proizvodna logistika autor smatra da je potrebno znanje o proizvodnom sustavu i njegovim procesima.

Proizvodnja je proces u kojem se dobra i usluge manje vrijednosti koje se nazivaju resursima (ulazne jedinice/input), pretvaraju u dobra i usluge veće vrijednosti koje se nazivaju učincima (izlazne jedinice/output) kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Shema procesa proizvodnje i proizvodnih resursa

Izvor: [5]

Glavna funkcija svih proizvodnih organizacija je stvaranje nove vrijednosti u proizvodnim procesima. Svi elementi koji sudjeluju u tom procesu pretvorbe čine proizvodni sustav. Kao što je prikazano na slici 1., ulazne jedinice proizvodnje su resursi koji su potrebni za početak proizvodnog procesa te stoga predstavljaju temeljne čimbenike proizvodnje ili proizvodne resurse. Izlazne jedinice proizvodnje su proizvodi i usluge koje su rezultat proizvodnje. Središnji element sustava je proces, tj. aktivnost fizičkog pretvaranja proizvodnih resursa u gotove proizvode i usluge. Glavne skupine proizvodnih resursa su zemlja, kapital, rad i poduzetništvo, a temeljni čimbenici proizvodnje su rad, sredstva za rad i predmet rada. [5]

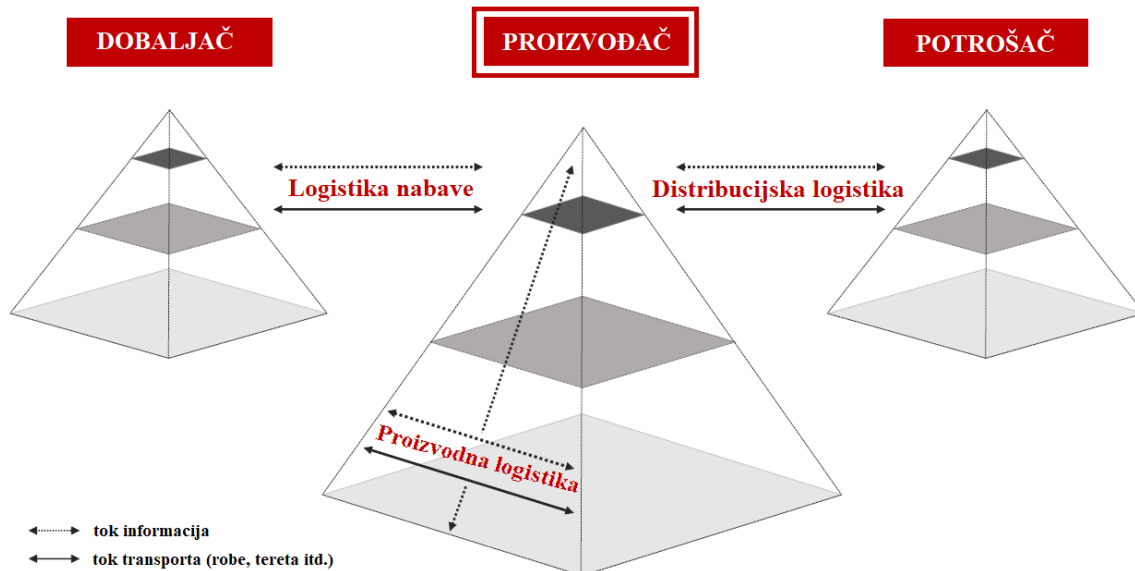
Projektiranjem i kontrolom procesa proizvodnje nužno je pratiti odnos učinka i troškova proizvodnje kako bi se osigurala ekonomska učinkovitost proizvodnje. Za smanjenje troškova neophodno je težiti maksimalnom iskorištenju raspoloživih kapaciteta i smanjenju zaliha materijala i neiskoristivog otpada nastalog u procesu proizvodnje. Uz investicijske troškove koji podrazumijevaju nabavu sredstva za rad, prisutni su i troškovi amortizacije i održavanja koji nastaju korištenjem sredstva za rad u određenom vremenskom periodu. Također, trošenjem predmeta rada nastaju materijalni troškovi. Proizvodnjom i prihodima proizvođač ostvaruje financijski rezultat umanjen za nastale troškove. Prihodi su uvjetovani o stanju i stabilnosti tržišta, dok na troškove proizvođač može izravno utjecati. [5]

Redovito planiranje, praćenje kretanja i kontrola trošenja svih ekonomskih resursa je neophodno za povećanje udjela proizvodnje na tržištu, intenzivno mehaniziranje i robotiziranje proizvodnje te za ulaganje i razvijanje masovne proizvodnje. Visina troškova ovisi i o količini i strukturi upotrijebljenih resursa, odnosno, o korištenoj tehnologiji koja je također značajan čimbenik proizvodnje. Pod tehnologijom se podrazumijevaju razvoj i primjena alata, strojeva, materijala i postupaka za izradbu nekoga proizvoda ili obavljanje neke aktivnosti te također i znanost koja proučava primjenu znanja, vještine i organizacije u provedbi nekoga procesa. Tehnološki napredak donosi promjene u proizvodnji sa stajališta trošenja i korištenja pojedinih resursa proizvodnje. Napredak tehnologije omogućava proizvodnju većih količina dobara i usluga iz raspoloživih ograničenih resursa. [5]

### **2.3. Proizvodna logistika**

Proizvodna logistika predstavlja podsustav koji povezuje sustave logistike i proizvodnje. Ovaj rad je usmjeren na procese proizvodne logistike, a ne pojedinačno na logistiku ili proizvodnju te je iz tog razloga potrebno definirati proizvodnu logistiku. U ovome radu su navedene i objašnjene inovativne tehnologije koje su prilagođene zadacima i ciljevima proizvodne logistike. Navedene su i aktivnosti proizvodne logistike na koje su u sljedećim poglavljima usmjeren razvoj i funkcionalnosti inovativnih tehnologija.

Funkcionalna podjela logistike, koja prati usmjerenost na tok, je fazno-specifičan pogled na logističke podsustave i tok robe prikazan na slici 2. [3]



Slika 2. Fazno-specifičan pogled na logističke podsustave

Izvor: [3]

Funkcionalna podjela logistike naglašava tri faze koji čine međuovisne podsustave: logistiku nabave, proizvodnu logistiku i distribucijska logistiku. Specifičnost faza logističkog sustava je u obostranom toku kretanja robe i informacija. U jednome smjeru robni tok započinje nabavom sirovina, pomoćnog i potrošnog materijala iz mreže dobavljača. Ova početna faza se naziva logistikom nabave i njena uloga je pribaviti sva potrebna dobra koja su potrebna za proces proizvodnje, a ne proizvodi ih sam proizvođač. Uključuje sve potrebne aktivnosti za opskrbu proizvodnje sa svim potrebnim ulaznim jedinicama. [6]

Druga faza se naziva proizvodnom logistikom te obuhvaća dobavljene i djelomično uskladištene sirovine, komponente, poluproizvode i gotove proizvode koji su spremni za prijevoz do proizvodnih stanica ili internih skladišta. [1]

Treću fazu karakteriziraju tokovi poluproizvoda i gotovih proizvoda bilo do distribucijskih skladišta ili izravno do kupaca. Ova faza se naziva distribucijska logistika. [3]

Faza u kojoj se tok kreće u suprotnome smjeru od gore navedenog, odnosno od potrošača do proizvođača i dobavljača, naziva se povratnom logistikom. Ova faza predstavlja proces planiranja,

implementacije i kontrole obrnutog toka sirovina, od procesa proizvodnje, distribucije ili točke korištenja, do točke obnavljanja ili prikladnog zbrinjavanja. Sukladno robnim tokovima, među različitim fazama logistike kreću se i informacijski tokovi koji pružaju neophodne informacije za kontrolu, praćenje i unaprjeđenje logističkog sustava. [3]

### **2.3.1 Osnovni zadaci i ciljevi proizvodne logistike**

Industrija proizvodnje u posljednjim stoljećima prati logistiku, kao što je i navedeno u poglavlju “2.1. Definicija logistike”. Ova stalna promjena logistike, kao upravljačke discipline, posebno ima posljedice za osnovne zadatke proizvodne logistike. Za prikladno formuliranje osnovnih zadataka logistike koriste se šest pravila, koja i ujedno opisuju i glavne ciljeve logistike. Šest pravila logistike se definiraju kao odgovornost za isporuku pravog proizvoda, u odgovarajućoj količini, s odgovarajućom kvalitetom, u pravo vrijeme, na pravom mjestu, uz odgovarajući trošak. Zahtjevi za ispunjenje navedenih šest pravila su izvršavanje temeljnih logističkih procesa, odnosno; prijevoza, rukovanja teretom, skladištenja, komisioniranja i pakiranja. Adekvatno izvršenje logističkog procesa ne može se osigurati bez prethodnog procesa planiranja i kontrole. S gledišta usmjerenosti na tok, proizvodna logistika je zadužena za izvođenje, planiranje, kontrolu i nadzor procesa proizvodnje i internog prijevoza, rukovanja i skladištenja. Svrha navedenih zadataka proizvodne logistike je premještanje ulaznih jedinica iz skladišta sirovog materijala, kroz faze proizvodnih procesa, u skladište gotovih proizvoda. [7]



### 2.3.2. Aktivnosti proizvodne logistike

Navedeni zadaci proizvodne logistike objašnjeni u poglavlju prije se mogu dodijeliti fazno-specifičnom pogledu na logističke podsustave za izradu matrice planiranja aktivnosti, prikazanoj u tablici 1.

Tablica 1. Aktivnosti proizvodne logistike

|                   | Dugoročno strateško planiranje  | Srednjoročno taktičko planiranje  | Kratkoročno operativno planiranje   | Operativno izvršavanje   |
|-------------------|---|---|---|--|
| Period planiranja | Više godina   | 6-18 mjeseci  | 1-3 mjeseca   | na dan, na sat   |
| Aktivnosti        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dubina proizvodnje i strategije outsourcinga</li> <li>• Ulaganja u proizvodna sredstva i skladišne objekte</li> <li>• Raspored proizvodnje i skladišta</li> <li>• ...</li> </ul> | <b>Planiranje proizvodnje</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Planiranje proizvodnog plana</li> <li>• Planiranje količine (planiranje materijalnih potreba)</li> <li>• Planiranje rokova i kapaciteta</li> </ul> | <b>Kontrola proizvodnje</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puštanje narudžba kupaca</li> <li>• Praćenje naredba kupaca</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prijevoz</li> <li>• Rukovanje</li> <li>• Skladištenje</li> <li>• Puštanje u rad</li> <li>• pakiranje</li> </ul> |

Izvor: [1]

Unutar ove matrice aktivnosti se mogu sistematizirati na tri različite razine planiranja, a to su dugoročno strateško, srednjoročno taktičko i kratkoročno operativno planiranje unutarnjih procesa. U smislu proizvodne logistike, posebno srednjoročno taktičko i kratkoročno operativno planiranje imaju određenu važnost. Pokrenuto narudžbama kupaca, srednjoročno planiranje uključuje sljedeće procese: [1]

- planiranje proizvodnog programa,
- planiranje količine (potreba za materijalom),
- planiranje rokova i kapaciteta.

Kratkoročno operativno planiranje ponekad se koristi kao sinonim za kontrolu proizvodnje i sastoji se od sljedećih funkcija: [1]

- puštanje narudžba kupaca,

- praćenje narudžba kupaca.

Operativno izvršenje proizvodne logistike uglavnom uključuje pet različitih temeljnih aktivnosti: prijevoz, rukovanje, skladištenje, puštanje u rad i pakiranje. Prijevoz, kao što sam pojam sugerira, uglavnom se odnosi na pokrivanje udaljenosti robe. Premješta robu ili u skladišta ili u radna mjesta proizvodnje. Svaki prijevozni sustav sastoji se od prijevoznog sredstva, robe koja se prijevozi i prijevoznog sustava. Procesi rukovanja bave se ukrcajem i iskrcajem prijevoznih sredstava i skladišta te skupljanjem i razvrstavanjem robe. Procesi rukovanja povezuju vanjske i unutarnje tokove materijala i različite prijevozne dionice. Roba se skladišti i iznosi iz skladišta različitim strategijama skladištenja. Sama pohrana nije aktivnost, već procesi koji su zasluženi za ispunjavanje zaliha. Puštanje u rad predstavlja komisioniranje (sakupljanje) artikla koje je kupac naručio, a mogu se sastojati od jedne ili više različitih roba. Naručitelj komisioniranja može biti krajnji kupac ili radno mjesto u proizvodnji, kojem je potreban uskladišteni materijal. Ambalaža ima pomoćnu funkciju zaštite proizvoda za gore navedene aktivnosti, odnosno prijevoz, manipulaciju, skladištenje i komisioniranje robe. [1]

Navedene aktivnosti uglavnom su kombinirane s tehničkim logističkim sustavima koji podupiru aktivnosti osiguravajući: [3]

- tok informacija između različitih aktivnosti planiranja i kontrole te podaci za ispunjavanje procesa na različitim razinama,
- tok materijala između različitih proizvodnih lokacija.

### **3. KIBERNETIČKO-FIZIČKI SUSTAVI UNUTAR INTERNETA STVARI I USLUGA KAO MOGUĆNOSTI UNAPREĐENJA PROIZVODNE LOGISTIKE**

U prvom djelu ovog poglavlja bit će objašnjeni pokretači četvrte industrijske revolucije (*eng. The Industry 4.0*). Od mnogobrojnih pokretača navedenih u znanstvenim i stručnim radovima, izdvojeni su sljedeći pokretači koje autori smatraju najvažnijima: individualizacija, volatilitnost i učinkovitost energenata i resursa. Ti pokretači predstavljaju temeljne razvoje za omogućavanje novih tehnoloških dostignuća u proizvodnoj logistici. U drugome djelu ovog poglavlja objašnjena su izdvojena tehnološka dostignuća, odnosno koncepte Kibernetičko-fizičkih sustava i Internet stvari i usluga. U ovome radu postavljena je pretpostavka da su Kibernetičko-fizičkih sustava i Internet stvari i usluga temeljenje tehnologije čije funkcije imaju mogućnost unaprjeđenja proizvodne logistike.

#### **3.1. Promjenjivi zahtjevi tržišta**

Proizvodna industrija podložna je značajnim strukturnim promjenama zbog globalnih megatrendova<sup>2</sup>. U ovom dijelu rada biti će istaknuti tri temeljna tekuća razvoja koji će značajno utjecati na cjelokupno proizvodno okruženje; individualizacija, volatilitnost i učinkovitost energenata i resursa. [8]

##### **3.1.1. Individualizacija**

Razmatranje želja kupaca u mnogim industrijama kao što su tekstilna, namještaja, osobnih računala, automobila i strojeva, postala je do određene mjere standard. Izgledno je da nestaju prednosti tradicionalne industrijske masovne proizvodnje temeljene na automatizaciji, ekonomiji

---

<sup>2</sup> Megatrendovi su trenutno stanje ili trenutni događaji koji nadilaze potrošačko, poslovno i vladino odlučivanje. Pobuđuje zanimanje i mijenja potrošačke navike i razine proizvodnje na globalnoj razini

razmjera i znanju kroz iskustvo, a koje su dugo bile temelj međunarodnih operativnih proizvodnih kompanija. [9]

Danas se sve više pažnje posvećuje željama i individualnim potrebama kupaca, čime se razina personaliziranih proizvoda značajno povećava. Zbog promjenjivih zahtjeva kupaca, temeljno je prilagoditi proizvodne procese i tehnologije ovom razvoju. [10]

Već implementirani koncepti poput masovne prilagodbe i svestrane serijske proizvodnje temeljene na modularnim sustavima mogli bi sačuvati prednosti standardiziranih proizvodnih sustava. Nova industrija revolucija će se morati nositi s gotovo potpunom integracijom kupaca u svoje procese srednjoročno i dugoročno. Masovna proizvodnja proizvoda, dizajnirana na temelju univerzalnosti, nastavit će padati u budućem periodu. Očekivano je da će se dogoditi potpuno nova razina pristupa proizvodnji u kojoj će kupac istovremeno biti potrošač i proizvođač. Kupac izražava želje, daje prijedloge za inovacije proizvoda, te aktivno sudjeluje u razvojnim i proizvodnim procesima. [9]

### **3.1.2. Volatilitnost**

Volatilitnost po definiciji znači<sup>3</sup> “vjerojatno da će se nešto iznenada i neočekivano promijeniti”.

Suočavanje s kratkotrajnim, fluktuirajućim tržištima ključni je čimbenik za održavanje konkurentnosti na tržištu, kao što su pokazuju kretanja nakon globalne gospodarske krize i pandemije. Iz perspektive makro i mikroekonomskih kretanja, volatilitnost opisuje relativnu veličinu fluktuacije cijena, vrijednosti dionica, tečajeva valuta, kamatnih stopa kao i cijelih tržišta unutar određenog vremenskog perioda. Nestalna tržišta s fluktuacijama potražnje utječu posebno na proizvodnu industriju zbog različiti izvori volatilitnosti. Kratkoročni učinci specifični za poduzeće, sezonske fluktuacije, životni ciklus proizvoda i druge fluktuacije na tržištu temeljni su čimbenici koji utječu na volatilitnost proizvodnih tvrtki, posebno u prodaji. [11]

Volatilitnost se smatra glavnim pokretačem promjene modela proizvodnje, jer zahtijeva fleksibilnije i prilagodljivije strukture, procese, proizvode i sustave u proizvodnji. Buduće tvrtke

---

<sup>3</sup> [www.dictionary.cambridge.org](http://www.dictionary.cambridge.org) (24.08.2022.)

morat će ulagati u fleksibilnost i prilagodljivost, budući da klasični instrumenti više neće moći svladati volatilitet. [10]

### **3.1.3. Učinkovitost energenata i resursa**

Održiva i sigurna opskrba sirovinama i energijom ključan je faktor za konkurentnost industrije. Budući razvoj energetskega sektora odredit će ambiciozni ciljevi u savladavanju nepoželjnih klimatskih promjena, svjetska promjena stanovništva i globalni rast prosperiteta. [9]

Dugoročno, ovakav razvoj će dovesti do eksponencijalnog povećanja potražnja za energijom i sirovinama. Potrebno je promijeniti pristup društva prema potrošnji prirodnih resursa i neobnovljivih izvora energije. Globalna potrošnja energije je najznačajnija u industrijskom sektoru pod koji je proizvodnja kategorizirana (vidi Grafikon 2)[12]

Potrebna je identifikacija prijatni okolišu i sigurnosti opskrbe uz troškove uzrokovane visokom potrošnjom energije. Produktivnost resursa i učinkovitost resursa trebaju biti uključeni u strateške ciljeve svake proizvodne tvrtke. Svaki otpad u procesu proizvodnje, na primjer, uzrokovan prekomjernom proizvodnjom, problemima s kvalitetom ili postojanjem neiskorištenog potencijala za optimizaciju, ima ekonomske i društvene posljedice. [10]

## **3.2. Nove tehnološke mogućnosti za budućnost proizvodne logistike**

Smatra se da suvremene proizvodne tehnologije, optičke tehnologije, tehnologija mikrosustava, nanotehnologija, biotehnologija, elektronika, novi materijali i geotehnologija mogu ostvariti potencijal optimizacije proizvodne logistike. Ugrađeni sustavi, pametni objekti, kibernetičko-fizički sustavi, koncept pametne tvornice, robusne mreže, računalstvo u oblaku (*eng. cloud computing*) i računalna sigurnost čine tehnološke temelje za buduću proizvodnju i uspjeh. [13]

U ovom radu, istaknuti su kibernetičko-fizički sustavi i Internet stvari i usluga kao glavni pokretači budućnosti proizvodne logistike. Također, značajnu ulogu imaju i obrade velikih podataka (*eng. Big Data technologies*) te interakcija između čovjeka i robota. Tehnologija obrade velikih podataka analiziraju i obrađuju veliku količinu podataka pomoću umjetne inteligencije<sup>4</sup> (*eng.*

---

<sup>4</sup> U daljnjem tekstu AI

*Artificial Intelligence – AI*). Komunikacija između čovjeka i robotizirane proizvodnje se unaprjeđuje multimodalnim biometričkim sučeljima koje omogućuju razvijanje novih razina komunikacija i interakcija u proizvodnom okruženju. [10]

Inovativne tehnologije za unaprjeđenje proizvodne logistike mogu se sustavizirati na sljedeći način: [14]

- podaci, računalna snaga i umreženost tehnologija,
- analitika i umjetna inteligencija,
- interakcija čovjeka, robota i virtualnih okruženja i
- digitalno-fizička pretvorba.

Tekući razvoj i razrada budućih tehnologija u proizvodnji su pokretačka snaga istraživačkih inicijativa u ovom području. U ovom dijelu postaje vrlo jasno da se gotovo svaki privatni i javni tržišni subjekt predaje definiranju, objašnjenju i stvaranju jasne perspektive budućnosti proizvodnje kako bi održali korak s tržišnom konkurencijom. Također je potrebno dublje razumijevanje pojmova, ideja i tehnologije, kao i njezinih odnosa, a posebno za primjenu u praksi. [10]

### **3.3. Kibernetičko-fizički sustavi (*Cyber-Physical-Systems – CPS*)**

Kontinuirani napredak informacijske i komunikacijske tehnologije u kombinaciji s eksponencijalnim rastom računalnih, prijenosnih i skladišnih kapaciteta, omogućuje pojavu sve snažnijih, međusobno povezanih novih tehnoloških sustava. Navedeni sustavi nazivaju se kibernetičko-fizički sustavi<sup>5</sup> (*eng. Cyber-Physical-Systems - CPS*). Ti se sustavi sastoje od nekih novih i već postojećih tehnologija. U literaturi se mogu naći brojna objašnjenja pojma ovih sustava od kojih su neka:

- “Integracije računanja s fizičkim procesima. Ugrađena računala i mreže nadziru i kontroliraju fizičke procese, obično s petljama povratnih informacija gdje fizički procesi utječu na izračune i obrnuto.” [15]

---

<sup>5</sup> U daljnjem tekstu CPS

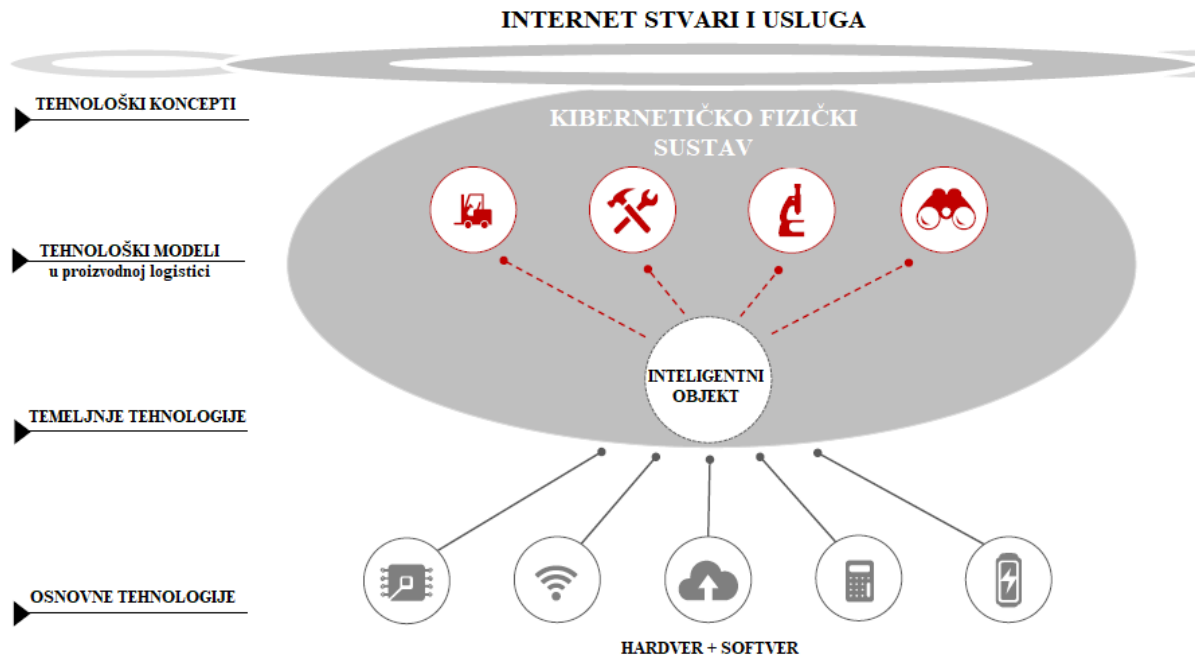
- “Sustavi koji izravno povezuju stvarne (fizičke) objekte i procese s (virtualnim) objektima i procesima obrade informacija putem otvorenih, djelomično globalnih i uvijek međusobno povezanih informacijskih mreža.” [16]
- “Uključuju ugrađene sustave, proizvodnju, logistiku, inženjerstvo, koordinaciju i upravljanje procesima kao i internetskim servisima, koji zahvaljujući sensorima izravno prikupljaju fizičke podatke i pomoću aktuatora<sup>6</sup> utječu na fizičke postupke. Ovi sustavi su međusobno povezani putem digitalnih mreža, koriste podatke i usluge dostupne širom svijeta i opremljeni su sučeljima čovjek-stroj. Kibernetičko-fizički sustavi su otvoreni društveno-tehnički sustavi koji omogućuju nekoliko novih funkcija, usluga i mogućnosti.” [17]

Iako nema očite razlike u tome što čini CPS, glavna dodatna značajka ovih sustava može se vrlo jednostavno vidjeti u izravnoj vezi stvarnog i virtualnog svijeta. Spajanje komponenti obrade informacija i fizičkih objekata u automatizaciji nije nepoznanica i već postoji od 1970-ih godina. Bitna inovacija koja dolazi uz CPS je međusobno povezivanje objekata i procesa putem otvorenih i globalnih informacijskih mreža, odnosno, putem Interneta. [18]

Glavni tehnološki pokretač nastanka CPS-a je hardversko i softversko podrijetlo. S jedne strane, tehnološka infrastruktura koja se sastoji od ugrađenih sustava i visokoučinkovitih senzora, aktuatora i komunikacijskih sučelja osigurava neizbježne hardverske kapacitete. Većina ovih ugrađenih sustava trenutno su ograničeni i ne izlažu računalne mogućnosti prema van. S druge strane, korištenje poslovnog weba, integracijskih platformi i usluga temeljenih na rješenjima u pohranjivanju podataka u oblaku otvaraju potpuno nove poslovne prilike. Hijerarhijski prikaz koncepta CPS-a i njegovih komponenti prikazan je na slici 3.[19]

---

<sup>6</sup> Naprava kojom se na pobudu upravljačkoga signala pokretni dijelovi sustava dovode u željeni položaj, ostvaruje se njihovo gibanje ili razvija sila ili moment kojim ti dijelovi djeluju na okolinu. [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr) (24.08.2022.)



Slika 3. Hijerarhijski prikaz komponenata CPS-a

Izvor: [19]

Ne moraju samo utjelovljeni objekti (sustavi) sačinjavati CPS, već i nematerijalna dobra kao što su operativni i upravljački procesi. Zbog te činjenice, CPS još uvijek predstavlja prilično apstraktan, teorijski koncept više nego gotovu tehnologiju, koja je spremna za korištenje i ima primjenu i prototipove u industrijskoj praksi. Još jedna karakteristika, koja se može koristiti za opisivanje CPS-a i istovremeno, pokazuje raznolikost dimenzija ovih sustava je stupanj decentralizacije njihove strukture i njihov prostorni volumen. Pomoću naprednih tehnologija mikrosustava, a CPS se može postaviti na jedan mikročip uključujući razne senzore i mikroprocesor za obradu podataka. Veći CPS može se konstruirati u obliku kompletnog alatnog stroja, koji može biti dio još većeg CPS-a, odnosno, cijele tvornice. Ekstremna manifestacija CPS-a bila bi njegova dodjela u svjetskoj mreži, npr. svjetska operativna tvrtka. Obje navedene karakteristike CPS bile su elementarne značajke ključnih tehnologija koje su dio modela klasifikacije tehnologija na temelju vrsta tehnologije. Stoga CPS mora biti dizajniran u skladu s potrebama kupca kako bi postigao svoj puni potencijal. CPS ima različite mogućnosti. Jednostavno govoreći, mogu ispuniti generičke funkcije kao što je traženje odgovarajućih usluga na internetu kao i funkcije specifične za aplikaciju, npr. optimizacija rute unutar logističke mreže. [18]



Razvoj ovih sustava proći će kroz nekoliko faza. Pet je temeljnih dimenzija CPS-a, koji se međusobno nadograđuju prema povećanju otvorenosti, složenosti i pamet: [19]

- spajanje fizičkog i virtualnog svijeta,
- sustavi s dinamički prilagodljivim granicama sustava,
- sustavi koji se prilagođavaju kontekstu s autonomnim sustavima, odnosno, aktivna kontrola u stvarnom vremenu,
- kooperativni sustavi s distribuiranim i promjenjivim upravljanjem i
- opsežna suradnja između čovjeka i sustava

U svakoj od ovih faza, dizajn CPS-a omogućuje razvoj različitih funkcija specifičnih za aplikaciju, koje omogućuju tehnologijama stvaranje novih prednosti. [19]

### **3.4. Internet stvari i usluga (*Internet of Things and Services – IoTS*)**

Internet stvari i usluga<sup>7</sup> (*eng. Internet of Things and Services – IoTS*) se promatra kao koncept, a ne kao tehnologija. Pojavio se, pružajući mogućnost umreživanja za sve veći broj heterogenih pametnih objekata koji postaju dio unaprjeđenja proizvodne logistike. Koncept Interneta stvari i usluga sadržava nekoliko tehnologija koje zajedno tvore IoTS budući da se međusobno podupiru. [20]

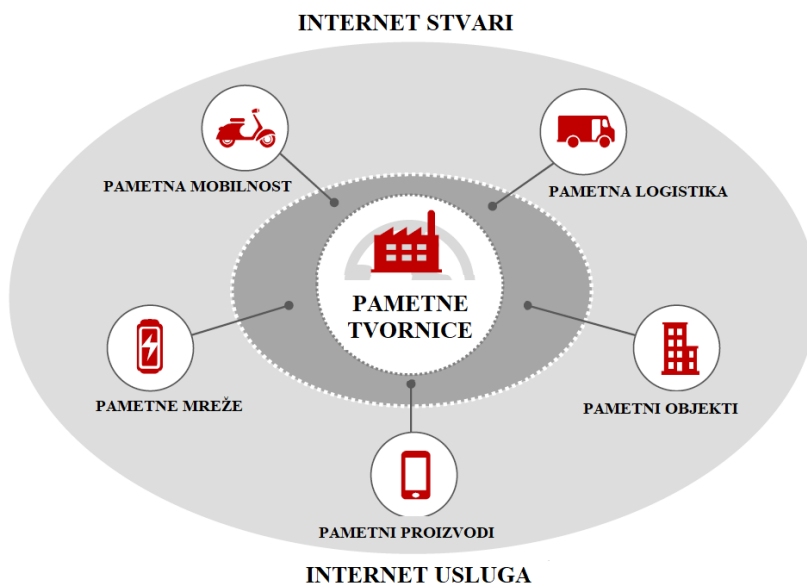
Dok se pokušava razumjeti koncept IoTS-a, korisno je razdvojiti pojmove Internet stvari (IoT) i Internet usluga (IoS). Po definiciji, IoT je : “povezivanje fizičkih objekata (stvari) s virtualnim prikazom na internetu ili slično strukturiranoj mreži. Automatska identifikacija pomoću RFID tehnologije mogući je izraz Interneta stvari; kroz senzor i tehnologije aktuatora funkcionalnost se može proširiti detekcijom statusa i izvršenje radnji.” [17]

Pod definiciji IoS je: “dio interneta, koji pruža usluge i funkcionalnosti kao granularne softverske komponente temeljene na Internetu. Pružatelj ih stavlja na raspolaganje na internetu i nudi na temelju stvarne potražnje.” [17]

---

<sup>7</sup> U daljnjem tekstu IoTS

Ponuđene usluge na IoS-u imaju dvostruku svrhu: i krajnji potrošač i tehnički sustavi mogu zahtijevati poslovne funkcije, koje pružaju partnerske tvrtke. Prijelaz s trenutnog Interneta orijentiranog na ljude, na Internet orijentiran na stvari je aktualan, a granica između stvarnog svijeta i virtualnog mora slabi. IoTS se smatra elementom koji omogućuje integriranje i međusobno povezivanje različitih industrijskih sektora. Koncept IoTS i međusobna povezanost s ostalim elementima sustava prikazan je na slici 4. [21]



Slika 4. Koncept Interneta stvari i usluga i njeni elementi

Izvor: [20]

Mogućnost izrade stvari koje je moguće identificirati i lokalizirati (npr. potrošni materijal, odjeća, radni dijelovi, karte, kućanski aparati, strojevi, prijevozna sredstva, biljke, životinje, ljudi, itd.) bez obzira na lokacije međusobno povezanih stvari, otvara posve nove poslovne prilike. Cjelokupni potencijal i dugoročni rezultati IoTS-a nisu potpuno predvidljivi, kao što se to dogodilo Internetu 1960-ih godina. Širok raspon istraživača iz industrije i akademskih zajednica, kao i poduzeća i vladinih agencija pokazuju interes za IoTS. [22]

### 3.4. Inteligentni objekti i sustavi

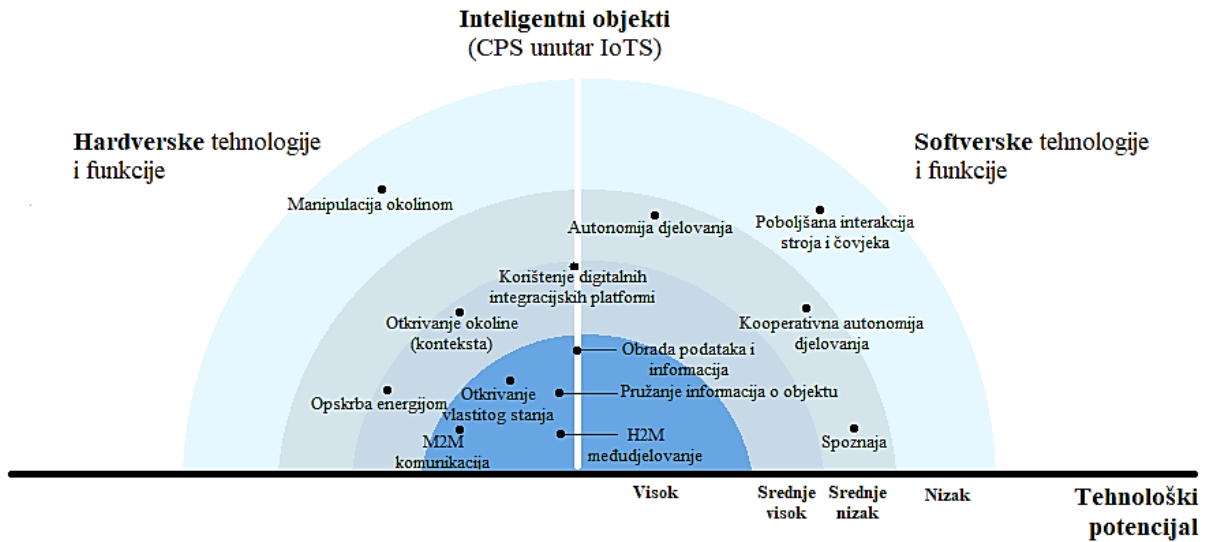
Temeljne tehnologije CPS-a i IoTS-a omogućuju pojavu koncepta inteligentnih objekata i sustava. Primjer inteligentnog objekta izdvojen je u zasebnom poglavlju "6. Primjena inovativnih tehnologija na primjeru iz prakse – digitalni blizanac". Inteligentni objekti predstavljaju fizički segment inovativnih tehnologija i sastoji se od hardverskih i softverskih tehnologija.

Koncept inteligentnih objekata nužno zahtijeva postojanje tijela (objekta) koji može djelovati u svojem okruženju i, posljedično, generirati znanje kroz iskustva. Inteligencija, dakle, izraz je senzomotoričke koordinacije, što znači da senzori (osjetilni organi) i pokretači (motori) koordiniraju s unutarnjim informacijama postupaka obrade. Često se inteligencija objekta identificira isključivo prema njegovoj sposobnosti obrade podataka i informacija. [32]

Ponašanje inteligentnih objekata uvelike ovisi o tome gdje i kako se koriste. Inteligentni objekt postavljen za nadzor temperature u teretnom kontejneru drugačije će se ponašati od inteligentnog objekta koji nadzire parkirna mjesta. Inteligentnim objektima mogu se dodijeliti nekoliko karakteristika. Do procjena o konkretnoj primjeni takvih objekata dolazi se modeliranjem različitih scenarija. Za realizaciju inteligentnih objekata postoje različite tehnologije. Te se tehnologije često nazivaju "tehnologijama omogućavanja" i percipiraju se kao tehnološki pokretač i temelj na kojem se grade razne inovativne primjene inteligentnih objekata. [33]

Prava inovativna prednost inteligentnih objekata dolazi iz njihovog međusobnog povezivanja. Ove međusobno povezane mreže tehnoloških sustava nazivaju se inteligentnim sustavima. Inteligentni sustavi potječu iz kibernetike. Kibernetika je najistaknutiji predstavnik teorije sustava i istražuje temeljne koncepte upravljanja i regulacije složenih, hibridnih sustava. Ispituje strukture, odnose i ponašanje dinamičkih sustava. Obradivanje podataka i razmjena informacija među Inteligentnim objektima može se implementirati centralizirano ili decentralizirano. Centralizirana implementacija je npr., implementacija strukture kao što je središnje računalo. Važno je naglasiti da se inteligencija stvara samo kroz interakciju članova sustava, odnosno, inteligentnih objekata.

Razrađena saznanja o tehnološkom potencijalu inteligentnih objekata i njihovih temeljnih tehnologija prikazani su u nastavku u obliku tehnološkog radara temeljenog na funkcijama podijeljenima prema njihovoj tehnološkoj osnovi (temeljenoj na softveru ili hardveru), slika 5. [23]



Slika 5. Tehnološki radar utemeljen na tehnologijama i funkcijama unutar inteligentnih objekta

Izvor: [23] [36]

Tehnološki radar predstavlja orijentaciju na mogućnosti kao i na izazove inteligentnih objekata pri promicanju digitalne integracije u proizvodnoj logistici. Hardverske i softverske tehnologije i funkcije detaljnije su objašnjene u poglavljima 4. i 5.

## **4. HARDVERSKE TEHNOLOGIJE I FUNKCIJE INTELIGENTNIH OBJEKATA PROIZVODNE LOGISTIKE**

Hardverske tehnologije su predstavljene u ovom poglavlju s posebnim osvrtom na njihove mehanizme omogućavanja, odnosno, njihovih funkcija. Odabir tehnologija ne predstavlja potpuni uvid u mogućnosti, već temeljenje tehnologije sa značajnom ulogom u funkciji inteligentnih objekata u proizvodnoj logistici.

### **4.1. Automatsko identificiranje i lociranje**

Među raznim funkcijama inteligentnih objekata, jedinstvena prepoznatljivost percipira se kao temeljna funkcionalnost. Automatska identifikacija je, naime, poveznica između protoka materijala i protoka informacija, odnosno, trenutak u kojem se fizički i virtualni svijet povežu u jednu cjelinu. [1]

Postoji nekoliko koncepata koji se odnose na tehnološke konfiguracije postupka identifikacije, koji se na temelju posebnih zahtjeva aplikacije mogu odgovarajuće dizajnirati. U današnje vrijeme u proizvodnoj industriji prevladala automatska identifikacija pomoću tehnologija automatske identifikacije (skraćeno Auto-ID). Tri si glavne dimenzije Auto-ID tehnologije koje uključuju optičku identifikaciju, radio identifikaciju i mrežna identifikacija.[23]

Optička identifikacija uglavnom podrazumijeva korištenje barkoda sustava. Ti su sustavi svjetski standard za automatsku identifikaciju te predstavljaju najširu primjenu Auto-ID tehnologije. Crtični kod artikla može se ispisati ili kao 1D-kod (npr. crte) ili 2D-kod (npr. matrica) i prepoznaje se pomoću laserske zrake (skeniranje) uz pomoć uređaja za skeniranje. Svaki sektor ima svoje standarde crtičnog koda, a dva najpoznatija standarda su “Univerzalni kod proizvoda (UPC)” i “Europski broj artikla (EAN)”.Nedostaci sustava crtičnog koda su spor protok informacija budući da su bar kodovi tehnologija vidljive linije koja zahtijeva ručno skeniranje i omogućuje čitanje samo jedne stavke u isto vrijeme. [24]

Nešto modernija tehnologija radiofrekvencijske identifikacije (RFID) nadvladava ova ograničenja. RFID se smatra odlučujućim uvjetom za realizaciju IoTS. RFID tehnologija radi beskontaktno i sastoji se od malih transpondera (*eng. tag*), koji se pričvršćuju na predmet (npr.

predmet, paleta ili kontejner), kao i od uređaja za čitanje i pisanje, koji bežično komuniciraju s transponderom. . Transponder ima pohranu mobilnih podataka na memorijskom čipu i antenu. Ti se transponderi mogu primijeniti gotovo na svaki opipljivi objekt jer se njihov volumen može komprimirati na veličinu bubamare. Klasična funkcionalnost RFID-a može se proširiti s obzirom na povećanje decentralizirane inteligencije, budući da se trenutno većina ključnih informacija centralno sprema u jednu bazu podataka. Osim prijenosa jedinstvenog identifikacijskog broja, druge informacije se mogu dodatno spremati i razmjenjivati s drugim sustavima. U proizvodnoj logistici, ovaj princip podatka na čipu omogućuje spremanje podataka o, na primjer, određitu prijevoza, sadržaju i geometrijskom obliku nosača tereta. Nadalje, omogućuje opremanje fizičkih objekata digitalnom memorijom proizvoda, koja se može koristiti se za osiguravanje potpune sljedivosti objekata ili za optimiziranje proizvodnih procesa, dok pruža informacije o povijesnim podacima o proizvodnji i daljnjim proizvodnim koracima. Daljnja primjena RFID-a je određivanje položaja fizičkih objekata unutar tvornice, odnosno, lokalizacija. Automatski navođena vozila<sup>8</sup> (*eng. Automated Guided Vehicles – AGV*) mogu biti opremljena uređajima za čitanje ugrađenog RFID-a transpondera na području tvornice. Stoga se AGV-ovi mogu pratiti unutar unaprijed određenog radijusa kretanja u bilo kojem trenutku. Materijali koji se prevoze AGV-om također se mogu lokalizirati u bilo kojem trenutku, budući da su u dometu čitača AGV-a). [25] Usporedba barkoda i RFID prikazana u tablici 2.

Tablica 2. Usporedba barkod i RFID tehnologije

| PARAMETRI  | BARKOD     | RFID        |
|--|------------|-------------|
| Količina pohranjenih podataka                              | <100 b     | 16-64 kb    |
| Čitljivost golim okom                                      | Moguća     | Nemoguća    |
| Utjecaj smanjenje vidljivosti uzrokovanom prljavštinom     | Visok      | Nepostojan  |
| Utjecaj smanjenje vidljivosti uzrokovanom drugim objektima | Visok      | Nepostojan  |
| Degradacija  | Ograničena | Nepostojana |
| Trošak nabave  | Nizak      | Osrednji    |
| Trošak održavanja  | Nizak      | Nepostojan  |
| Brzina čitanja podataka                                    | ≈4s        | ≈0.5s       |
| Maksimalna udaljenost                                      | 0.5m       | 5m          |

<sup>8</sup> U daljnjem tekstu AGV

Izvor: [24] [25]

Lokalizacija inteligentnih objekata također se može izvršiti Globalnim pozicijskim sustavom<sup>9</sup> (*eng. Global Positioning System - GPS*) zatvorenom prostoru. Interni GPS ima istu funkciju kao i GPS koji se svakodnevno koristi pomoću pametnih mobilnih uređaja, satova, vozila te ostalih uređaja koji podržavaju GPS. Ovaj sustav je testiran u nekoliko okruženja i može se promatrati kao praktično rješenje za funkciju lokalizacije. Budući da se smatra da funkcije lociranja i praćenja imaju široko polje primjene, posebno u logistici i proizvodnji, funkcija lokalizacije inteligentnih objekata stoga ima značajnu važnost. [23]

## 4.2. Komunikacija između strojeva i uređaja

Sposobnost inteligentnih objekata da komuniciraju, u literaturi i praksi, uz objašnjene funkcije u poglavlju 3.4., smatra se integralnom tehnologijom IoTS-a. Pasivna komunikacija u ovom kontekstu znači da drugi nadređeni IT sustav preuzima komunikaciju u obliku “zamjenika”. Ovaj oblik je najčešća definicija komunikacije stroj-stroj (*eng. machine-to-machine –M2M*) za inteligentne objekte. Najnoviji razvoj modernih komunikacijskih tehnologija visokih performansi je uglavnom potaknut napretkom unutar privatnog komunikacijskog sektora. Industrijska komunikacija koristi prednosti komunikacijske tehnologije, koje su već dokazane na potrošačkom tržištu. Industrijski Ethernet<sup>10</sup>, na primjer, koji je široko rasprostranjen i koristi se u koracima proizvodnje, temelji se na inovacijama u internet komunikaciji. Stoga će klasična tehnologija automatizacije unutar četvrte industrijske revolucije biti pod jakim utjecajem komunikacijske tehnologije koja je trenutno vodeća na tržištu privatnih potrošača. Komunikacijska sučelja mogu se razlikovati po radnom dometu i fizičkoj instalaciji, što uključuje ili žičanu ili bežičnu komunikaciju. Tablica 3 prikazuje različite vrste komunikacijskih tehnologija unutar industrijskog okruženja. [26]

---

<sup>9</sup> U daljnjem tekstu GPS

<sup>10</sup> sustav za povezivanje računala u mreže (grupe računala koja se koriste zajedno) [www.dictionary.cambridge.org]

Tablica 3. Industrijske komunikacijske tehnologije

| Područje                            | Definicija   | Primjeri  |
|-------------------------------------|--|---|
| <b>Body Area Networks (BAN)</b>     | Bežična mreža sa dometom, od otprilike, 1 metra                      | Near field communication (NFC), EnOcean, Ant+, Bluetooth Low Energy, Bluetooth 4.0  |
| <b>Personal Area Networks (PAN)</b> | Bežična mreža za mobilne uređaje sa dometom, od otprilike, 10 metara | WLAN, Bluetooth, ZigBee   |
| <b>Local Area Networks (LAN)</b>    | Žičana ili bežična mreža sa dometom, od otprilike, 300 metara        | Ethernet, Industrial Ethernet, Wired field bus systems standards: Ethernet/IP, Profibus, Profinet, SERCOS, CAN-Open ili M-Bus |
| <b>Wide Area Networks (WAN)</b>     | Prijenos podataka između udaljenosti od nekoliko stotina kilometara  | Telekomunikacijski standardi: GPRS, UMTS i LTE  |

Izvor: [26]

Što se tiče potpune digitalne integracije unutar pametne tvornice, M2M ne znači samo komunikaciju između različitih terenskih uređaja u pogonu (kao što ime sugerira), već i između različitih IT sustava na različitim razinama unutar cijelog poduzeća. To podrazumijeva implementaciju jedinstvenih komunikacijskih standarda, što je trenutno veliki izazov zbog raznolikosti proizvođača koji imaju svoje specifične standarde. [27]

### 4.3. Opskrba energijom

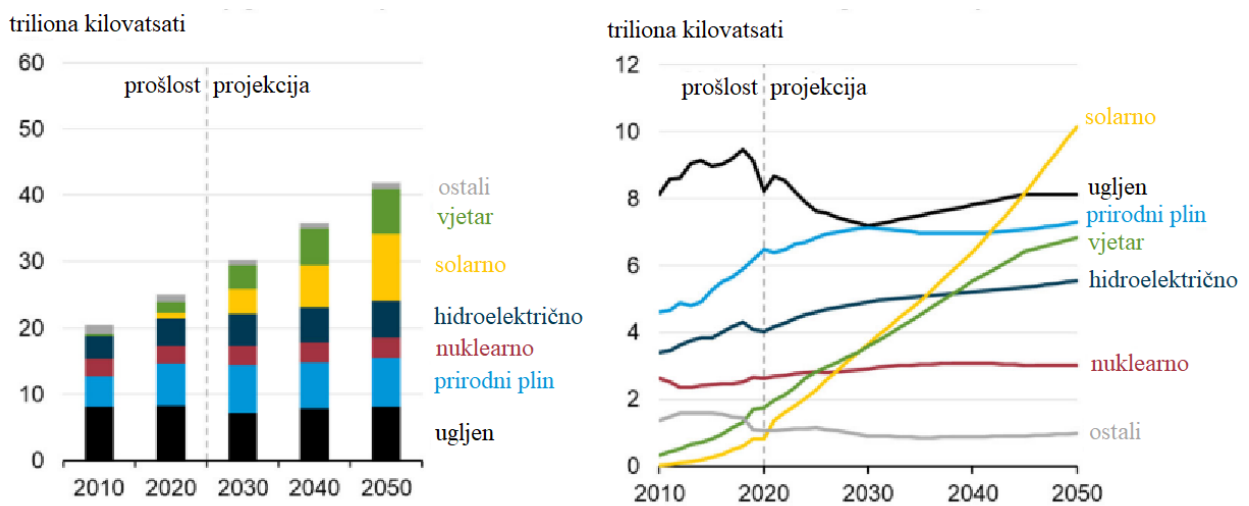
Inteligentni objekti ispunjavaju različite funkcije zahvaljujući svojim tehničkim mogućnostima. Takvi objekti zahtijevaju energiju za obavljanje procesa i zadataka kojima su namijenjeni. inteligentni objekti prikupljaju potrebnu energiju ili iz vanjskih izvora ili je generiraju autonomno. Obično je složenost zadataka proporcionalna utrošku energije. Stoga, što više energije objekti dobivaju, to su složenije funkcije koje izvršavaju. [28]

Mobilna opskrba električnom energijom za inteligentne objekte i danas je veliki izazov. Unatoč značajnim naporima da se poveća energetska gustoća baterija, sadašnji uspjesi ne mogu pratiti sve veću potrošnju energije modernih procesora. Gustoća energije baterija u prosjeku se poveća četiri puta za deset godina dok se izvedba procesora udvostručuje gotovo svake dvije godine. Stoga je opskrba energijom za mobilne inteligentne objekte ograničavajući faktor za praktičnu upotrebu



inteligentnih objekata. Postoje uglavnom četiri različite mogućnosti opskrbe energijom za inteligentne objekte: bez opskrbe energijom, energetska opskrba provedena žičanim putem, induktivna opskrba i unutarnja opskrba energijom. Žičana opskrba energijom može se primijeniti samo na stacionarne inteligentne objekte ograničene mjestom, npr. proizvodnih strojeva, budući da objekti imaju žičanu vezu s opskrbljivanjem strujom. [29]

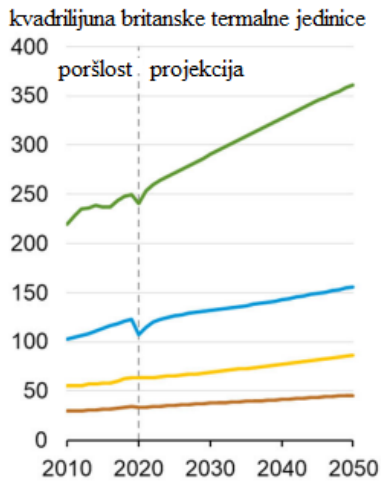
Agencija američkog federalnog statističkog sustava, U.S. Energy Information Administration (EIA), je u svom izvješću iz 2021. godine predstavila projekcije za proizvodnju i potrošnju energije prikazanima u grafikonima 1. i 2.



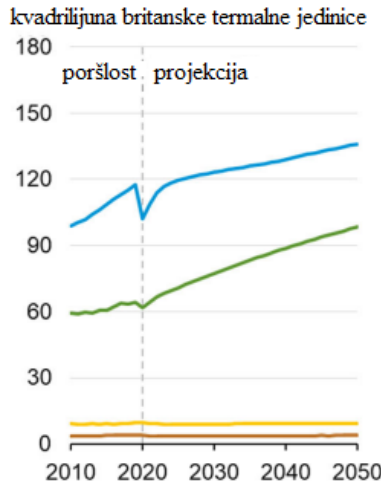
Grafikon 1. Projekcija globalne proizvodnje energije po izvorima do 2050. godine

Izvor: U.S. Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2021* (IEO2021)

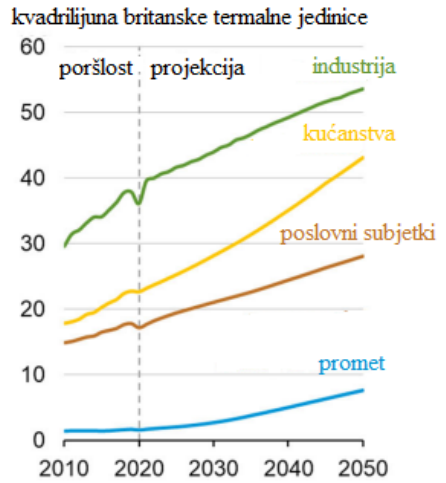
### Potrošnja energije



### Potrošnja tekućih goriva



### Potrošnja električne energije



Grafikon 2. Projekcija globalne potrošnje energije po izvorima i sektorima do 2050. godine

Izvor: U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2021 (IEO2021)

Radi efikasnosti samih objekata, poželjno je da budu energetske samodostatni. Energetski samodostatni inteligentni objekti generiraju potrebnu energiju iz svoje okoline bez korištenja ikakvih dodatnih izvora energije. Ova se tehnologija naziva prikupljanje energije. Postoji nekoliko pristupa za korištenje prirodnih izvora energija iz okoliša na temelju npr. termoelektričnih izvora ili solarnih izvora energije (fotonapon). Najpoznatiji oblik koji već ima nekoliko primjena u proizvodnim sustavima je sakupljanje sunčeve energije, koja se, primjerice, koristi u logistici za praćenje kontejnera. Kako solarna energija u većini slučajeva ima smisla samo izvan tvorničkih zgrada, smatra se da termoelektrično sakupljanje ima ogroman potencijal u proizvodnim okruženjima. A modul termogeneratora koristi se za sakupljanje energije iz temperaturnih gradijenata između izvora topline, npr. osobe i životinje, strojeva ili drugih prirodnih izvora. [20]

## 4.4. Osjetila i pokretanja

Svako živo biće je prirodno opremljeno biološkim strukturama za registriranje vanjskih podražaja koji su opisani kao receptori. Živci pretvaraju vanjske podražaje u električne signale koje

dalje prenose u središnji živčani sustav (mozak), gdje se formiraju osjetilni dojmovi (opažaj, osjećaj). [29]

Senzori su stoga tehnička replikacija tih prirodnih procesa. Jedna funkcija inteligentnih objekata je prikupljanje podataka iz svoje okoline pomoću senzora. Nakon toga, fizički svijet može se vjerno rekreirati u stvarnom vremenu, čime se ostvaruje jamstvo točnosti kontrole fizičkih procesa. Rezultat jest spoj digitalnog i materijalnog svijeta. [26]

Senzori i srodni mjerni sustavi pružaju mjerljive informacije za mehatroničke sustave. Stoga su važne poveznice između procesa i dijelova mikroelektronike koji obrađuju podatke. U ovom kontekstu najviše relevantni senzori su oni koji prikupljaju mehanička ili toplinska mjerenja, stvarajući električni signal. Tehnički senzori mogu se klasificirati prema naravi varijabli koje mjere. Najvažnije varijable su mehaničke, termalne, električne i kemijske i fizičke te su njihove klasifikacije prikazane u tablici 4. [30]

Tablica 4 Klasifikacija senzora prema mjernim varijablama

| Klasifikacija                |                              | Primjeri  |
|------------------------------|------------------------------|---|
| Mehaničke varijable          | Kinetičke varijable          | Brzina, moment sile, brzina rotacije, ubrzanje, vibracija, brzina protoka |
| Termalne varijable           | Temperatura                  | Kontaktna temperatura, temperatura zračenja                               |
| Električne varijable         | Varijable električnog stanja | Napon, struja, električna snaga   |
| Kemijske i fizičke varijable | Optičke varijable            | Intenzitet, valna duljina, boja   |

Izvor: [30]

U vidu senzorskih tehnologija, klasični senzori su prvi element u čitavom lancu operacija mjerenja. Ovaj lanac uključuje temeljne mjerne procese kao što su prikupljanje mjernih veličina, pretprocesiranje signala, obrada signala, pojačanje signala i analogno-digitalna pretvorba.[30]

Klasični senzori, jednostavno rečeno, prikupljaju te podatke i transformiraju ih u električni signal. No, novije generacije senzora na bazi poluvodiča, takozvanih pametnih senzora, imaju sposobnost transformiranja prikupljenih signala u digitalne podatke i obrađuju ih odmah u

uporabljive informacije. Drugim riječima, mogu pokriti cijeli mjerni lanac. Pametni senzori također imaju na raspolaganju komunikacijsko sučelje koje služi za interakciju s drugim pametnim sensorima. U kombinaciji s ugrađenim mikroprocesorom, ti se sustavi nazivaju MEMS (*eng. Micro Electromechanical Systems*) i smatraju se vlastitim CPS-om.[26]

Ovaj tehnološki napredak senzorskih tehnologija razvija novi oblik prikupljanja podataka, odnosno, korištenje bežične senzorske mreže. Korištenjem komunikacijskog uređaja pametni senzori mogu međusobno razmjenjivati obrađene podatke. Koncept bežične senzorske mreže sličan je inteligentnim objektima i velik dio razvoja u području inteligentnih objekata zahvaljuje okruženjima koja se bave bežičnim senzorskim mrežama. Bežične mreže senzora sastoje se od čvorova koji se samostalno konfiguriraju u mreže, kroz koje se očitavanja senzora mogu prenositi. Korištenjem mreže senzora, moguće je izvršiti precizna opažanja u scenarijima iz stvarnog svijeta u raznim sektorima, kao što to nikada prije nije bilo moguće. Važni kriteriji za implementaciju bežičnog senzora mreže su brzina, mogućnost rada u stvarnom vremenu, pouzdanost prijenosa i niska cijena veze. Bežične senzorske mreže otvaraju posve nove mogućnosti za prikupljanje kontekstualno specifičnih informacija o inteligentnim objektima. Kontekst se definira kao količina informacija koje su potrebne za karakterizaciju situacije, ljudi i predmeta, koji je relevantan za interakciju između korisnika i IT aplikacije. Takvi sustavi omogućuju korištenje kontekstualnih informacija specifičnih za aplikaciju kao i prilagodbu ponašanja prema identificiranoj situaciji.[31]

Osjetljivost na kontekst najviši je cilj tekuće istraživačke i razvojne aktivnosti. Tehnološki razvoj koji može doprinijeti praktičnom rješenju fuzija senzora, što znači spajanje podataka iz nekoliko različitih senzora, koji se temelje na klasifikaciji senzora prikazanoj u tablici 2. Također, prepoznavanje uzoraka je još jedna karakteristika optičke mjerne varijable.

Bežične senzorske mreže imaju ograničenja zbog fizičke veličine senzorskih čvorova. Vizija pametne prašine je bila razvijena oko 2000. godine, slijedeći ideju malih čestica prašine koje se mogu raspršiti koristeći mehanizme kao što su protok zraka. Njihova uporaba u vojsci za praćenje lokacije neprijatelja je otkazana zbog restriktivne prirode fizičke veličine senzora.[32]

S druge strane, aktuatori utječu na tehničke procese pomoću konačnog upravljačkog elementa, koji mogu mijenjati određene procesne parametre, odnosno, sposobni su tehnički manipulirati fizički svijet. To podrazumijeva cijeli sustav programa, elektronike i mehanizma koji

transformiraju električne signale iz jedinice za obradu informacija u gibanja, sile i rezultirajuće korake. [26]

Vrsta aktuatora jako ovisi o svrsi njegove implementacije. Način rada djelovanja izvršnih sustava je isti. Pokretač prima električni signal (informacije) upravljačke jedinice i prenosi ih elementu za regulaciju energije. Energija za upravljanje fizičkim procesima osigurava pomoćni energetska element. Pomoćna energija se može prenositi u različitim oblicima; najčešći su izvori toplinske energije (npr. toplinska ekspanzija), kemijski izvori energije (tlak eksplozije), izvori energije na bazi tekućine (npr. pneumatski, hidraulički) i električni izvori energije (npr. magnetski polja). Pomoćna energija obavlja stvarni rad aktuatora. Stoga se također naziva energija pokretanja ili podešavanja. [30]

#### **4.5. Obrada informacija i podataka**

U literaturi više autora inteligencija inteligentnih objekata definira se isključivo prema stupnju njihove sposobnosti za obrađivanje podataka i informacija. Iako se ovaj pristup doima preuskim i suprotnim teorijom utjelovljenja, funkcija obrade ključna je za sva daljnja razmatranja o decentraliziranom i autonomnom ponašanju inteligentnih objekata. Funkcija obrade podataka i informacija se može provesti, na temelju lokacije postupka obrade, na tri načina: izvan inteligentnog objekta, ugrađen unutar inteligentnog objekta i kombinacijom prve dvije varijante. Obrada podataka i informacija izvan inteligentnog objekta zahtijeva sučelja sposobna za komunikaciju u realnom vremenu i da su ugrađena u fizički objekt. Senzori prikupljaju podatke i prenose ih u centralni IT sustav, gdje se odvija stvarni postupak obrade. U nekim aplikacijama, podaci iz različitih izvora mogu se agregirati, transformirati u informacije i prenijeti natrag u inteligentni objekt. Decentralizirana obrada podataka i informacija zahtijeva izravno ugrađene komponente za obradu na inteligentnom objektu. [33]

Cilj obrade podataka i informacija, neovisno o lokaciji postupka obrade podrazumijeva pripremu informacija na takav način da su procesi potrebni za donošenje odluka optimalno podržani. Do kojeg se stupnja informacije obrađuju ovisi o samoj aplikaciji (npr. kome je dopušteno donijeti odluku na temelju informacija, inteligentnom objektu ili čovjeku). [6]

Tehnološku implementaciju lokalne obrade podataka i informacija ostvaruju mikroprocesori, odnosno mikrokontroler. Mikrokontroler je mikroprocesor s ugrađenom memorijom, mjeračima vremena i hardverom za povezivanje vanjskih uređaja kao što su senzori, aktuatori i komunikacijski uređaji. Mikrokontroleri imaju dvije vrste memorije: memoriju samo za čitanje (ROM) i memorije s izravnim pristupom (RAM). ROM se koristi za pohranu programskog koda koji kodira ponašanje uređaja, a RAM se koristi za privremene podatke softvera koji mora obaviti zadanu radnju. Svrha mikrokontrolera je pokretanje i podržavanje njegovih softverskih programa. Softver je pohranjen u ROM-u i obično se već nalazi na mikrokontroleru. Softver je uglavnom programiran na programskim jezicima visoke razine, kao što su C, Pascal ili Forth. Ova mikroručunala poznata su i kao ugrađeni sustavi, osim ako su ugrađeni u nešto što nije računalo (npr. osobna računala, prijenosna računala i druga oprema koja se lako identificira kao računalo). Osnovna razlika između tradicionalnog ugrađenog sustava i inteligentnog objekta jest da se komunikacija obično ne smatra središnjom funkcijom za ugrađene sustave, dok je komunikacija esencijalni uvjet inteligentnih objekata. Ugrađeni sustavi se stoga mogu promatrati kao ranije manifestacije inteligentnih objekata. [32]

#### **4.6. Interakcija čovjeka i stroja**

Inteligentni objekti komuniciraju sa svojim korisnicima putem ljudskog-strojnog sučelja<sup>11</sup> (*eng. Human-Machine-Interfaces - HMI*). Ulazni uređaji prevode radnje korisnika u digitalni jezik, dok se izlazni uređaji koriste za predstavljanje računalnog jezika na čovjeku razumljiv način. HMI su integrativni dijelovi hardverskih i softverskih komponenti, koji informacije i upravljačke elemente čine dostupnima za podršku korisniku u ispunjavanju njegovih zadataka. [26]

Za HMI danas postoji mnogo tehnologija na tržištu. Neki od njih su već dokazali svoju praktičnu važnost u svakodnevnoj uporabi. S obzirom na vrstu uređaja za unos, na primjer glasovnog upravljanja, koja ima široku primjenjivost jer se ne oslanja na vizualne i ostale osjetilne sposobnosti

---

<sup>11</sup> U daljnjem tekstu HMI

korisnika među kojima može lako doći do nesporazuma tijekom interakcije s inteligentnim objektom. Apple-ov<sup>12</sup> osobni asistent Siri<sup>13</sup> dobar je primjer HMI-ja glasovnih naredbi. [31]

Druga revolucionarna tehnologija je upravljanje gestama. Smatra se intuitivnim i trenutnim, a već je dostupna za jednostavne aplikacije (npr. Microsoft Azure Kinect<sup>14</sup>). Prepoznavanje pokreta ruke može se izvršiti na temelju slike (npr. procedure detekcije objekta temeljene na kameri) ili temeljene na uređaju (npr. senzor na tijelu mreže ili podatkovne rukavice). [31]

Klasični zaslone osjetljivi na dodir smatraju se najbitnijim oblikom HMI ulaznih uređaja u budućnosti. Nove tehnologije kao što su disperzivne signalne tehnologije koje omogućuje korištenje zaslona osjetljivog na dodir čak i u abrazivnim, industrijskim okruženjima. Ovakve tehnologije posebno imaju dodatnu vrijednost u proizvodnji, gdje se koriste kao personalizirani sustavi za pomoć, koji korisnicima pružaju kontekstualne informacije. Unutar ovih sustava ne prikazuju se samo informacije, već i preporuke o donošenju odluka na temelju prethodno agregiranih podataka. Karakteristična značajka naprednog HMI izlaznog uređaja jest razumljiva i jednostavna vizualizacija informacija. [6]

Da bi se postigla veća učinkovitost potrebno je razvijati sposobnost inteligentnih objekata da prepoznaju stanja i namjere korisnika, kao što su osjećaji, te da predviđaju ljudsko ponašanje. Tada bi inteligentni objekti pokazivali ljudsku svijest i razvijali bi visoki stupanj umjetne inteligencije. Tehnologije modeliranja korisnika, što znači i čovjeka, omogućuju dijagnozu, simulaciju, predviđanje i podršku ljudima u interakciji s inteligentnim objektima. U analogiji s ljudskom evolucijom, evolucija inteligentnih objekata bi se preko pametnih i aktivnih objekata unaprijedila u socijalne objekte koji bi imali društvenu svijest i bile bi dio društvene zajednice. [34]

---

<sup>12</sup> Američki proizvođač osobnih računala, pametnih telefona, tablet računala i računalnog softvera [www.britannica.com/]

<sup>13</sup> Osobni asistent ugrađen u Apple-ove proizvode koji može upravljati uređajem te davati informacije i odgovore na postavljena pitanja putem glasovnog upravljanja [www.britannica.com/]

<sup>14</sup> Programski komplet za prostorno računalstvo sa sofisticiranim modelima računalnog vida i govora, naprednim AI senzorima i paketima za razvoj programa koji se mogu povezati s Azure kognitivnim uslugama. [www.azure.microsoft.com]

## **5. SOFTVERSKE TEHNOLOGIJE I FUNKCIJE INTELIGENTNIH OBJEKATA PROIZVODNE LOGISTIKE**

Hardverske tehnologije zahtijevaju i softverske tehnologije i funkcije koje u cjelini omogućuju rad i unaprjeđenje inteligentnih objekata. Softverske tehnologije se temelje na skupu skripta i uputa, podacima i programima kojima se omogućava rad i upravljanje inteligentnih objekata. Hardverske tehnologije su fizičke i konstante, a softverske komponentne su varijabilne i neopipljive.

### **5.1. Umjetna inteligencija**

U području automatiziranih tehnologija trenutna istraživanja stavljaju žarište na transformaciju inteligencije u tehničke sustave temeljene na ICT-u. Cilj je prenijeti dijelove ljudskog ponašanja, poput procesa donošenja odluka, u tehničku komponentu, odnosno, inteligentne objekte. [35]

Izraz umjetna inteligencija (*eng. Artificial intelligence - AI*)<sup>15</sup> opisuje ovaj proces. AI pokreće emocije, jer pobuđuje pitanja kao što su: "Što je inteligencija?", "Kako se može mjeriti inteligencija?" i "Postoji li mogućnost da se strojevi ponašaju kao ljudska bića?". AI u odnosu na čovjeka može značajno brže izračunati složene matematičke zadatke, dok su ljudska bića još uvijek superiorna u odnosu na računala u kontekstu optimalnog donošenja odluka i planiranja djelovanja na temelju iskustava. Stoga umjetna inteligencija pokušava razviti, na temelju istraživanja u kognitivnoj znanosti, metode i tehnologije koje omogućuju strojevima da razmišljaju i djeluju kao ljudska bića. [46]

AI je moguće definirati pomoću pet temeljnih mogućnosti:[37]

- racionalno djelovanje,
- logičko zaključivanje,
- kognitivno ponašanje,
- savjest o postojanju i
- sposobnost odlučivanja.

---

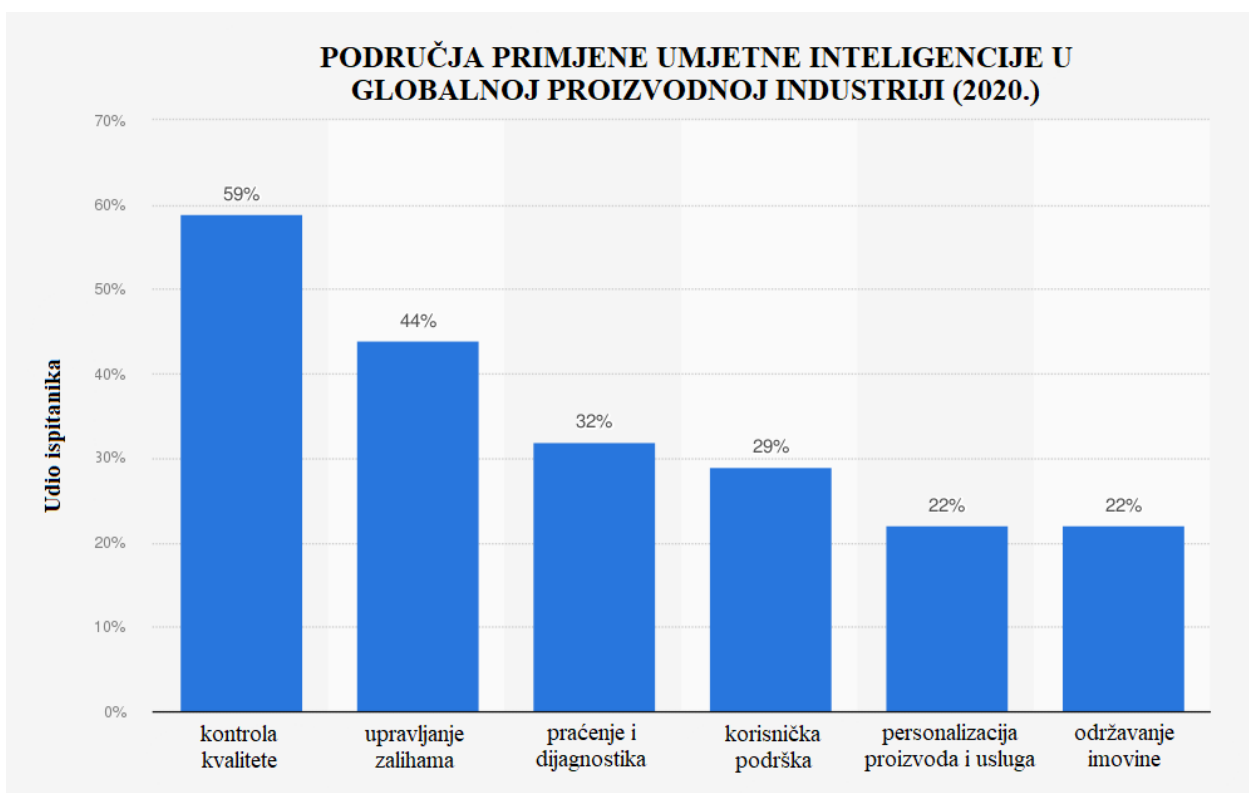
<sup>15</sup> U daljnjem tekstu AI



Kombinacijom ovih pet karakteristika opisuje se sposobnost ljudskih bića da uče i rješavaju probleme. Posljedično, to znanje prevedeno u softverski program može se interpretirati kao AI.[37]

Distribuirana umjetna inteligencija (koja se također naziva kolektivna umjetna inteligencija) može nastati umrežavanjem tehničkih sustava koji su prostorno distribuirani na strateške lokacije. Da bi se postigla takva umjetna inteligencija unutar sustava, i pojedinačni objekti do određenog stupnja moraju biti inteligentni (npr. posjedovati mikroprocesor).<sup>384</sup> Ovo bi ispunilo uvjete za realizaciju jednog takvog sustava, pa se naposljetku može zaključiti da kombinacija softverskih funkcija AI i prethodno u detaljno opisane hardverske funkcije inteligencije, čine cijeli niz inteligencije za fizičke objekte i sustave. [37]

U istraživanju koje je proveo Massachusetts Institute of Technology<sup>16</sup> (MIT) u 2020. godini definirane su podjele primjene umjetne inteligencije u globalnoj proizvodnoj industriji, prikazane u grafikonu 3.



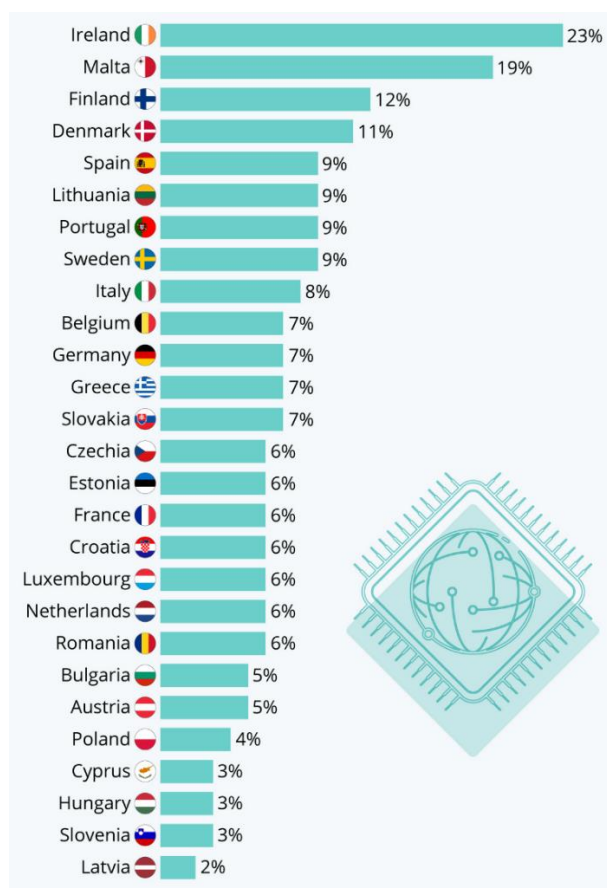
Grafikon 3. Područja primjene umjetne inteligencije u globalnoj proizvodnoj industriji (2020.)

<sup>16</sup> američko sveučilište poznato posebno po svojim znanstvenim tečajevima i istraživanjima, smatra se jednim od najboljih znanstvenih i tehnoloških sveučilišta na svijetu.

Izvor: [38]

Unutar proizvodne industrije, većina ispitanika (59 %) navodi da je kontrola kvalitete najvažniji slučaj upotrebe umjetne inteligencije. Općenito, kontrola kvalitete odnosi se na uspostavljanje kontrole koje standardiziraju proizvodnju. Na primjer, umjetna inteligencija može pomoći poboljšati ukupnu kontrolu kvalitete korištenjem pametnih kamera za poboljšanje procesa inspekcije što dovodi do smanjenih troškova. [38]

Uz proizvodnu logistiku, umjetna inteligencija postaje sve važniji pokretač ekonomske inteligencije, čineći ključne prodore u područjima kao što su kibernetička sigurnost, ljudski resursi, poljoprivreda i zdravstvena skrb. U Europskoj uniji udio poduzeća koja koriste tehnologiju trenutno iznosi 7 posto, iako se ta brojka značajno razlikuje među državama članicama, kao što je prikazano na grafikonu 4. [39]



Grafikon 4. Udio poduzeća, po državama Europske Unije, koja primjenjuju umjetnu inteligenciju (min. 10 zaposlenika)

Izvor: [39]

Republika Irska ima uvjerljivo najširu primjenu umjetne inteligencije u svojoj industriji u kojoj gotovo četvrtina poduzeća (s najmanje 10 zaposlenika) ima integriranu umjetnu inteligenciju u svoje poslovne sustave. Tehnologija također postaje sve prisutnija na Malti gdje je koristi 19 posto poduzeća, a Finska i Danska također imaju udjele veće od deset posto. Država članica Europske Unije s najmanjim udjelom poduzeća koje koriste AI je Latvija sa samo dva posto. Na začelju su također jedine dvije članice Europske Unije s kojima Hrvatska graniči, Slovenija i Mađarska, sa samo tri posto primjene umjetne inteligencije. Pozicija Hrvatske je nešto manja od prosjeka te iznosi šest posto poduzeća s integriranom umjetnom inteligencijom. [39]

## 5.2. Autonomija djelovanja

Softverski agenti su korisna tehnologija za implementaciju inteligentnih objekata, budući da je koncept agenata blizak konceptu inteligentnih objekata. Softverski agenti se definiraju kao poseban softverski proces, koji može samostalno razmišljati i može reagirati na promjene koje su na njega inducirali drugi agenti i njegovo okruženje, te je sposoban surađivati s drugim agentima. Najjednostavniji primjer agenta je filter neželjene pošte koji odvaja željenu i neželjenu (spam) e-poštu i na kraju ih arhivira. [36]

Postoji šest karakteristika koje opisuju softverski agent: [40]

- smješten: postojanje unutar okruženja,
- reaktivan: prilagodba ponašanja informacijama iz okoline,
- autonoman: posjedovanje određenog stupnja autonomije djelovanja,
- društven: sposobnost suradnje s drugim agentima (sustav s više agenata),
- racionalan: izvršenje radnji za ispunjenje određenog cilja i
- antropomorfan: prikaz mentalnih koncepata ljudskih bića.

Na temelju ovih karakteristika mogu se definirati četiri različite vrste agenata, koji označuju povećanje stupnja inteligencije sa svakom fazom: [40]

- jednostavan refleksni agent: izbor akcije na temelju trenutnih percepcija (bez razmatranja prijašnjih percepcija),
- refleksni agent temeljen na modelu: izbor akcije temeljen na modelu okoline i prošlih dodatnih percepcija (unutarnje stanje). refleksni agenti temeljeni na modelu mogu reagirati na neočekivane situacije na temelju ranijih iskustava (u skladu s agentovim unutarnjim stanjem),
- agent temeljen na cilju: izbor akcije temeljen na trenutnim i prošlim percepcijama, i na temelju željenog stanja,
- agent temeljen na vrijednosti: izbor akcije temeljen na optimalnom rješenju za ispunjenje željenog stanja.

Programski agenti, štoviše, mogu se implementirati kao konsolidirana rješenja svog fizičkog objekta (npr. stroja), što omogućuje jednostavnu migraciju pojedinačnih strojeva, pa čak i globalno, međusobno povezanih objekata. U svrhu jednostavnijeg povezivanja novih objekata, softverski agenti mogu se implementirati kao jedna cjelina ili kao integrativni dio stroja. [41]

Ovi agenti omogućuju, ovisno o korištenju, decentralizirano i (djelomično) autonomno ponašanje inteligentnih objekata temeljeno na funkcijama samokontrole. Samokontrola inteligentnih objekata opisuje proces decentraliziranog odlučivanja u heterogenim strukturama. Stoga je potrebna sposobnost inteligentnih objekata da donose autonomne odluke u nedeterminističkim sustavima prema unaprijed određenim ciljevima. Unaprijed određeni ciljevi bitni su za postojanje i uspješnost ispunjenja procesa samokontrole, budući da postavljaju krajnju točku događaja ili procesa koja se mora postići. [42]

Bitne karakteristike za samokontrolu inteligentnih objekata opisani su na sljedeći način: [42]

- autonomno ponašanje usmjereno ka cilju,
- sposobnost samostalnog odlučivanja,
- sposobnost mjerenja, povratnog povezivanja i evaluacije događaja,
- sposobnost interakcije,
- heterarhija<sup>17</sup> i

---

<sup>17</sup> Suprotno od hijerarhije

- nedeterminizam.

Na temelju stupnja autonomije svake dimenzije moguće je ostvariti sve veći oblik samokontrole. Autonomija se može podijeliti na tri dimenzije: [34]

- autonomija ponašanja: sposobnost izvršavanja unaprijed definiranih programa ponašanja,
- autonomija u donošenju odluka: sposobnost izbora između različitih ponašanja programa i
- informacijska autonomija: sposobnost generiranja novih programa ponašanja na temelju novih informacija.

Ove se tri dimenzije autonomije spajanjem mogu se smatrati autonomijom djelovanja. Karakteristike samokontrolirajućih inteligentnih objekata mogu se implementirati s različitim, prethodno spomenutim tipovima programa softverskih agenata. To uvelike ovisi o tome koliko bi autonomija djelovanja, a time i umjetna inteligencija trebala biti decentralizirana s obzirom na cilj aplikacije. Za učinkovito korištenje softverskih agenata unutar sustava, mogu biti implementirani višeagentski sustavi<sup>18</sup> (*eng. Multi-Agent systems - MAS*). U sustavima s više agenata, softverski agenti surađuju i pregovaraju s drugim agentima. Ideja iza MAS-a dolazi iz životinjskog svijeta. Vrlo složeno ponašanje ptica, a posebno ptica selica, u jatima višestruko intrigira znanstvenike. Ovo ponašanje se doživljava kao "dogovoreno" ponašanje i da je razvijen plan za njihovo putovanje, kojeg svaka od ptica slijedi za sebe. Na vanjske utjecaje jato reagira u formaciji kao cjelovita, usklađena jedinica. Koliko bi god strategije svake pojedine ptice mogle biti različite, svaka djeluje u korist cijele skupine. [43]

Ovaj prirodni fenomen naziva se inteligencija jata ili roja. U MAS-u je suradnja među agentima odlučujući aspekt, koji stvara nove koristi temeljene na međusobnoj interakciji. U teoriji organizacije, koordinacija opisuje međusobni dogovor pojedinaca u sustavu koji dalje služe cilju nadređenog sustava. Samoorganizaciju sustava karakterizira njegova sposobnost rješavanja složenih problema na temelju postupaka i percepcija kolektive. [37]

Agenti međusobno usklađuju svoje djelovanje za rješavanje problema na strateški način i snagom zajedničkog koordiniranja. Rješavanje problema proces je podijeljen u tri faze: dekompozicija problema, rješavanje podproblema i spajanje parcijalnih rješenja. U MAS-u je ontologija neizbježna za uspješan rad i učinkovitu funkcionalnost. U ontologiji se pronalazi

---

<sup>18</sup> U daljnjem tekstu MAS

unaprijed određeni rječnik za komunikaciju između agenata. Bez toga i naknadne semantičke povezanosti vokabulara, smisljena komunikacija ne može biti ostvarena. [40]

### 5.3. Napredna analiza podataka

Nužno je skrenuti pozornost na povećanje količine generiranih podataka. Količina podataka kontinuirano raste, naizgled beskonačno. Očekuje se ogroman porast količine podataka po stanovniku, no još veći rast se očekuje u proizvodnji. U proizvodnji će taj rast biti proporcionalan s korištenjem inteligentnih objekata i njegovih komponenti (npr. senzora, mreže senzora). [44]

Taj se fenomen naziva tehnologijom velikih podataka (*eng. Big Data*). U budućnosti će transformacija velikih podataka u značajnije inteligentne podatke biti glavni izazov, što će u konačnici povećavati učinkovitost procesa, ako se koristi na odgovarajući način. Automatizirano prepoznavanje odnosa, značenja i obrazaca korištenjem naprednih tehnologija za analizu podataka, može stvoriti dodatnu korist. Te softverske tehnologije kreću se od metoda rudarenja (*eng. data-mining*) novih podataka pa skroz do složenih programa strojnog učenja. Alati za rudarenje podataka omogućuju, na primjer, generiranje novih aplikacija i specifičnih kontekstualnih informacija, korištenjem podataka iz različitih izvora. Algoritmi analize ovise o predstavljenom problemu. Metode rudarenja podataka moraju biti implantirane u odnosu na specifičan slučaj. [45]

Multinacionalna softverska tvrtka SAP SE bavi se ovom temom putem svoje platforme SAP HANA. Razvijen je za obradu i analizu velikih količina podataka u stvarnom vremenu. SAP HANA već se uspješno koristi aplikacijski scenariji M2M, gdje je sveobuhvatna analiza podataka prije bila iznimno dugotrajna ili nemoguća. To uključuje, na primjer, održavanje sukladno trenutnom stanju, prediktivnu analizu kvarova ili automatsku nadopunu potrošnog materijala na temelju trenutnog statusa proizvodnje i kratkoročne prognoze potražnje proizvoda. [46]

Sljedeći korak, temeljen na naprednim analitičkim metodama, su samooptimizirajući inteligentni sustavi. Inteligentni objekti takvog sustava opremljeni su kognitivnim vještinama. Na temelju tehnologija strojnog učenja, povijesni podaci mogu se koristiti za donošenje odluka temeljenim na iskustvima. Inteligentni objekti bi stoga imali mogućnost optimiziranja vlastitog ponašanja. Neuronske mreže bitan su preduvjet i istovremeno ključan faktor u uspješnom strojnom

učenju. Neuronske mreže uče iz primjera, prepoznaju obrasce i koriste podatke iz prošlih mjerenja za izradu prognoza i idealnih modela za buduća ponašanja složenih sustava.<sup>410</sup> Samooptimizirajući sustavi, kao i samokontrolirajući i samoorganizirajući sustavi, imaju nadređene ciljeve sustava. U proizvodnji ti ciljevi mogu biti smanjenje vremena isporuke, smanjenje potrošnje energije ili povećanje kvalitete proizvoda. Dakle, kognitivni, samooptimizirajući sustavi imaju sposobnosti koje nadilaze prethodno spomenutu kontrolu i organiziranje aktivnosti. Takvi sustavi mogu izvršavati i dizajnirati složene planske zadatke na duži vremenski period. [47]

#### **5.4. Digitalne integrirane platforme**

Digitalna integracija unutar inteligentnih objekta može se olakšati upotrebom takozvanih pametnih usluga na platformama za digitalnu integraciju. Integracija inteligentnih objekata putem IoT-a omogućuje pristup terenskim podacima s bilo koje lokacije. Integracijska platforma uključuje hardver, softver i komunikaciju sustava. [48]

Posebna primjena digitalne integracijske platforme u proizvodnji je tržište digitalnih podataka. Javlja se kao posrednik između ponude i potražnje tog tržišta i pruža samo potrebnu transparentnost za sve vrste sigurnosti. Inteligentni objekti mogu koristiti ponuđene tehnološke podatke, na primjer, za održavanje svojih komponenti. Posljedično, izvorne funkcionalnosti inteligentnih objekata mogu se produljiti povremenom upotrebom takvih usluga. Zbog velikih zahtjeva za hardver koji bi podržavao ovakav tip platformi, javlja se rješenje u obliku digitalnog oblaka. Takav pristup već je dokazao svoju učinkovitost i u praksi se smatra smislenim rješenjem. [19]

Digitalni oblak karakteriziraju mogućnost nadogradnje, visoka dostupnost i brza internetska veza. Usluge digitalnog oblaka mogu se koristiti na različitim hardverskim i softverskim razinama. U sustavima digitalnih oblaka podaci iz proizvodnih procesa prikupljaju se na istom serveru, analiziraju se i vraćaju natrag na odredište. Već spomenuti Appleov program Siri je primjer ove funkcije. Glasovna naredba se snima preko mikrofona, zvučna datoteka se šalje na server, gdje se obrađuje, a rezultat se prenosi kao upravljačka naredba jedinici pošiljatelja. Te se funkcije mogu ponuditi kao usluge na digitalnim platformama temeljenim na sustavima digitalnih oblaka. Moguće je očekivati da će se te usluge kupovati u obliku aplikacija. Aplikacije su mala softverska rješenja i imaju unaprijed definirane funkcije sa ograničenom primjenom. [48]

## 6. PRIMJENA INOVATIVNIH TEHNOLOGIJA NA PRIMJERU IZ PRAKSE – DIGITALNI BLIZANAC

Nova industrijska revolucija u cijeloj industriji potaknula je raznolike transformacije u proizvodnji i proizvodnoj logistici. Proizvodnja se sve više orijentira na masovnu prilagodbu potrebama potrošača, za razliku od prijašnjeg pristupa čiji je temelj masovna proizvodnja. Razvoj i nadogradnje hardwarea i softwarea u okruženju Interneta stvar i usluga u proizvodnoj logistici uzrokuje sve više interesa u personaliziranu i proizvodnju. Međutim, takva proizvodnja zahtijeva integrirano upravljanje i prikupljanje praktičnih informacija o proizvodnji iz tvornica [49]

Masovna prilagodba je proizvodni koncept u kojem sudionici u lancu opskrbe proizvode robu sa zajamčeno niskim cijenama dok potrošačima omogućuju proizvode koji stvaraju vrijednost personalizacijom i velikim stupnjem prilagodbe potrebama potrošača. Međutim, personalizirana proizvodnja trenutno je previše ograničena i ne može se individualno smatrati učinkovitim konceptom proizvodnje. Primjena ove strategije zahtijeva razmatranje mnogih čimbenika i izazova koji utječu na ciljeve personalizirane proizvodnje, odnosno, mogućnosti postizanja pristupačne cijene uz pružanje visoke kvalitete proizvoda, brze isporuke i najvišeg stupnja prilagodbe. [50]

Tvornica kao usluga<sup>19</sup> (*eng. Factory-as-a-Service -FaaS*) je otvorena proizvodna usluga koja potiče personaliziranu proizvodnju usmjeravajući se na poteškoće pokretanja proizvodnje na koje pojedinac ili tvrtka mogu naići pri komercijalizaciji ideja. FaaS se također suočava s preprekama pristupa, troškova i izvedbe proizvodnje. Prepreke za pristup proizvodnji predstavljaju poteškoću razumijevanja pojedinosti proizvoda koje je potrebno istaknuti u personaliziranom konceptu proizvodnje. Troškovna prepreka označava stalno rastuće pitanje troškova, a prepreka uspješnosti izvedbe označava neučinkovitost proizvodnje. FaaS rješava te poteškoće pomoću povezanih mikro pametnih tvornica<sup>20</sup> (*eng. Connected micro smart factory – CMSF*) čije su komponente međusobno povezane u okviru IoTS-a. Ovaj se koncept temelji na tri ključne komponente: platforma otvorene proizvodne usluge (interakcijski prostor za sudionike u lancu vrijednosti), aditivna proizvodnja i modularni dizajn izgleda. Također, još jedan ključni napredak je koncept digitalnog blizanca, jedan od ključnih elemenata u istraživanju i primjeni IoTS-a. Digitalni bliznac predstavlja model na kojem se nalazi virtualna tvornica informacija i funkcionalna jedinica fizičkog svijeta. Digitalni

---

<sup>19</sup> U daljnjem tekstu FaaS

<sup>20</sup> U daljnjem tekstu CMSF ili MSF

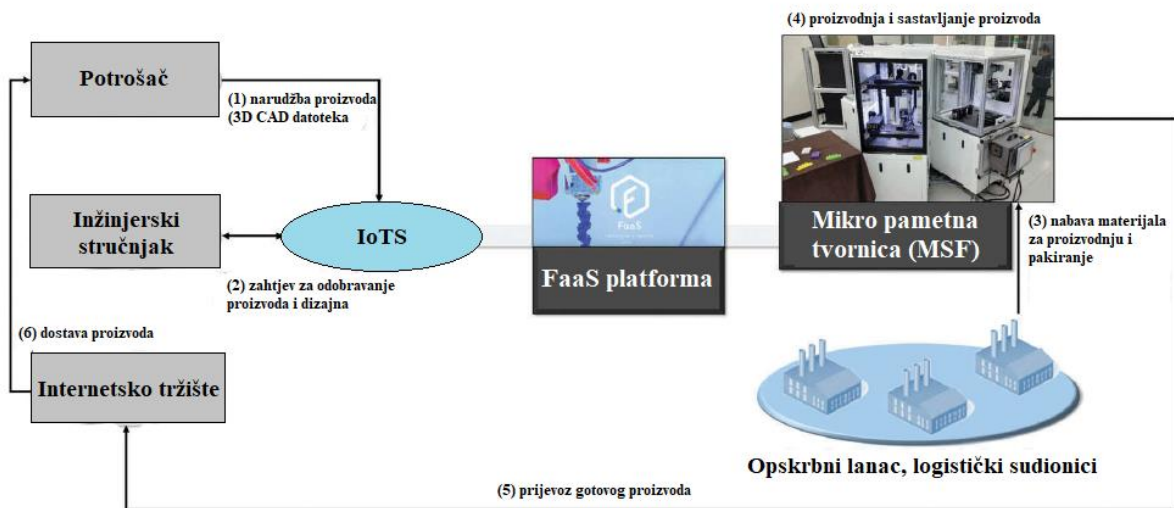


blizanac također ima cilj osigurati učinkovitost proizvodnog mjesta na temelju međusobnog povezivanja i interakcije putem stvarne IoTS mreže

Ovaj diplomski rad na primjeru iz prakse razmatra FaaS, koji primjenjuje koncepte personalizirane proizvodnje s ciljem rješavanja problema izvedbe i povećanjem učinkovitosti smanjuje troškovne prepreke primjenom integrirane automatizacije sustava. Predloženi digitalni blizanac predstavlja rješenje za personalizirane proizvodne sustave. Istovremeno, ovaj primjer savladava troškovne prepreke i prepreke izvedbe personalizirane proizvodnje te prevlada poteškoće integriranog upravljanja, koje predstavljaju ograničenje zbog korištenja tvorničke mreže. Uloga digitalnog blizanca iz primjera je nadziranje, praćenje i donošenje odluka u svrhu savladavanja gore navedenih izazova.

## 6.1. Factory-as-a-Service (FaaS)

Kako bi FaaS sustav mogao biti primijenjen u praktičnom okruženju, potrebna je platforma koja omogućuje razmjenu i korištenje informacija među sudionicima lanca vrijednosti. Slika 6. prikazuje konceptualni dijagram pružanja usluge pomoću FaaS platforme. [52]



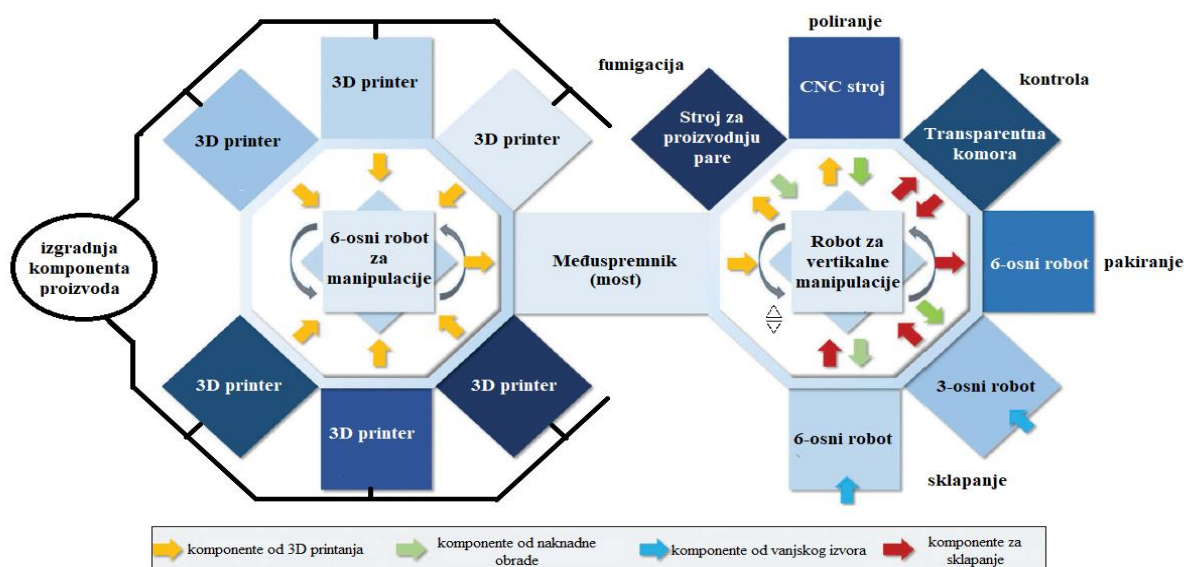
Slika 6. Dijagram koncepta FaaS platforme i faza proizvodnje personaliziranih proizvoda

Izvor: [52]

Platforma prima narudžbu od kupca putem interneta, a dizajn proizvoda je ostvaren kroz interakcije s inženjerskim stručnjacima na temelju narudžba kupaca. Cijeli proces pružanja usluge je dovršen kada je određeni objekt proizveden pomoću povezanosti proizvodnih elemenata i potrošača pomoću IoTS-a. U konačnici se taj proizvod dostavlja direktno krajnjem potrošaču. [52]

Četvrta faza u gornjem prikazu predstavlja fazu proizvodnje koja se provodi u CMSF-u. Ulazni podatak za proizvodnju je narudžba potrošača, odnosno, odobreni dizajn proizvoda od strane stručnjaka. Ograničenja ovog koncepta su izražena u visokim troškovima proizvodnje i preprekama u izvedbi te se dovodi u pitanje učinkovitost samog koncepta. Ovi izazovi mogu se djelomično riješiti konfiguriranjem ograničenih i modularnih proizvodnih elemenata te tako povećati učinkovitost, međutim, dodatna povećanja učinkovitosti su i dalje potrebna zbog nedovoljne integracije i iskorištenosti informacija. [52]

CMSF je proizvodni sustav dizajniran za stvaranje optimalne učinkovitost proizvodnje u nastojanju da se prevlada troškovna prepreka. Troškovna prepreka označava problem u kojem troškovi proizvodnje nastavljaju rasti, strukturno, pri proizvodnji raznih personaliziranih proizvoda u malim količinama. Proizvodni elementi CMSF-a sastoje se od proizvodnje, naknadne obrade, montaže i pakiranja. Sve navedene procese izvode automatizirani objekti čiji dizajn omogućuje jednostavno uklanjanje ili dodavanje modula (dijelova) kao što je prikazano na slici 7. [53]



Slika 7. Shematski dijagram izgleda mikro pametne tvornice

Izvor: [53]

## 6.2. Značajke digitalnog blizanca

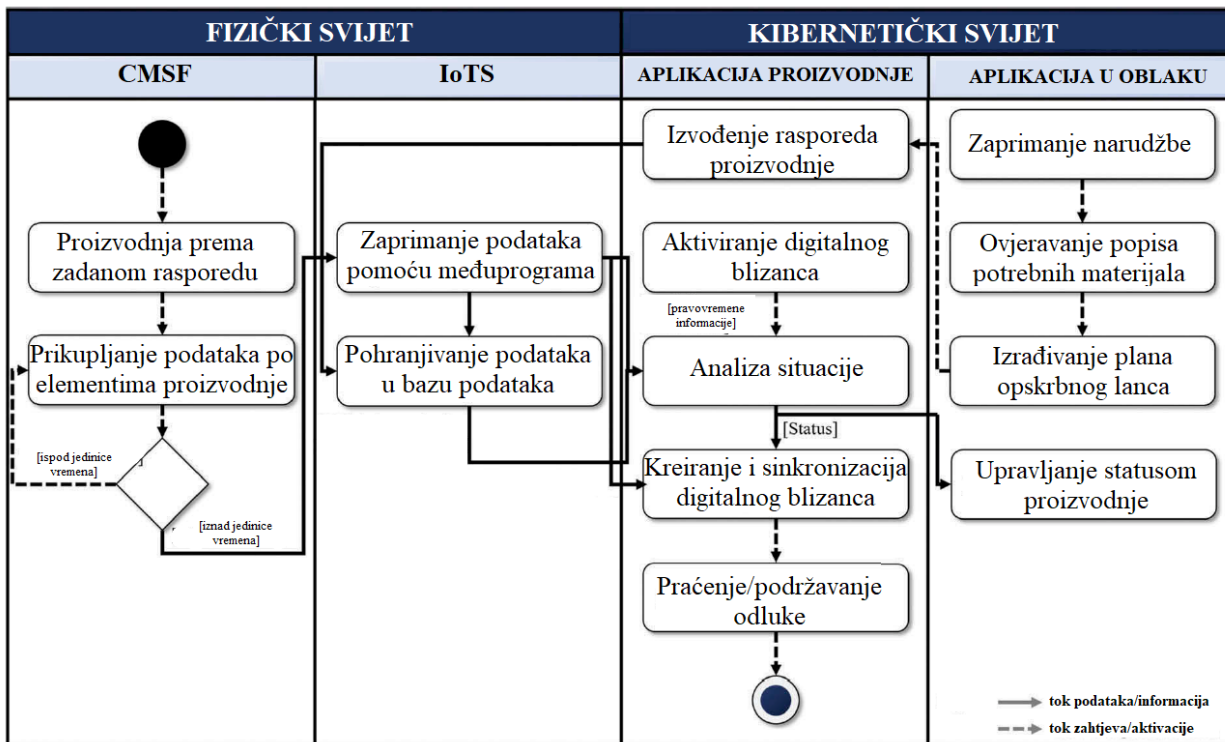
U ovom odjeljku opisane su proizvodne aplikacije temeljene na IoTS-u i primjene istih u praksi. Također definiran je pojam digitalnog blizanca, tehnologije koja koristi napredne proizvodne aplikacije temeljene na IoTS-u. Kao fizička domena istaknut je CMSF i virtualizacijom njegovih komponenti postiže se preslika u obliku digitalnog blizanca. Cilj generiranja digitalnog blizanca je nadziranje i praćenje procesa CMSF-a te donošenje odluka za prevladavanje izazova FaaS-a i personalizirane proizvodnje.

Digitalni blizanac može se definirati kao integrirani virtualni model fizičkog sustava koji sadrži sve njegove informacije i funkcionalne jedinice. Značajke digitalnih blizanaca su sljedeće: [54]

- fizički svijet se odražava u kibernetičkom svijetu u stvarnom vremenu, sugerirajući koje aplikacije digitalnih blizanaca u kibernetičkom svijetu mogu vršiti nadzor i praćenje različitih situacija u stvarnom vremenu,
- potiče razvoj kroz ponovljene interakcije i konvergenciju na visokim razinama. Može komunicirati između različitih informacijskih i funkcionalnih elemenata u fizičkom svijetu i mreži, kao i razne integracije i mogućnosti dodavanja vrijednosti na temelju tih elemenata. Osim toga, može izvući nove rezultate analize i akumulirati znanje na temelju prošlih podataka i podataka u stvarnom vremenu
- iako digitalni blizanac ima ulogu sličnu onome kod postojećih simulacija, budući da usvaja simulaciju kao temeljna funkcionalnost, također ima sposobnost, kroz integriranu analizu, brzo donošenje odluka putem IoTS mreže i osiguranje interoperabilnosti s drugim primjenama u proizvodnji

### 6.3. Koncept digitalnog blizanca

Na slici 8. prikazan je scenarij predloženog koncepta i primjenu digitalnog blizanca kroz dijagram aktivnosti.



Slika 8 Scenarij interoperabilnosti aplikacije digitalnog blizanca

Izvor: [52]

Fizički i kibernetički svijet podijeljeni su u dva sloja, kao što je označeno na dijagramu. Naime, fizički svijet uključuje CMSF i IoTS mrežu, a kibernetički svijet uključuje proizvodnu aplikaciju i aplikaciju u oblaku. Razmjena podataka ili informacija s drugim ćelijama označena je punom linijom, dok točkaste strelice pokazuju da su za prvu aktivnost potrebne druge aktivnosti prije prelaska na sljedeći korak. Scenarij počinje od MSF-a fizičkog svijeta i završava na sloju proizvodnih aplikacija kibernetičkog svijeta. [52]

Prvi sloj fizičkog svijeta je CMSF. Proizvodni elementi CMSF-a povezani su s IoTS mrežom putem I senzora ili među-programa. Kada CMSF započinje proces prema rasporedu proizvodnje, podaci o proizvodnji prikupljaju se po jedinici vremena, kao što su: [52]

- informacije o proizvodu koji se trenutno proizvodi,

- status procesa,
- informacije o pogonu iz tvorničke ćelije i
- podaci o radu u stvarnom postrojenju.

Ove informacije teku u IoTS mrežu, koja je drugi sloj mreže. Podaci o proizvodnji koji se šalju putem veze s IoTS protokolom ili samim među-programom su zatim klasificirani i pohranjeni.

Kibernetički svijet se sastoji od sloja proizvodnih aplikacija osmišljenim da prevladaju prepreku personalizirane proizvodnje i sloj aplikacije u oblaku koji radi kao kontaktna točka između korisnika i sustava te obavlja upravljačke uloge. Sloj aplikacije u oblaku također pomaže u prevladavanju prepreka pristupa primanjem narudžbe kupca zajedno s FaaS scenarijem. Štoviše, potvrđuje popis materijala za proizvodnju<sup>21</sup> (*eng. manufacturing bill of materials - MBOM*) kojim dobije informacije o potrebama kupaca. Nakon što je MBOM potvrđen, priprema se plan opskrbnog lanca za CMSF i zahtijeva se raspored proizvodnje od aplikacijskog sloja proizvodnje. Izdvojeni raspored proizvodnje zatim se premješta u IoTS mrežni sloj i pohranjuju u bazu podataka. [52]

Aplikacijski sloj proizvodnje sinkronizira prošlost, sadašnjost i budućnost operacije temeljene na proizvodnji informacije primljene iz baza podataka ili protokola IoTS mreže, ovisno o vremenu koje korisnik želi pratiti. Ako korisnici žele pratiti prošlost, mogu zatražiti prošle informacije o proizvodnji iz baze podataka, identificirati status na temelju dobivenih informacija, te koristiti integrirano praćenje i dobiti uslugu podrške kroz sinkronizaciju na temelju identificiranih statusa. Ako korisnici žele znati o trenutnoj operaciji, mogu pravovremeno primiti podatke izravno iz protokola, a ako zatraže budući plan proizvodnje, trebaju dobiti plan rasporeda iz baze podataka prije sinkronizacije i obavljane uloge sustava u digitalnom blizancu. [55]

#### **6.4. Primjena digitalnog blizanca na primjeru MSF testne stanice**

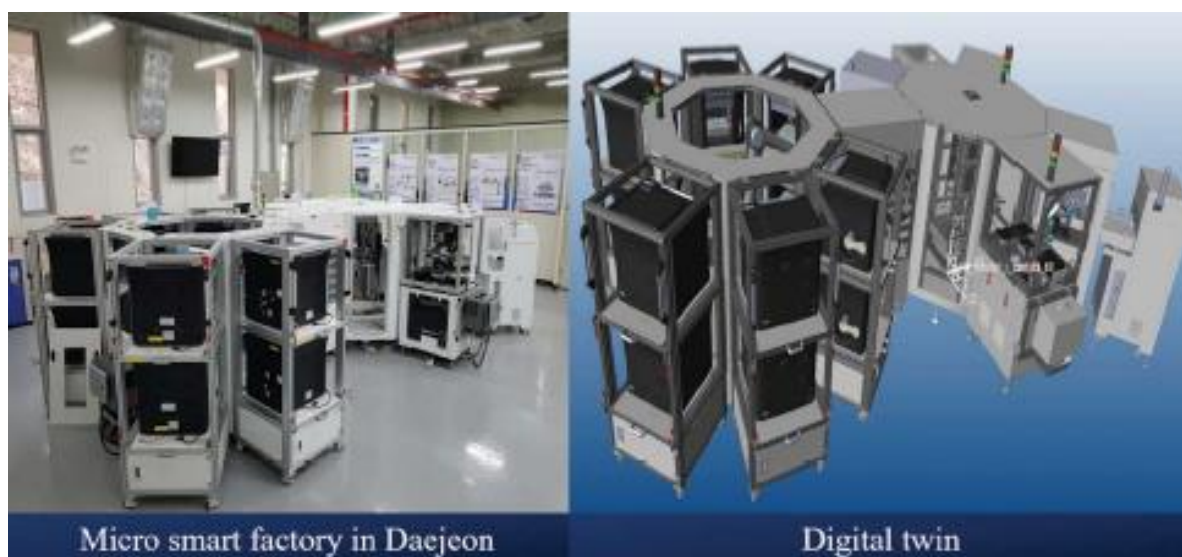
Za studiju slučaja opisano je stvarno okruženje MSF pogona. Tvornica koja je uzeta za primjer iz prakse je MSF testna stanica u Daejeonu, Južna Koreja. Slično drugim MSF-ovima, Daejeon

---

<sup>21</sup> U daljnjem tekstu MBOM

MSF koristi IoTS protokol i međuslojnu opremu za prikupljanje podataka o proizvodima, procesima, postrojenjima i resursima.

Slika 9. prikazuje MSF i njegovog digitalnog blizanca u Daejeonu. MSF se sastoji od proizvodnih elemenata prikazanih na Slici 7., s istim rasporedom.

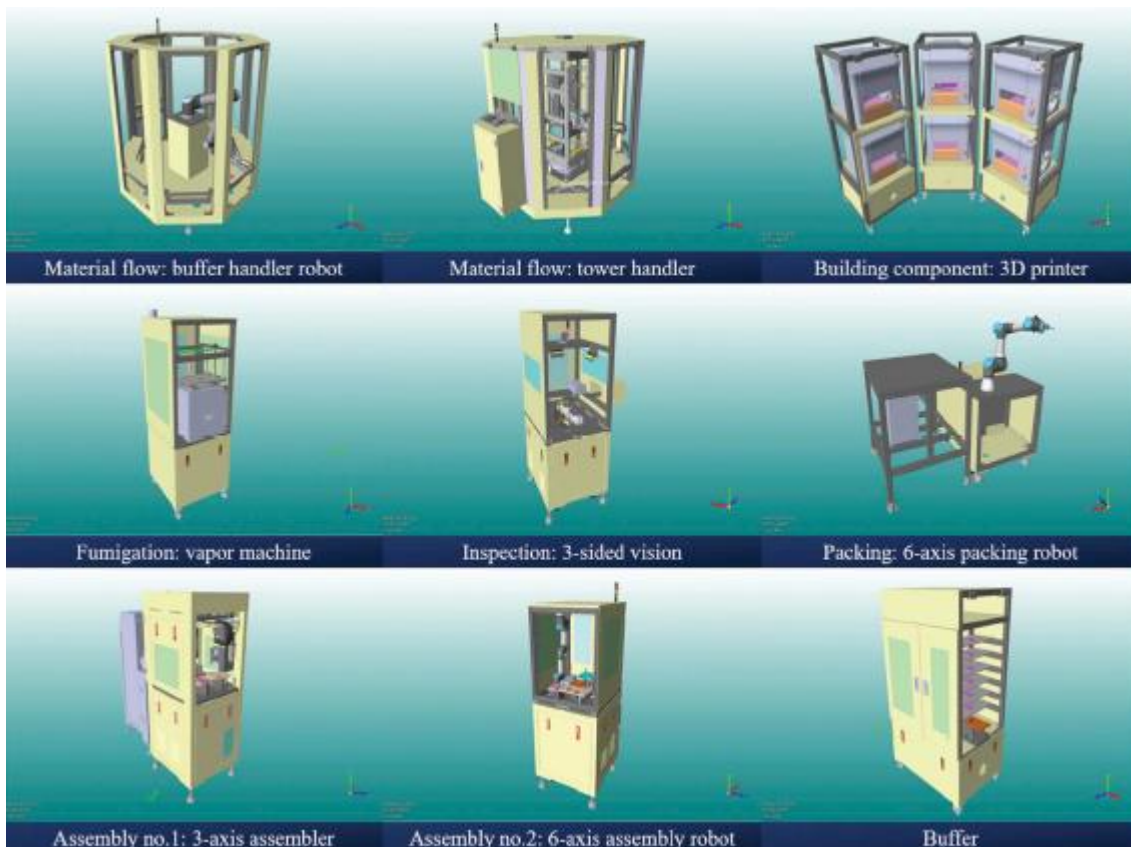


Slika 9. MSF testna stanica u Daejeonu (lijevo) i digitalni bliznac istog MSF-a (desno)

Izvor: [55]

Ovo postrojenje odgovara sloju CMSF u fizičkom svijetu arhitekture sustava interoperabilnosti, odnosno, konteksta predložene aplikacije digitalnog blizanca. Među četiri sloja, digitalni bliznac uključen u sloj proizvodne aplikacije unaprijed je definiran za sinkronizaciju informacija i funkcionalnih jedinica na MSF komponentama. [55]

Slika 10. ilustrira osnovni model postrojenja u digitalnom blizancu, koji prikazuje komponente MSF-a. Aplikacija digitalnog blizanca može pružiti usluge 3D vizualizacije korištenjem ovih 3D modela.



Slika 10. Osnovni modeli digitalnog blizanca MSF-a u Daejeonu

Izvor: [55]

Od vrha prema dolje i slijeva na desno, prvi zaslon prikazuje postrojenje za protok materijala koje sadrži robota za rukovanje međuspremnikom koji prenosi tiskane dijelove iz procesa građevinskih komponenti. Drugi zaslon prikazuje postrojenje za protok materijala koje koristi vertikalni rukovatelj, koji je klasificiran kao uređaj dizajniran i korišten zasebno za izgradnju MSF-a. Pogon građevinskih komponenti uključuje proces ispisa komponenti pomoću 3D printera koji se klasificiraju kao uređaji, a MSF ima dvanaest odgovarajućih pogona. Četvrti zaslon prikazuje postrojenje za fumigaciju koje izvodi naknadnu obradu dijelova, procesa rada i sklopova pomoću stroja za isparavanje. Inspeksijska tvornica koristi stroj za trostrano gledanje i kontrolu gotovog proizvoda, a stroj za pakiranje vrši pakiranje inspeksijski odobrenih proizvoda pomoću univerzalnog robota 5 (UR5). Montažni pogon br. 1 izvodi proces montaže pomoću troosne montaže, a montažni pogon br. 2 izvodi proces montaže pomoću robota za montažu sa šest osi. Montažni pogon br. 2 koristi robota rukovatelja međuspremnikom za protok materijala i sklapanje pakiranja. Pohranjuje osnovni model robota u robotsku biblioteku stroja za robotsku simulaciju te

dohvaća i sinkronizira definiciju kinematike kao podatke za proizvodnu operaciju. Nasuprot tome, montažni pogon br. 1, koji obavlja protok materijala, izgradnju komponenti, fumigaciju, inspekciju i montažu pomoću vertikalnog rukovatelja, je postrojenje koje sadrži uređaj koji je posebno projektiran i koristi se za izradu MSF-a. Nije uključen u mehanizam robotske simulacije i dohvaća povezane informacije iz pozadinskih podataka. Sinkronizacija je omogućena definiranjem uređaja unaprijed kako bi digitalni bliznac sa njima mogao upravljati. Tablica 5. prikazuje implementacijsko okruženje korištenjem Visual Studio 2015 i Windows 10 za razvoj sustava, a tablica 6. prikazuje osnovno okruženje za eksperiment. [55]

Tablica 5. Implementacijsko okruženje za primjenu digitalnog blizanca

| Stavka                                  | Sadržaj                              |
|---|--------------------------------------|
| <b>Operativni sustav</b>                | Windows 10                           |
| <b>Procesor</b>                         | Intel® Core™ i7-6500U CPU @ 2.50 GHZ |
| <b>Skup alata platforme</b>             | Visual Studio 2015 (v140)            |
| <b>Programski jezik</b>                 | C++/Microsoft Foundation Class       |
| <b>Platforma za simulaciju robotike</b> | ezRobotics DMWorks ×64 2.3.14452.0   |

Izvor: [55]

Tablica 6. Osnovno okruženje za eksperiment.

| Stavka                            | Sadržaj                               |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Format podatkovnog objekta</b> | JavaScript Object Notation            |
| <b>Instalirana memorija</b>       | 64.0 GB                               |
| <b>Mrežna arhitektura</b>         | RESTful API                           |
| <b>Operativni sustav</b>          | Window 7                              |
| <b>Procesor</b>                   | Intel® Xeon® CPU E5-2640 v2 @ 2.00GHz |

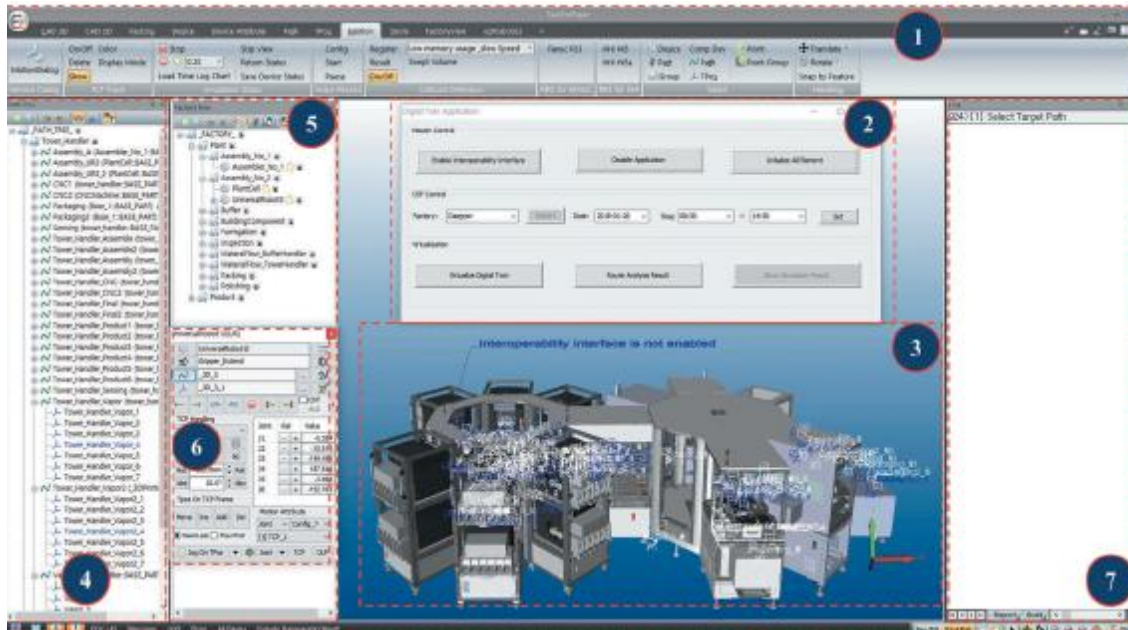
Izvor: [55]

Format podatkovnog objekta za premještanje informacija implementiran je korištenjem JavaScript Object Notation (JSON), čime se olakšava pouzdanost rada sučelja interoperabilnosti. RESTful API korišten je kao mrežna arhitektura za IoT mrežni sloj interoperabilne arhitekture za implementaciju komunikacijskog okruženja temeljenog na internetu.



## 6.5. Rezultati primjene digitalnog blizanca na primjeru MSF testne stanice

Početno okruženje aplikacije digitalni blizanac prikazano je na Slici 11, a opis svake komponente prikazan je u Tablici 7.



Slika 11. Primjena aplikacije digitalnog blizanca

Izvor: [55]

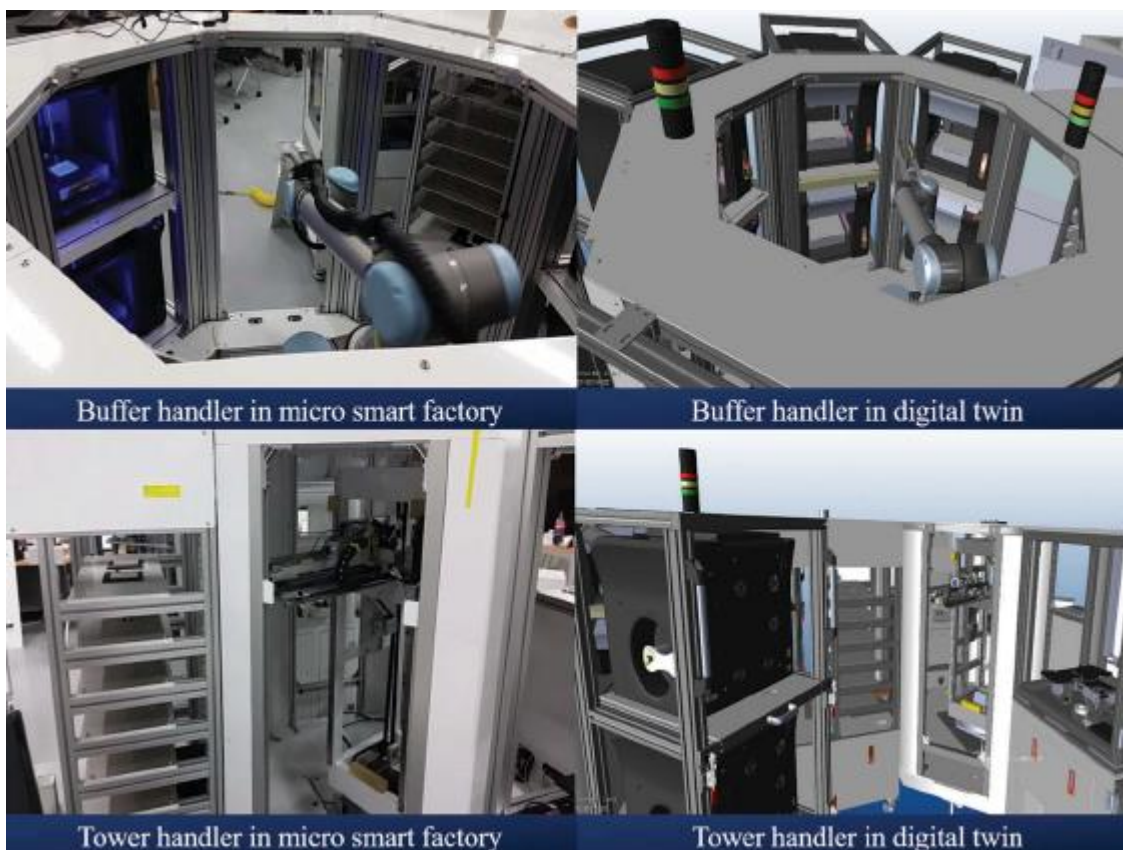
Tablica 7. Opis implementacije aplikacije digitalnog blizanca

| Index | Item                       | Contents   |
|-------|----------------------------|--|
| 1     | Robotics simulation engine | Robotics simulation engine in the digital twin application   |
| 2     | User interface             | Performs event handling and synchronization handling with the user interface of the operation module in the digital twin application |
| 3     | Digital twin               | Virtual factory capable of reflecting MSF components as well as their matching information and configuration unit                    |
| 4     | Path/logic tree            | Structure that imports the path/logic library among the background data in the digital twin application                              |
| 5     | Device tree                | Structure that imports the device library among the background data in the digital twin application                                  |
| 6     | Plant/robot setting        | Structure that imports the plant/robot-setting library among the background data in the digital twin application                     |
| 7     | Log window                 | Outputs the log data after the robotics simulation engine starts to run  |

Izvor: [55]

Robotski simulacijski motor komponenta je aplikacije digitalnog blizanca. U ovome primjeru korišten je softver DMWorks ova platforma ima ugrađenu definiciju kinematike i biblioteku robota i može izvoditi funkcije kao što je simulacija izvršenja/analiza rezultata. Korisničko sučelje djeluje kao upravljač za upravljanje aplikacijom digitalnog blizanca. Može obraditi željeni događaj i upravljati sinkronizacijom u skladu s događajem. Kao što je ranije opisano, digitalni blizanac je

virtualna tvornica koja nalikuje MSF-u u Daejeonu. Brojevi 4-6 u Tablici 7. opisuju pozadinske skupove podataka za podršku stvaranja u aplikaciji digitalnog blizanca, koju korisnik može vidjeti, kao što je prikazano u Slici 11, nakon završetka uvoza podataka. Korisničko sučelje može aktivirati sučelje interoperabilnosti pomoću gumba na kartici glavne kontrole. Kada je sučelje interoperabilnosti aktivirano, informacije se mogu dijeliti i koristiti, a zatim se događaj može definirati postavljanjem željene točke stvaranja u kontrolnoj kartici CMSF. Svaki gumb na kartici sinkronizacije omogućuje korisnicima pregled informacija o proizvodnji, statusu i rezultatima simulacije na temelju događaja postavljenih na kontrolnoj kartici CMSF. Potrebno je premjestiti, analizirati, obraditi i koristiti informacije za rad aplikacije digitalnog blizanca. Slika 12. ilustrira sinkronizaciju informacija o proizvodnji, u kojoj upravljači međuspremnik i vertikalnim nosačem u MSF-u rade istovremeno s rukovateljima međuspremnik i vertikalnim nosačem blizanca. [55]



Slika 12. Sinkronizacija informacija proizvodnje

Izvor: [55]

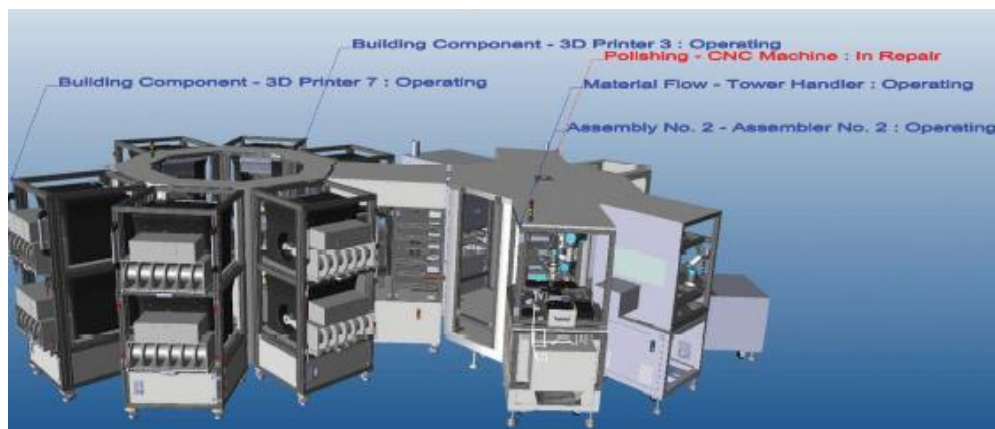
Na ovaj način korisnicima je omogućena vizualizacija na visokoj razini o tome kako se upravlja stvarnim informacijama o proizvodnji. Kako bi se potvrdilo da je sinkronizacija informacija stvarno izvršena, prikupljena je kinematika rukovatelja međuspremnik u digitalnom blizancu, kao što je prikazano u Tablici 8. [55]

Tablica 8. Kinetička usporedba fizičkog okruženja i digitalnog blizanca

| Time    | Buffer handler in micro smart factory |         |          |          |         |        | Buffer handler in digital twin |         |          |          |         |        |
|---------|---------------------------------------|---------|----------|----------|---------|--------|--------------------------------|---------|----------|----------|---------|--------|
|         | rx                                    | ry      | rz       | yaw      | pitch   | roll   | rx                             | ry      | rz       | yaw      | pitch   | roll   |
| 1022652 | -90.002                               | -53.751 | -138.979 | -167.256 | -89.998 | 45.005 | -90.002                        | -53.751 | -138.979 | -167.256 | -89.998 | 45.005 |
| 1023294 | 5.178                                 | -54.003 | -138.894 | -167.089 | -84.698 | 44.936 | 5.178                          | -54.003 | -138.894 | -167.089 | -84.698 | 44.936 |
| 1023306 | 8.316                                 | -54.148 | -138.84  | -166.977 | -81.56  | 44.939 | 8.316                          | -54.148 | -138.84  | -166.977 | -81.56  | 44.939 |
| 1023319 | 12.551                                | -54.343 | -138.773 | -166.83  | -77.326 | 44.936 | 12.551                         | -54.343 | -138.773 | -166.83  | -77.326 | 44.936 |
| 1023331 | 17.22                                 | -54.557 | -138.695 | -166.655 | -72.674 | 44.931 | 17.22                          | -54.557 | -138.695 | -166.655 | -72.674 | 44.931 |
| 1023344 | 22.708                                | -54.816 | -138.596 | -166.493 | -67.141 | 44.921 | 22.708                         | -54.816 | -138.596 | -166.493 | -67.141 | 44.921 |
| 1023356 | 27.118                                | -55.02  | -138.523 | -166.367 | -62.768 | 44.912 | 27.118                         | -55.02  | -138.523 | -166.367 | -62.768 | 44.912 |
| 1023369 | 31.029                                | -55.196 | -138.466 | -166.25  | -58.841 | 44.905 | 31.029                         | -55.196 | -138.466 | -166.25  | -58.841 | 44.905 |
| 1023382 | 34.081                                | -55.347 | -138.418 | -166.136 | -55.822 | 44.901 | 34.081                         | -55.347 | -138.418 | -166.136 | -55.822 | 44.901 |
| 1023394 | 36.124                                | -55.448 | -138.383 | -166.069 | -53.772 | 44.897 | 36.124                         | -55.448 | -138.383 | -166.069 | -53.772 | 44.897 |
| 1023407 | 37.506                                | -55.505 | -138.359 | -166.029 | -52.387 | 44.895 | 37.506                         | -55.505 | -138.359 | -166.029 | -52.387 | 44.895 |
| 1023419 | 38.014                                | -55.518 | -138.348 | -166.019 | -51.856 | 44.895 | 38.014                         | -55.518 | -138.348 | -166.019 | -51.856 | 44.895 |
| 1023432 | 38.015                                | -55.518 | -138.348 | -166.015 | -51.853 | 45.181 | 38.015                         | -55.518 | -138.348 | -166.015 | -51.853 | 45.181 |
| 1023445 | 38.01                                 | -55.521 | -138.343 | -166.011 | -51.868 | 46.314 | 38.01                          | -55.521 | -138.343 | -166.011 | -51.868 | 46.314 |
| 1023457 | 38.007                                | -55.521 | -138.344 | -166.006 | -51.875 | 48.139 | 38.007                         | -55.521 | -138.344 | -166.006 | -51.875 | 48.139 |
| 1023470 | 38.006                                | -55.523 | -138.345 | -166.005 | -51.883 | 50.949 | 38.006                         | -55.523 | -138.345 | -166.005 | -51.883 | 50.949 |
| 1023483 | 38.006                                | -55.526 | -138.343 | -166.003 | -51.883 | 54.613 | 38.006                         | -55.526 | -138.343 | -166.003 | -51.883 | 54.613 |

Izvor: [55]

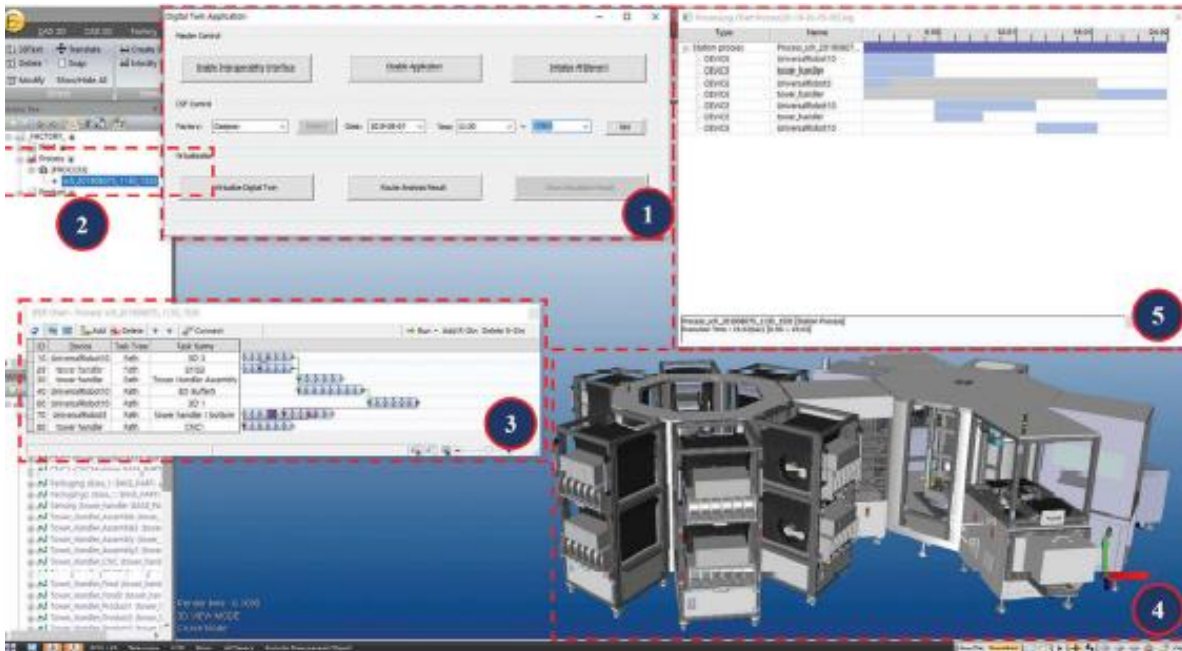
Rezultati kinematičkih podataka proizvodnog elementa u fizičkom svijetu i digitalnom blizancu je identična i time se potvrđuje je digitalni bliznac ispravno podešen i sinkroniziran s podacima iz fizičkog svijeta. Slika 13 ilustrira status sinkronizacije svakog postrojenja prema njegovom StatusPlantID-u.



Slika 13. Implementacija statusnog usmjeravanja

Izvor: [55]

U ovom trenutku, usmjeravanja statusa nisu dostupna za objekte koji ne obavljaju nijedan drugi zadatak za vizualnu učinkovitost. Umjesto toga, status se javlja crvenim tekstom za svaki radni problem koji se pojavi tijekom popravka ili komunikacijske veze. Slika 14 ilustrira ekran za praćenje i podršku donošenju odluka o budućem rasporedu proizvodnje kroz stvaranje sekvencija simulacije. [55]



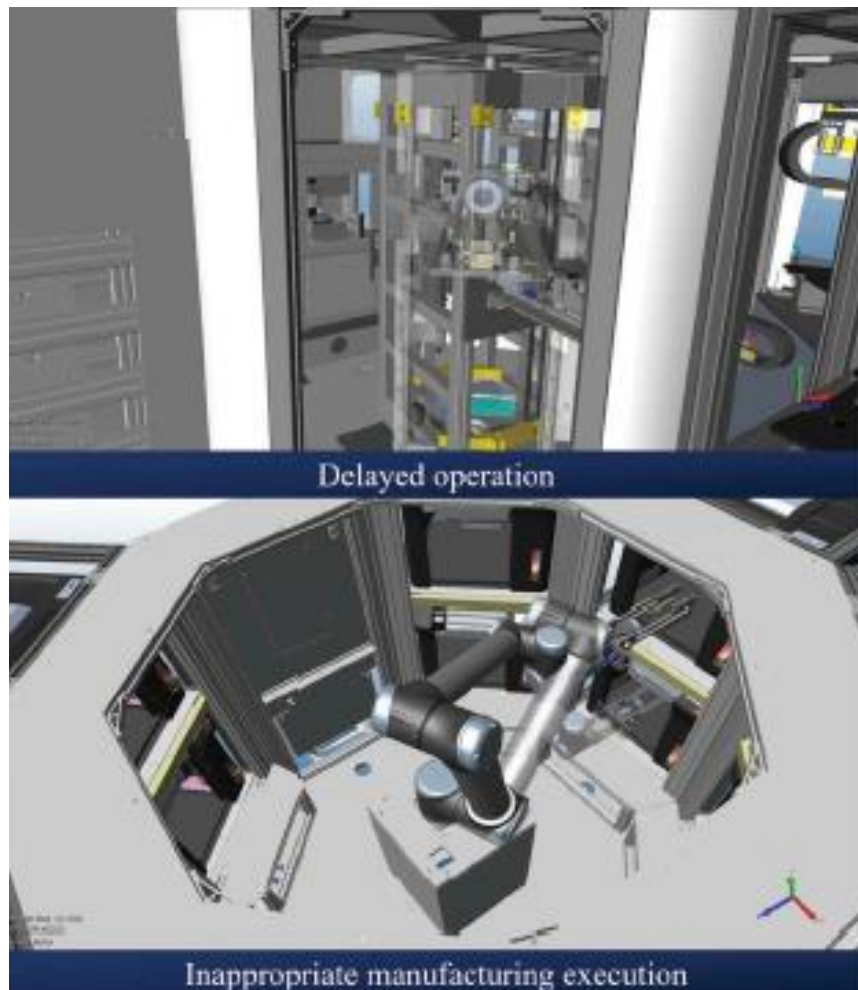
Slika 14. Izrada simulacijske sekvence

Izvor: [55]

Najprije se stvara sekvenca postavljanjem buduće točke gledišta u korisničkom sučelju, a raspored proizvodnje u toj točki dodaje se aplikaciji digitalnog blizanca, kao u (2). U softveru DMWorks, raspored proizvodnje generira se iz istog grafikona kao u (3) prije sinkronizacije u digitalnom blizancu. Ako korisnici kliknu gumb 'Prikaži rezultat simulacije' na korisničkom sučelju, mogli bi vidjeti rezultat simulacije, kao što je prikazano u (5), jer se koristi robotski simulacijski mehanizam. Na temelju tog rezultata korisnici mogu donositi odluke. [55]

Slika 15 prikazuje usporedbu konceptualno istih objekata na temelju prošlih, sadašnjih i budućih informacija. Relativno neproziran objekt prikazuje stvarni rad odabrane točke u odabranom

vremenskom periodu. Razlika između planiranog i stvarnog rada može se koristiti za potvrdu odgođenog rada, neprikladnog izvođenja proizvodnje, uzroka kvara stroja i uzroka loše kvalitete.



Slika 15. Implementacija naprednog nadzornog usmjeravanja

Izvor: [55]

Ljudi, postrojenja i sustavi za upravljanje podacima u konvencionalnoj tvornici rade na način koji je izoliran jedni od drugih, što znači da ih je stalno potrebno ručno koordinirati i integrirati. Svaka komponenta u proizvodnom i logističkom okruženju mora biti povezana sa zajedničkim digitalnim sustavom i potpuno integrirana u sustav više razine kako bi se osigurala učinkovita transformacija u pametnu tvornicu. Drugim riječima, ključni čimbenik je promjena strategije od samo integriranja hardvera do korištenja softvera za olakšavanje pune integracije u okruženja

digitalnih procesa. To omogućava strojevima, postrojenjima, skladištima i sustavima protoka materijala da mogu dijeliti informacije u stvarnom vremenu što im omogućuje neovisnu kontrolu procesa proizvodnje. Osim kontrole proizvodnog procesa, stalna interakcija uspostavlja brzu komunikaciju kako bi se proizvodni proces mogao prilagoditi. Ova integracija omogućuje proizvodnoj logistici da predstavlja dinamičnu mrežu koja će zadovoljiti sve buduće zahtjeve i tržišne potražnje. Pametna tvornica sposobna je ispuniti sve zahtjeve potrošača, odnosno, visoku kvalitetu, brže rokove isporuke i prilagodbe potrebama potrošača. [56]

Za proizvodna poduzeća, MSF omogućuje napredno planiranje i raspoređivanje proizvodnje. MSF može samostalno uvrstiti plan proizvodnje na temelju naloga koji se unose na FaaS servisnoj platformi i automatski izvoditi zadani plan proizvodnje. Također, MSF omogućuje praćenje procesa i događaja u stvarnom vremenu te sinkronizaciju stanja MSF-a za podršku korisniku pri donošenju odluke. MSF pruža obavijesti o neregularnim događajima koje sustav prepoznaje, kao što su: nedostatna kvaliteta proizvoda, kvarovi opreme i neobičajene situacije na razini cijele proizvodnje. Uz same obavijesti, MSF ima tehničku funkcionalnost predlaganja i izvođenja alternativnih radnji prilikom pojave neregularnih situacija. Koncept MSF-a je pogodan za poduzeća čija je strategija proizvodnja proizvoda s velikom mogućnosti prilagodbe i personalizacije. Vrijednost proizvoda mora biti dovoljno velika kako bi se opravdali troškovi integracije ove tehnologije. [57]

## 7. ZAKLJUČAK

Pretpostavka ovog rada je da se tehnologijama CPS i IoTS integriranim u inteligentne objekte može postići unaprjeđenje u proizvodnoj logistici. Rezultat razrade i analize pojedinih tehnologija, dijelova i procesa te njihovih međuodnosa ukazuje na mogućnosti dodatnog unaprjeđenja prijevozne logistike. Inteligentni objekti se najčešće opisuju kao integrirani članovi inteligentnog sustava. Međutim, i jedan Inteligentni objekt također pokazuje inteligentno ponašanje specifično njemu. Objekt koji može aktivno priopćiti svoju identifikaciju ili položaj u sustavu je do određenog stupnja inteligentan. Dok se međusobno povezivanje inteligentnih objekata unutar sustava, što omogućava neku vrstu autonomne samokontrole i samoorganizacije, može interpretirati kao viši stupanj inteligencije. Odgovarajućim zadacima, potrebnom tehnologijom i opsežnim pregledom literature o karakteristikama ovih objekata, temeljita analiza će dati informacije o njihovom utjecaju na digitalnu integraciju, praktičnu relevantnost i spremnost na tržište. Posljedično, funkcije se mogu primijeniti u praktičnom okruženju proizvodne logistike u skladu s njezinim korisnički orijentiranim zahtjevima. Iako su inteligentni objekti veliki investicijski projekti, dugoročno njihova primjena rezultira optimalnom iskorisćenju vremena i resursa s tehnologijom koja je trenutno dostupna.

Inteligentni objekti sastoje se od nekoliko hardverskih i tehnoloških konfiguracija temeljenih na softveru. Kada se koriste u kombinaciji, tehnologije temeljene na hardveru čine mehatronički sustav. Mehatronički sustav kombinira tri različita područja tehnologije: strojarstvo, elektrotehniku i informacijske tehnologije. Odluka o tome koje će se identificirane tehnologije koristiti za formiranje Inteligentnih objekata uvelike ovisi o uporabi i primjeni. Softverske tehnologije uglavnom se koriste za poboljšanje funkcionalnosti jedinice za obradu informacija Inteligentnih objekata. Inteligentni objekti mogu biti implementirani u proizvodnu logistiku s različitim tehnološkim komponentama, koje su spomenute u prethodnim poglavljima. Tehnologije CPS-a i IoTS-a trenutno su tehnološke teorije, koje su stoga nematerijalne i što dobavljaču tehnologije predstavlja izazov, a posebno korisniku tehnologije. Dakle, praktični odraz ovih koncepata pripisuje se Inteligentnim objektima.

Inteligentni objekti u proizvodnoj logistici, definiraju se kao fizička manifestacija CPS-a unutar IoTS-a i imaju značajan tehnološki potencijal. Opseg tehnološkog potencijala u proizvodnoj logistici pokreću dva faktora i svoje podrijetlo nalaze iz odnosa cilj-sredstvo tehnologija, a to su:

Zahtjevi specifični za aplikaciju inteligentnih objekata (korisnički orijentirane funkcije) i tehnološka realizacija inteligentnih objekata (funkcije orijentirane na proizvod). Svoj potencijal objekti u proizvodnoj logistici manifestiraju u obliku tehnološke pretpostavke specifične za primjenu. Da bi u potpunosti razradili i definirali tehnološki potencijal Inteligentnih objekata u proizvodnoj logistici, potrebna su daljnja istraživanja o zahtjevima korisnika tih tehnologija unutar same proizvodne logistike.

Na praktičnome primjeru prikazan je detaljan dizajn sustava kontinuiranim snižavanjem hijerarhije interoperabilnosti pomoću sustava aplikacije digitalnog blizanaca. Proizvodnja temeljena na IoTS aplikaciji je primijenjena na MSF u primjeru iz prakse, kao i na distribuirani proizvodni sustav, za obavljanje integriranog nadzora, praćenja i ulogu podrške u donošenju odluka. Primjerom iz prakse razmotrena je konstrukcija i korištenje digitalnog blizanca na razini tvornice na konceptualnoj razini. Ostvareno je praktično rješenje za smanjenje troškova i mogućnosti izvedbe personalizirane proizvodnje i heterogenog proizvodnog sustava. Moguća dodatna vrijednost za ovaj sustav bi bila ugradnja sustava s mogućnošću prepoznavanja budućih pogreška MSF-a. Takav model bi predstavljao značajnu nadogradnju na sustave proizvodne logistike.



## POPIS LITERATURE

1. Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (2008): Handbuch Logistik. 3rd revised edition, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
2. Hompel, M. ten; Henke, M. (2014): Logistik 4.0 In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Eds.): Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, Cf. Pfohl, H.-C. (2004), p. 3
3. Pfohl, H.-C. (2010): Logistiksysteme. 8th revised edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
4. Clausen, U.; Geiger, C. (2013): Verkehrs- und Transportlogistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
5. Buntak K, Šuljagić N.: Economics of production logistics, Tehnički glasnik 9, 2015, Zagreb
6. Schuh, G.; Klappert, S.; Moll, T. (2011): Ordnungsrahmen Technologiemanagement In: Schuh, G.; Klappert, S. (Eds.): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Cf. Pawellek, G. (2004)
7. Pawellek, G. (2004): Produktionslogistik In: Klaus, P.; Krieger, W. (Eds.): Gabler, Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse. Wiesbaden: Gabler,
8. Westkämper, E. (2013): Struktureller Wandel durch Megatrends In: Westkämper, E.; Spath, Dieter; Constantinescu, C.; Lentjes, J. (Eds.): Digitale Produktion. Berlin: Springer,
9. BMBF (2014): Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).
10. Kelker, O. (2011): Studie Industry 4.0. Eine Standortbestimmung der Automobil- und Fertigungsindustrie. In: Mieschke, Hoffmann & Partner (MHP), A Porsche Company
11. Spath, D.; Ganscher, O.; Gerlach, S., Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S. (2013): Produktionsarbeit der Zukunft – Industry 4.0. In: Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Stuttgart
12. Bauernhansl, T. (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-
13. Heuser, B. (Eds.): Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg Bauer et al. (2014)

14. McKinsey&Company (2015): Industry 4.0. How to navigate digitization of the manufacturing sector.
15. Lee, E. A. (2008): Cyber Physical Systems: Design Challenges.
16. German Committee of Experts VDI/VDE-GMA 7.21 „Industry 4.0“ (2014): Glossar Industry 4.0 des Fachausschuss VDI/VDE-GMA 7.21 „Industry 4.0“.
17. Kagermann, H.; Riemensberger, F. (2015): Smart Service Welt – Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Abschlussbericht Langversion. Berlin
18. Bettenhausen, K. D.; Kowalewski, S. (2013): Cyber-Physical Systems
19. Geisberger, E.; Broy, M. (2015): Living in a networked world. Integrated research agenda Cyber-Physical Systems (agendaCPS): München
20. Windelband, L.; Fenzel, C.; Hunecker, F.; Riehle, T. (2010): Qualifikationsanforderungen durch das Internet der Dinge in der Logistik. Bremen
21. Botthof, A.; Bovenschulte, M. (2011): Die Autonomik als integratives Technologieparadigma. IIT Perspektive. Berlin
22. Fortino, G.; Rovella, A.; Russo, W.; Savaglio, C. (2014): On the Classification of Cyberphysical Smart Objects in the Internet of Things. In: Proceedings of the 5th International Workshop on Networks of Cooperating
23. Deindl, M. (2013): Gestaltung des Einsatzes von intelligenten Objekten in Produktion und Logistik. Aachen: Apprimus-Verl.
24. Meyer, G. G.; Främling, K.; Holmström, J. (2009): Intelligent Products: A survey. In: Computers in Industry, 3 (2009)
25. Roidl, M. (2010): Kooperation und Autonomie in selbststeuernden Systemen In: Günthner, W.; Hompel, M. ten (Eds.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,
26. Lucke, D.; Görzig, D.; Kacir, M.; Volkmann, J.; Haist, C.; Sachsenmaier, M.; Rentschler, H. (2014): Strukturstudie "Industry 4.0 für Baden-Württemberg". Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industry 4.0. Stuttgart
27. Hoppe, G. (2014): High-Performance Automation verbindet IT und Produktion In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Eds.): Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration

28. Hernandez, P.; Reiff-Marganiec, S. (2014): Classifying Smart Objects using Capabilities. In: 2014 International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)
29. Hesse, S.; Schnell, G. (2011): Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Funktion - Ausführung - Anwendung ; mit 35 Tabellen. 5th revised edition.
30. Isermann, R. (2008): Mechatronische Systeme. Grundlagen. 2nd revised edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
31. Gorecky, D.; Schmitt, M.; Loskyll, M. (2014): Mensch-Maschine-Interaktion im Industry 4.0-Zeitalter In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Eds.): Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg,
32. Vasseur, J.-P.; Dunkels, A. (2010): Interconnecting smart objects with IP. The next Internet. Burlington, MA: Morgan Kaufmann Publishers/Elsevier
33. Deindl, M. (2013): Gestaltung des Einsatzes von intelligenten Objekten in Produktion und Logistik. Aachen: Apprimus-Verl.
34. Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. (2014): From "smart objects" to "social objects": The next evolutionary step of the internet of things. In: IEEE Communications Magazine
35. Botthof, A.; Bovenschulte, M. (2011): Die Autonomik als integratives Technologieparadigma. IIT Perspektive. Berlin
36. Ertel, W. (2013): Grundkurs Künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung. 3rd revised edition. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg
37. Bogon, T. (2013): Agentenbasierte Schwarmintelligenz. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg
38. <https://mittrinsights.s3.amazonaws.com/AIagenda2020/GlobalAIagenda.pdf> (26.09.2022.)
39. <https://www.statista.com/chart/24614/share-of-enterprises-using-artificial-intelligence-in-the-eu/> (26.09.2022.)
40. Roidl, M. (2010): Kooperation und Autonomie in selbststeuernden Systemen In: Günthner, W.; Hompel, M. ten (Eds.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
41. Vogel-Heuser, B.; Pantförder, D.; Meyer, F. (2014): Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen, Wiesbaden: Springer Vieweg

42. Windt, K. (2006): Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik In: Vec, M.; Hütt, M.; Freund, A. (Eds.): Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Köln, Weimar, Wien: Böhlau
43. Geisberger, E.; Broy, M. (2015): Living in a networked world. Integrated research agenda Cyber-Physical Systems (agendaCPS): München: Herbert Utz Verlag
44. Schöning, H. (2014): Data Mining und Analyse In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Eds.): Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg
45. Pötter, T.; Folmer, J.; Vogel-Heuser, B. (2014): Enabling Industry 4.0 – Chancen und Nutzen für die Prozessindustrie In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Eds.): Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg
46. Kleinemeier, M. (2014): Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungsnetzwerken In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Eds.): Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg
47. Günthner, W. A.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P. (2014): Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industry 4.0 In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Eds.): Industry 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg
48. Kagermann, H.; Riemensberger, F. (2015): Smart Service Welt – Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Abschlussbericht Langversion. Berlin
49. Yao, X., and Y. Lin. 2015. “Emerging Manufacturing Paradigm Shifts for the Incoming Industrial Revolution.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85
50. Kumar, A. 2007. “From Mass Customization to Mass Personalization: A Strategic Transformation.” *International Journal of Flexible Manufacturing System*
51. Silveira, G. D., D. Borenstein, and F. S. Fogliatto. 2001. “Mass Customization: Literature Review and Research Directions.” *International Journal*

52. Son, J. Y., H. C. Kang, H. C. Bae, E. S. Lee, H. N. Han, J. H. Park, and H. Kim. 2015. "IoT-based Open Manufacturing Service Platform for Mass Personalization." *The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences*
53. Kang, H. S., S. D. Noh, J. Y. Son, H. Kim, J. H. Park, and J. Y. Lee. 2018. "The FaaS System Using Additive Manufacturing for Personalized Production." *Rapid Prototyping Journal*
54. Gabor, T., L. Belzner, M. Kiermeier, M. T. Beck, and A. Neitz. 2016. "A Simulation- Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems." In *IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*,
55. Kyu Tae Park, Young Wook Nam, Hyeon Seung Lee, Sung Ju Im, Sang Do Noh, Ji Yeon Son & Hyun Kim (2019): Design and implementation of a digital twin application for a connected micro smart factory, *International Journal of Comp*
56. <https://www.scio-automation.com/> (04.10.2022)
57. Park, K.T.; Lee, J.; Kim, H.-J.; Noh, S.D. Digital-twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Shema procesa proizvodnje i proizvodnih resursa .....                                       | 5  |
| Slika 2. Fazno-specifičan pogled na logističke podsustave.....                                       | 7  |
| Slika 3. Hijerarhijski prikaz komponenata CPS-a .....  | 16 |
| Slika 4. Koncept Interneta stvari i usluga i njeni elementi .....                                    | 18 |
| Slika 5. Tehnološki radar utemeljen na tehnologijama i funkcijama unutar inteligentnih objekta ..... | 20 |
| .....  |    |
| Slika 6. Dijagram koncepta FaaS platforme i faza proizvodnje personaliziranih proizvoda ....         | 41 |
| Slika 7. Shematski dijagram izgleda mikro pametne tvornice .....                                     | 42 |
| Slika 8 Scenarij interoperabilnosti aplikacije digitalnog blizanca.....                              | 44 |
| Slika 9. MSF testna stanica u Daejeonu (lijevo) i digitalni blizanac istog MSF-a (desno).....        | 46 |
| Slika 10. Osnovni modeli digitalnog blizanca MSF-a u Daejeonu .....                                  | 47 |
| Slika 11. Primjena aplikacije digitalnog blizanca .....  | 49 |
| Slika 12. Sinkronizacija informacija proizvodnje .....   | 50 |
| Slika 13. Implementacija statusnog usmjeravanja.....   | 51 |
| Slika 14. Izrada simulacijske sekvence .....   | 52 |
| Slika 15. Implementacija naprednog nadzornog usmjeravanja .....                                      | 53 |

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Aktivnosti proizvodne logistike.....                              | 9  |
| Tablica 2. Usporedba barkod i RFID tehnologije.....                          | 22 |
| Tablica 3. Industrijske komunikacijske tehnologije .....                     | 24 |
| Tablica 4 Klasifikacija senzora prema mjernim varijablama .....              | 27 |
| Tablica 5. Implementacijsko okruženje za primjenu digitalnog blizanca .....  | 48 |
| Tablica 6. Osnovno okruženje za eksperiment.....                             | 48 |
| Tablica 7. Opis implementacije aplikacije digitalnog blizanca.....           | 49 |
| Tablica 8. Kinetička usporedba fizičkog okruženja i digitalnog blizanca..... | 51 |

## **POPIS GRAFIKONA**

|   |    |
|---|----|
| Grafikon 1. Projekcija globalne proizvodnje energije po izvorima do 2050. godine .....                                    | 25 |
| Grafikon 2. Projekcija globalne potrošnje energije po izvorima i sektorima do 2050. godine....                            | 26 |
| Grafikon 3. Područja primjene umjetne inteligencije u globalnoj proizvodnoj industriji (2020.)..                          | 33 |
| Grafikon 4. Udio poduzeća, po državama Europske Unije, koja primjenjuju umjetnu inteligenciju (min. 10 zaposlenika) ..... | 34 |



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

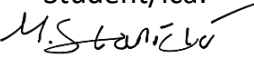
## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je \_\_\_\_\_ DIPLOMSKI RAD  
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojeg vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom \_\_\_\_\_ Primjena inovativnih tehnologija u unaprjeđenju proizvodne logistike , u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

U Zagrebu, 03. listopada 2022.

Student/ica:  
  
\_\_\_\_\_  
Marko Staničić  
(ime i prezime, potpis)