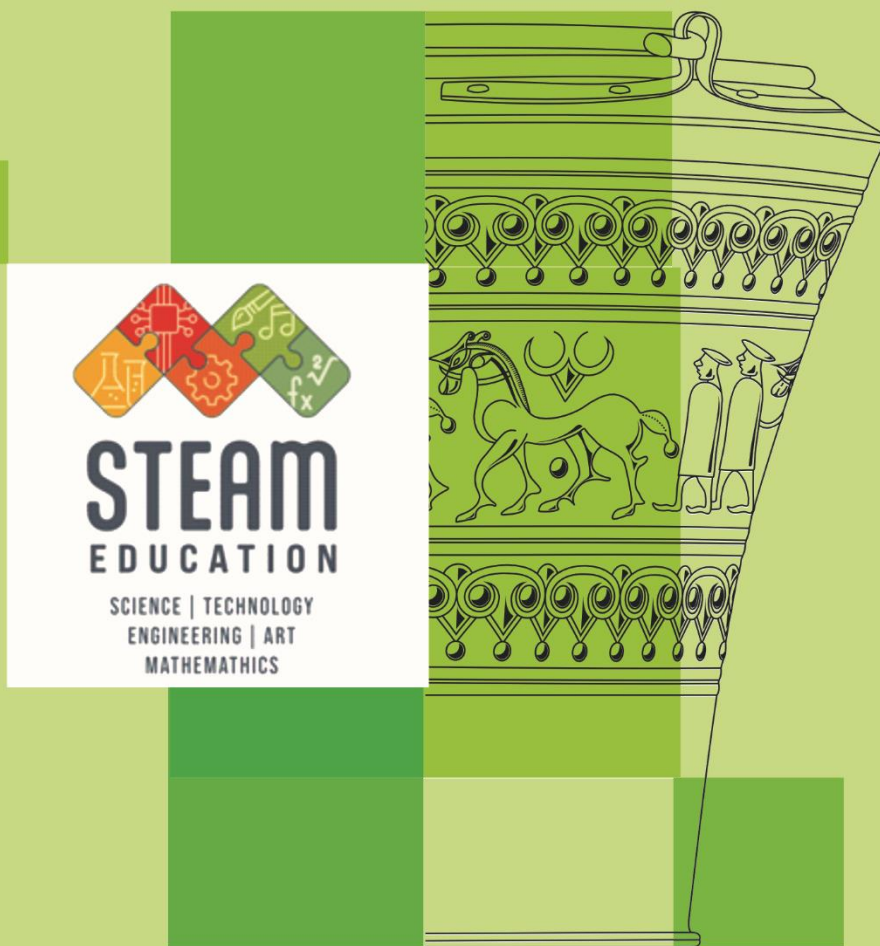




Univerza v Novem mestu  
Fakulteta za *strojništvo*

# *Napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije in sistemi za prehod iz Industrije 4.0 v Industrijo 5.0*

Elvis Hozdić



Strokovno gradivo

# Zakaj?



## Pomanjkanje kadra na STE(A)M področjih

Slovenska podjetja se že sedaj spopadajo s pomanjkanjem kadra na teh področjih, projekcije pa so, da bo v prihodnosti potreba po tem kadru še več.



## Razvoj kompetenc in znanj za Družbo 5.0

Aktivnosti bodo zasnovane tako, da bodo spodbujale in razvijale znanja in kompetence vključenih za Poklice prihodnosti in uspešno delo v Družbi 5.0.



## Regionalni vidik – uravnotežen razvoj Slovenije

Stanje v manj razvitih regijah je še slabše, veliko manj pa je tudi kakovostnih aktivnosti na šolah in obšolskih dejavnostih.



## Del poslanstva vključenih SVZ

Poslanstvo vključenih zavodov je tudi sodelovanje z lokalnim okoljem. Smo pomemben razvojni potencial v regijah. Imamo tesne odnose s SS in OŠ.

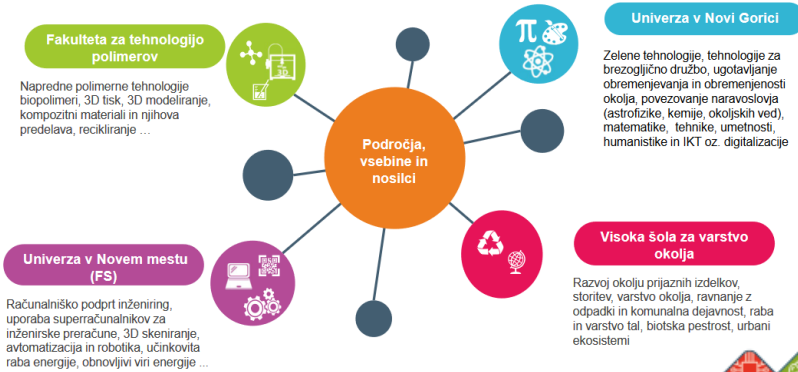


## Multiplikativni učinki skupnega projekta

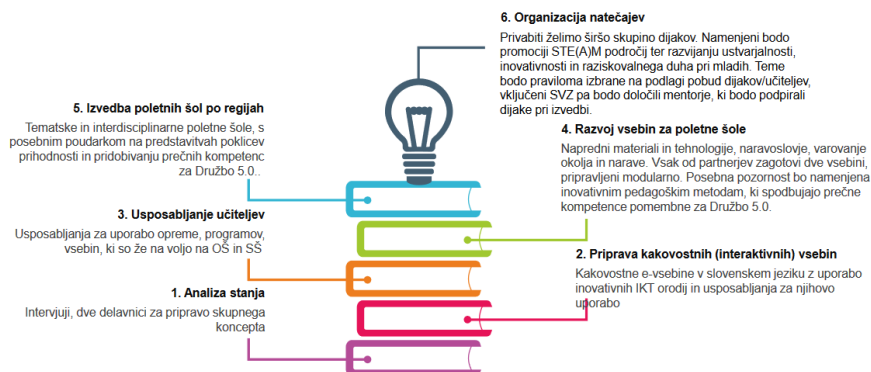
Prenos dobrih praks, dvig kompetenc partnerjev in skupen razvoj aktivnosti ter razvitih vsebin. Interdisciplinarnost in pokrivanje različnih področij oz. poklicev prihodnosti. Pretočnost znanja med regijami.



# Kdo in kaj?



# Kako?





Univerza v Novem mestu  
Fakulteta za *strojništvo*



Elvis Hozdić

# Napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije in sistemi za prehod iz Industrije 4.0 v Industrijo 5.0

Novo mesto, 2022



**Avtor:** dr. ELVIS HOZDIĆ

**Naslov publikacije:** **Napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije in sistemi za prehod iz Industrije 4.0 v Industrio 5.0**

**Podnaslov:**

**Izdaja:** Elektronska izdaja

**Izdajatelj:** Univerza v Novem mestu, Fakulteta za strojništvo

**Založnik:** Založba Univerze v Novem mestu

**Strokovna recenzija:**

**Jezikovni pregled:**

**Stilistična in grafična ureditev:** dr. Elvis Hozdić

**Tehnična ureditev:** dr. Elvis Hozdić

**Dostopno na:** URL naslov:

**Naklada:**

**Cena:** Brezplačna publikacija

© Univerza v Novem mestu, 2022 / University of Novo mesto, 2022

All rights reserved. / Vse pravice pridržane.



To delo je ponujeno pod licenco *Creative Commons* Priznanje avtorstva - Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna licenca. / This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Share like 4.0 International License.

**Izdano:** Novo mesto, 2022

## Kazalo

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>NAPREDNE INFORMACIJSKO-KOMUNIKACIJSKE TEHNOLOGIJE IN SISTEMI</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>NAPREDNE INFORMACIJSKO-KOMUNIKACIJSKE TEHNOLOGIJE</b> .....	<b>7</b>
2.1.1	INTERNET.....	8
2.1.1.1	Internet stvari.....	8
2.1.1.2	Internet storitev .....	11
2.1.2	SOCIALNE MREŽE .....	13
2.1.3	KOMUNIKACIJSKE TEHNOLOGIJE .....	14
2.1.4	RAČUNALNIŠKI OBLAK.....	15
2.1.5	AGENTI IN VEČAGENTNI SISTEMI .....	16
<b>2.1</b>	<b>POVZETEK</b> .....	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>INDUSTRIJSKE REVOLUCIJE, PROIZVODNE PARADIGME IN SISTEMI SKOZI ČAS</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>PROIZVODNI SISTEM</b> .....	<b>22</b>
3.1.1	KOMPLEKSNOŠT KOT KLJUČNA LASTNOST NAPREDNIH PROIZVODNIH SISTEMOV ...	25
<b>3.2</b>	<b>INDUSTRIJSKE REVOLUCIJE</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>PROIZVODNE PARADIGME KOT PROIZVODNI MODELI INDUSTRIJSKIH REVOLUCIJ</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>KONCEPTI NAPREDNIH PROIZVODNIH SISTEMOV</b> .....	<b>33</b>
3.4.1	FLEKSIBILNI PROIZVODNI SISTEMI.....	33
3.4.2	REKONFIGURABILNI PROIZVODNI SISTEMI .....	34
3.4.3	INTELIGENTNI PROIZVODNI SISTEMI.....	35
3.4.4	FRAKTALNI PROIZVODNI SISTEMI .....	35
3.4.5	BIOLOŠKI PROIZVODNI SISTEMI .....	37
3.4.6	HOLONSKI PROIZVODNI SISTEMI .....	38
3.4.7	AGILNI PROIZVODNI SISTEMI .....	40
3.4.8	KOMPLEKSNI ADAPTIVNI PROIZVODNI SISTEMI .....	41
3.4.9	ADAPTIVNI DISTRIBUIRANI PROIZVODNI SISTEMI .....	43
3.4.10	PROIZVODNE MREŽE IN MREŽNI PROIZVODNI SISTEMI .....	49
<b>3.5</b>	<b>POVZETEK</b> .....	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>PAMETNI PROIZVODNI SISTEMI – PROIZVODNA PARADIGEM INDUTRIJE 4.0: KONCEPTI IN MODELI</b> .....	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>PROIZVODNJA ZASNOVANA NA OBLAKU</b> .....	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>VSEPOVSODNA PROIZVODNJA</b> .....	<b>60</b>



<b>4.3</b>	<b>KIBERNETSKO-FIZIČNI PROIZVODNI SISTEMI .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4</b>	<b>SOCIALNO-KIBERNETSKO-FIZIČNI PROIZVODNI SISTEMI .....</b>	<b>64</b>
4.4.1	DIGITALIZACIJA IN KIBERNETIZACIJA DELOVNIH PROCESOV V SKFPS.....	73
4.4.2	DIGITALIZACIJA IN KIBERNETIZACIJA FUNKCIJ UPRAVLJANJA SKFPS .....	76
<b>4.5</b>	<b>POVZETEK.....</b>	<b>81</b>
<b>5</b>	<b>ADAPTIVNI KOGNITIVNI PROIZVODNI SISTEMI: PARADIGEM ZA NASLEDNJO INDUSTRIJSKO REVOLUCIJO – INDUSTRIJO 5.0 .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1</b>	<b>KLJUČNE TEHNOLOGIJE ZA INDUSTRIJO 5.0.....</b>	<b>85</b>
<b>5.2</b>	<b>NOVI KONCEPTI PROIZVODNIH SISTEMOV ZA INDUSTRIJO 5.0 .....</b>	<b>87</b>
5.2.1	ODPORNI PROIZVODNI SISTEMI.....	88
5.2.2	ADAPTIVNI KOGNITIVNI PROIZVODNI SISTEMI.....	89
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>95</b>

## Kazalo slik

<b>Slika 2.1.</b> Napredne IKT (Lastni vir) .....	7
<b>Slika 2.2.</b> Predstavitev koncepta Interneta stvari (Gubbi et al. 2013) .....	9
<b>Slika 2.3.</b> Omogočitvene tehnologije Interneta stvari (Baird, Ng, and Seah 2017).....	10
<b>Slika 2.4.</b> Evolucija socialnih medijih in mrež (Alrubaian et al. 2019).....	14
<b>Slika 2.5.</b> Računalniški oblak (Suthar 2013) .....	16
<b>Slika 2.6.</b> Generična struktura agenta (Wooldridge and Jennings 1995).....	18
<b>Slika 2.7.</b> Med agentska komunikacija po FIPA standardu (Wooldridge and Jennings 1995) .....	18
<b>Slika 2.8.</b> Kombinacija agentov z IEC 61131-3 / 61499 programa PLC, predelano po (Leitão and Karnouskos 2015).....	20
<b>Slika 3.1.</b> Elementi proizvodnega sistema (Peklenik 1988).....	23
<b>Slika 3.2.</b> Generična struktura naprednih proizvodnih sistemov (Hozdić 2020c).....	24
<b>Slika 3.3.</b> Struktura samoučečega proizvodnega sistema (Žapčević 2013).....	25
<b>Slika 3.4.</b> Industrijske revolucije skozi čas (Wahlster 2013).....	28
<b>Slika 3.5.</b> Proizvodne paradigme in razvoj proizvodnih konceptov v času, predelano po (Womack, Jones and Roos, 1990), (Koren, 2010b) .....	31
<b>Slika 3.6.</b> Fleksibilni proizvodni sistem (Davidrajah, Skolud, and Krenczyk 2018).....	34
<b>Slika 3.7.</b> Re-konfigurabilni proizvodni sistem razvit od strani FESTO grupe (Abdul Rahman 2020) ..	35
<b>Slika 3.8.</b> Fraktalni proizvodni sistem (Lee and Ryu 2022).....	36
<b>Slika 3.9.</b> Koncept bioloških proizvodnih sistemov (Ueda, Vaario, and Ohkura 1997).....	37
<b>Slika 3.10.</b> Model agenta BMS z omejeno racionalnostjo (Ueda, Kito, and Fujii 2006).....	38
<b>Slika 3.11.</b> Arhitektura holonskega proizvodnega sistema (Fletcher and Brusey 2003) .....	39
<b>Slika 3.12.</b> Konceptualni model razvoja AMS (Gunasekaran 1998).....	40
<b>Slika 3.13.</b> Struktura kompleksnega adaptivnega proizvodnega sistema.....	41
<b>Slika 3.14.</b> Elementarni delovni sistem (Peklenik 1995) .....	42
<b>Slika 3.15.</b> Elementarni delovni sistem - primer .....	43
<b>Slika 3.16.</b> Virtualni delovni sistem (Butala and Sluga 2002).....	44
<b>Slika 3.17.</b> Osnovni funkcijski diagram ADS (Butala and Sluga 2006) .....	45
<b>Slika 3.18.</b> Avtonomni delovni sistem(Butala and Sluga 2006).....	46
<b>Slika 3.19.</b> Samoučeči avtonomni delovni sistem (Žapčević 2013).....	47
<b>Slika 3.20.</b> Adaptivno krmiljenje procesa v EDS (Žapčević 2013), prilagojeno po (Peklenik 1988) .....	48
<b>Slika 3.21.</b> Konceptualni okvir ADMS (Sluga, Butala, and Peklenik 2005) .....	49
<b>Slika 3.22.</b> Klasifikacija konceptov sodelovanja proizvodnih sistemov (Wiendahl and Lutz 2002) .....	51
<b>Slika 3.23.</b> Funkcijski diagram storitvene enote (Zupančič, Sluga, and Butala 2012).....	52
<b>Slika 3.24.</b> Proizvodno orientirana storitvena arhitektura (Zupančič, Sluga, and Butala 2012) .....	52
<b>Slika 3.25.</b> Statična partnerska povezava podjetji (Kalpič 2002) .....	54
<b>Slika 3.26.</b> Posrednik partnerskega podjetja (Kalpič 2002).....	55
<b>Slika 3.27.</b> Decentralizirana partnerska povezava, podjetje brez meje (Kalpič 2002).....	55
<b>Slika 4.1.</b> Hierarhična arhitektura pametne tovarne (Chen et al. 2018).....	58
<b>Slika 4.2.</b> Arhitektura proizvodnega sistema zasnovanega na oblaku (Qi and Tao 2019) .....	59
<b>Slika 4.3.</b> Referenčna infrastruktura za uresničitev vsepovsodno proizvodnjo (Zhang et al. 2013).....	61
<b>Slika 4.4.</b> Kibernetsko-fizični sistemi (Eric et al. 2013).....	62



<b>Slika 4.5.</b> Konceptualni model povezovanja socialnega, kibernetkega in fizičnega prostora (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b) .....	65
<b>Slika 4.6.</b> Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b) .....	67
<b>Slika 4.7.</b> Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b) .....	68
<b>Slika 4.8.</b> Struktura kibernetkega sistema EDS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b) .....	69
<b>Slika 4.9.</b> Struktura kibernetkega sistema ADS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b) .....	71
<b>Slika 4.10.</b> Struktura kibernetkega sistema CAMS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b) .....	72
<b>Slika 4.11.</b> Digitalizirana in kibernetizirana funkcija v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b) .....	74
<b>Slika 4.12.</b> Evolucija vloge Subjekta v proizvodnih sistemih skozi čas (Hozdić 2020b) .....	75
<b>Slika 4.13.</b> Funkcije PPC v konceptu SKFPS (Hozdić 2020b), (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020) .....	77
<b>Slika 4.14.</b> Digitalizirana funkcija planiranja proizvodnje (Hozdić 2020b) .....	78
<b>Slika 4.15.</b> Digitalizirana funkcija razporejanja nalog v kibernetkem sistemu ADS (Hozdić 2020b) ...	79
<b>Slika 4.16.</b> Kibernetizirana funkcija samoorganizacije v kibernetkem sistemu EDS (Hozdić 2020b) ..	80
<b>Slika 5.1.</b> Evolucija od Industrije 1.0 do koncepta Industrije 5.0 .....	84
<b>Slika 5.2.</b> Ključni dejavniki Industrije 5.0 (Breque, De Nul, and Petridis 2021) .....	85
<b>Slika 5.3.</b> Ključne omogočitvene tehnologije Industrije 5.0 (Mourtzis, Angelopoulos, and Panopoulos 2022) .....	86
<b>Slika 5.4.</b> Evolucija proizvodnih sistemov (ElMaraghy and ElMaraghy 2022) .....	88
<b>Slika 5.5.</b> Odporni proizvodni sistem (Ding et al. 2014) .....	89
<b>Slika 5.6.</b> Tranzicija iz podatkov do kognicije (ElMaraghy and ElMaraghy 2022) .....	90
<b>Slika 5.7.</b> Nivoji upravljanja in vodenja proizvodnih procesov, prilagojeno po (Hozdić 2020b) .....	91
<b>Slika 5.8.</b> Na človeka osredotočeni adaptivni kognitivni proizvodni sistemi (ElMaraghy and ElMaraghy 2022) .....	92



## Seznam kratic in simbolov

Okrajšava	Pomen
<b>AARIA</b>	Agentska arhitektura (ang. <i>Autonomous Agent at Rock Island Arsenal</i> )
<b>ACMS</b>	Adaptivni kognitivni proizvodni sistemi (ang. <i>Adaptive cognitive manufacturing systems</i> )
<b>ADS</b>	Avtonomni delovni sistem
<b>AMS</b>	Agilni proizvodni sistemi (ang. <i>Agile manufacturing systems</i> )
<b>B2MN</b>	Poslovni pristop k proizvodnem omrežju (ang. <i>Business-to-Manufacturing Network</i> )
<b>BMS</b>	Biološki proizvodni sistemi (ang. <i>Biological manufacturing systems</i> )
<b>CAD</b>	Računalniško podprto snovanje in konstruiranje (ang. <i>Computer Aided Design</i> )
<b>CAM</b>	Računalniško podprta proizvodnja (ang. <i>Computer Aided Manufacturing</i> )
<b>CAMS</b>	Kompleksni adaptivni proizvodni sistemi (ang. <i>Complex Adaptive Manufacturing System</i> )
<b>CAPP</b>	Računalniško podprto planiranje procesov (ang. <i>Computer Aided Process Planning</i> )
<b>CC</b>	Računalniški oblak (ang. <i>Cloud Computing</i> )
<b>CIM</b>	Računalniško integrirana proizvodnja (ang. <i>Computer Integrated Manufacturing</i> )
<b>CMfg</b>	Proizvodnja, ki bazira na oblaku (ang. <i>Cloud Manufacturing</i> )
<b>CPPS</b>	Kibernetsko-fizični proizvodni sistemi (ang. <i>Cyber-physical production systems</i> )
<b>CRM</b>	Sistem za upravljanje odnosov s strankami (ang. <i>Customer Relationship Management</i> )
<b>DML</b>	Namenska proizvodna linija (ang. <i>Dedicated Manufacturing Lines</i> )
<b>DSS</b>	Sistemi za podporo odločanju (ang. <i>Decision Support Systems</i> )
<b>DT</b>	Digitalni dvojček (ang. <i>Digital twin</i> )
<b>EDS</b>	Elementarni delovni sistem
<b>EIS</b>	Ekspertni informacijski sistemi (ang. <i>Expert Information Systems</i> )
<b>ELS</b>	Elementarni logistični sistemi
<b>ERP</b>	Informacijski sistem za celotno upravljanje podjetja (ang. <i>Enterprise Resource Planning</i> )
<b>ESS</b>	Elementarni storitveni sistemi
<b>FrPS</b>	Fraktalni proizvodni sistemi
<b>H2M</b>	Komunikacija človek-stroj
<b>HCI</b>	Vmesnik človek-računalnik
<b>HMS</b>	Holonski proizvodni sistem (ang. <i>Holonic Manufacturing System</i> )
<b>IKT</b>	Informacijsko-komunikacijske tehnologije (ang. <i>Information Communication Technology – ICT</i> )
<b>IMS</b>	Inteligentni proizvodni sistem (ang. <i>Intelligent Manufacturing System</i> )
<b>IoS</b>	Internet storitev (ang. <i>Internet of Service</i> )
<b>IoT</b>	Internet stvari (ang. <i>Internet of Things</i> )
<b>IS</b>	Inteligentni sistem
<b>JADE</b>	Programska knjižnica, ki omogoča agentsko orientiran pristop k programiranju v programskem jeziku Java (ang. <i>Java Agent Development framework</i> )
<b>JAF</b>	Agentsko okolje JAF (ang. <i>Java Agent Framework</i> )
<b>JAT</b>	Agentsko okolje JAT (ang. <i>Java Agent Template</i> )
<b>KFPS</b>	Kibernetsko-fizični proizvodni sistem (ang. <i>Cyber-Physical Production System – CPPS</i> )



<b>KFS</b>	Kibernetsko-fizični sistem (ang. <i>Cyber-Physical System</i> – CPS)
<b>KV</b>	Komunikacijski vmesnik
<b>LAN</b>	Lokalno omrežje (ang. <i>Local Area Network</i> )
<b>M2M</b>	Komunikacija med stroji (ang. <i>Machine to Machine communication</i> )
<b>MAP</b>	Večagentna platforma (ang. <i>Multi-agent Platform</i> )
<b>MAS</b>	Večagentni sistem (ang. <i>Multi-agent System</i> )
<b>MES</b>	Proizvodni informacijsko-komunikacijski sistem (ang. <i>Manufacturing Execution System</i> )
<b>MIS</b>	Upravljalni informacijski sistemi (ang. <i>Management Information Systems</i> – MIS)
<b>MPS</b>	Mrežni proizvodni sistemi
<b>MS</b>	Mreža stvari
<b>MTP</b>	Sistem za izmenjavo sporočil (ang. <i>Message Transport Systems</i> )
<b>NIP</b>	Naprava za implementacijo procesa (ang. <i>Process Implementation Device</i> – PID)
<b>OAS</b>	Sistemi za avtomatizacijo pisarniškega poslovanja (ang. <i>Office Automation Systems</i> – OAS)
<b>OEM</b>	Izvirni proizvajalec opreme (ang. <i>Original Equipment Manufacturer</i> )
<b>PaaS</b>	Platforma kot storitev (ang. <i>Platform as a Service</i> )
<b>PLC</b>	Programski logični krmilnik (ang. <i>Programable Logical Controller</i> )
<b>PLM</b>	Informacijski sistem za upravljanje življenjskega cikla izdelka (ang. <i>Product Lifecycle Management</i> – PLM)
<b>POSM</b>	Proizvodno orientirana storitvena mreža (ang. <i>Manufacturing- oriented Service Network</i> – MoSN)
<b>PPC</b>	Sistem planiranja in kontrole proizvodnje (ang. <i>Production Planning and Control</i> )
<b>QR</b>	Dvodimenzionalna koda (ang. <i>Quick Response Codes</i> )
<b>ReMS</b>	Odporni proizvodni sistem (ang. <i>Resilient Manufacturing System</i> – ReMS)
<b>RFID</b>	Radio frekvenčna identifikacija (ang. <i>Radio Frequency Identification</i> )
<b>RMS</b>	Rekonfigurabilni proizvodni sistemi
<b>SaaS</b>	Programska oprema kot storitev (ang. <i>Software as a Service</i> )
<b>SKFPS</b>	Socialno-kibernetsko-fizični proizvodni sistemi
<b>SLAWS</b>	Samoučeči avtonomni delovni sistem (ang. <i>Self-Learning Autonomous Work System</i> )
<b>SMS</b>	Pametni proizvodni sistemi (ang. <i>Smart manufacturing systems</i> )
<b>SE</b>	Storitvena enota (ang. <i>Service Unit</i> – SU)
<b>SOA</b>	Storitveno orientirane arhitekture (ang. <i>Service Oriented Architecture</i> )
<b>SOAP</b>	Protokol za spletne storitve (ang. <i>Simple Object Access Protocol</i> )
<b>TPS</b>	Sistemi za obdelavo transakcij (ang. <i>Transaction Processing Systems</i> – TPS)
<b>UDDI</b>	Standardni mehanizem za registracijo in kasnejše odkrivanje, integracijo spletnih storitev
<b>UML</b>	Splošni modelirni jezik (ang. <i>Unified Modelling Language</i> )
<b>VCC</b>	Virtualni kompetenčni center (ang. <i>Virtual Competence Centre</i> )
<b>VCU</b>	Virtualna koordinacijska enota (ang. <i>Virtual Coordination Unit</i> )
<b>VDS</b>	Virtualni delovni sistem (ang. <i>Virtual Work System</i> )
<b>VP</b>	Virtualno podjetje (ang. <i>Virtual Enterprises</i> – VE)
<b>WfS</b>	Sistemi za podporo delovnim procesom (ang. <i>Workflow Systems</i> – WfS)
<b>WS</b>	Spletne storitve (ang. <i>Web Service</i> )
<b>WSDL</b>	Jezik za opis spletnih storitev (ang. <i>Web Service Description Language</i> )
<b>XML</b>	Računalniški komunikacijski jezik (ang. <i>Extensible Markup Language</i> )

## 1 UVOD

*»Namen izobraževanja mora biti urjenje neodvisnih aktivnih in razmišljujočih posameznikov, ki bodo videli v služenju skupnosti svoje najvišje poslanstvo.«*

*Albert Einstein*

Industrijska proizvodnja ustvarja novo vrednost in kreativna delovna mesta in je zato ključna za nacionalne ekonomije. V zadnjih dvajsetih letih so se na področju industrijske proizvodnje dogajale pomembne spremembe: izbrisane so državne meje glede tržišč, zavlada je celovita globalizacija; ponudba in povpraševanje po industrijskih proizvodih sta večja kot kadar koli prej. Globalni trg zaznamujejo ponudba številnih novih proizvodov, hitro zastaranje obstoječih, predvsem visokotehnoloških proizvodov, zahteve po visoki kakovosti in kratkih dobavnih rokih ter pritiski na cene proizvodov. Te razmere povečujejo negotovost in kompleksnost proizvodnje in terjajo preobrazbo obstoječih proizvodnih industrij v industrijo, ki bo temeljila na naprednih konceptih, tehnologijah in komunikacijah (Hozdić 2020b).

Brisanje meja tržišč in razvoj naprednih informacijsko-komunikacijskih tehnologij (IKT) sta ustvarila pogoje za razvoj novih struktur proizvodnih sistemov (Hon 2005), kot so: distribuirani adaptivni proizvodni sistemi, proizvodne mreže in avtonomi proizvodni sistemi. Zaradi razvoja tovrstnih naprednih proizvodnih sistemov se posledično ustvarja poljubno število komunikacijskih interakcij med udeleženci v proizvodnih sistemih, s čimer postajajo takšni proizvodni sistemi nepredvidljivi, njihovo obnašanje vse bolj kompleksno in upravljanje vse bolj zahtevno (Hozdić 2020b).

Današnji kompleksni proizvodni sistemi so sestavljeni iz številnih elementov, ki skušajo dosegati medsebojno komunikacijo, interakcijo in porazdelitev proizvodnih aktivnosti (Vrabič, Husejnagić, and Butala 2012). Elementi kompleksnih proizvodnih sistemov niso samo realni, kar pomeni fizični elementi, kot so: stroji, orodja, obdelovanci ipd., temveč tudi digitalni in komunikacijski elementi, kot so: internet, razne komunikacijske mreže, programska oprema, protokoli, datoteke, računalniško krmiljene naprave, roboti, mehatronski sistemi in mnogi drugi. Ta sklop elementov je prinesel nov pogled, pristop in opis proizvodnih sistemov skozi prizmo povezovanja fizičnih, digitalnih in virtualnih komponent, na čemer temeljijo t. i. *kibernetsko-fizični proizvodni sistemi* (KFPS). KFPS predstavljajo novo področje proizvodnih sistemov, ki temeljijo na načelih *kibernetsko-fizičnih sistemov* (KFS), ki jih je Helen Gill (Gill 2006) prvič definirala leta 2006.

KFS so sestavljeni iz dveh podsistemov, kibernetskega (digitalnega, virtualnega) in fizičnega (realnega, materializiranega). Pri tem predstavljajo kibernetski podsistemi strukturo komunikacijskih, logičnih in

senzorskih enot, prek katerih se sistem povezuje v kibernetski prostor, medtem ko fizični podsistemi predstavljajo strukturo močnostnih in aktuatorskih enot ter realnih objektov krmiljenja, s katerimi se izvajajo proizvodni procesi, vezani na materializacijo proizvoda (Hozdić 2020b). Sposobnost komunikacije in interakcije v kibernetskem prostoru temelji na digitalnem procesiranju informacij, rabi naprednih IKT (Giusto et al. 2010) in nadzornih mehanizmov, ki omogočajo sklenjeno zanko med kibernetskim in fizičnim podsistemom, kar pa je temelj za izboljšanje učinkovitosti delovnih procesov in optimalno podporo ljudem v procesih odločanja (Baheti and Gill 2011).

V zadnjem desetletju sta evropska in svetovna industrija v dobi digitalizacije in kibernetike, kjer proizvodna podjetja želijo prilagoditi svoje proizvodne strukture in sisteme v skladu z načeli Industrije 4.0 (Hozdić, Kendić, and Jurković 2022).

Ključni dejavniki, ki omogočajo Industrijo 4.0, kot so decentralizacija, povezljivost, horizontalna in vertikalna integracija, sodelovanja, digitalizacija, kibernetizacija, pametni stroji in izdelki, avtomatizacija itd., (Hozdić, Kendić, and Jurković 2022), so spremenili industrijski sektor. Ti elementi so odprli pot novim organizacijskim oblikam in inovativnim načelom upravljanja. Nove organizacijske oblike in inovativni principi upravljanja nastajanja, samoorganizacije, učenja, odprtega inoviranja, sodelovanja in mreženja ljudi in organizacij so postali ključni elementi proizvodnih sistemov Industrije 4.0 (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), tako imenovanih pametnih proizvodnih sistemov (ang. *Smart Manufacturing Systems* – SMS) (Davis et al. 2012).

Koncept SMS omogoča digitalizacijo in kibernetizacijo procesov, s čimer se zmanjša poseg človeka v proizvodni proces. Sčasoma so se razvili različni koncepti SMS in napredne tehnologije avtomatizacije, kot so: kibernetsko-fizični proizvodni sistemi (Monostori 2014), proizvodnja v oblaku (Zhang et al. 2014), vseprisotni proizvodni sistemi (Wang et al. 2017), socialno-kibernetsko-fizični sistemi (ang. *Socio-Cyber-Physical Production Systems* – SCPPS) (Morosini et al. 2013), socialno-kibernetsko-fizični proizvodni sistemi (ang. *Socio-Cyber-Physical Manufacturing Systems* – SCPMS) (Hozdić and Butala 2020), personalizirana izdelava (Pérez et al. 2022), itd.

Ključni tehnologiji Industrije 4.0 in SMS sta aktivno vključeni v evropsko industrijo, vendar je hud akutni respiratorni sindrom korona virus tipa 2 (SARS-CoV-2) povzročil številne težave v gospodarstvu, industriji, delu proizvodnih dejavnosti, transportu itd. Pandemija SARS-CoV-2 (World Health Organization (WHO) 2020) je izpostavila potrebo po ponovnem premisleku o obstoječih delovnih metodah in pristopih na področju evropske in svetovne industrije.

Pandemija SARS-CoV-2 je industrijam po vsem svetu pokazala, da njihovi trenutni proizvodni sistemi niso tako odporni, kot so pričakovali (Romero and Stahre 2021). Glede na pregled literature (Tissir, El Fezazi, and Cherrafi 2020), (UNCTAD 2020), (Chen and Lin 2020), (Kumar et al. 2020) se je veliko podjetij soočalo z naslednjimi težavami: (1) delavci nosijo maske in ohranjajo minimalno medsebojno razdaljo, (2) delavci morajo biti v karanteni za več tednov, (3) povpraševanje po izdelku se je zmanjšalo, (4) povpraševanje po izdelku se je povečalo, prihodnje povpraševanje lahko izgine, (5) zaradi nezadostne transportne zmogljivosti izdelkov, ki jih proizvaja tovarna, ni mogoče dostaviti kupcu itd.

Izkušnja s pandemijo SARS-CoV-2 se bo izkazala za prelomnico z velikim vplivom na proizvodnjo in proizvodne sisteme (ElMaraghy et al. 2021). Sodobna industrija, proizvodna podjetja in njihovi

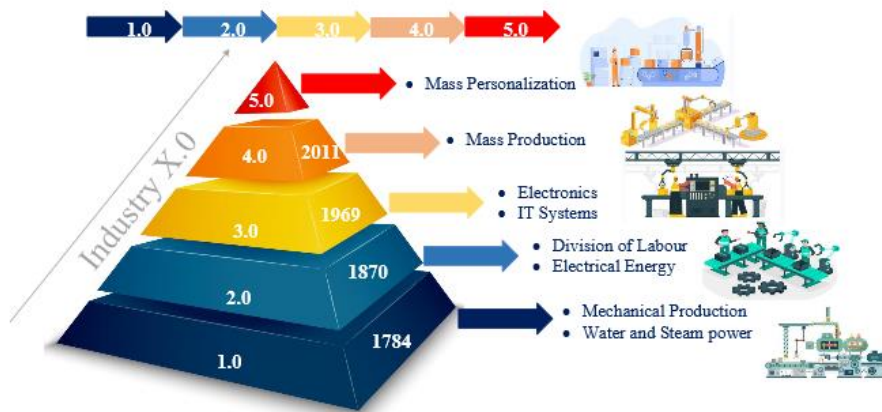


proizvodni sistemi morajo biti med drugim usklajeni z agilnimi, povezanimi, storitveno usmerjenimi, zelenimi in socialnimi proizvodnimi praksami (Tao et al. 2017), bolj okoljsko, socialno in ekonomsko trajnostni ter bolj osredotočenimi na človeka (ElMaraghy et al. 2021), (Monostori and Váncza 2020) in prilagodljivi (Romero and Stahre 2021), (Patriarca et al. 2018).

Evropska komisija je napovedala novo filozofijo proizvodnje za trajnostno, na človeka osredotočeno in odprno evropsko industrijo, ki se je nedavno pojavila pod imenom *Industrija 5.0*. *Industrija 5.0* odpira nove perspektive načrtovanja, razvoja, implementacije in delovanja proizvodnih sistemov.

Na teh osnovah so v nadaljevanju:

- opisane napredne IKT kot omogočitvene tehnologije za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje novih konceptov proizvodnih sistemov,
- definiran je proizvodni sistem in opisane njegove ključne lastnosti,
- predstavljen zgodovinski pot razvoja industrije skozi industrijske revolucije,
- podan je pregled proizvodnih paradig in pripadajočih konceptov, ki se dotikajo področja modeliranja, upravljanja in krmiljenja proizvodnih sistemov,
- predstavljeni so koncepti naprednih proizvodnih sistemov, ki izhajajo iz osnov četrte industrijske revolucije, tako imenovane *Industrija 4.0*,
- definirani so procesi digitalizacije in kibernetizacije, ki jih s sabo prinaša koncept *Industrije 4.0*,
- predstavljene so smernice nove industrijske revolucije t.i. *Industrije 5.0* in novi koncepti proizvodnih sistemov, ki temeljijo na paradigmi adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov
- izpostavljene smernice za bodoče delo na poti prehoda iz Industrije 4.0 v novo industrijsko revolucijo t.i. *Industrijo 5.0*.

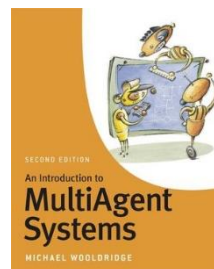
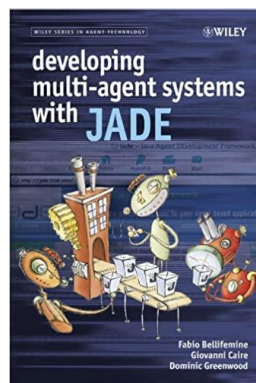
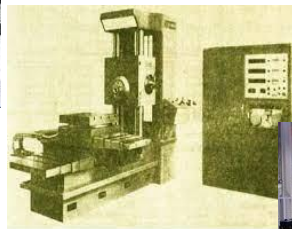
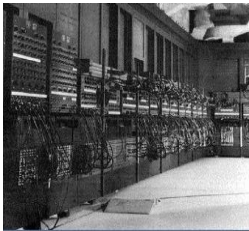
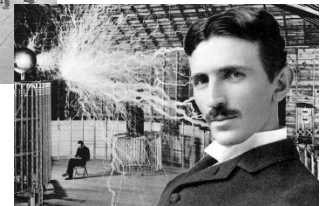


Factfile

**History of industrial revolution**

<b>1.0</b>	<b>1780 - Mechanisation</b> Industrial production based on machines powered by water and steam
<b>2.0</b>	<b>1870 - Electrification</b> Mass production using assembly lines
<b>3.0</b>	<b>1970 - Automation</b> Automation using electronics and computers
<b>3.5</b>	<b>1980 - Globalisation</b> Offshoring of production to low-cost economies
<b>4.0</b>	<b>Today - Digitalisation</b> Introduction of connected devices, data analytics and artificial intelligence technologies to automate processes further
<b>5.0</b>	<b>Future - Personalisation</b> The fifth industrial revolution, or industry 5.0, will be focused on the co-operation between man and machine, as human intelligence works in harmony with cognitive computing. By putting humans back into industrial production with collaborative robots, workers will be upskilled to provide value-added tasks in production, leading to mass customisation and personalisation for customers

VIR: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>.



## 2 NAPREDNE INFORMACIJSKO-KOMUNIKACIJSKE TEHNOLOGIJE IN SISTEMI

*“Moji možgani so le sprejemnik, v vesolju obstaja jedro,  
iz katerega pridobivamo znanje, moč in navdih.  
Nisem prodril v skrivnosti tega jedra,  
vendar vem, da obstaja.”*

*Nikola Tesla*

Informacije in znanje sta, v dobi vseobsegajoče globalizacije, dva osnovna vira za uspešno poslovanje proizvodnih podjetij. Pojem informacije je definiran v delih C. E. Shannon (Shannon 1948) o matematični teoriji informacija, ki postavlja temeljna načela komunikacije. Shannon-ova teorija komunikacije temelji na izmenjavi »nečesa neznanega« od pošiljatelja, preko kanala veze, do prejemnika. Vezavo med entropijo sistema in informacijo Shannon izpostavlja definicijo informacije kot negativno vrednost entropije, oziroma entropija sistema predstavlja primanjkljaj informacij v sistemu, ter njegovo nedoločenost.

Iz predhodno navedene Shannon-ove teorije informacij so izpeljane številne definicije informacije, od katerih v tem delu izpostavljamo:

*»Informacija je namensko upravljano znanje s ciljem da pripravi obnašanje, ki mora biti učinkovito za doseg ciljev. Bolj, ko so znane inačice in okoliščine, uspešneje se lahko pripravijo aktivnosti in zato je po pravilu popolne informacije uspeh večji. Pri tem se ne smatra znanje na splošno, ampak znanje z namenom da pripravi obnašanje« (Wittmann 1959).*

Na osnovi predhodne definicije se lahko zaključi, da je informacija novo spoznanje katerega pošiljatelj informacije usmerja prejemniku v obliki obvestila, poročila podatkov in podobno, da bi se dosegle primerne odločitve in izvršile določene aktivnosti.

Napredne IKT predstavljajo eno izmed temeljnih značilnosti 21. stoletja (Luftman 2003). Razvoj IKT je praktično vplival na vse sfere človeškega življenja. Tudi, povečana uporaba IKT v proizvodni domeni je ena izmed največjih sprememb v poslovanju proizvodnih podjetij v zadnjih tridesetih letih (Schermerhorn, Hunt, and Osborn 2002).

Danes obstajajo številne definicije IKT. Bakopoulos je v delu (Bakopoulos 1985) definiral IKT kot:

»množica resursov za zajemanje, prenos in obdelavo podatkov in informacij s ciljem zagotavljanja podpore pri izvajanju poslovnih procesov v podjetjih«.

Weill in Broadbendt v knjigi (Weill and Broadbent 1998) poudarjata, da IKT vsebujejo vsa sredstva in opremo s pomočjo katerih se zajemajo, obdelujejo, analizirajo in shranjujejo podatki.

IKT je v proizvodnih podjetjih strukturirana v različnih informacijskih sistemih za izvajanje/podpore poslovnih in proizvodnih procesov. V delu (O'Brien 2003) O'Brien definira informacijski sistem in sicer:

»... je lahko katera koli organizirana kombinacija ljudi, komunikacijskih omrežij, podatkovnih virov, strojne in programske opreme, ki zbirajo, urejajo, transformirajo in razširjajo informacije v organizaciji«.

Turban je v delu (Turban, Volonino, and Wood 2013) predstavil različne tipe informacijskih sistemov, kot so: izvršni sistemi (ang. *Executive Support Systems* – ESS), upravljalni informacijski sistemi (ang. *Management Information Systems* – MIS), sistemi za podporo odločanju (ang. *Decision Support Systems* – DSS), sistemi za upravljanje z znanjem (ang. *Knowledge Management Systems* – KMS), sistemi za avtomatizacijo pisarniškega poslovanja (ang. *Office Automation Systems* – OAS), ekspertni informacijski sistemi (ang. *Expert Information Systems* – EIS), sistemi za obdelavo transakcij (ang. *Transaction Processing Systems* – TPS), sistemi za podporo delovnim procesom (ang. *Workflow Systems* – WfS) ipd.

Tipi informacijskih sistemov niso strogo ločeni med seboj in se v podjetju večinoma prepletajo. Za realizacijo različnih tipov informacijskih sistemov danes obstajajo različne celovite systemske rešitve, kot so: informacijski sistem za celotno upravljanje podjetja (ang. *Enterprise Resource Planning* – ERP), informacijski sistem za upravljanje življenjskega cikla izdelka (ang. *Product Lifecycle Management* – PLM), sistem za upravljanje odnosov s strankami (ang. *Customer Relationship Management* – CRM), CAD/CAPP/CAM sistemi, proizvodni informacijsko-komunikacijski sistem (ang. *Manufacturing Execution System* – MES), sistem za nadzor, upravljanje in avtomatski zajem podatkov (ang. *Supervisory, Control, Automated Data Acquisition* – SCADA) itd.

Ključne naloge informacijskih sistemov in celovitih systemskih rešitev v naprednih proizvodnih sistemih predstavljajo: zajemanje podatkov, procesiranje ali obdelava podatkov, organiziranje podatkov in informacij v uporabni obliki (generiranje modela podatkov), shranjevanje in skladiščenje podatkov ter prenos podatkov.

Napredna IKT je postala sestavni del poslovanja v številnih podjetjih s ciljem odpiranja novih kanalov komunikacije, izboljšanja učinkovitosti, fleksibilnosti, zmanjševanju stroškov, skrajšanju časa izvajanja proizvodnih in poslovnih procesov, boljšega razumevanja zahtev kupca, ipd. Integracija različnih systemskih rešitev oz. informacijskih sistemov je omejena zaradi problemov kompatibilnosti in interoperabilnosti.

Poleg tega, da so IKT značilno vplivale na spremembe načina poslovanja proizvodnih podjetij so tudi postale strateški dejavniki v proizvodnih podjetjih (Applegate, Austin, and Soule 2007), ki omogočajo prestrukturiranje obstoječih proizvodnih sistemov v nove proizvodne in systemske strukture.



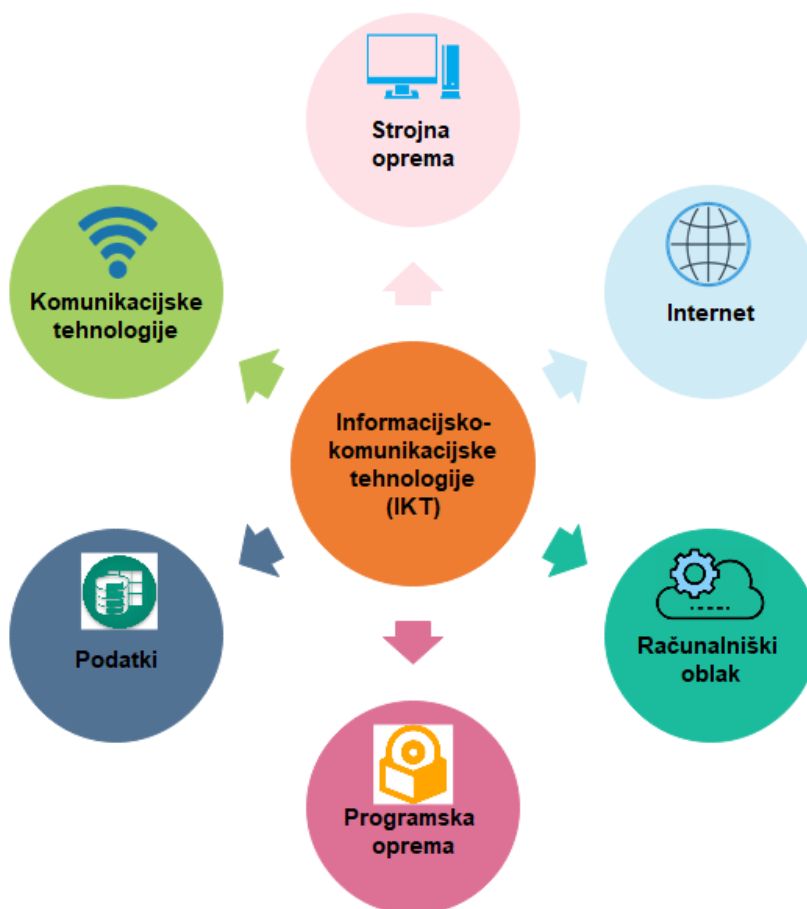
V nadaljevanju so predstavljene napredne IKT, ki omogočajo razvoj in implementacijo naprednih proizvodnih sistemov in sicer: internet (oziroma internet stvari, internet storitev), socialne mreže, komunikacijske tehnologije, računalniški oblak in večagentni sistemi ter predstavljene celovite sistemske rešitve za realizacijo različnih tipov informacijskih sistemov.

## 2.1 Napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije

Napredna IKT je, iz vidika industrijske proizvodnje, tehnologija za razvoj informacijskih sistemov proizvodnih podjetij in mrežnih proizvodnih sistemov, glej [Slika 2.1](#). Komunikacijske tehnologije predstavljajo medij za posredovanje informacij med udeleženci v komunikaciji.

V sodobni komunikaciji prevladujejo elektronski mediji, zaradi možnosti hitrega in lahkega vzpostavljanja stika s fizično oddaljenimi udeleženci, relativno nizkimi stroški pošiljanja informacij ter združevanje informacijskih sistemov na področju elektronskega poslovanja. Tak medij je lahko interpersonalni medij (intranet) ali masovni medij (internet).

*Slika 2.1. Napredne IKT (Lastni vir)*



## 2.1.1 Internet

Internet je nova, hitro razvijajoča se paradigma (Giusto et al. 2010), ki se je pojavila na področju sodobnih komunikacijskih tehnologij.

*Internet se nanaša na globalni informacijski sistem, ki: 1) je logično povezan z globalno unikatnim naslovnim prostorom na osnovi internetnega protokola (IP) ali njegovih razširitev/nadgradenj; 2) podpira komunikacijo z rabo internetnega sklada protokolov (TCP/IP) ali njegovih razširitev; in 3) zagotavlja, uporablja ali omogoča javni ali zasebni dostop do visoko nivojskih storitev na komunikacijskem nivoju... (Leiner et al. 2009).*

Zahvaljujoč internetu imamo danes razvita pametna okolja v obliki pametnih stvari ali interneta stvari in pametnih storitev oz. interneta storitev, ki so zmožna medsebojno komunicirati.

### 2.1.1.1 Internet stvari

Prvo uradno rabo termina »internet stvari« (ang. *Internet of Things* – IoT) je mogoče povezati z Ashtonovim citatom iz leta 1999<sup>1</sup>, v katerem opisuje, kako bodo stvari same sposobne »zaznati« fizični svet okoli sebe in te podatke deliti tudi z drugimi stvarmi.

Koncept in vizija IoT sta predstavljena v delu (Gubbi et al. 2013), glej [Sliko 2.2](#).

V članku (Giusto et al. 2010) avtorji opredeljujejo IoT kot koncept računalništva, ki opisuje prihodnost, v kateri bodo vsakodnevni fizični objekti priključeni na internet in se bodo lahko identificirali z drugimi napravami ter z njimi komunicirali in sodelovali.

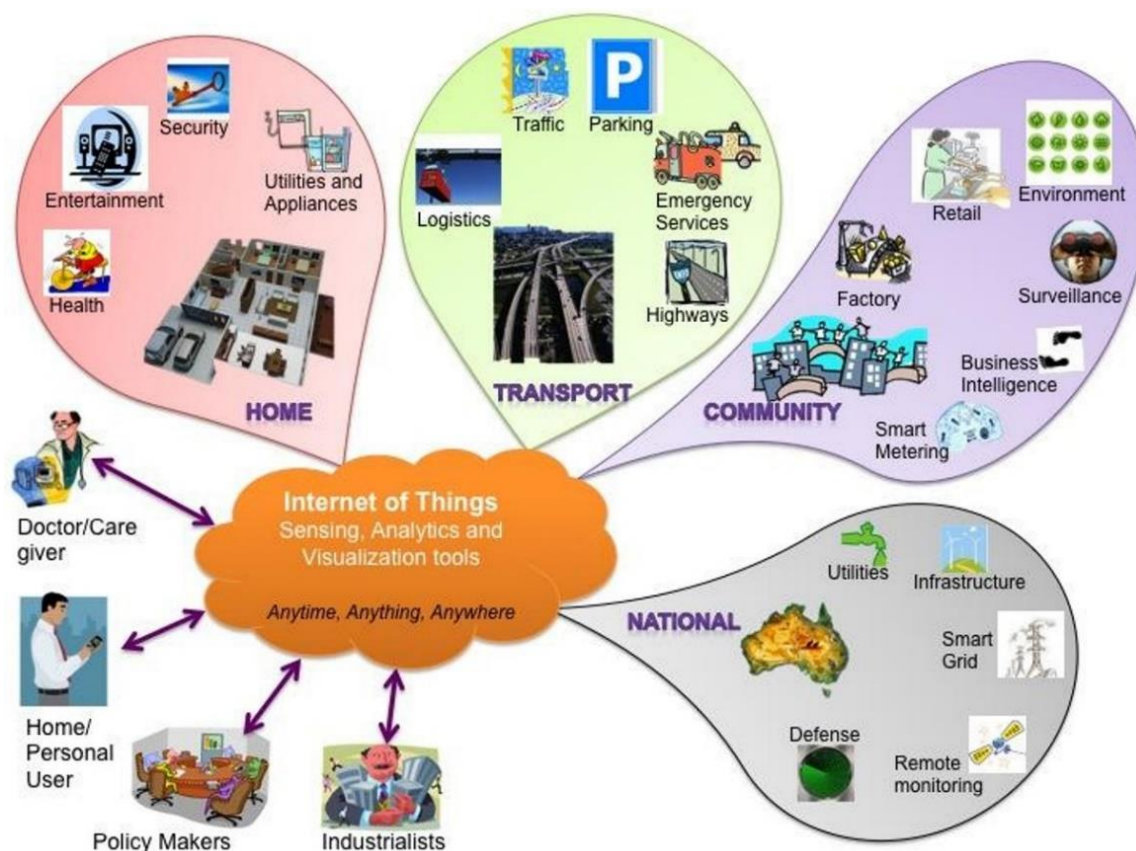
IoT je koncept in paradigma (Gubbi et al. 2013), (Sundmaeker et al. 2010), ki temelji na trditvi, da lahko prisotnost raznih stvari (predmetov, elementov) iz fizičnega sveta v kolaboracijskem svetu interneta, ki lahko medsebojno komunicirajo prek komunikacijskih kanalov (žične in brezžične mreže, TCP/IP protokolov) in pri tem ustvarjajo nove aplikacije in storitve, privede do uresničitve skupnih ciljev. Mnoge raziskave so v tem kontekstu usmerjene v aktivnosti preslikave fizičnih stvari v svet interneta. IoT ima za cilj predvsem omogočati stvarjem iz fizičnega sveta, da so povezane na internet kadarkoli, kjerkoli, za vse in vsakogar, uporabljajoč katerokoli mrežo, katerokoli storitev in kateri koli način povezovanja (Gubbi et al. 2013), (Sundmaeker et al. 2010).

IoT je revolucionarni napredek na področju Interneta, kjer stvari (objekti) postanejo samoprepoznavne in komunikativne, kar rezultira stvaritvi določene inteligence skozi sposobnost zaključevanja in sprejemanja odločitev. S takšnimi lastnostim postanejo stvari »pametne«.

---

<sup>1</sup> "I could be wrong, but I am fairly sure the phrase „Internet of Things“ started life as the title of a presentation I made at Procter & Gamble (P&G) in 1999", Kevin Ashton, RFID Journal, 22 June 2009.

Slika 2.2. Predstavitev koncepta Interneta stvari (Gubbi et al. 2013)



V delu (Sundmaeker et al. 2010), »pametne stvari« avtorji opredeljujejo kot aktivne udeležence v poslovnem, informacijskem in družvenem procesu, v katerem so le te sebi omogočile medsebojno komunikacijo ter si z okolico izmenjujejo podatke in dobivajo informacije preko senzorja iz okolice, ter se na dogajanja in vplive odzivajo samostojno, s pomikanjem procesov ki so pobudniki akcije in delajo storitve z ali brez neposrednega človeškega poseganja.

Pri analizi literature, ki obravnava tematiko Interneta stvari, je mogoče opaziti da številni avtorji (Haller 2009), (Miorandi et al. 2012), (Gubbi et al. 2013) predlagajo različne definicije, čeprav v grobem rečeno oziroma lahko zaključimo, da je cilj Interneta stvari povezati fizične objekte v svetovno omrežje, pri katerem imajo svojo identifikacijo ter komunicirajo z ostalimi objekti z namenom pridobivanja informacij in generiranja novega znanja.

Najpogosteje rabljena definicija interneta stvari je:

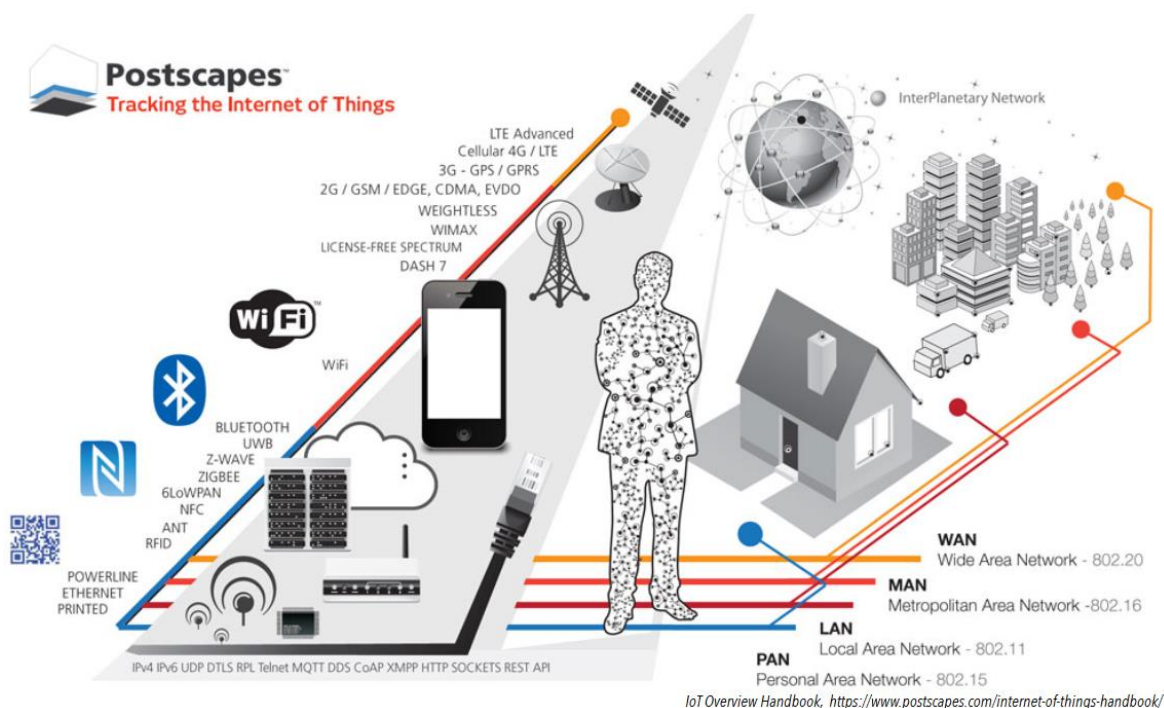
*Internet stvari je globalna infrastruktura za informacijsko družbo, ki omogoča napredne storitve s povezovanjem (fizičnih in virtualnih) stvari na osnovi obstoječih in novih interoperabilnih informacijskih in komunikacijskih tehnologij<sup>2</sup>.*

<sup>2</sup> International Telecommunication Union - ITU - T Y.2060, *Next Generation Networks – Frameworks and functional architecture models – Overview of the Internet of Things*, 2012.

Omogočivne tehnologije za izvedbo interneta stvari so radio-frekvenčna identifikacija (ang. *Radio Frequency Identification – RFID*) (Want 2006), senzorske mreže (ang. *Sensor Network – SNet*), brezžične tehnologije (ang. *Wireless Technology*) (Lee, Su, and Shen 2007), dvodimenzionalne kode (ang. *Quick Response codes – QR*), komunikacija med napravami (ang. *machine-to-machine communication – M2M communication*) (Verma et al. 2016), internetni protokoli (ang. *Internet Protocol – IP*), semantična integracija podatkov, agentske tehnologije itd., glej Sliko 2.3.

Radio Frekvenčna identifikacija predstavlja tehnologijo za brez-kontaktno samodejno identifikacijo objektov s pomočjo radijskih valov. RFID tehnologija povezuje znanja iz različnih področij, kot so: elektromagneti, telekomunikacije, polprevodna tehnologija, zaščita podatkov in kriptografija, proizvodnja, avtomatizirani sistemi, kot tudi številne druge povezane panoge (Finkenzeller 2003). Pri uporabi RFID tehnologije je omogočena identifikacija različnih objektov (stvari, elementov), oziroma identificirati je možno praktično karkoli kar je prisotno v fizičnem svetu, ki nas obdaja. Identifikacija z uporabo RFID tehnologije razumemo kot uporabo RFID oznake, ki predstavlja elektronsko oznako, katera je nosilec podatkov za identifikacijo s katerimi se obeležuje objekt, katerega je potrebno identificirati in RFID čitalca, oziroma naprave ki je zmožna zaznati prisotnost RFID oznak v svoji okolici in z njih odčitati podatke. V neizogibno potrebne komponente RFID sistema, poleg RFID oznake in čitalca, spada tudi sistem za obdelavo podatkov, kateri s pomočjo dobljenih podatkov čitalca sprejema zbrane podatke in jih skladišči ali obdeluje po potrebi, kot tudi prikladna komunikacijska tehnologija, ki omogoča komunikacijo med komponentami sistema. Podrobnejši opis nastanka, razvoja in uporabe RFID tehnologije je mogoče najti v delu (Ahson and Ilyas 2010).

Slika 2.3. Omogočivne tehnologije Interneta stvari (Baird, Ng, and Seah 2017)



Brezžične senzorske mreže so se razvile zahvaljujoč naglemu razvoju različnih tehnologij med katerimi so: tehnologija mikro-elektro-mehanskih sistemov (ang. *micro-electro-mechanical systems – MEMS*), ki omogoča, da se senzorji in njihovi deli namestijo v miniaturne čipe; digitalna elektronika, ki omogoča, da imajo mikro-kontrolerji zadostne vire, da lahko obdelajo podatke s senzorja; kot tudi komunikacijske in informacijske tehnologije, katere omogočajo pošiljanje podatkov s senzorja drugim brezžičnim senzorskim modulom, oziroma glavni upravljalni aplikaciji sistema (Sohraby, Minoli, and Znati 2007). Številni, danes prisotni brezžični senzorski moduli, so dosegli standard IEEE 802.15.4 za komunikacijo, kar omogoča naprednejše delo heterogenih brezžičnih senzorskih mrež v katerih se koristijo različne platforme (Akyildiz and Vuran 2010).

Z razvojem Interneta, kot globalne računalniške mreže, kakor tudi z nastankom novih aplikacij in storitev, se število uporabnikov stalno povečuje. Vzporedno s porastom priljubljenosti Interneta in naraščanjem števila uporabnikov, narašča tudi potreba za javnimi internetnimi protokoli, ki so pravzaprav numerične oznake, ki se dodeljujejo napravam, ki sodelujejo v računalniški mreži, da bi se omogočila komunikacija med ostalimi napravami. IPv6 protokol je definiran leta 1998 znotraj IETF skupine standardov. Za nastavljanje naprav se uporablja IP naslov velikosti 128 bitov, za razliko od IPv4 ki je uporabljala IP naslov velikosti 32 bitov, s čemer se število IP naslovov večkratno povečuje (CISCO 2012).

Wi-Fi (ang. *Wireless - Fidelity*) ali IEEE 802.11 je brezžična mreža kjer se podatki med dvema ali več napravami prenašajo s pomočjo radijskih frekvenc in primernih anten. Najpogostejše se uporablja v lokalnih mrežah. Wi-Fi mreže delujejo s pomočjo enostavne radio tehnologije kjer se signali pretvarjajo v ničle in enice, pošiljajo pa se na frekvencah 2.4 GHz in 5 GHz (IEEE 1997).

Sredi tehnološke revolucije v kateri korišćene informacijsko-komunikacijske tehnologije sestavljajo omreženo družbo in spreminjajo ves svet, vse bolj pomemben postaja novi koncept komunikacije, imenovan M2M komunikacija, pod katero se razume avtonomna komunikacija med stroji, neodvisno od interakcije uporabnika (Dohler, Watteyne, and Alonso-Zarate 2010).

Komunikacija, ki je ustvarjena z žičnimi ali brezžičnimi tehnologijami med dvema napravama, neposredno ali z zelo malim posredovanjem človeka, je definirana kot M2M komunikacija v (ETSI 2011). Komunikacija M2M se v glavnem vrši s paketnim prometom (izmenjavo sporočil) uporabljajoč protokol IP (IPv4 ili IPv6). Arhitekture, standardi in aplikacije komunikacijske paradigme M2M so opisani v (Wan, Chen, and Leung 2014).

### 2.1.1.2 *Internet storitev*

Internet storitev (ang. *Internet of Services – IoS*) je lahko mišljen kot oblika infrastrukture in poslovnega modela, ki korenito spreminja način na katerem se snuje, nudi in kliče storitve. IoS uporablja internet kot medij za ustvarjanje nove vrednosti prek storitev.

IoS nudi s perspektive IKT globalni opis standardov, orodij, aplikacij in arhitektur za podporo poslovnim aktivnostim kakor tudi razvoj različnih oblik spletnih storitev. Xu (Xu 2012) je identificiral tri najpogostejše vrste modelov za nudenje storitev, to so: programska aplikacija kot storitev (ang.

*Software as a Service* – SaaS), platforma kot storitev (ang. *Platform as a Service* – PaaS) in infrastruktura kot storitev (ang. *Infrastructure as a Service* – IaaS).

SaaS je struktura, ki omogoča dostopnost aplikacij preko IaaS v obliki storitev, katere se najemajo po potrebi, namesto da bi jih kupovali kot lastniške programe, katere je potrebno naložiti na hišne, pisarniške ali industrijske računalnike. Takšna oblika poslovnega modela podjetjem omogoča najem različnih programskih paketov, pri čemer se izognejo strošku nabave, namestitve, nadgradnje in vzdrževanja teh paketov na osebnih in industrijskih računalnikih.

PaaS predstavlja variacijo SaaS strukture, ki nudi kot storitev razvojno podporo. Uporabnik lahko na platformi sam gradi lastne aplikacije, ki se izvajajo na infrastrukturi ponudnika storitev. Aplikacije se uporabnikom ponujajo preko strežnika, ki je dostopen preko interneta. Te storitve so omejene v dizajnu in možnostih ponudnika, tako da uporabniku ne nudijo popolne svobode. Uporabnik ne more preverjati strukture mreže, sistema hrambe, operacijske sisteme in strežnike, vseeno pa ima nadzor nad svojimi razvitimi aplikacijami.

IaaS omogoča uporabniku koriščenje računalniške infrastrukture (v glavnem virtualne platforme). Uporabniki ne kupujejo strežnikov, programov, prostorov za hranjenje podatkov ali mrežne opreme, pač pa se oskrbujejo z navedenimi viri v obliki zunanje storitve. Uporabniku se nudi možnost upravljanja z obdelavo, hrambo, mreženjem in drugimi osnovnimi računalniškimi viri.

Predhodno opisane storitve se navadno izvajajo preko standardnih industrijskih vmesnikov, kot so storitveno orientirane arhitekture (ang. *Service Oriented Architecture* – SOA) in spletne storitve (ang. *Web Service* – WS).

Po (Kulkarni and Dwivedi 2008) je SOA aplikacijska arhitektura, ki povezuje heterogene, distribuirane, kompleksne in nefleksibilne poslovne enote ter jih razčlenjuje na posamezne poslovne funkcije – storitve. SOA je sposobna razvijati, implementirati, odkriti, integrirati in vnovič uporabiti storitve, neodvisno od aplikacij in računalniških platform na katerih so izvedene, kar dela poslovne procese enostavnejše, doslednejše in bolj fleksibilne.

Temeljni pomen SOA je, da se storitve lahko iščejo preko mreže, ki so v času izvajanja dostopne (Will and Blecker 2012). To omogoča zagon istih storitev v različnih procesih, ne da bi bilo potrebno poznati njihovo natančno lokacijo. Da bi se storitev lahko uporabila, mora eden ali več središčnih registrov shraniti informacije o vsaki specifični storitvi.

Spletna storitev predstavlja katerikoli programsko aplikacijo, ki je dostopna preko mreže, katera pa koristi standardizirani XML standard za izmenjavo sporočil (ang. *eXtensible Markup Language* – XML). Arhitektura spletnih storitev je opisana v članku (Curbera et al. 2002).

Tehnologijo spletnih storitev posebej opisujejo storitve same, kot primarni gradniki, opisi storitev zasnovani na WSDL (ang. *Web Service Description Language*), sporočila zasnovana na SOAP (ang. *Simple Object Access Protocol*) tehnologiji in konceptih. Registracija opisa storitve in mehanizmi odkrivanja so najpogosteje realizirani skozi UDDI (ang. *Universal Description, Discovery and Integration*). UDDI predstavlja standard za opis, online registracijo, objavljanje in dinamično ugotavljanje objavljenih

spletnih storitev. XML, SOAP, UDDI in WSDL omogočajo definiranje, pakiranje, pristopanje in obdelavo podatkov, kakor tudi izvrševanje programa preko interneta, ne glede na posamezne implementirane tehnologije, s čimer se zagotavlja interperabilnost med entitetami informacijskih sistemov (Devedžić 2004).

Tehnologija spletnih storitev v domeni proizvodnih sistemov je prikazana v nekaterih delih. Storitvena komunikacijska arhitektura za avtomatizirano integracijo obdelovalnih strojev je prikazana v delu (Wu, Xi, and Zhou 2008). V delu (Hu, Zhou, and Li 2010) tehnologija spletnih storitev podpira izmenjavo podatkov in znanja v fazi razvoja izdelka. Estrem v delu (Estrem 2003) spletne storitve definira kot ključno tehnologijo za distribuirano obdelavo podatkov, poleg tega pa je tudi predstavljen konceptualni okvir za uvedbo omenjene tehnologije v proizvodne sisteme. Integracija spletnih storitev in več-agentskih sistemov je imela poudarek v delih (Bellifemine, Caire, and Greenwood 2007), (Leitão and Karnouskos 2015).

### **2.1.2 Socialne mreže**

Termin »socialne mreže« (ang. *Social Networks – SN*) je prvi opredelil Barnes v delu (Barnes 1954), in sicer kot:

*»skupnost ljudi, ki so med seboj povezani skozi družino, delo ali hobi«.*

Tudi socialna mreža se lahko definira kot socialna struktura, katero sestavljajo množice socialnih akterjev (oseb ali organizacij). Ko računalniška mreža ali omrežje povezuje ljudi ali organizacije, govorimo o socialnem omrežju (Blažun 2012).

Socialne mreže so v svetu interneta (t.i. *spletne socialne mreže*) eden od najpogostejših medijev, ki omogočajo realizacije različnih sodelujočih strategij. Le te virtualno integrirajo ljudi in organizacije, odvisno od tega za kaj so specializirane. Tako obstajajo poslovne, organizacijske in druge socialne mreže. Časovna os razvoja SN v svetu interneta je predstavljen v delih (Boyd and Ellison 2007), (Alrubaian et al. 2019), glej Sliko 2.4.

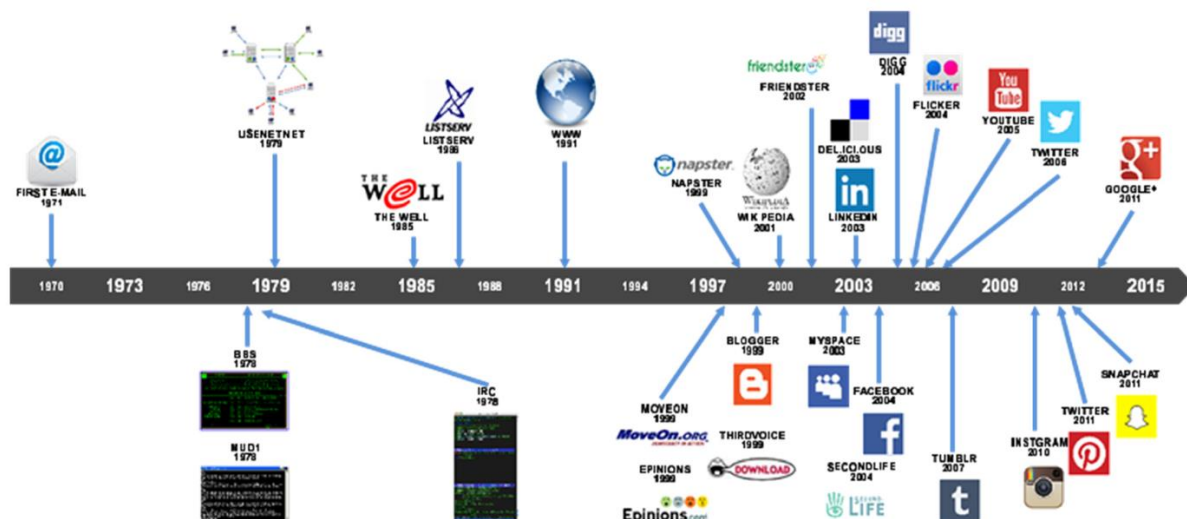
Z vidika storitvenih arhitektur in modelov predstavljajo socialne mreže platforme, ki ustvarjajo skupnosti in socialne odnose med ljudmi, ki medsebojno delijo interese, aktivnosti, njihove osebnosti, gradijo medsebojno zaupanje, delijo stališča in povezave.

Akterjem tovrstnih mrež ni mar za geografske, ekonomske, politične ali jezikovne omejitve. Na različnih lokacijah se zbirajo milijoni medsebojno povezanih potencialnih strank, partnerjev, kupcev, potrošnikov, pa tudi konkurentov. Ravno tako osredotočene skupine, povzročajo domala idealno polje za izpeljevanje sofisticiranih komunikacijskih aktivnosti.

Skozi socialne mreže lahko ljudje delijo svoj status in razpoloženje svojim prijateljem širom sveta in kadarkoli, preko zgolj enega klika. Uporabniki socialnih mrež uporabljajo sporočila, slike, video in spletne strani, da delijo različne vsebine. Danes je mogoče dostopati do socialnih mrež preko osebnih računalnikov, pametnih telefonov in tabličnih računalnikov. Torej, če so lahko pametne naprave

vkjučene v socialne mreže, lahko tudi one pošiljajo različna sporočila na socialne mreže kot ljudje. Povsem jasno je, da je internet stvari lahko dobro povezan s socialnim omrežjem (Zhang et al. 2014).

**Slika 2.4.** Evolucija socialnih medij in mrež (Alrubaian et al. 2019)



Kingsley, v delu (Kingsley 2008) raziskuje, kako se medsebojni odnosi, procesiranje in pretok informacij med ljudmi, fizičnimi predmeti in okolico obnašajo v pretvorbi iz implicitne v eksplicitno informacijo, na temelju odnosa fizičnega in digitalnega sveta.

Primere raziskav, ki obravnavajo SN v proizvodni domeni, lahko najdemo v delih (Škulj, Vrabič, and Butala 2014), (Putnik et al. 2015), (Kaplan and Haenlein 2010), (Mourtzis, Doukas, and Milas 2016).

### 2.1.3 Komunikacijske tehnologije

Komunikacijske tehnologije (ang. *Communication Technologies* – CT) v industrijskih sistemih imajo nalogo prenosa podatkov med posameznimi distribuiranimi elementi. Generalno temelji ta prenos na serijski (po standardih RS232, RS422 in RS455) in paralelni komunikaciji (po standardu IEEE488).

Danes se veliko uporabljajo standardi *Fieldbus*, kot hrbtenica distribuiranega sistema ter *Ethernet*, kot naslednik *Fieldbusa*. Le-te omogočajo povezovanje večjega števila naprav v skupni komunikacijski medij in so po navadi manjšega obsega in specializirane za hiter prenos diskretnih informacij ter se uporabljajo na nivoju naprav. Le-ta temelji na protokolih: Modbus, ProfiBus, PROFinet ter Ethernet/IP.

Modbus je serijski protokol, ki predstavlja nadgradnjo RS-232 protokola s ciljem rabe za industrijski komunikacijski protokol. Ima vlogo povezovanja računalnika, krmilnika, operaterskih terminalov, senzorjev, aktuatorjev in drugih vhodno/izhodnih naprav.

ProfiBus je standardizirani, odprti komunikacijski sistem za vsa področja rabe v proizvodni in procesni industriji. Temelji na mednarodnih standardih EN50170 in IEC61158. Izmenjava podatkov z



distribuiranimi napravami je ciklična, dočim se dodatne informacije (npr. alarmi ali diagnostični podatki) prenašajo neciklično.

PROFINet je komunikacijski protokol, zasnovan na Ethernetu, ki uporablja standardne mehanizme komunikacije v realnem času. To pomeni, da uporablja standarda TCP/IP in COM/DCOM (ang. *Component Object Model / Distributed Component Object Model*). Prednosti rabe PROFINet protokola je v tem, da omogoča komunikacijo in kompatibilnost s ProfiBus protokolom.

Za povezovanje pametnih senzorjev s ciljem zajemanja večje količine podatkov iz fizičnega okolja v uporabi so t. i. *brezžična omrežja*, kot so: 1) mreže za nadomestitev vodnika za periferne naprave (Bluetooth, ZigBee, RFID ipd.), 2) brezžična razširitev ožičenega omrežja (IEEE 802.11x – WiFi) (Hiertz et al. 2010) ter 3) brezžična senzorska omrežja (ang. *Wireless Sensor Networks - WSN*).

Za komunikacijo v realnem času predstavlja M2M komunikacija hrbtenico, ki zagotavlja sredstva za prenos podatkov (Verma et al. 2016). Komunikacijo M2M razumemo kot vsakršno komunikacijo med napravami, ki so med seboj žično ali brezžično povezane. Ta komunikacija podpira sodelovalne odločitve brez človekovega posredovanja (Wan et al. 2013). Pomembnost komunikacije M2M v proizvodni domeni je poudarjena v delih (Kim et al. 2009), (Putnik et al. 2013), (Gao et al. 2015).

#### **2.1.4 Računalniški oblak**

Računalniški oblaki so nova tehnologija, ki je konceptualno že davno domišljena, vendar prihaja v širšo rabo šele v zadnjih letih (Caseres et al. 2010), Slika 2.5. Kolaboracija, IoT in »računalniški oblak« (ang. *Cloud Computing – CC*) so pri avtorjih (Bughin, Chui, and Clouds Manyika 2010) spoznani kot ključni členi, ki bodo omogočili razvoj novih oblik podjetij širom po svetu.

Velika večina raziskovalcev, med drugim (Wang and von Laszewski 2008), računalniški oblak definirajo na naslednji način:

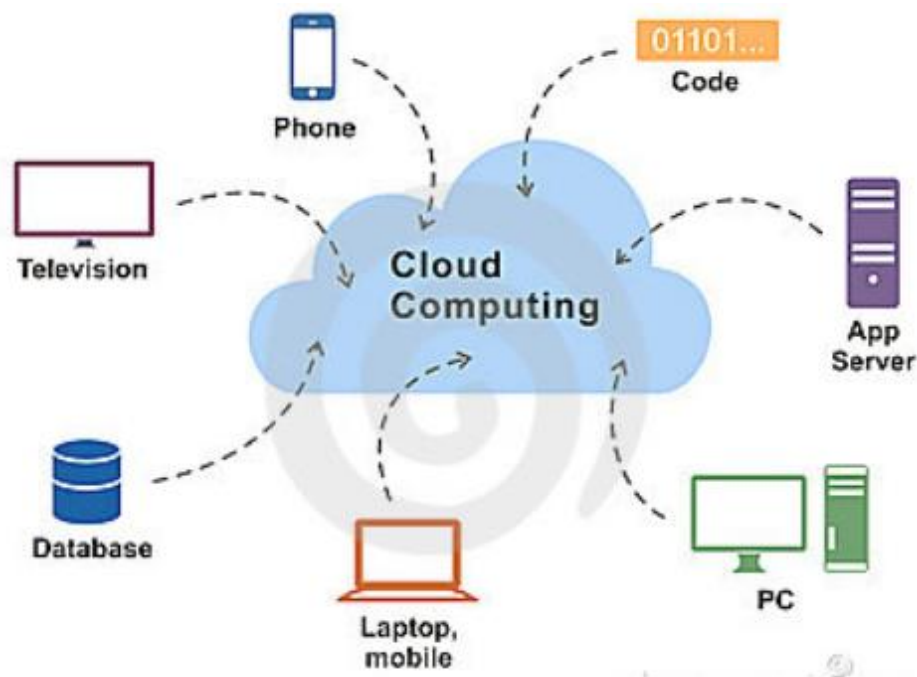
*Računalniški oblak je množica mrežnih storitev, ki so namenjene ponudbi raznih računalniških servisov (tipa shranjevanja digitalnih podatkov ali izvajanja programskih rešitev).*

Ponujanje teh uslug se odlikuje: s samopostrežbo in na zahtevo (ang. *on-demand self-service*); z dostopom prek omrežja (ang. *network access*); z virtualizacijo virov (ang. *resource virtualization*); s hitro elastičnostjo (ang. *rapid elasticity*); z obračunom glede na porabo (ang. *pay as you go*).

Proizvajanje v oblaku je opredeljeno kot na naročnika osredotočen model, ki izkorišča deljen dostop do različnih proizvodnih sredstev na zahtevo. S pridobljenimi proizvodnimi sredstvi se ustvarijočasne proizvodne linije z možnostjo spreminjanja, ki imajo višji izkoristek, zmanjšan strošek obstoja izdelka in omogočajo optimalno razpolaganje s sredstvi glede na spreminjajoče zahteve naročnikov (Wu et al. 2013). Sistem proizvodnje, zasnovane na oblaku, izvajajo trije ključni akterji: ponudniki storitev, operater oblaka in uporabniki storitev (Wu et al. 2012).

Osnovna lastnost proizvodnje v oblaku je omogočanje dinamičnega strukturiranja proizvodnje na osnovi virtualnih proizvodnih objektov. Virtualni proizvodni objekt predstavlja realni objekt v mrežnem okolju in omogoča vpogled v njegove funkcionalne in poslovne lastnosti. Na podlagi pridobljenih informacij s strani virtualnih objektov je nato mogoče izvesti proces strukturiranja proizvodnje (Škulj 2016).

**Slika 2.5.** Računalniški oblak (Suthar 2013)



Referenčna arhitektura računalniškega oblaka in proizvodnega sistema baziranega na proizvodnji v oblaku, je prikazana v (Xu 2012), decentralizirana mrežna arhitektura za proizvodnjo zasnovano na oblaku je podana v (Škulj et al. 2015), medtem ko so možnosti rabe med ostalim obravnavane v delih (Wei and Liu 2015), (Lin and Chong 2015).

### 2.1.5 Agenti in večagentni sistemi

Za implementacijo naprednih konceptov distribuiranih proizvodnih sistemov predstavljajo agenti in večagentni sistemi najnaravnejši in najbolj dosleden pristop. Uporabi agentskih in večagentnih struktur v distribuiranih okoljih omogoča uresničitev novih konceptov proizvodnih sistemov. V nadaljevanju tega poglavja bo na kratko definiran pojem agenta in agentskih struktur, njihov nastanek, lastnosti, možnosti in omejitve v tehničnem in tehnološkem smislu.

Z razvojem programske opreme, v drugi polovici prejšnjega stoletja, so se pojavile nove samostojne discipline, kot so umetna inteligenca (Russel and Norving 1995), objektno programiranje (Agha, Wegner, and Yonezawa 1993) in človek-računalnik vmesnik (ang. *Human Computer Interface – HCI*) (Maes 1994). Tekom devetdesetih let prejšnjega stoletja prihaja do integracije navedenih disciplin, s

ciljem da bi se ustvarili temeljni elementi za razvoj agentskih tehnologij (Jennings, Sycara, and Georgeff 1998). Danes obstaja ne malo število definicij, katere opisujejo agente in agentske strukture.

V nadaljevanju so prikazane najpogosteje citirane definicije agentov:

»...agent je računalniški (ali pogosteje programski) sistem, ki zadovoljuje naslednje pogoje, (Wooldridge and Jennings 1995):

- *avtonomijo* – ko agenti delujejo brez neposrednega poseganja ljudi ali drugih sistemov in imajo določen nadzor nad akcijami in svojim notranjim stanjem;
- *komunikacijo* – kadar so agenti v interakciji z drugimi agenti (in po možnosti z ljudmi) s pomočjo agentskega komunikacijskega jezika;
- *reakcijo* – takrat ko agenti občutijo svoje okolje (ki je lahko fizični svet, uporabniki skozi koriščenje uporabniškega vmesnika, drugi agenti, kibernetško okolje, internet, ali kombinacija vsega navedenega) in v realnem času odgovarjajo na spremembe, ki se pojavijo;
- *inicijativo* – kadar se agenti ne odzivajo zgolj na okolico, pač pa so v stanju, da demonstrirajo vedenje, inicirano s predhodno determiniranim ciljem.

»... so programske entitete ki izvršujejo določeno množico operacij v korist uporabnikov ali drugega programa z določeno stopnjo neodvisnosti, za kar uporabljajo določeno znanje ali reprezentacijo uporabnikovih želja ali ciljev. Vsakega agenta, torej, karakterizirajo njegova avtonomija in inteligenca. Avtonomija je možnost samostojnega delovanja agenta in se lahko meri preko njegove interakcije z drugimi entitetami. Inteligenca je stopnja razumevanja in učenja« (Knapik and Johnson 1998).

V članku (Sluga and Butala 1998) avtorja definirata štiri temeljne funkcijske elemente agenta: 1) perceptor, 2) evaluator, 3) efektor, in 4) mehanizem sklepanja. Temeljne karakteristike agentov, kot so: avtonomija, kooperativnost, adaptivnost in mobilnost, so definirane v delu (Sluga, Butala, and Bervar 1998).

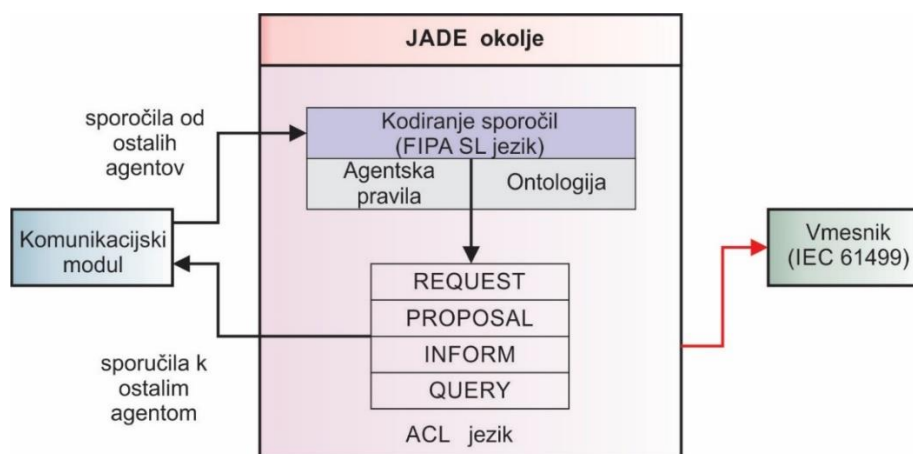
FIPA ponuja širok spekter specifikacij, ki definirajo mnoge aspekte agentske tehnologije: od arhitekture, komunikacije, hranjenja podatkov, informacij in znanja, izmenjava sporočil, prikazovanja sporočil in številne druge standarde, vezane za agente in agentske tehnologije.

Generična struktura agenta v JADE okolju je prikazana na Sliki 2.6.

Agentje potrebujejo programsko okolje, znotraj katerega bodo oblikovani in znotraj katerega bodo realizirali naloge, kakor tudi storitve, katere bodo agentje koristili za pristop do virov, bodisi za uresničitev kompleksnih algoritmov (d'Inverno and Luck 1997). Do danes je bilo razvito veliko število agentskih okolij, izmed katerih so najznačilnejša agentska okolja JAF (ang. *Java Agent Framework*), JAT (ang. *Java Agent Template*) in JADE (ang. *Java Agent DEvelopment framework*) (Bellifemine, Poggi, and

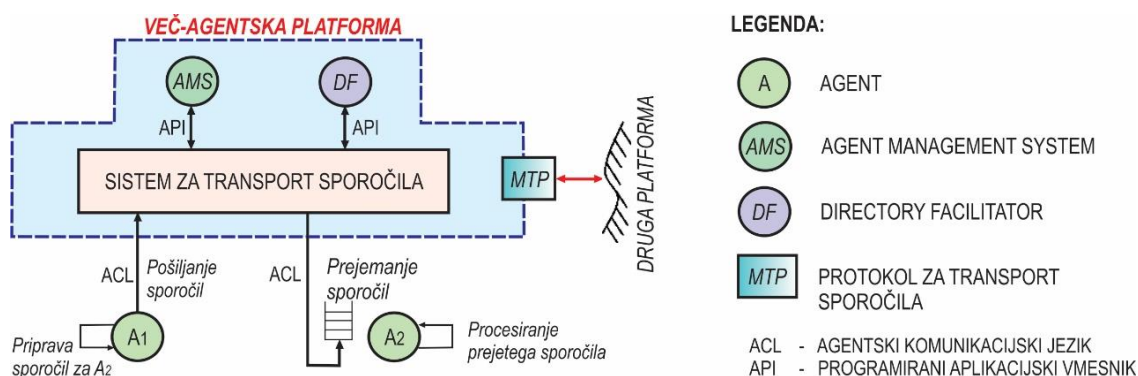
Rimassa 1999). Sodelovanje med heterogenimi agentskimi okolji definirajo standardi priloženi s strani neprofitne organizacije FIPA<sup>3</sup> (FIPA 2014).

Slika 2.6. Generična struktura agenta (Wooldridge and Jennings 1995)



Agentsko okolje omogoča izmenjavo sporočil med agentih, mobilnost agentov in zaščito agenta od neželenih efektov (neavtoriziran pristop do agentov in servisov, zaščita od virusnih agentov ipd.). To pomeni, da agenti ne komunicirajo direktno, ampak se sporočila pošiljajo do agentskega okolja. Agentsko okolje vsebuje mehanizme za iskanje ustreznega agenta, glej Sliko 2.7.

Slika 2.7. Med agentska komunikacija po FIPA standardu (Wooldridge and Jennings 1995)



Agent deluje v okolju ki vključuje tudi druge agente. Takšna skupnost interaktivnih agentov, kot celota, deluje kot več-agentski sistem (ang. *Multi-Agent System – MAS*) (Wooldridge and Jennings 1995). MAS je oblikovan kot mreža agentov kateri vstopajo v interakcije in medsebojno komunicirajo, ter se lahko na podlagi tega razumejo kot sistemi, ki so istočasno asinhroni, stohastični in distribuirani. Za uresničitev več-agentskih sistemov je potrebna prisotnost več-agentske platforme (ang. *Multi-Agent Platform – MAP*) v agentskem okolju kot infrastruktura za implementacijo MAS. Primer takšne platforme je JADE platforma.

<sup>3</sup> FIPA - Foundation for Intelligent Physical Agents



Agenti v večagentnem sistemu se lahko prek svojega protokola za transport sporočila MTP (ang. *Message Transport Protocol* – MTP) povezujejo z bazo podatkov in znanja (D&K bazo) na temeljih DKBP protokola (ang. *Data & Knowledge Base Protocol* – DKBP).

Poleg agentskega okolja, ki upravlja življenjskim ciklusom agenta, agenti potrebujejo tudi servise, ki jih lahko koristi za pristop do resursov, kot tudi za realizacijo kompleksnih algoritmov.

Po (Hanisch and Vyatkin 2004) standard IEC 61499 uvaja napredne programske tehnologije, kot so enkapsulacija funkcionalnosti, oblikovanje, ki temelji na komponentah, dogodkovno vodena izvedba in distributivnost. Osnovna programska enota standarda IEC 61499 je funkcijski blok. Funkcijski bloki omogočajo prehod iz centraliziranega v distribuirani pristop upravljanju in krmiljenju proizvodnih sistema.

V projektu holonskih proizvodnih sistemov (Christensen 2003) Christensen je predstavil način povezovanja funkcijskih blokov, ki so izvedeni v soglasju s standardom IEC 61499 in opravljajo funkcijo krmiljenja na najnižjem nivoju, z več-agentnim tehnologijami katere definira FIPA standard, ki opravljajo koordinacijske in sodelujoče funkcije.

Povezovanje večagentnega sistema s standardnim komunikacijskim funkcijskim blokom dvosmernega podatkovnega prenosa *CLIENT/SERVER*, ki se temelji na komunikacijskem protokolu UDP (ang. *User Datagram Protocol*), omogoča dvosmerno komunikacijo v realnem času med operativnimi in izvršnimi funkcijami delovnega sistema. To pomeni, da bodo proizvodni parametri uporabljeni v realnem času v adaptivnem procesu odločanja, kar zagotavlja obratovanje strojev v optimalnih mejah. Povezovanje agentov z PLC je prikazano na Sliki 2.8.

Agenti in večagentni sistemi so uporabljeni za integracijo delovnih, proizvodnih in poslovnih sistemov, sodelovanje na poslovnem nivoju, za načrtovanje procesov, razporejanje in krmiljenje. Namen agentske tehnologije je uvajanje karakteristik avtonomnosti, fleksibilnosti, kooperativnosti, modularnosti, adaptivnosti, samoorganizacije in agilnosti na področja proizvodnih sistemov (Maturana et al. 2004).

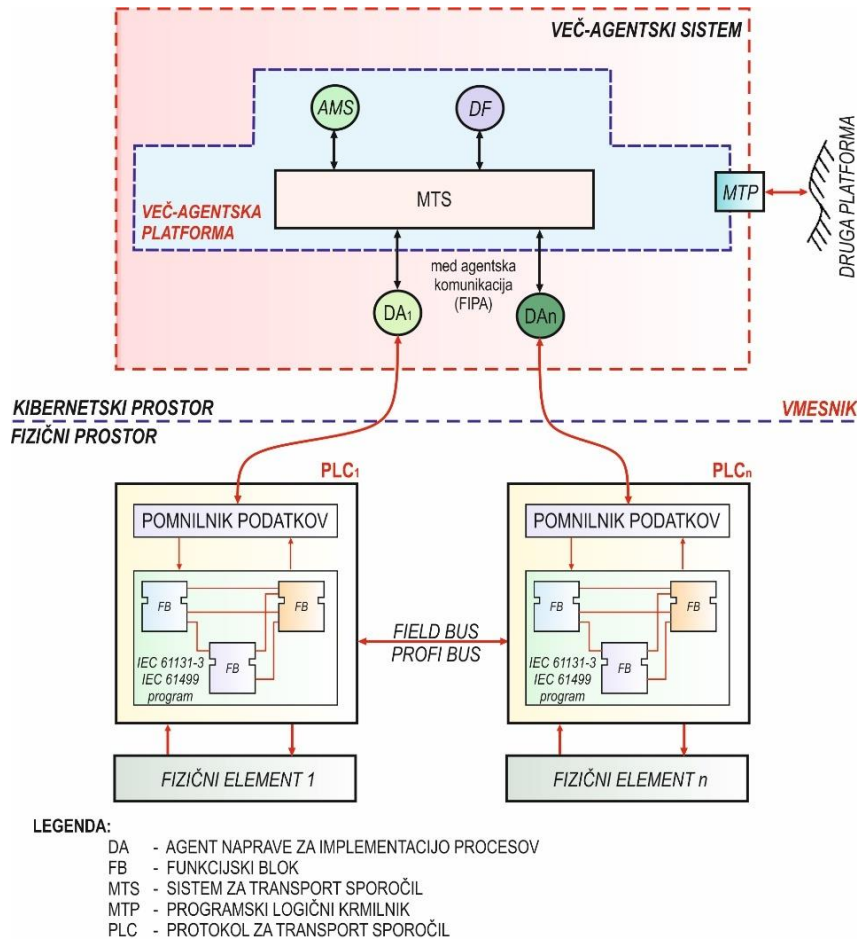
Shaw (Shaw 1988) je med prvimi uporabil agente za organizacijo proizvodnje in krmiljenje proizvodnega sistema. Heterarhični pristop krmiljenja proizvodne celice, v kateri agenti predstavljajo fizična delovna sredstva, proizvode in operaterje sta prva uvedla Duffie in Piper v svojem delu (Duffie and Piper 1986).

Parunak, Baker in Clark (Parunak, Baker, and Clark 1997) so razvili agentsko arhitekturo AARIA (ang. *Autonomous Agent at Rock Island Arsenal*), ki je rabljena za dinamično planiranje proizvodnje, dinamično preoblikovanje in krmiljenje splošnih proizvodnih sistemov s ciljem doseganja zastavljenih terminskih planov.

Shen in soavtorji podajajo v delu (Shen, Wang, and Hao 2006) pregled stanja s področja rabe agentskih tehnologij za distribuirano planiranje procesov in razporejanje v proizvodni domeni. Komunikacija med agenti in WS je predstavljena v delih (Bellifemine, Caire, and Greenwood 2007), (Leitão and Karnouskos

2015). Nekateri primeri in opisi hevrističnih algoritmov so podani v delu (Buddhakulsomsiri and Kim 2007).

**Slika 2.8.** Kombinacija agentov z IEC 61131-3 / 61499 programa PLC, predelano po (Leitão and Karnouskos 2015)



## 2.1 Povzetek

V tem poglavju so izpostavljene in opisane omogočitvene tehnologije za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje novih konceptov proizvodnih sistemov kot so pametni proizvodni sistemi Industrije 4.0 in novi koncepti proizvodnih sistemov za *Industrijo 5.0*.

V nadaljevanju so predstavljeni koncepti naprednih proizvodnih sistemov skozi razvoj industrijskih revolucij in izpostavljeni teoretični vidiki za prehod iz Industrije 4.0 v novo industrijsko revolucijo – *Industrijo 5.0*.

### 3 INDUSTRIJSKE REVOLUCIJE, PROIZVODNE PARADIGME IN SISTEMI SKOZI ČAS

*»Živite, kot da bi jutri umrli.  
Naučite se, kot da bi večno živeli.«*

*Mahatma Gandhi*

Pojava računalnikov in hitri razvoj tehnike v zadnji štiridesetih letih sta vplivala na največje tehnično-tehnološke spremembe v človekovi zgodovini. Globalna družbeno-ekonomska in tehnično-tehnološka dogajanja v svetu so se posledično odrazila na strukturne spremembe v ekonomskih sistemih, konfiguracijah podjetij, njihovih medsebojnih odnosih, individualnem in delovnem okolju, kakor tudi v načinu komunikacije. Pod pritiskom takšne vse obsegajoče globalizacije na prehodu dveh stoletij, prihaja v industrijski proizvodnji do korenitih sprememb. Proizvodna podjetja opuščajo klasično proizvodno filozofijo (Taylor 1911) in se obračajo k novi proizvodni filozofiji zasnovani na zahtevah globalnega tržišča. Nova proizvodna filozofija je rezultat zahtev tržišča in tudi znanstveno-tehnološkega napredka. Obračanje proizvodnih podjetij k principom nove proizvodne filozofije ustvarja osnovo za razvoj sodobne industrijske proizvodnje.

Sodobna industrijska proizvodnja se odvija v okolju nenehnih sprememb, ob prilagajanju novim okoliščinam in zahtevam po spremembi strukture proizvodnje, da bi ugodila potrebam tržišča in pospešenemu tehnološkemu razvoju. Takšna proizvodnja mora biti del nove proizvodne filozofije, katera temelji na znanju, novih proizvodnih tehnikah in tehnologijah, še posebej pa na informacijskih tehnologijah v sleherni fazi priprave in izvedbe procesa proizvodnje. Turbulentno stanje tržišča, ki je nezanesljivo in dinamično, zahteva proizvodne sisteme, ki bodo odgovarjali spremenljivosti in nestalnosti velikega števila dejavnikov, kot so kakovost, količina, dobavni rok, asortima, cene, konkurenca in podobno (Hozdić 2020b).

V nadaljevanju je definiran proizvodni sistem in njegove ključne lastnosti; prikazane so industrijske revolucije skozi čas in opredeljena evolutivna pot razvoja proizvodnih paradigem in njihovih pripadajočih proizvodnih sistemov.

### 3.1 Proizvodni sistem

Proizvodni sistem je kompleksna sistemska struktura, katere funkcija je transformacija determiniranih vhodov v želene izhode. Osnovna funkcija proizvodnje je ustvarjanje nove vrednosti (Ueda et al. 2009). Pri tem je cilj proizvodnje novih proizvodov in storitev. Za doseganje ciljev je proizvodne sisteme neizogibno potrebno ustrezno modelirati, strukturirati, upravljati in krmiliti (Peklenik 1991). Proizvodne sisteme je treba obravnavati kot strukturo transformacijskih podsistemov, ki se med seboj ustrezno povezujejo v procesno/vrednostne verige. Le-ti lahko vključujejo podsisteme za transformacijo materiala; podsisteme za transformacijo zahtev kupcev; podsisteme za znanje, učenje in izboljšave; podsisteme za organizacijski razvoj (Compton et al. 1992).

Proizvodne sisteme je kot kibernetske sisteme modeliral Peklenik (Peklenik 1988), (Peklenik 1991), (Peklenik 1995), (Peklenik 1998). Pri tem je uvedel tri nivoje: nivo odločanja, vodstveni nivo in proizvodni nivo.

Prvi nivo je nivo odločanja na katerem lastnik podjetja oblikuje proizvodno politiko in strategijo. Definira vrsto proizvodov in količino proizvodov, ki se bodo proizvajali, definira razvojno politiko in politiko trženja, vodi finančno strategijo podjetja, kreira investicijsko politiko in podobno. Drugi je vodstveni nivo, ki povezuje prvi in tretji nivo s ciljem, da realizira strateške opredelitve lastnika in upravlja poslovne funkcije. Na tem nivoju so poleg funkcije upravljanja še funkcije razvoja, prodaje, upravljanja s sredstvi in trženja. Tretji, proizvodni nivo, je sestavljen iz večjega števila podsistemov potrebnih za realizacijo osnovne funkcije proizvodnega sistema, to je načrtovanja, razvoja in izdelave proizvodov in storitev. Na tem nivoju se nahajajo funkcije kot so konstruiranje in modeliranje proizvodov, načrtovanje tehnologije ter planiranje in krmiljenje proizvodnje, izdelava komponent, montaža proizvodov, kontrola kvalitete, testiranje proizvodov in najrazličnejše logistične funkcije (oskrba, skladiščenje, transport, odprema, itd.). Vse trije nivoji so medsebojno povezani preko integriranega informacijskega sistema s sistemi baz podatkov in znanja.

Proizvodni sistem je definiran kot (Peklenik 1991):

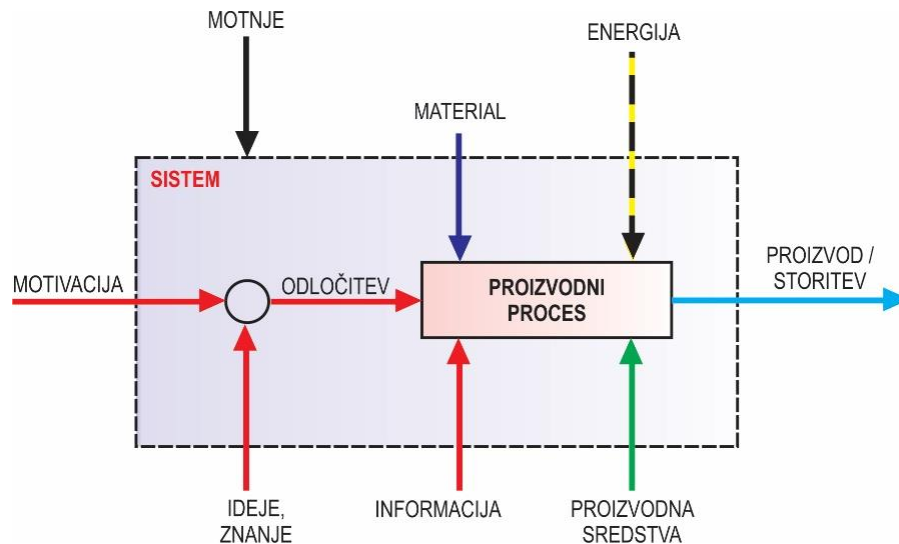
*»kompleksni tehnološko-ekonomsko-družbeni sistem, ki obsega subjekte – ljudi, znanje, proizvodne procese in pripadajoče stroje in naprave za izvajanje procesa s ciljem transformacije materialov, energije, informacij in znanja v proizvode in storitve, ki imajo uporabno in tržno vrednost, ob stalnem dinamičnem vplivu motenj, omejitev in ciljev, ki delujejo iz okolja. Proizvodni proces se izvaja ob interaktivnem delovanju materialnih (fizičnih) elementov kot so obdelovalni stroji, obdelovanci, orodja, transportna sredstva itn., kot tudi nematerialnih elementov, kot so znanje, informacije, informacijski tokovi ter tudi organizacijske in upravljalne strukture«.*

Celoten proizvodni proces sestavlja več delovnih procesov, pri katerih so udeležene naprave, na katerih se tekom delovnega procesa izvede množica operacij. Delovni procesi potekajo zaporedno in/ali vzporedno ter kot celota predstavljajo izvedbo poslovno-proizvodnih procesov.



Prikaz proizvodnega sistema in njegovih glavnih elementov, ki ga je definiral Peklenik (Peklenik 1991), je podan na Sliki 3.1.

**Slika 3.1.** Elementi proizvodnega sistema (Peklenik 1988)



Proizvodni in delovni procesi se izvajajo v okviru notranjih in zunanjih omejitev, kot so prostorske, časovne, finančne in materialne omejitve, omejitve kapacitet človeških in drugih virov, omejitve iz zakonodaje in normativov ipd. Notranje in zunanje omejitve se prenašajo na proizvodni sistem v obliki motenj.

Proizvodno okolje predstavlja okolje v katerem deluje proizvodni sistem. Večina današnjih delovnih sistemov sloni na Taylorjevi paradigmi, ki predpostavlja deterministično in statično proizvodno okolje. Te predpostavke so veljale nekoč. Danes, proizvodno okolje postaja vse bolj dinamično, stohastično in pod vplivom procesa globalizacije vse bolj globalno. Dinamično okolje ter tehnološko-ekonomsko-sociološka narava proizvodnih sistemov v veliki meri vpliva na rast kompleksnosti v proizvodnem sistemu (Peklenik 1995), (Suh, 2005), (Vrabič and Butala 2012).

Tradicionalne proizvodne sisteme je potrebno, zaradi naraščajoče kompleksnosti, neizogibno nadomestiti z dinamičnimi in integriranimi koncepti s prepletenimi in soodvisnimi funkcijami. Takšne zahteve, iz vidika kompleksnosti, odpirajo prostor za strukturiranje novih konceptov naprednih proizvodnih sistemov.

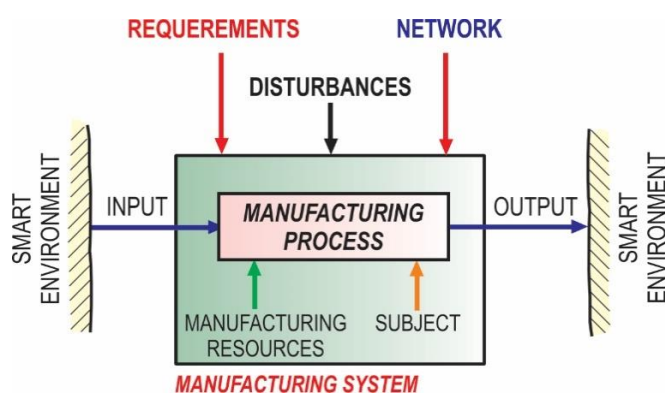
Napredni proizvodni sistemi zajemajo sisteme za proizvodnjo in pripadajoče usluge, procese, naprave in opremo, katera vključuje avtomatizacijo, robotiko, merilne sisteme, napredno procesiranje informacij, obdelavo signala in vodenje proizvodnje z visoko sofisticiranimi informacijskimi in komunikacijskimi sistemi<sup>4</sup>. Generična struktura naprednih proizvodnih sistemov je prikazana na Sliki 3.2.

<sup>4</sup> High Level Group, „High Level Group on Key Enabling Technologies“, 2010

Glavne značilnosti naprednih proizvodnih sistemov so (Žapčević 2013):

- pomembno povečana učinkovitost dela,
- manjši stroški in uporaba materialov ter energije,
- izboljšana operativna natančnost,
- izboljšan ekološki vidik skozi zmanjšanje količine odpadkov in onesnaževanja okolja,
- vključitev uporabe različnih kompozitnih materialov,
- integracija informacijske tehnologije in znanja v delovne in odločitvene procese s ciljem izboljšave poslovnih, proizvodnih in delovnih procesov.

Slika 3.2. Generična struktura naprednih proizvodnih sistemov (Hozdić 2020c)

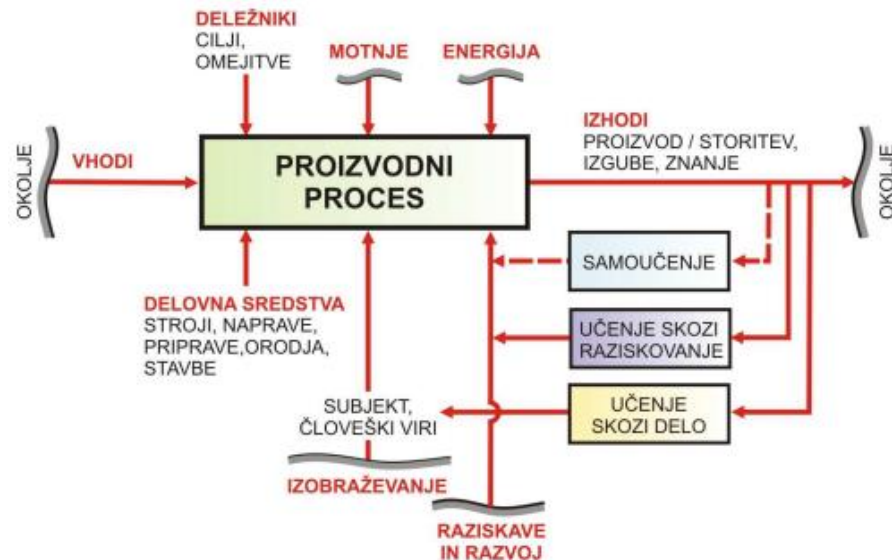


Samoučeči proizvodni sistem, ki predstavlja nadgradnjo zgoraj definiranega proizvodnega sistema, in sicer v smislu vpeljave nove funkcionalnosti v sistem, to je samoučenja na osnovi proizvodnih podatkov, ki se zbirajo in shranjujejo med operiranjem sistema. Na Sliki 3.3 je prikazana struktura proizvodnega sistema s posebnim poudarkom na znanju in učenju. Znanje vstopa v proizvodni sistem skozi dva komunikacijska kanala in sicer kot zapisano (eksplicitno) zanje ali pa preko zaposlenih kot skrito (tacitno) znanje. Pri tem znanje izvira iz treh virov (Žapčević 2013):

- znanje, ki ga prinašajo ljudje iz svojega izobraževanja. To je eksplicitno znanje, ki ga zaposleni pridobijo skozi izobraževanje v šolah in na fakultetah. To znanje je tudi zapisano na različnih medijih (papirnih in elektronskih) v obliki knjig, priročnikov, katalogov ipd., in zato spada v kategorijo eksplicitnega znanja.
- novo znanje, ki se pridobi z raziskavami in razvojem; pri tem gre lahko za lastne raziskave, ali pa za raziskave izvedene s strani raziskovalnih institucij in univerz. Tudi to znanje je eksplicitno zapisano na papirju ali elektronskem mediju v obliki raziskovalnih študij, poročil, znanstvenih in strokovnih člankov, zapisov v bazah podatkov in znanj ipd., ali pa posredovano na konferencah, seminarjih, posvetih in podobnih dogodkih za deseminacijo znanja.
- znanje, ki se pridobi z učenjem v okviru dela (angl. *learning-by-doing*). V tem primeru gre za t.i. skrito oz. tacitno znanje, ki ga pridobijo posamezniki preko delovnih izkušenj in ga uporabljajo pri izvajanju procesov. To znanje se z delom stalno dopolnjuje.

Navedeni trije viri znanja so v obstoječih proizvodnih sistemih povezani v dve učni zanki, kot je prikazano na [Sliki 3.3](#).

**Slika 3.3.** *Struktura samoučnega proizvodnega sistema (Žapčević 2013)*



V zunanji učni zanki je povezano znanje subjektov v proizvodnji, to je zaposlenih, ki je pridobljeno z izobraževanjem z znanjem pridobljenim na podlagi delovnih izkušenj vezanih na operiranje v proizvodnem sistemu. Skozi to zanko torej zaposleni nadgrajujejo svoje eksplicitno znanje s skritim znanjem in tako obogateno znanje ponovno vnašajo v proizvodni sistem. S tem se ustvarja spirala znanja, ki v vsakem novem krogu povečuje skupno znanje in ki vodi izkušene zaposlene do modrosti. Tacitnega znanja, ki ga dobijo skozi delovne izkušnje, ljudje običajno za znajo artikulirati, lahko pa ga prenašajo na druge skozi praktično poučevanje oz. trening ([Žapčević 2013](#)).

Novo znanje, ki izhaja iz rezultatov znanstveno-raziskovalnega dela in tehnološkega razvoja in je eksplicitno zapisano na enem od obstoječih uveljavljenih medijev, se lahko skozi drugo učno zanko dopolnjuje z znanjem, ki izhaja iz konkretnih raziskav problematike samega proizvodnega procesa. Tudi tu gre za eksplicitno znanje, ki je običajno pridobljeno z eksperimentiranjem in pogosto izraženo v obliki tabel, formul, diagramov in pravil. Torej se tudi skozi to zanko ustvarja novo eksplicitno znanje, ki se ponovno vnaša v proizvodni sistem. S tem je omogočena evolucija proizvodnega sistema ([Žapčević 2013](#)).

### **3.1.1 Kompleksnost kot ključna lastnost naprednih proizvodnih sistemov**

Iz definicije naprednih proizvodnih sistemov je razvidno, da napredni proizvodni sistemi ustvarjajo množico elementov, ki so med seboj povezani na različnih funkcionalnih nivojih, kar jih po definiciji uvršča v kompleksne sisteme.

Kompleksen sistem je vsak sistem z vsebovano množico elementov, razvrščenih v strukturah, ki se pojavljajo na večjih skalah ([Kirshbaum 2011](#)). Imajo veliko avtonomnih delov, ki so se sposobni odzvati

na pobude iz okolja ter na samo-vzdrževalne zahteve preko različnih internih povratnih zank (Lukas 1999). Ko prehajajo skozi procese sprememb, jih ne moremo opisati zgolj z enim pravilom niti reducirati na zgolj en nivo obrazložitve. Ti različni nivoji pogosto vsebujejo značilnosti, katerih porajajoče se lastnosti ne moremo predvideti iz njihove trenutne specifikacije. Ključ teh sistemov je njihova adaptacija s ciljem izboljšanja delovanja njihove funkcije. V članku (Iwata et al. 1993) so identificirani trije nivoji adaptacije: 1) optimizacija, 2) stabilizacija in 3) samo-organizacija.

Prilagoditev elementov kompleksnega sistema se kaže skozi spremembo pravil, glede na katere elementi delujejo. Sleherni posamezni element kompleksnega sistema poseduje svoja pravila obnašanja, ki mu zagotavljajo avtonomnost. Tako za odločanje lahko uporabi lastna interna pravila prehodov, ki temeljijo na trenutno zaznanem stanju sistema, lastnem stanju ter zgodovini. Avtonomni elementi lahko poleg tega na osnovi naučenega še samostojno spreminjajo pravila delovanja. Ta pojav opredelimo kot samo-organizacija (Zupančič 2012).

Kompleksnost je svojstvo prepletenih sistemov, sestavljenih iz večjega števila elementov, ki so v medsebojni interakciji. Skozi svojo teorijo kompleksnosti, Suh (Suh, 2005) definira kompleksnost kot stopnjo nedoločenosti pri doseganju funkcionalnih zahtev v razvoju specifičnega sistema in na podlagi takšne definicije identificira štiri vrste kompleksnosti: 1) realno časovno neodvisna kompleksnost, 2) imaginarna časovno neodvisna kompleksnost, 3) časovno odvisna kombinatorična kompleksnost in 4) časovno odvisna periodična kompleksnost.

V članku (Peklenik 1995) Peklenik ugotavlja, da je strukturiranje in krmiljenje proizvodnih delovnih sistemov zelo težavno, ker gre za kompleksne sisteme brez formalnega matematičnega opisa njihovih prenosnih lastnosti. Pri tem opredeli dva tipa kompleksnosti: 1) strukturno kompleksnost (načrtovanje struktur), in 2) operacijsko kompleksnost (krmiljenje delovanja).

Pri strukturni kompleksnosti je razvidno, da dekompozicija kompleksnega sistema v set manj kompleksnih podsistemov zmanjša celotno (skupno) kompleksnost. S ponavljanjem postopka dekompozicije se kompleksnost zmanjšuje, dokler so novonastali pod sistemi oziroma elementi še sposobni samostojne realizacije posameznih funkcij. Nadaljnja dekompozicija ne zmanjšuje kompleksnosti posameznih elementov, ampak se celotna kompleksnost zopet povečuje. Do tega pride zaradi vse večjega števila novo nastajajočih elementov, povezav med elementi, kar je posledica njihove individualne nezadostnosti realizacije posamezne funkcije v celoti. Dekompozicija kompleksnih sistemov je torej smiselna do tistega nivoja, kje je kompleksnost najmanjša.

Operacijska kompleksnost se nanaša na kompleksnost krmiljenja. Krmiljenje proizvodnih sistemov kot celote po navadi izvaja človek (*Subjekt*), zato se v tem primeru govori o odločanju. *Subjekt* zaradi nepopolnih informacij o stanjih v proizvodnem sistemu ni sposoben racionalno odločati, kar povečuje operacijsko kompleksnost. Ta obravnava stanja v proizvodnem sistemu, medtem ko strukturna kompleksnost obravnava povezave in relacije med gradniki sistema.

Poleg kompleksnosti, proizvodne sisteme karakterizirajo tudi druge lastnosti, kot so fleksibilnost, rekonfigurabilnost, modularnost, integrabilnost, razširljivost, spremenljivost, avtonomnost, prilagodljivost, robustnost, agilnost, odpornost, inovativnost, virtualnost in podobno.

S stališča sodobnega razumevanja dinamike sistema je prikazano, da ima vsaka vrednost neke lastnosti, zgolj omejeno veljavo, saj je del bolj kompleksnega okolja z evolucijskimi spremembami v toku časa. Zaradi procesov staranja, adaptacije in evolucije proizvodnega sistema ne bomo zanesljivo vedeli, ali imamo v obravnavi še popolnoma enak sistem. Ta bo lahko zaradi vplivov medijev ali lastnih interesov v vmesnem času spremenil svoje karakteristike in s tem svoje obnašanje. Na splošno, se kompleksen sistem hitreje stara.

## 3.2 Industrijske revolucije

Industrijske revolucije označujejo radikalnejše spremembe v razvoju industrije. Te spremembe so okarakterizirane z določenimi dosežki, ki so vplivali na smer razvoja celotne industrije kot tudi na nove sistemske rešitve strukturiranja proizvodnih sistemov in organizacije dela.

Iz vidika industrijske proizvodnje je prvi pomemben dosežek odkritje parnega stroja<sup>5</sup>, ki je postal vir moči za pogon strojev, s čimer se je odprla pot v mehanizacijo industrijske proizvodnje in gradnjo tovarn. Ta razvoj označujemo kot prvo industrijsko revolucijo. Le-ta je zajela razvoj strojev na osnovi uporabe energije vodne pare. Parni stroj je poganjal druge stroje in omogočal obsežnejšo prostorsko in proizvodno koncentracijo le teh, znotraj ene tovarne in koncentracijo tovarn samih. Prva industrijska revolucija označuje enega od najpomembnejših dogodkov v zgodovini človeške družbe, ki je prinesel obsežne tehnološke in družbene transformacije, glej [Slika 3.4](#).

Razvoj se je nadaljeval v smeri novih odkritij (enosmerni in izmenični električni tok, žarnica, elektrarne, daljnovodi, motorji z notranjim izgorevanjem, telekomunikacije in podobno), ki so se zgodili v drugi polovici 19. stoletja. Vodna para kot vir energije v tovarnah se je nadomestila z elektriko, plinom in nafto. Prve komunikacijske tehnologije so omogočile prenos podatkov na velike razdalje (telegraf) ter komunikacijo v realnem času (telefon), kar je omogočilo ustvarjanje večjega tržišča industrijskih proizvodov in kapitala. Ta razvoj je pripeljal do druge industrijske revolucije, ki jo okarakterizirajo naslednje ekonomske spremembe:

- povečuje se prostorski obseg poslovanja;
- širi se svetovna trgovina; razvije se tehnologija svetovne trgovine s čimer se značilno zmanjšajo stroški in poveča varnost in učinkovitost trgovine;
- razvije se tovarniški sistem proizvodnje na osnovi znanstvenih principov upravljanja (F.W. Taylor);
- razvijejo se principi masovne proizvodnje (H. Ford).

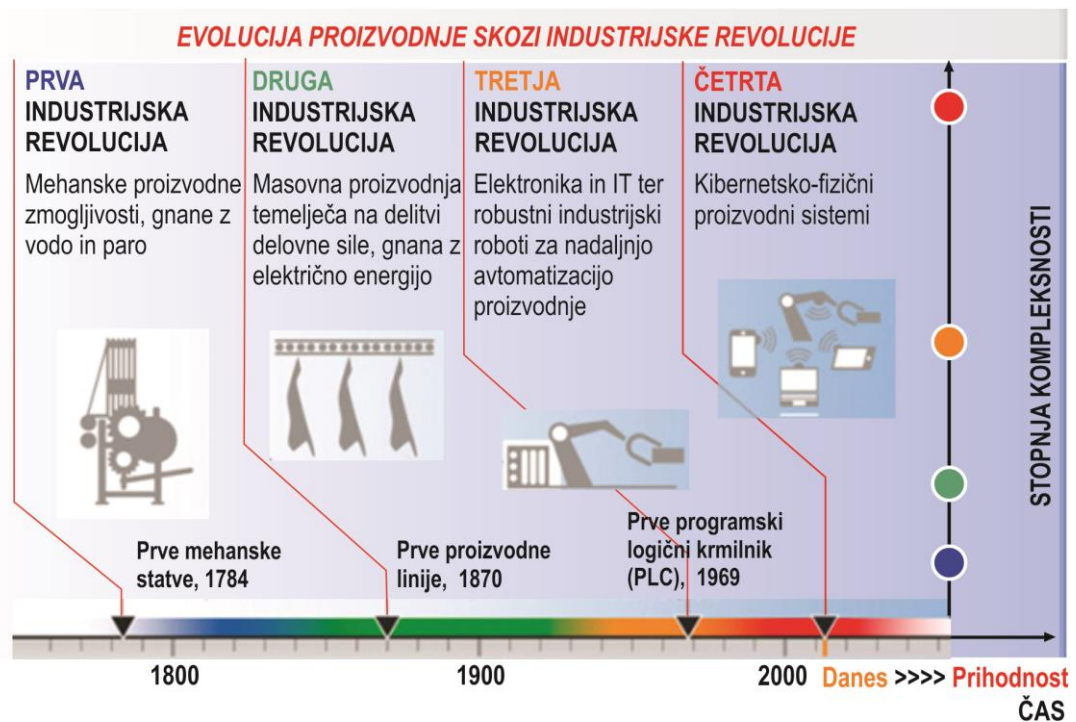
Tretja industrijska revolucija se je začela v šestdesetih letih 20. stoletja. To obdobje označuje pomembne tehnološke dosežke na področju informacijskih in komunikacijskih znanosti, elektronike in računalništva, pa tudi na področju avtomatizacije proizvodnje. Običajno jo imenujemo računalniška ali digitalna revolucija, saj so jo spodbudili razvoj računalnikov in računalniško krmiljenih strojev in

---

<sup>5</sup> Leta 1690 je Denis Papin v članku *Nov način kako dobiti znatne gonilne sile po nizki ceni opisal „prvi stroj, ki lahko s silo ognja dviga vodo“*. Med letoma 1774 in 1781 je James Watt izdelal parni stroj.

industrijskih robotov. Tretja industrijska revolucija je v proizvodnjo vpeljala elektroniko in digitalno tehniko. Temeljna karakteristika tega obdobja je uvajanje fleksibilne proizvodnje na osnovi avtomatizacija in robotizacije.

Slika 3.4. Industrijske revolucije skozi čas (Wahlster 2013)



Četrta generacija industrije oz. Industrija 4.0, predstavlja nadaljevanje in nadgradnjo tretje industrijske revolucije. Izraz Industrija 4.0 so leta 2011 skovali na sejmu v Hannoveru, da bi opisali revolucijo v organizaciji globalnih vrednostnih verig (Schwab 2016).

Terminološko pomeni *Industrija 4.0* horizontalno integracijo pretoka podatkov, informacij in znanja med partnerji, dobavitelji in uporabniki, kot tudi vertikalno integracijo znotraj samih proizvodnih organizacij – od razvoja proizvoda do njegove izdelave, uporabe, storitvene podpore in vse do zaključka življenjskega cikla proizvoda (Westkämper 2014).

Kegermann in ostali avtorji, v delu (Kegermann, Wahlster, and Johannes 2013), navajajo tri cilje Industrije 4.0:

- horizontalna integracija skozi vrednostne mreže,
- digitalni integracijski inženiring od konca do konca (ang. *end-to-end*) vzdolž celotnih vrednostnih verig,
- vertikalna integracija in mrežni proizvodni sistemi.

Paralelno z vse obsegajočim tehnološkim razvojem, predvsem na področju IKT, doživlja industrijska proizvodnja v zadnjih nekaj letih močne in globoke spremembe. Tovarne postajajo odzivnejše na nepredvidljive zunanje vplive; prav tako se morajo proizvodni sistemi prilagajati na notranje



spremembe. Proizvodni sistemi nove generacije se morajo prilagoditi spremembam in zahtevam globalnega trga. Optimizacija delovnega procesa skozi nenehne izboljšave ter pospešeno in pravočasno komunikacijo, je primarni izziv za bodoče proizvodne sisteme (Westkämper 2008).

Z razvojem t.i. »pametnih tovarn« v okviru četrte industrijske revolucije se ustvarja okolje, ki omogoča fizičnim in virtualnim proizvodnim sistemom globalno in prilagodljivo sodelovanje. To omogoča popolno prilagajanje proizvodov po meri kupca in ustvarjanje novih poslovno-proizvodnih modelov (Schwab 2016). Pametna tovarna predstavlja tovarno ljudi in naprav, medsebojno povezanih z namenom realizacije določenih nalog (Lucke, Constantinescu, and Westkämper 2008), (Hozdić, 2015).

Vendar pa četrta industrijska revolucija ne zajema samo pametnih in medsebojno povezanih strojev ter sistemov. Njene razsežnosti so bistveno večje, saj z njo sovpadajo tudi odkritja na drugih področjih, od določanja zaporedja genov do nano-tehnologije in od obnovljivih virov energije do kvantnega računalništva. Zlitje teh tehnologij ter njihova interakcija na fizičnem, digitalnem in biološkem področju je tisto, zaradi česar se četrta industrijska revolucija bistveno razlikuje od prejšnjih. V tej revoluciji se nove tehnologije in široko uporabne inovacije uvajajo bistveno hitreje in obsežneje kot v prejšnjih, ki se v določenih deli sveta še vedno niso povsem zaključile. Poleg hitrosti in obsega je četrta industrijska revolucija edinstvena tudi zaradi vse večjega usklajevanja različnih disciplin in odkritji ter njihove integracije.

Umetna inteligenca ponovno postaja pomembno področje informacijskih znanosti, saj omogoča napredne rešitve – od samovozečih avtomobilov in brezpilotnih letal do virtualnih pomočnikov. Impresivni napredek umetne inteligence spodbujata eksponentna rast računalniških zmogljivosti in razpoložljivost velike količine podatkov. Aplikacije razkrivajo moč enega od podsklopov hitro razvijajočega se področja umetne inteligence ti. *pametnih pomočnikov*. Naprave okoli nas bodo postale vse bolj *pametne* in del našega ekosistema, saj nas bodo poslušale, predvidevale naše potrebe in nam po potrebi pomagale, tudi če jih ne bomo zaprosili za pomoč (Schwab 2016).

Digitalizacija in napredna IKT sta omogočili naglo širitev digitalnih in virtualnih podjetij, kot tudi razvoj globalne in distribuirane proizvodnje. Le-ta je ravno tako pripomogla tudi k razvoju digitalnih in virtualnih tovarn.

### **3.3 Proizvodne paradigme kot proizvodni modeli industrijskih revolucij**

Proizvodna paradigma predstavlja revolucionaren, nov in integriran proizvodni model, ki se razvije kot reakcija na spremembe tržnega in socialnega okolja, dosega pa se s kreiranjem novega tipa proizvodnega sistema (Koren 2010a). Razvoj proizvodnih sistemov skozi proizvodne paradigme je opisan v delih (Koren, Moriwaki, and Van Brussel 1999), (ElMaraghy 2006), (Wiendahl et al. 2007).

Danes lahko identificiramo šest glavnih proizvodnih paradigem, ki so zaznamovale proizvodnjo industrijskih produktov v zadnjih dveh stoletjih:

- obrtniška proizvodnja (ang. *craft production*),
- masovna proizvodnja (ang. *mass production*),
- fleksibilna proizvodnja (ang. *flexible production*)
- proizvodnja masovnega prilagajanja (ang. *mass customization*),
- vsepovsodna proizvodnja (ang. *ubiquitous manufacturing*),
- personalizirana proizvodnja (ang. *mass personalization*),
- socializirana proizvodnja (ang. *social manufacturing*).

Pri obrtniški proizvodnji so se proizvodi izdelovali v majhnih količinah, ročno in po predhodnem naročilu za točno določenega kupca. Pri takšni proizvodnji je bil človek poglavitni element, tako glede oblike proizvoda, kakor tudi glede načina njegove izdelave. Kakovost in ostale karakteristike posameznih proizvodov so določale zahteve posameznega kupca. V članku (Koren 2010a), Koren opisuje značilnosti obrtniške proizvodnje:

- velika raznolikost proizvodov;
- izjemno majhne količine enakih proizvodov;
- tip poslovnega modela je vleči (prodaj, načrtaj, izdelaj);
- stroji so univerzalni, primerni za izvajanje različnih proizvodnih operacij;
- pomemben je človeški faktor, kateri zahteva visoko usposobljene delavce.

Na začetku 20. stoletja pride do pomembnega razvoja tržišča, pri čemer se odpre možnost za proizvodnjo večje količine proizvodov za širšo potrošnjo, po načelu masovne ali serijske proizvodnje. Masovna proizvodnja prinaša prednosti pred obrtniško proizvodnjo zaradi radikalnega dviga produktivnosti in znižanja stroškov na enoto proizvoda. Velika količina proizvedenih proizvodov pokriva stroške vlaganja v opremo, delo s stroji, inženiring in izobraževanje (Tseng and Jiao 2001).

Masovna proizvodnja temelji na potisnem poslovnem modelu<sup>6</sup> (razvij, izdelaj, sestavi, prodaj). Ključna proizvodna tehnologija masovne proizvodnje je Fordova premikajoča montažna linija<sup>7</sup>. Za tak tip proizvodnje so bili razviti namenski proizvodni sistemi, oziroma namenske proizvodne linije (ang. *Dedicated Manufacturing Lines – DML*), kjer so stroji nadomestili človeško delo (Jovane, Koren, and Boer 2003). Ta paradigma temelji na principih znanstvenega upravljanja, ki so podani v delu (Taylor 1911). Principi znanstvenega upravljanja obravnavajo človeka v proizvodnem sistemu kot orodje, ki se mora prilagajati stroju. Taylorjev prispevek predstavlja temelj masovne proizvodnje, ki je sledila predhodnemu obrtniškem načinu dela in prehod iz vlečnega poslovnega modela v potisnega, glej Slika 3.5.

V obdobju med letoma 1970 in 2000 je postala proizvodnja bolj fleksibilna, kar je omogočilo masovno prilagajanje proizvodov potrebam posameznih skupin odjemalcev. Masovno prilagajanje je paradigma, ki izhaja iz spremenjenih družbenih potreb. Definirali bi jo lahko kot: »... proizvodnjo produktov in storitev, ki izpolnjujejo individualne potrebe kupca, z učinkovitostjo, ki je blizu masovni proizvodnji«

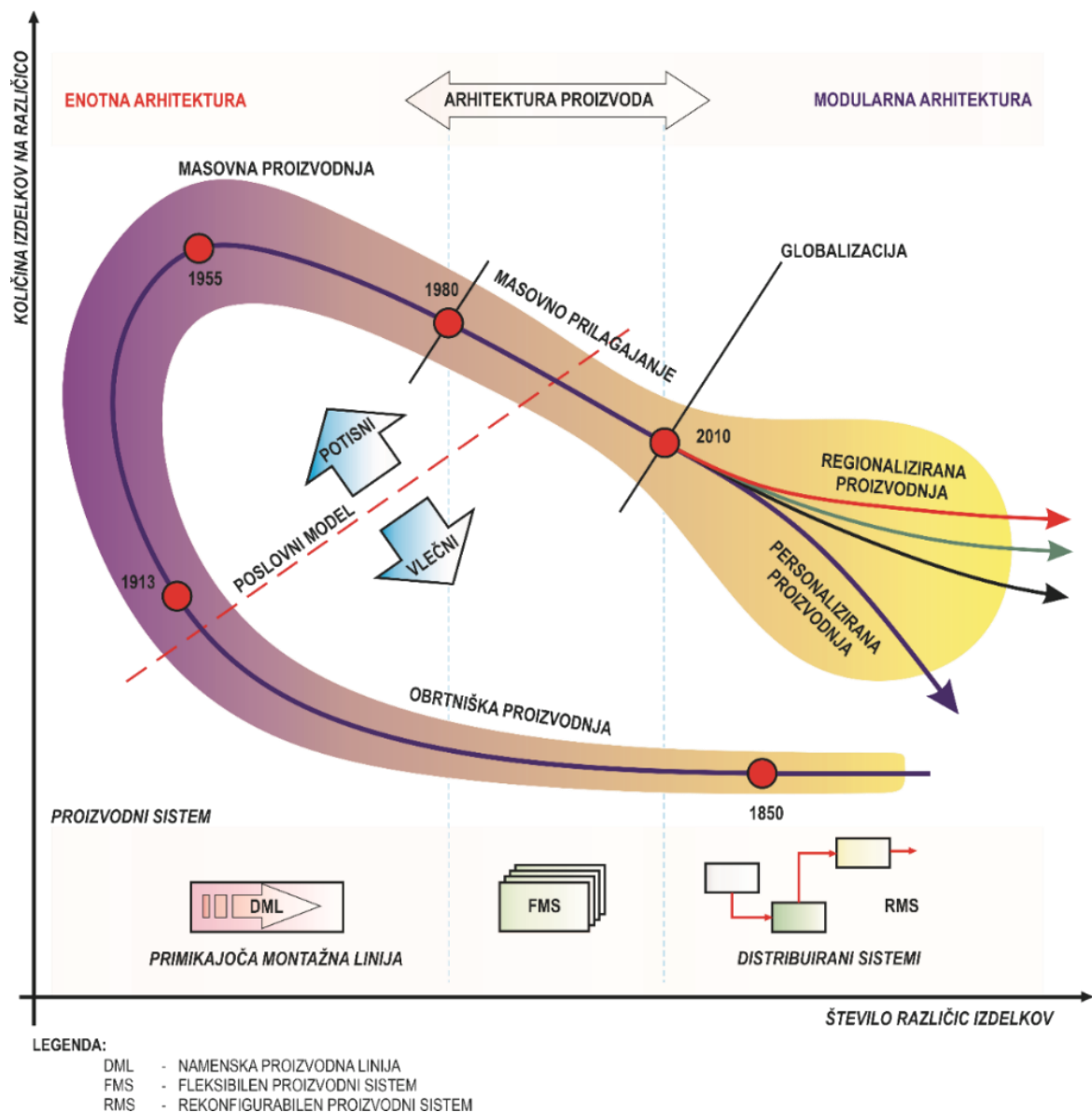
<sup>6</sup> Pri potisnem proizvodnem modelu je izdelek potisnjen skozi proces neodvisno od kupca, pri vlečnem pa kupec zahteva izdelek in ga tako potegne skozi proces

<sup>7</sup> Utemeljitelj serijske proizvodnje avtomobilov Henry Ford je nekoč humorno povzel glavni princip: "Kupec lahko kupi avto katerekoli barve, samo da je črna".



(Tseng, Jiao, and Merchant 1996). Na ta način se je težilo k proizvodjanju individualiziranih proizvodov z učinkovitostjo, ki je blizu velikoserijske proizvodnje. Proizvodnja proizvodov široke raznolikosti je imperativ navedene paradigme. Za uresničitev takšnih dosežkov igrajo ključno vlogo fleksibilni proizvodni sistemi (ang. *Flexible Manufacturing System – FMS*) in računalniško integrirana proizvodnja (ang. *Computer Integrated Manufacturing – CIM*).

**Slika 3.5.** Proizvodne paradigme in razvoj proizvodnih konceptov v času, predelano po (Womack, Jones and Roos, 1990), (Koren, 2010b)



Poslovni model je tu vlečni, saj kupec najprej odda naročilo in plača, šele na to gre izdelek v izdelavo, glej [Slika 3.5](#).

Industrijsko proizvodnjo 21. stoletja, ki je pod nenehnim pritiskom globalizacije, označuje regionalizacija, vsepovsodna prisotnost in naraščajoča personalizacija proizvodov, pri čemer sleherni

kupec išče proizvod po lastnih željah, kar občutno povečuje število različic posameznega proizvoda in njihovo različnost v smislu potrebnih proizvodnih količin.

Ločitev poslovnih procesov zunaj obstoječega poslovnega sistema, proizvodnja na različnih lokacijah, različne vrste gospodarskih organizacij na globalni ravni, nove oblike življenjskega ciklusa proizvoda, sistemov in tovarn, porast raznovrstnih modelov proizvodov in števila njihovih različic, je utrlo pot regionalizirani (*ubikvitarni*) obliki proizvodnje.

Regionalizirana proizvodnja (Elango 2004) je nadaljevanje variantne proizvodnje, proizvodnje s poudarkom na variantah, prilagojenim posebnostim (kulturnim, pravnim, bivanjskim, itd.) določene regije. Pri personalizirani proizvodnji (Tseng, Jiao, and Wang 2010) pa so kupci udeleženi pri načrtovanju izdelkov, ki jih kupijo. Ravno ta ko-kreacija je gonilo ustvarjanja nove vrednosti (Ueda et al. 2009). Personalizirana proizvodnja zahteva prilagodljive in re-konfigurabilne proizvodne sisteme (ang. *Re-configurable Manufacturing System – RMS*). Najnovejša konceptualna modela, osredotočena na personalizirano proizvodnjo, sta modela agilnega proizvodnje (ang. *Agile Production*) in proizvodnje v oblaku (ang. *Cloud Manufacturing – CM*).

Industrija 4.0 se je leta 2011 razvila s konceptom paradigme pametnega proizvodnega sistema (ang. *Smart Manufacturing Systems – SMS*) (Nacional Institute of Standard and Technology (NIST) 2014). Pametno proizvodnjo kot novo proizvodno paradigmo definiramo kot:

*“popolnoma integriran sodelovalni proizvodni sistem, ki se v realnem času odziva na spreminjajoče se zahteve in pogoje v tovarni, v oskrbovalnem omrežju in potrebah strank”* (Nacional Institute of Standard and Technology (NIST) 2014).

Pametna proizvodnja združuje današnja in prihodnja proizvodna sredstva s senzorji, računalniškimi platformami, komunikacijsko tehnologijo, nadzorom podatkovno intenzivnega modeliranja, simulacijo in napovednim inženiringom. Pametna proizvodnja uporablja koncept kibernetično fizičnih sistemov, interneta stvari, računalništva v oblaku, storitveno usmerjenega računalništva, umetne inteligence in podatkovne znanosti. Ko bodo ti prekrivajoči se koncepti in tehnologije uvedeni, bo proizvodnja postala zaščitni znak naslednje industrijske revolucije (Kusiak 2018), tako imenovane *Industrije 5.0*.

Vsako izmed opisanih paradigem ženejo določeni cilji, ki se realizirajo v novih konceptih proizvodnih sistemov, le-ti pa se realizirajo z novimi tehnologijami (Koren 2010b).

V nadaljevanju so predstavljeni nekateri uspešni in za nadaljnji razvoj pomembni koncepti proizvodnih sistemov, ki so bili razviti v zadnjih dvajsetih letih.

## 3.4 Koncepti naprednih proizvodnih sistemov

Spremembe zahtev trga, ter družbene potrebe, posledično vplivajo na razvoj novih vrst sistemov za proizvodnjo industrijskih proizvodov in novih poslovnih modelov (Tolio et al. 2010). Integracija novih proizvodnih sistemov z novimi poslovnimi modeli in z arhitekturo proizvoda ustvarja novo proizvodno paradigmo (Jovane, Koren, and Boer 2003).

Poslovni modeli so lahko takšni, da temeljijo na že obstoječi in znani proizvodni paradigmi, ali pa se zaradi pogoja njihovega obstoja naslanjajo na povsem nove proizvodne paradigme.

### 3.4.1 Fleksibilni proizvodni sistemi

Fleksibilni proizvodni sistem je sistem, ki vsebuje v svojem delovanju neko mero fleksibilnosti in je zasnovan tako, da vnaprej predvideva možnost sprememb (Perry 1971).

Fleksibilni proizvodni sistem (FMS) je definiran v članku (Koren 2010a) kot:

*»Integrirana skupina procesnih enot, kot so CNC obdelovalni stroji, ki so povezani z avtomatiziranim sistemom za manipulacijo materiala in katerih delovanje krmili nadzorni računalnik«.*

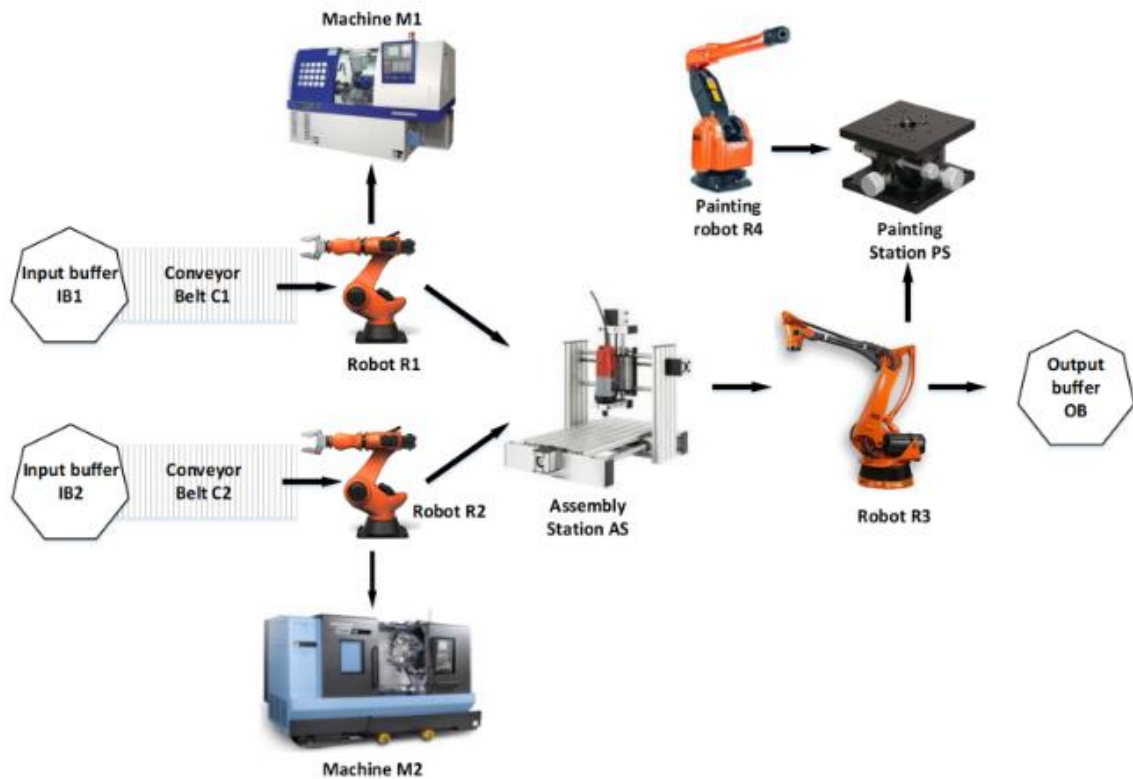
Tipično so stroji v FMS projektirani tako, da delujejo na fleksibilen način in so pri tem načrtovani za definiran spekter proizvodov, zaradi česar so kompleksni in niso povsem primerni za prilagajanje v smislu kapacitet glede na potrebe. Prav tako pa ni možna postopna sprememba njihove funkcionalnosti (Katz 2007).

Ključni konceptualni lastnosti FMS sta fleksibilnost in avtomatizacija. Fleksibilnost v proizvodnem sistemu je lahko izražena na različne načine in se deli na fleksibilnost strojne obdelave, obdelovalnega procesa, proizvoda, usmerjanja proizvodnje, proizvodnih količin, širjenja proizvodnje, proizvodnih operacij in nabora proizvodnih proizvodov (Browne et al. 1984), (Jain et al. 2013).

Globalizacija in nagli porast konkurence med proizvajalci na svetovnem trgu je omogočila fleksibilne proizvodne sisteme z le delno uspešno rešitvijo proizvodnega sistema, kateri je v takšnih okoliščinah lahko konkurenčen. Tipičen fleksibilni proizvodni sistem omogoča relativno slabo rešitev za proizvodnjo, kot tudi slabo možnost odziva na spremembe potrebnih proizvodnih količin. Proizvodna podjetja morajo, da bi zadržala svojo konkurenčnost, načrtovati proizvodne sisteme, ki imajo sposobnost proizvajati proizvode visoke kakovosti, po nizki ceni in pri tem hitro reagirati na spremembe tržnih zahtev. Fleksibilnost sama, kot taka, ni več konkurenčna prednost, pač pa je pomembnejša odzivnost na spremembe.

Primer fleksibilnega proizvodnega sistema je prikazan na [Sliki 3.6](#).

Slika 3.6. Fleksibilni proizvodni sistem (Davidrajuh, Skolud, and Krenczyk 2018)



### 3.4.2 Rekonfigurabilni proizvodni sistemi

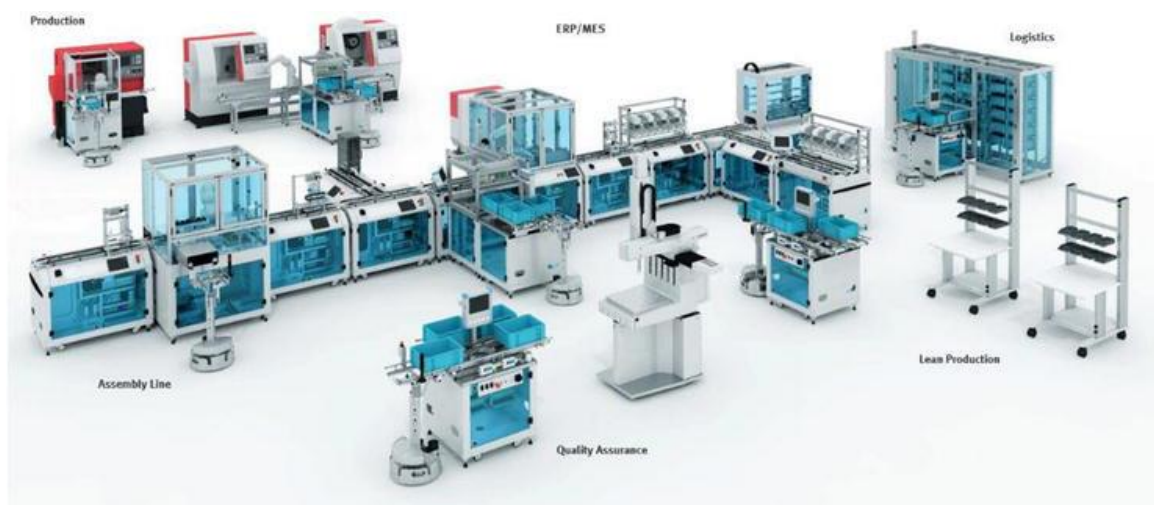
Re-konfigurabilni proizvodni sistem (ang. *Re-configurable Manufacturing Systems* – RMS) predstavlja sistem, ki je zasnovan tako, da je sposoben hitro spremeniti svojo strukturo, tako strojno kot računalniško, z namenom prilagajanja proizvodnih kapacitet nenadnim spremembam zahtev tržišča v okviru družine komponent. Koncept RMS združuje pozitivne lastnosti DML in FMS z namenom povečanja fleksibilnosti DML in zmanjšanja stroškov vzpostavitve in obratovanja FMS.

V članku (Koren, Moriwaki, and Van Brussel 1999) avtorji definirajo RMS kot:

*»Rekonfigurabilni proizvodni sistem je načrtovan za nagle spremembe strukture, kot tudi strojnih in programskih komponent, da bi se na ta način omogočila hitra prilagoditev kapacitete in funkcionalnosti v okviru družine obdelovancev, kot odziv na nepričakovane spremembe na trgu ali spremenjene pogoje poslovanja«.*

Idealen rekonfigurabilni proizvodni sistem je okarakteriziran s šestimi osnovnimi lastnostmi in sicer: modularnost, integrabilnost, skalabilnost, prilagodljivost, konvertibilnost in omogočanje diagnostike. Tipičen rekonfigurabilni proizvodni sistem izkazuje nekatere od naštetih lastnosti, vendar ne vseh (Koren and Ulsoy 2002). Primer re-konfigurabilnega proizvodnega sistema je prikazan na Sliki 3.7.

**Slika 3.7.** Re-konfigurabilni proizvodni sistem razvit od strani FESTO grupe (Abdul Rahman 2020)



### 3.4.3 Inteligentni proizvodni sistemi

Inteligenca predstavlja sposobnost učenja na osnovi izkušenj, uspešnega prilagajanja novim stanjem in spremembam v okolju ali sposobnost abstraktnega razmišljanja (Pfeifer and Scheier 1999). Na osnovi takšne definicije je mogoče ovrednotiti umetno inteligenco (ang. *Artificial Intelligence – AI*), kot sposobnost računalnika oz. programa, da imitira človekove kognitivne procese, kot so razmišljanje in učenje.

Nadvse pomembni atributi, ki vodijo k inteligentnim sistemom (ang. *Intelligent System – IS*) so izraženi skozi učenje, intuicijo, kreativnost, hitro razmišljanje, razumevanje, samostojno delovanje, prilagoditev in posredovanje znanja. Na osnovi takšnih svojstev so sposobni zbirati in uporabljati znanja skozi procese odločanja in učenja s ciljem predvidevanja, napovedovanja, sprejemanja odločitev, nadzora in izvrševanja akcij v resničnem okolju.

Umestitev umetne inteligence v proizvodne sisteme je prvič opisno v delu (Hatwany 1983), kjer Hatwany navaja, da so inteligentni proizvodni sistemi (ang. *Intelligent Manufacturing System – IMS*) nova generacija proizvodnih sistemov, zasnovanih na umetni inteligenci, od katerih se pričakuje, da ponudijo rešitve znotraj določenih omejitev v primeru pojave nepredvidenih težav, povzročenih s strani nepopolnih in nenatančnih informacij. Inteligentni proizvodni sistemi, zasnovani na umetni inteligenci in strojnem učenju, so opisani v delih (Yoshikawa 1992), (Monostori 2003).

### 3.4.4 Fraktalni proizvodni sistemi

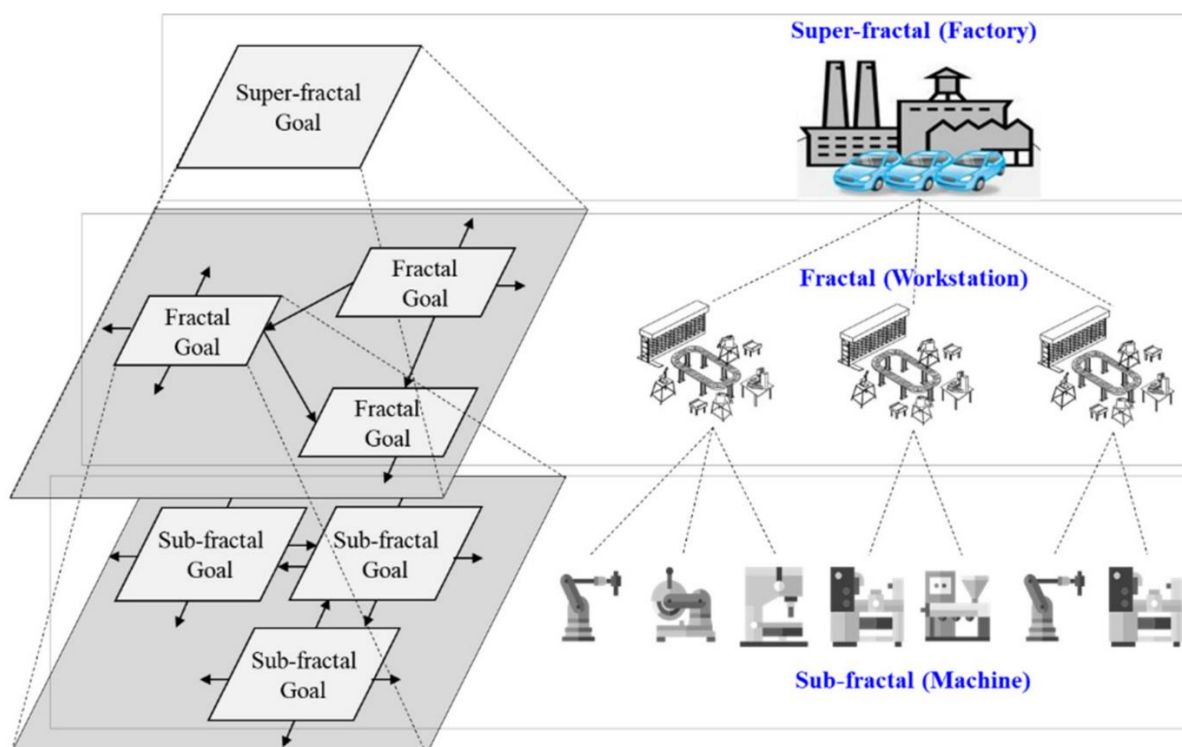
Fraktalni proizvodni sistem (ang. *Fractal Production System – FrPS*) je koncept privzet iz koncepta fraktalne tovarne. Koncept fraktalne tovarne (Warnecke 1993) je poimenovan po fraktalih, matematičnih objektih, katerih značilna lastnost je samopodobnost. Fraktalna tovarna je sestavljena iz manjših, celovitih in avtonomnih enot, ki tudi same izkazujejo lastnosti tovarne. Gre za kreacijo »tovarn

znotraj tovarn«, pri čemer vsaka zase deluje avtonomno, [Slika 3.8](#). Nadzor nad celoto je skupen, s čimer je možno zagotavljanje strateških ciljev podjetja.

Osnovni element je fraktal, ki nastopa kot samostojna enota z možnostjo samo-organizacije. Beseda »fraktal« izhaja iz latinske besede »fractus«, ki pomeni prekinjen ali razkosan. Vsak fragment, oziroma fraktal, vsebuje osnovne karakteristike cele strukture, nudi pa tudi storitve v skladu s posameznim ciljem in deluje neodvisno. Da lahko funkcionira kot koherentna celota, je zelo pomembno ustrezno formiranje ciljev posameznih fraktalov, kar zagotavlja konsistentnost doseganja ciljev na nivoju sistema. Ta konsistentnost se doseže z mehanizmom dedovanja ([Tharumarajah, Wells, and Nemes 1998](#)).

Glavna značilnost fraktala je samopodoba, z vsebnostjo rekurzije v sebi, to je vzorec znotraj vzorca. Na podlagi teh značilnosti se gradi koncept fraktalnih tovarn, ki predlaga proizvodno podjetje kot strukturo, sestavljeno iz majhnih komponent ali entitet fraktalov. Te entitete so lahko opisane s specifičnimi notranjimi značilnostmi fraktalov. Prva značilnost je samo-organizacija, druga značilnost je dinamičnost in tretja je samopodoba. Ta svojstva FrPS je možno opisati in modelirati ob uporabi agentskih in več-agentskih struktur v distribuiranem okolju. FrPS ima dobre konceptualne značilnosti, če prav je njihova implementacija zelo zahtevna ([Ryu and Jung 2003](#)).

**Slika 3.8.** Fraktalni proizvodni sistem ([Lee and Ryu 2022](#))



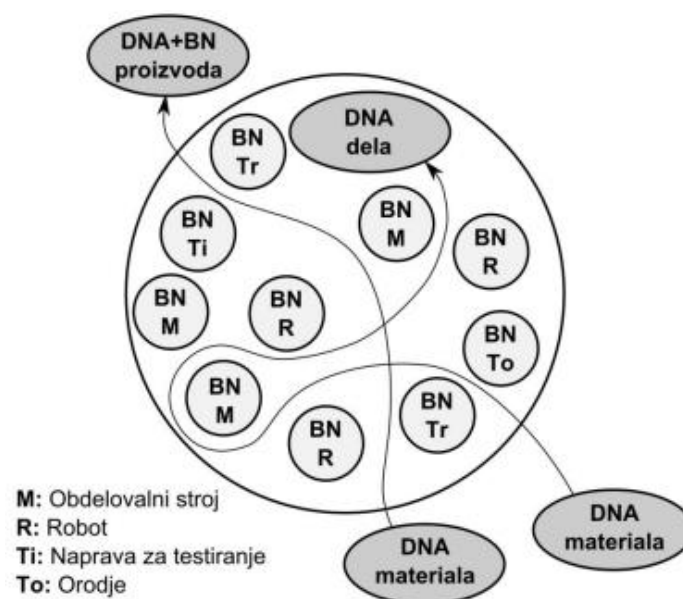
### 3.4.5 Biološki proizvodni sistemi

Biološki proizvodni sistem (ang. *Biological manufacturing System – BMS*) temelji na ideji kako organizirati proizvodne sisteme, da bodo sposobni obvladovati lastno kompleksnost in dinamične spremembe okolice, ki jih obdaja. Za tak model proizvodnega sistema so pomembne štiri funkcijske lastnosti živih organizmov: evolucija, samo-organizacija, uporaba naravne inteligence in dinamična struktura z naravno hierarhijo. Na podlagi takšnih lastnosti Okino, v članku (Okino 1989), vleče paralele z biološkimi sistemi in predlaga zasnovo za uresničitev pomembnih svojstev prihodnjih proizvodnih sistemov.

Biološki proizvodni sistemi v svojo funkcionalnost vključujejo ne-deterministične spremembe v proizvodnih okoljih, z idejo in konceptom ki izhaja iz bioloških sistemov, kakršne najdemo v naravi, kot so avtonomnost in samodejnost, socialna usklajenost do organizacije, samo-organizacija, prilagajanje (adaptacija), rast in evolucija. Navedene funkcije so v bioloških organizmih kodirane skozi dva tipa bioloških informacij v obliki DNA-tipa, kateri se razvija skozi generacije, in BN-tipa, ki se individualno naučijo in dosegajo tekom življenjskega obdobja slehernega organizma. Povezovanje biološke informacije z individualno informacijo dela biološke sisteme kompleksne in adaptivne.

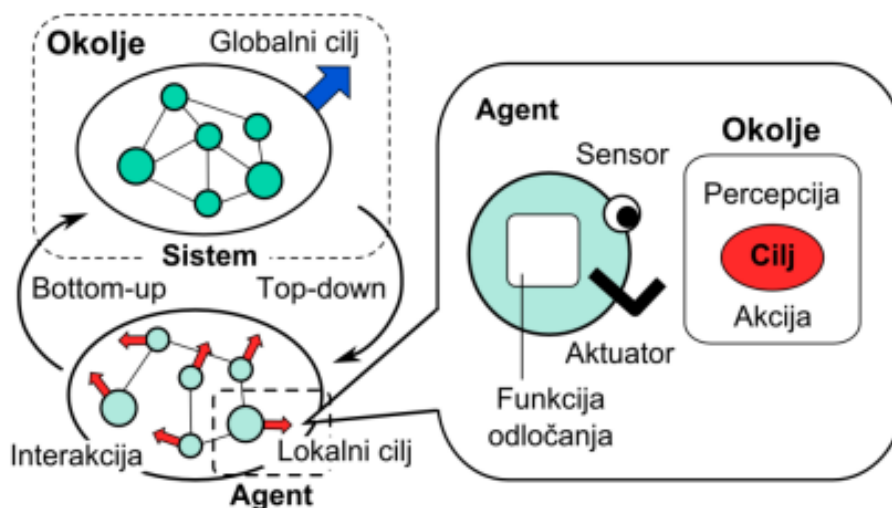
Strukturni elementi v BMS so avtonomni elementi opreme za proizvodnjo, kot so stroji, oprema za montažo, transport, testiranje, skladiščna oprema, orodja, materiali, deli, proizvodi, itd. in so primerljivi z avtonomnimi organizmi. Takšni elementi morajo biti sposobni poleg sprejemanja samostojnih odločitev, s katerim se bodo prilagodili okolju, tudi komunicirati z drugimi elementi. Združevanje pridobljenega znanja avtonomnih elementov in informacij o njihovih lastnostih, ki se uporablja po zgledu DNK živih bitji, omogoča BMS hitro prilagajanje v spremenljivem okolju (Okino 1989), (Tharumarajah, Wells, and Nemes 1998), glej Sliko 3.9.

**Slika 3.9.** Koncept bioloških proizvodnih sistemov (Ueda, Vaario, and Ohkura 1997)



Realizacija BMS je predvidena z implementacijo programskih agentov z omejeno racionalnostjo, ki se od običajnih programskih agentov razlikujejo po tem, da upoštevajo omejen dostop do informacij in omejeno zmožnost optimizacije, glej [Slika 3.10](#). Proizvodni sistem, ki vsebuje agente z omejeno racionalnostjo, izkazuje večjo stopnjo fleksibilnosti in prilagodljivosti v primerjavi s sistemom, katerega sestavljajo le klasični agenti ([Ueda, Kito, and Fujii 2006](#)).

**Slika 3.10.** Model agenta BMS z omejeno racionalnostjo ([Ueda, Kito, and Fujii 2006](#))



Biološki proizvodni sistemi so izjemno fleksibilni in prilagodljivi, pa čeprav jih je z današnjo tehnologijo težko realizirati ([Ueda, Vaario, and Ohkura 1997](#)).

### 3.4.6 Holonski proizvodni sistemi

Koncept holonskih sistemov temelji na konceptu, ki ga je razvil Arthur Koestler ([Koestler 1969](#)) za organizme in socialne organizacije opisujoč hierarhično strukturo kompleksnih sistemov, sestavljeno iz holonov, kateri so istočasno celota in del neke druge celote ali holona v hierarhični strukturi. Ta hierarhija holonov se imenuje »holarhija«, glej [Slika 3.11](#).

Holon predstavlja avtonomni, inteligentni, fleksibilni, distribuirani in kooperativni gradnik holonskih proizvodnih sistemov (ang. *Holonistic Manufacturing System – HMS*) opisanih v delu ([Van Brussel 1994](#)).

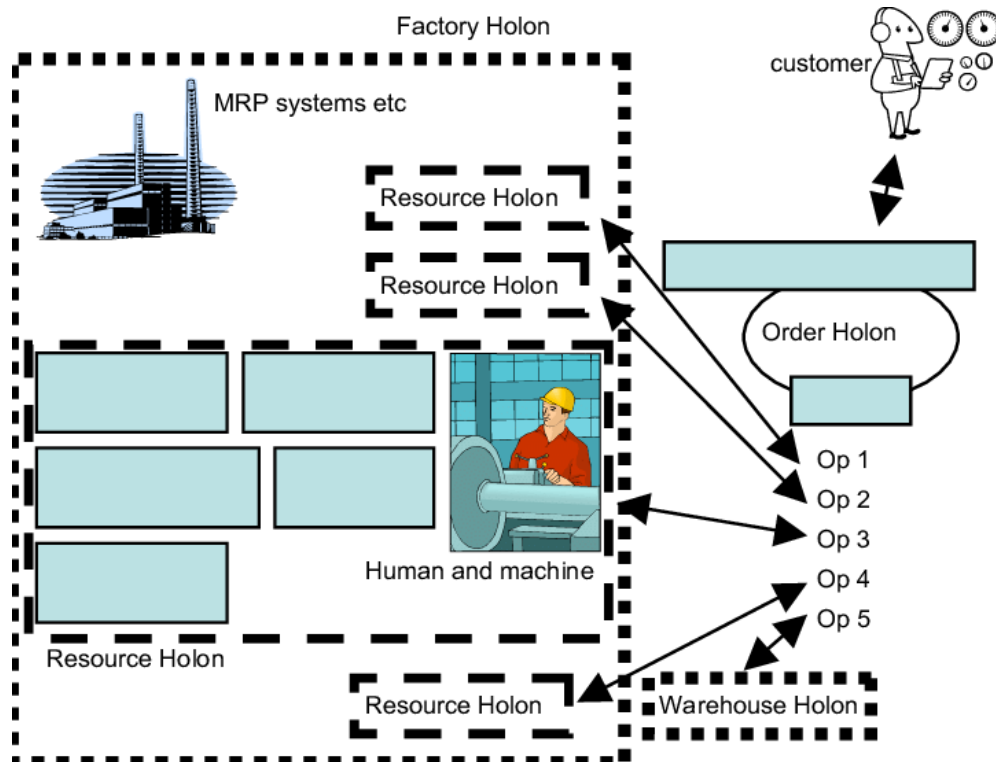
Avtonomnost in kooperativnost sta dve najznačilnejši karakteristiki holonov. Avtonomnost izhaja skozi samostojno načrtovanje in krmiljenje aktivnosti, kooperativnost pa se izraža skozi sposobnost usklajevanja le teh z aktivnostmi drugih holonov.

Realizacija HMS je predvidena z uporabo programskih večagentnih tehnologij na podlagi PROSA-referenčne arhitekture holonskih proizvodnih sistemov (ang. *Product-Resource-Order-Staff Architecture – PROSA*), ki je utemeljena v članku ([Van Brussel et al. 1998](#)). PROSA definira tri osnovne holone: holon proizvoda, holon vira, holon naročila. Referenčna arhitektura holonskih proizvodnih



sistemov zagotavlja enostavno integracijo z uporabo principa samopodobnosti novih proizvodnih elementov in re-konfiguracijo proizvodnega sistema.

**Slika 3.11.** Arhitektura holonskega proizvodnega sistema (Fletcher and Brusey 2003)



Leitao in Restivo (Leitao, Colombo, and Restivo 2005) sta razvila arhitekturo ADACOR (ang. *ADaptive holonic Control aRchitectutre for distributed manufacturing systems*) katera temelji na referenčni arhitektura PROSA, z dodatnimi holoni za nadzorovanje holonov nižjega nivoja. To omogoča nastanek stabilne hierarhije v sistemu in uvaja adaptivno krmiljenje proizvodnega sistema (holonski krmilni sistem) ter združuje optimizacijo proizvodnje z agilnimi reakcijami na motnje v sistemu.

Kruger in Basson (Kruger and Basson 2013) sta izvedla raziskavo, v kateri sta za razvoj holonskega krmilnega sistema kot alternativne tehnologije uporabila agentsko tehnologijo in tehnologijo funkcijskih blokov standarda IEC 61499<sup>8</sup>. Zaključila sta, da je za razvoj višjih hierarhičnih nivojev bolj primerna agentska tehnologija, medtem ko so funkcijski bloki bolj ustrezni za razvoj nižjih hierarhičnih nivojev v holonski krmilni strukturi.

Adaptivno distribuirano holonsko krmilno okolje s pomočjo pristopa objektno-orientiranega programiranja je opisano v delu (Jovanović et al. 2014) v katerem se na osnovi ADACOR arhitekture uvajajo nove strukture holonov, kot so: holon operaterja, holon planiranja, glavni kontrolni holon, kontrolni holon modula in operacijski holon.

<sup>8</sup> IEC 61499 – standard ki definira referenčno arhitekturo distribuiranih krmilnih sistemov

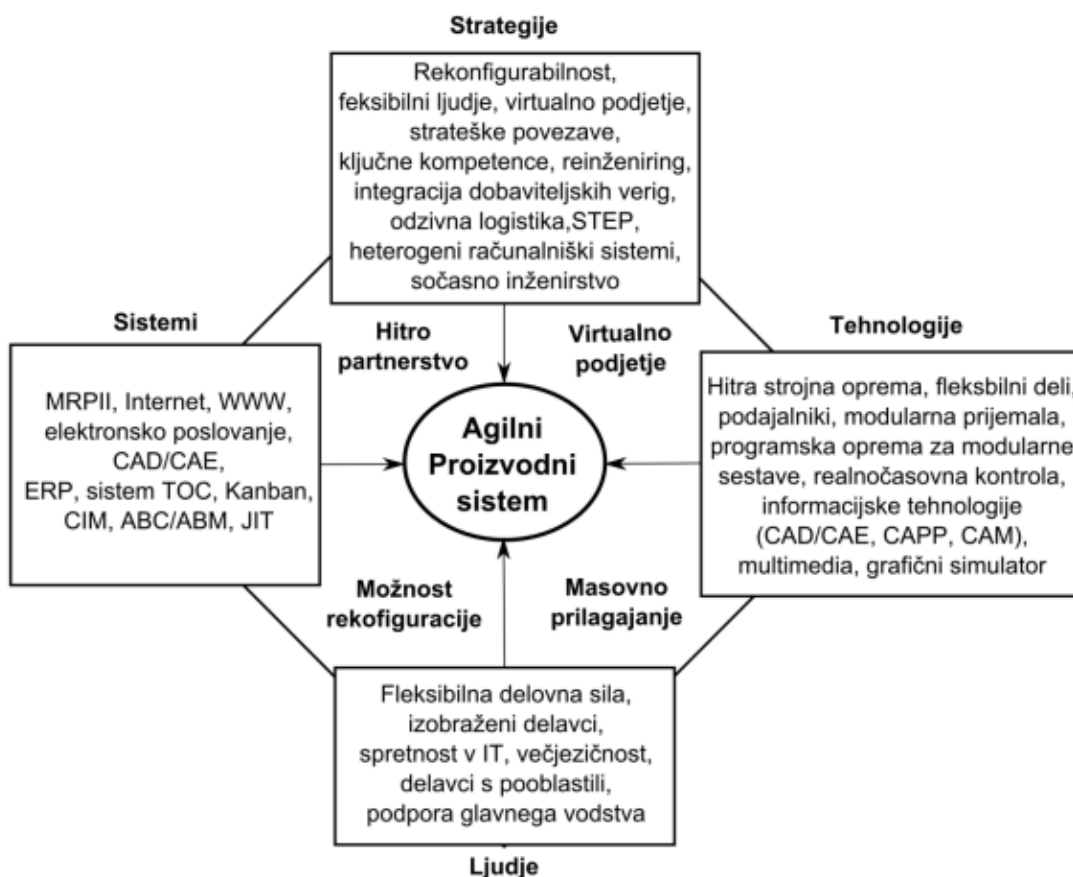
### 3.4.7 Agilni proizvodni sistemi

Agilni proizvodni sistem (ang. *Agile Manufacturing System* – AMS) je sistem, ki ima sposobnost hitrega prilagajanja na nepredvidljive spremembe poslovnega in proizvodnega okolja z občutnimi spremembami načina svojega delovanja in s povezovanjem z drugimi proizvodnimi sistemi, (Škulj 2016).

AMS je močno vpet v poslovno okolje, v katerem deluje, in se zanaša na poslovne partnerje, s čimer si zagotavlja lastno prilagodljivost. Agilni proizvodni sistemi in njihove lastnosti so opisani skozi literaturo (Wang, Rajurkar, and Kapoor 1996), (Gunasekaran 1998), (Gunasekaran 1999), (Cheng, Harrison, and Pan 1998), (Elkins, Huang, and Alden 2004), (Bottani 2010), (Inman et al. 2011), (Zhang 2011), (Dubey and Gunasekaran 2015).

Koncept AMS omogočajo (1) uporaba koncepta virtualnega podjetja, (2) fizično porazdeljena proizvodna oprema in ekipe, (3) hitro oblikovanje poslovnih partnerstev, (4) sočasno inženirstvo, (5) integrirani informacijski sistemi, (6) orodja za hitro izdelavo prototipov in (7) elektronsko trgovanje. AMS je razvit z integracijo strategij, sistemov, tehnologij in ljudi znotraj podjetja, kot je prikazano na Sliki 3.12, (Gunasekaran 1998), (Gunasekaran 1999).

**Slika 3.12.** Konceptualni model razvoja AMS (Gunasekaran 1998)



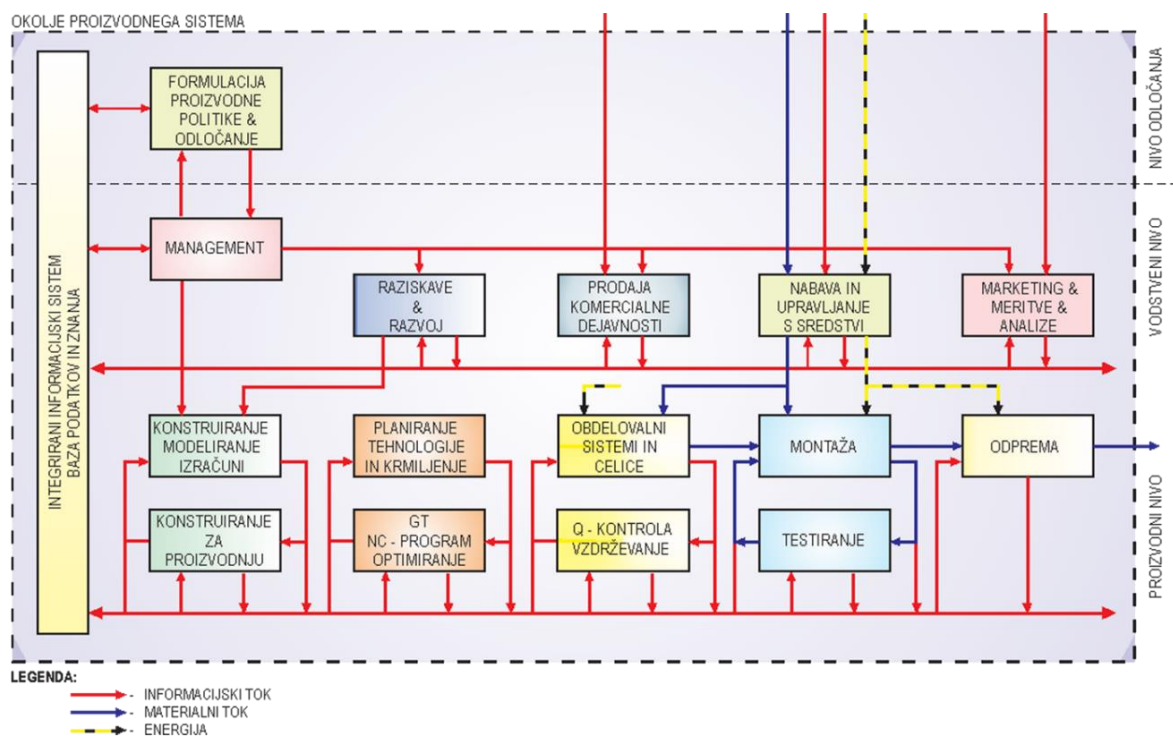
Agilnost v proizvodnih podjetjih glede na različne definicije predvideva (1) visok nivo kvalitete in prilagojenosti proizvoda kupcu, (2) proizvode in storitve z vsebino visoke dodane vrednosti, (3) uporabo glavnih proizvodnih kompetenc podjetja, (4) odzivnost na socialne in okoljske probleme, (5) sintezo različnih proizvodnih tehnologij, (6) odzivnost na spremembe in negotovost trga ter (7) integracijo med in znotraj podjetij (Yusuf, Sarhadi, and Gunasekaran 1999).

### 3.4.8 Kompleksni adaptivni proizvodni sistemi

Koncept kompleksnih adaptivnih proizvodnih sistemov (ang. *Complex Adaptive Manufacturing System – CAMS*) (Peklenik 1988), (Peklenik 1995) obravnava proizvodni sistem kot kompleksen adaptiven sistem, kot mrežo številnih neodvisnih gradnikov – agentov, ki delujejo vzporedno ali zaporedno in s tem gradijo mrežo interakcij. Struktura takšnega sistema je utemeljena na Peklenikovi tri nivojski strukturi, glej Slika 3.13.

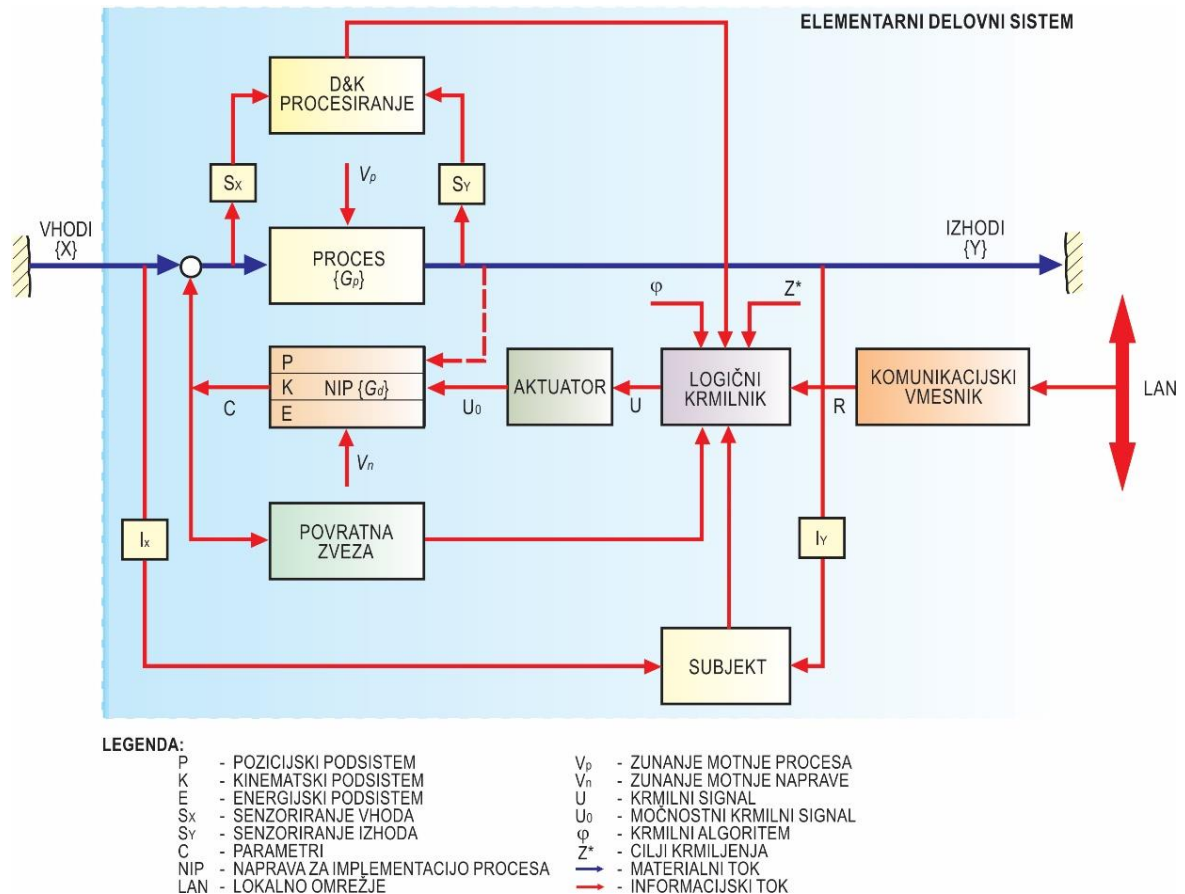
Ključne značilnosti, ki jih definira koncept CAMS, so nenehne spremembe gradnikov proizvodnega sistema kot posledica adaptacije tržišču, novostim v znanosti in tehnologijah ter zaradi drugih vzrokov. Tako proizvodni sistem skoraj nikoli ni v ravnotežju, temveč v stanju nenehne tranzicije. To pomeni da se proizvodni sistem neprestano adaptira na spremembe. Adaptivno krmiljenje proizvodnega sistema kot celote in njegovih gradnikov se izvaja na več nivojih brez neposrednega, centralističnega krmiljenja. Koherentno obnašanje gradnikov je doseženo predvsem na podlagi kooperacije in konkurence med gradniki. Osnovni gradnik proizvodnega sistema v konceptu CAMS je elementarni delovni sistem.

Slika 3.13. Struktura kompleksnega adaptivnega proizvodnega sistema (Peklenik 1988)



Elementarni delovni sistem (EDS) (ang. *Elementary Work System – EWS*) je osnovni gradnik za izgradnjo kateregakoli proizvodnega sistema (Peklenik 1988). EDS je najmanjša delovna enota, ki lahko ustvarja novo vrednost. Skozi koncept EDS je natančno opredeljeno kateri so osnovni elementi proizvodnega sistema, brez katerih delo ne more biti izvedeno: proces, naprava za implementacijo procesa (NIP), *Subjekt*<sup>9</sup> in okolje, glej Slika 3.14.

Slika 3.14. Elementarni delovni sistem (Peklenik 1995)



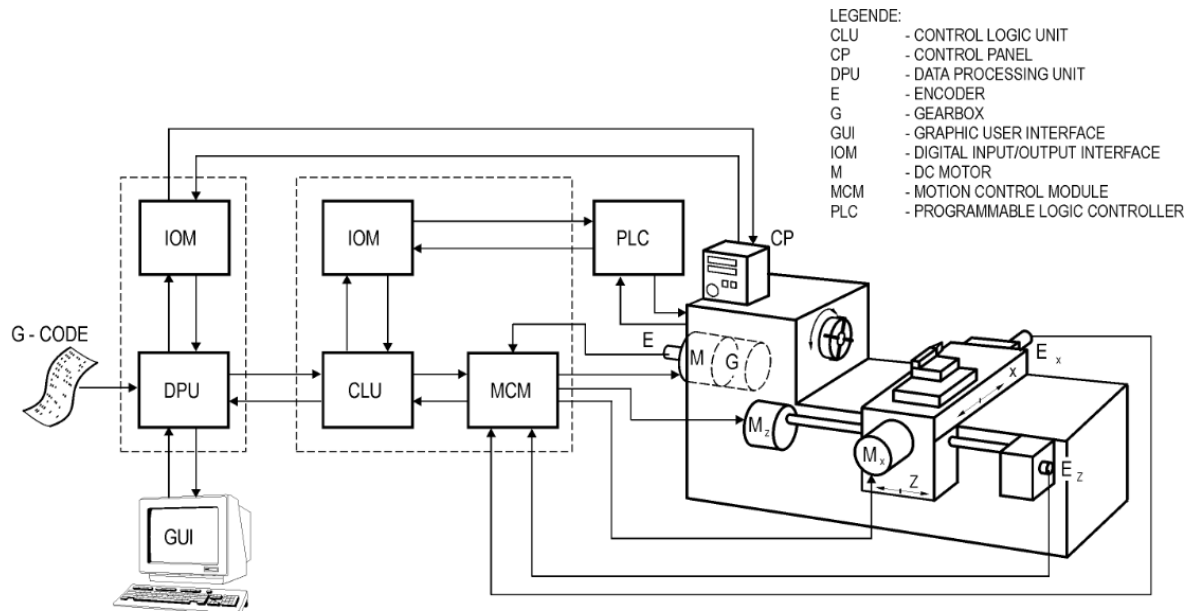
Vhodi v proces zajemajo glavne entitete potrebne za razvoj in proizvodnjo konkretnih proizvodov: informacija (*I*), materiali (*M*), energija (*E*) in viri (*R*). Izhod iz procesa predstavljajo polizdelki, izdelki, performance, kakovost storitev in podobno. Na podlagi senzorjev (*S<sub>x</sub>*) in (*S<sub>y</sub>*) se zbirajo podatki o stanju sistema pred in po izvedbi procesa, po tem se obdelujejo in posredujejo v obliki informacije do logičnega krmilnika. Vhodi in izhodi procesa so spremljani s strani *Subjekta*, ki generira krmilne signale (*U*) na podlagi referenčnih signalov (*R*). *Subjekt* torej ne krmili neposredno procesa, temveč krmili napravo, na kateri proces poteka. Vsi elementi sistema, proces, NIP in *Subjekt*, so podvrženi motnjam, (*V<sub>p</sub>*), (*V<sub>d</sub>*) in (*V<sub>s</sub>*).

Krmilni signali se od logičnega krmilnika do NIP prenašajo preko pogonov, kateri pridobivajo signale (*U*) in posredujejo močnostni signal (*U<sub>0</sub>*) do naprave za implementacijo procesa, glej Slika 3.15.

<sup>9</sup> Peklenik v delu (Janez Peklenik 1988) definira vlogo človeka v proizvodnih sistemih in uvaja termin *Subjekt*

Napotki se po algoritmu ( $\varphi$ ) posredujejo do logičnega kontrolerja s ciljem realizacije strateške optimizacije, adaptivnega krmiljenja in podobno.

**Slika 3.15.** Elementarni delovni sistem – primer



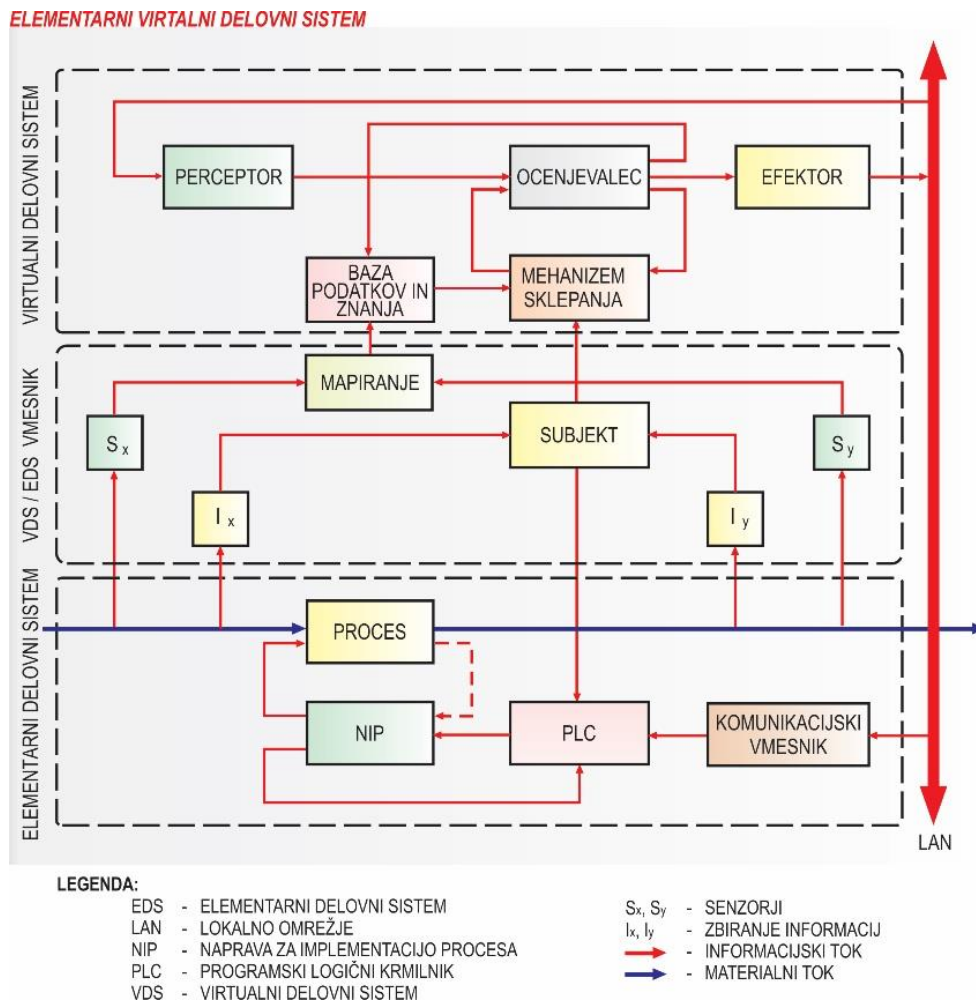
Obstoj komunikacijskega vmesnika omogoča povezovanje logičnega krmilnika z drugimi napravami ali delovnimi sistemi in integracijo v kompleksne adaptivne proizvodne sisteme (Peklenik 1988).

### 3.4.9 Adaptivni distribuirani proizvodni sistemi

Koncept adaptivnih distribuiranih proizvodnih sistemov (ang. *Adaptive Distributed Manufacturing System – ADMS*) je bil razvit na podlagi koncepta CAMS (Peklenik 1995). Podobno kot koncept CAMS tudi koncept ADMS obravnava proizvodni sistem kot mrežo gradnikov, ki pa so distribuirani.

Koncept ADMS temelji na strukturiranju proizvodnih sistemov, na osnovi proizvodnih nalog za izdelavo komponent proizvodov. ADMS sestavlja mreža delovnih sistemov, ki so medsebojno povezani preko odgovarjajočih agentov oziroma virtualnih delovnih sistemov. Virtualni delovni sistem (VDS) (Butala and Sluga 2002) je uveden v koncept ADMS s ciljem da zastopa EDS v distribuiranem okolju, Slika 3.16. To pomeni da je VDS agent, ki zastopa EDS v informacijski domeni kot neke vrste digitalni dvojček (ang. *Digital Twin – DT*). VDS kot agent je programska entiteta, katera ima štiri osnovne funkcionalne elemente: perceptor, ocenjevalec, efektor in mehanizem sklepanja. Agenti delujejo in komunicirajo preko mreže in koordinirajo svoje aktivnosti, izvršujejo komplicirane naloge in pri tem koristijo svoje sposobnosti upoštevajoč lastne cilje. VDS avtonomno odloča o sprejemanju nalog za izvedbo in ima sposobnost sprejemanja odločitev v okvirih svoje pristojnosti. Njegova naloga je podpreti odločitve in koordinacijo z drugimi agenti. Avtonomija, kompetenca za določene naloge, budnost, reaktivnost, fleksibilnost, učenje in sposobnost komuniciranja so ključni atributi VDS. S tem je delovni sistem pridobil funkcionalnost, ki je potrebna za delo v distribuiranem okolju.

Slika 3.16. Virtualni delovni sistem (Butala and Sluga 2002)



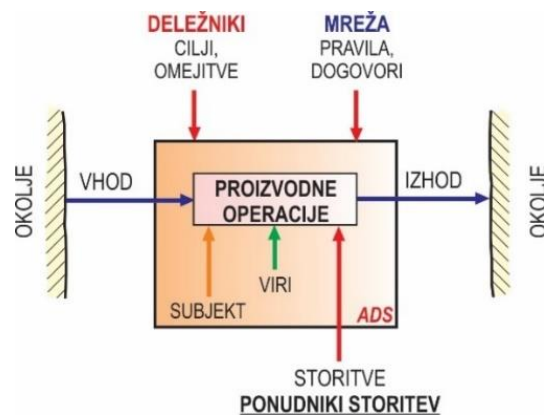
V konceptu ADMS gradniki proizvodnega sistema niso neposredno elementarni delovni sistemi, ampak avtonomni delovni sistemi (ADS) (ang. *Autonomous Work System – AWS*) (Butala and Sluga 2006), Slika 3.17, kjer vsak ADS vsebuje tudi enega ali več EDS. ADS je strukturiran s ciljem minimalne strukturne kompleksnosti mrežnih proizvodnih sistemov.

S tem so gradniki, ki sestavljajo mrežo, relativno enostavne strukture z avtonomnim obnašanjem, namesto kompleksnih struktur, tj. podjetij. Proizvodne mreže so kompleksne strukture. Zato je evidentno, da dekompozicija kompleksnih struktur v množico manj kompleksnih struktur zmanjšuje skupno kompleksnost mreže. V kontekstu mrež se dekompozicija izvede do nivoja samozadostnih funkcionalnih entitet, tj. sistemov, ki so sposobni izvajati določene funkcionalnosti in so istočasno sposobni avtonomno delovati v mreži (Žapčević 2013).

Butala in Sluga sta definirala ADS (Butala and Sluga 2006) kot sistem z zaokroženo tehnološko funkcionalnostjo in ustrežno funkcijo upravljanja. Tehnološka funkcionalnost je v osnovi zgrajena kot elementarni delovni sistem, katerega po definiciji sestavljajo: proces, naprava za implementacijo procesa in subjekt. Funkcije upravljanja predstavljajo upravne funkcionalnosti, ki ADS omogočajo avtonomnost. Avtonomija ADS se odraža skozi njegovo specifično kompetenco v smislu znanja,

izkušenj in virov. V delu (Scholz-Reiter and Höhns 2003) avtorja definirata avtonomnost kot sposobnost sistema, da neodvisno sprejema odločitve o sebi, brez zunanjih navodil ter izvaja lastne aktivnosti brez zunanje prisile. Podobno temu v delu (Seidel and Mey 1994) avtorja definirata avtonomnost kot sposobnost entitete, da ustvarja in krmili izvajanje lastnih planov in/ali strategij.

**Slika 3.17.** Osnovni funkcijski diagram ADS (Butala and Sluga 2006)

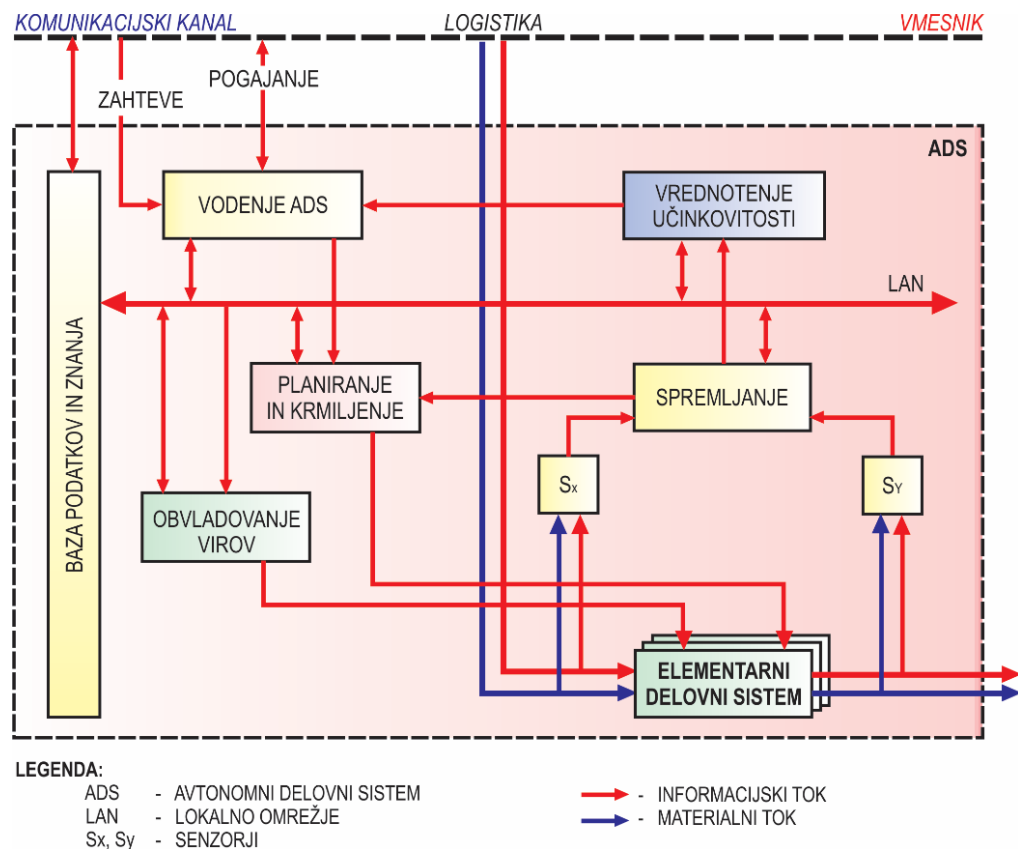


Osnovna funkcionalnost ADS je transformacija vhoda v izhod, glej [Slika 3.18](#). Izvedbo takšne funkcije omogočajo elementi ADS, kot so: znanje o procesu, obdelovalni stroji, orodja, merilne naprave, subjekt in podobno. Navedeni elementi ADS zaokrožajo funkcionalno kompetenco ADS, ki je potrebna za izvajanje procesov. Pri tem so funkcionalnosti ADS omejene na ključne funkcionalnosti, katere ADS omogočajo določeno prednost pred konkurenco. Poleg ključnih funkcionalnosti, ADS potrebuje tudi druge funkcionalnosti, katere niso sestavni del funkcionalnosti sistema in se v ADS realizirajo v obliki storitev (npr. vzdrževanje strojev, logistika, kontrola kakovosti, optimizacija procesnih parametrov, upravljanje z orodji).

Upravne funkcionalnosti so namenjene upravljanju ADS, ki se odražajo skozi pridobivanje poslov v B2MN okolju, krmiljenju internih proizvodnih operacij in koordinaciji le-teh z ostalimi ADS v proizvodni mreži. Pri tem na delovanje ADS vplivata dva seta krmilnih vhodov. Prvi set se nanaša na cilje in omejitve, ki jih definirajo deležniki v smislu ekonomskih kazalcev in organizacije ter motivirajo lasten interes ADS, da deluje znotraj mreže kooperativno in/ali kompetitivno. S takim aktivnostim se uravnoveša odnos med kontroliranim in porajajočim vedenjem ADS. Drugi set sestavljajo pravila in dogovori v proizvodni mreži, kateri omogočajo skladno in učinkovito delovanje mreže. Le-ti se realizirajo skozi pravila, protokole, komunikacije, sintakso in semantiko izmenjave informacij, različnih vzorcev medsebojnih pogodb, ipd.

Elementi ADS so strukturirani v dve notranji krmilni zanki in eno zunanjo krmilno zanko. Prva notranja zanka omogoča krmiljenje operacij EDS-ov v realnem času. Ta zanka se realizira preko sensoriranja (sensoriranje vhodov –  $S_x$ , sensoriranje izhodov –  $S_y$ ) in spremljanja ter na ta način omogoča planiranje in krmiljenje operacij v realnem času.

Slika 3.18. Avtonomni delovni sistem (Butala and Sluga 2006)



Druga notranja upravljalna oziroma performančna zveza omogoča upravljanje s sistemom na osnovi parametrov, ki merijo ključne dimenzije, izvedenih na temelju informacij o dogodkih in dejanskem stanju v EDS. Potrebna pa je za kakovostno odločanje v okviru upravljanja z viri.

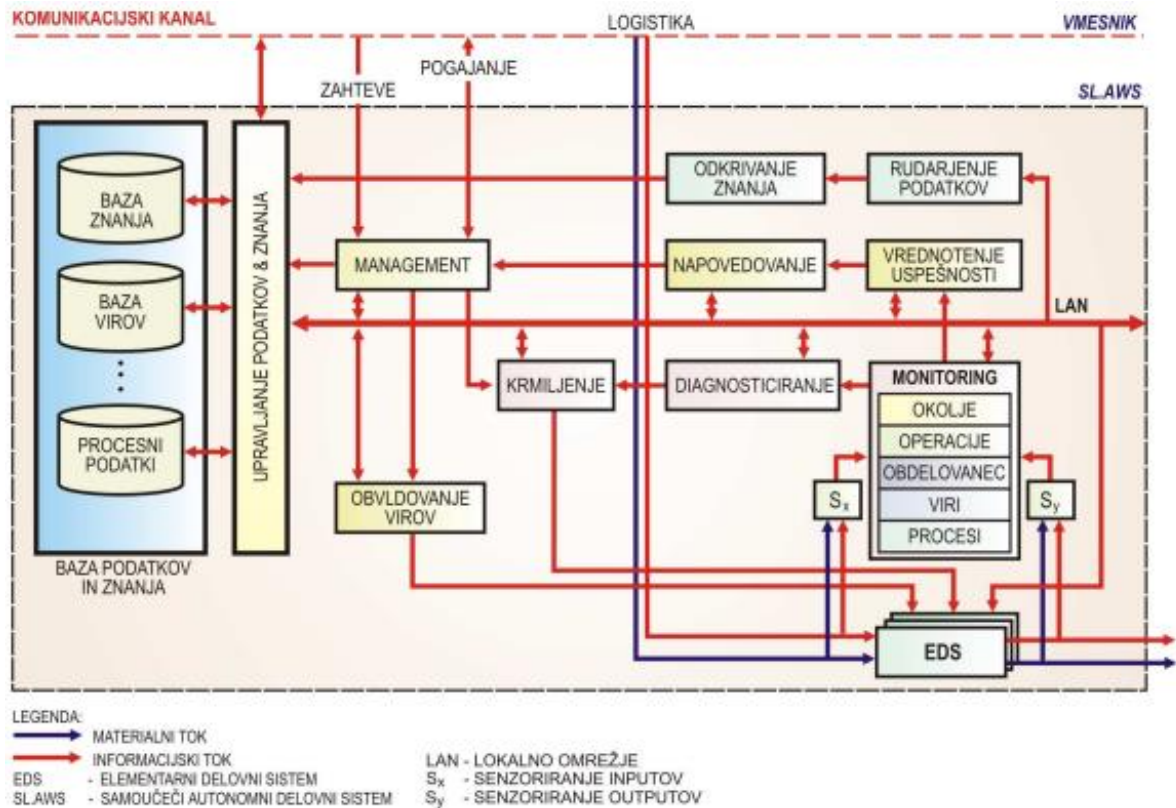
Zunanja krmilna zanka oziroma koordinacijska zanka se odvija na nivoju koordinacije. Ta omogoča upravljanje operacij na osnovi opredelitve ciljev krmiljenja in primerjave doseženih performans. V slučaju odstopanj dejanskih performans od ciljnih je potrebna opredelitev ustreznih ukrepov, ki se jih izvede preko funkcije obvladovanja virov.

Osnovno strukturo ADS prav tako gradi baza podatkov in znanja ter mrežna komunikacijska infrastruktura lokalnega omrežja (ang. *Local Area Network – LAN*). Bazo podatkov in znanja sestavljajo tri skupine podatkov, in sicer: podatki vezani na proizvode, podatki vezani na naročila, oziroma projektne naloge in proizvodni podatki. ADS se preko komunikacijskih in logističnih vmesnikov povezuje v mrežo.

Poleg navedenih krmilni zank v delu (Žapčević and Butala 2012) avtorja predlagata koncept samo-učječega avtonomnega delovnega sistema (ang. *Self-Learning Autonomous Work System – SLAWS*), ki omogoča ADS izvedbo funkcije samo-učenja, Slika 3.19.



Slika 3.19. Samoučeči avtonomni delovni sistem (Žapčević 2013)



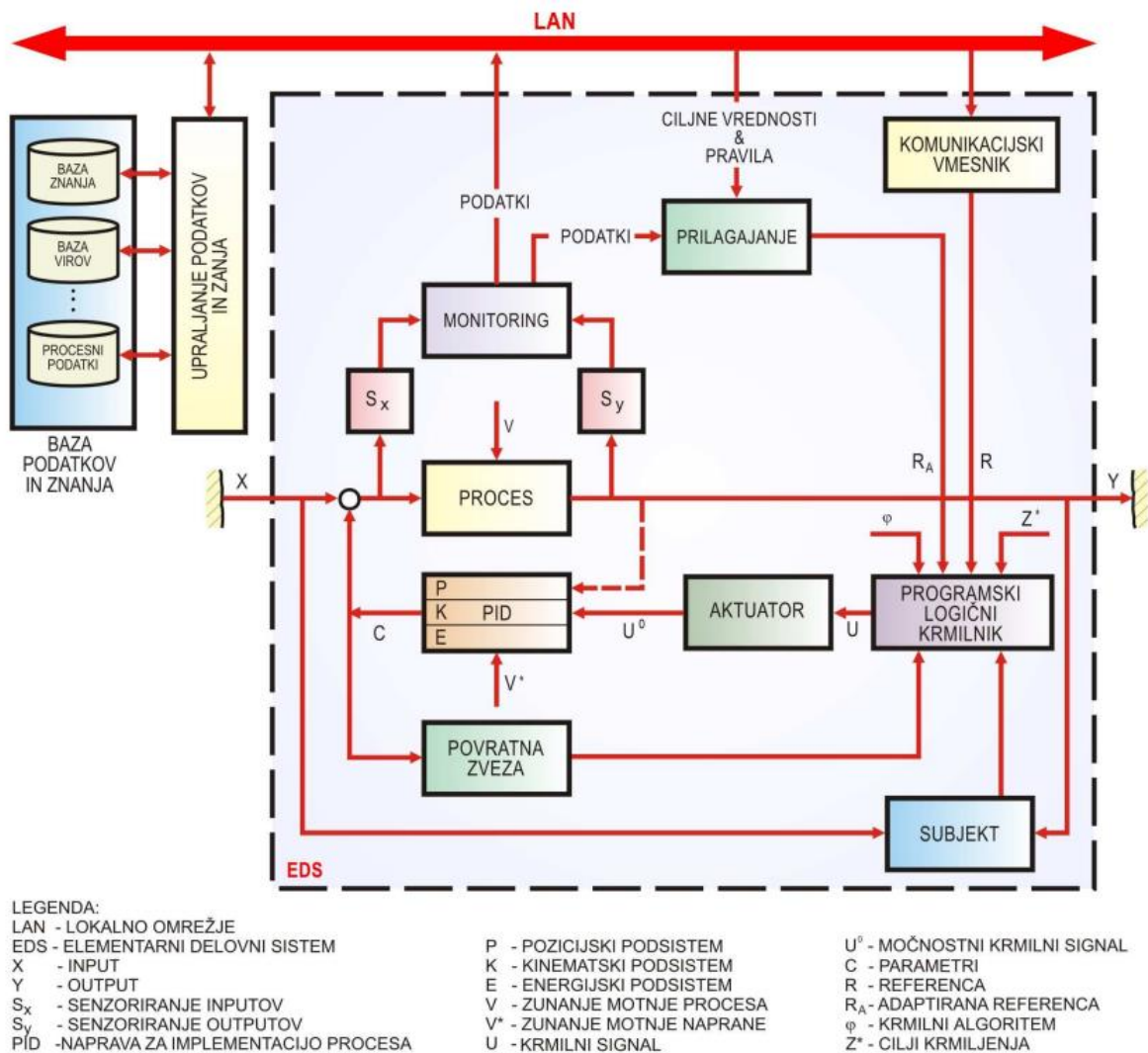
Samo-učenje omogoča adaptacijo in evolucijo kateregakoli proizvodnega sistema. Zanka samo-učenja izhaja iz baze podatkov, v kateri so shranjeni proizvodni podatki, ki se zbirajo v okviru krmilne zanke v realnem času.

Osnovna ideja adaptivnega krmiljenja procesov izhaja iz dela (Peklenik 1988) in je prikazana na blokovni shemi na Sliki 3.20. Jedro sheme predstavlja tako imenovani elementarni delovni sistem (EDS), ki je sestavljen iz treh vitalnih elementov: procesa, naprava za implementacijo procesa in človeškega *Subjekta*.

V EDS je oblikovana osnovna krmilna zanka, preko katere se krmili naprava za implementacijo procesa. V tej zanki logični krmilnik preko močnostnih elementov (aktuatorjev) aktira posamezne podsisteme naprave (npr. obdelovalnega stroja) (glej spodnji del sheme na Sliki 3.19). Druga krmilna zanka, ki je prikazana na zgornjem delu sheme, pa je namenjena adaptivnemu krmiljenju procesa. V okviru te zanke je potrebno meriti izbrane vhodne in izhodne parametre procesa. Podatki teh meritev se uporabljajo za (1) kontinuirano pridobivanje podatkov o vrednostih procesnih parametrov v zanki za zbiranje podatkov in (2) identifikacijo stanja procesa v vsakem procesnem ciklusu, ki je osnova za adaptivno krmiljenje procesa (kot je prikazano na Sliki 3.19), (Žapčević 2013).

Za dinamično povezovanje ADS v proizvodno mrežo je uporabljen tržni mehanizem, ki stimulira gradnjo oziroma adaptacijo strukture glede na trenutne cilje in omejitve okolja. Samoorganizacija in distribuirano odločanje sta omogočila doseganje prilagodljivosti strukture.

Slika 3.20. Adaptivno krmiljenje procesa v EDS (Žapčević 2013), prilagojeno po (Peklenik 1988)



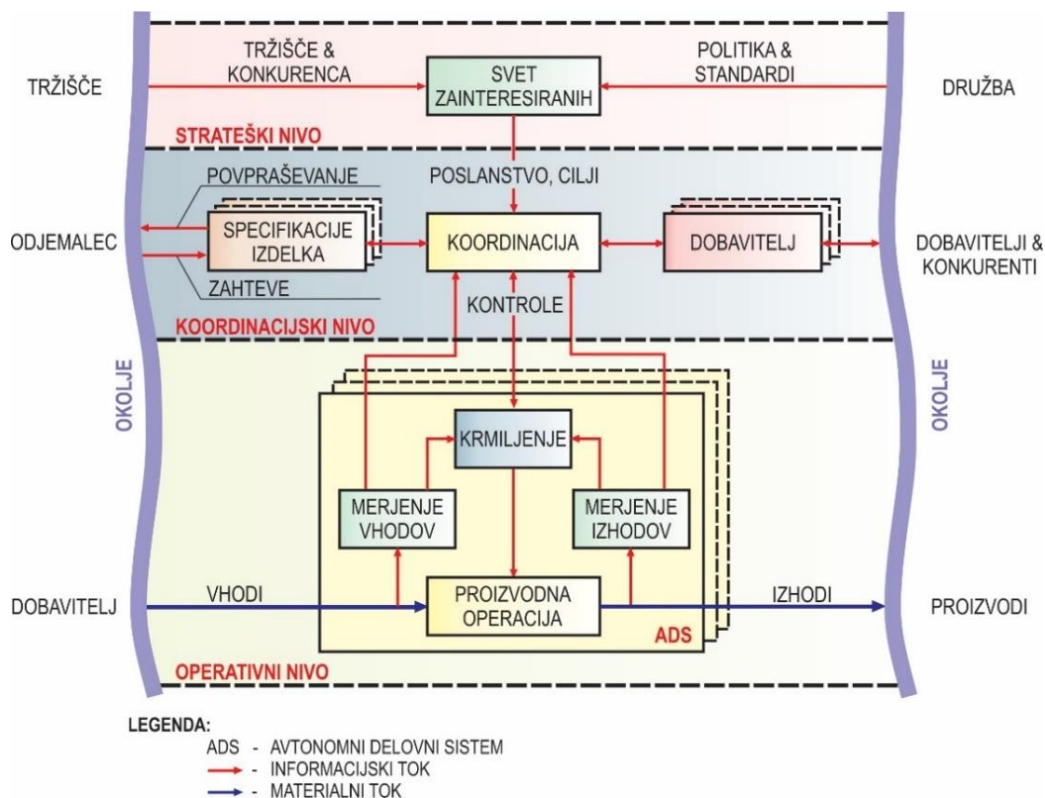
Koncept ADMS predstavlja tri nivoje kompleksnega proizvodnega sistema, Slika 3.21. Osnovni nivo je nivo operativnega delovanja s heterogenimi in redundantnimi avtonomnimi delovnimi sistemi, sposobnimi izvajanja različnih proizvodnih procesov. Drugi, srednji nivo je nivo koordinacije, kateri zagotavlja koordiniran proces specifikacije produkta med stranjo povpraševanja in stranjo izdelave.

Koordinacija se izvaja s ciljem optimizacije učinka celotnega proizvodnega sistema. Najvišji nivo predstavlja strateški nivo odločanja. Ta definira politiko delovanja na osnovi ciljev lastnikov.

ADS je vitek proizvodni sistem. Kot smo že omenili, vsebuje njegova struktura upravne in osnovne proizvodne funkcionalnosti. Poleg osnovnih proizvodnih funkcionalnosti, katere poseduje (vsaki ADS je specializiran za določeno področje, npr. lakiranje, struženje in freziranje obdelovancev večjih dimenzij, visoko tlačno litje, lasersko obdelavo, rezanje z vodnim curkom in podobno.) potrebuje ADS tudi ostale funkcionalnosti, kot so: kontrola kakovosti, nastavitve procesnih parametrov, interna logistika in transport, ekspertiza za umerjanje merilnih naprav itd. Teh funkcionalnosti ADS ne obsega, zato morajo

biti realizirane v obliki storitev. Torej ADS potrebuje storitveno podporo. Storitve, katere so namenjene proizvodnji, avtorji v delu (Huang et al. 2011) imenujejo proizvodno-orientirane storitve.

**Slika 3.21.** Konceptualni okvir ADMS (Sluga, Butala, and Peklenik 2005)



Posamezen ADS vsebuje znanje in izkušnje za posamezno področje proizvodnje skladno z njegovimi ključnimi funkcionalnostmi. Na podlagi tega ima ADS možnost, da identificira možne napake in odpovedi v procesih, ki bi lahko povzročili izdelke neustrezne kakovosti.

Kakovost pomeni sposobnost/ustreznost za uporabo (Montgomery 2009). Feigenbaum v knjigi (Feigenbaum 1991) definira kakovost kot celoten splet značilnosti proizvoda in storitev, ki jih le-ta pridobita skozi proces trženja, inženiringa, proizvodnje in vzdrževanja, s katerimi bosta proizvod in storitev dosegla pričakovanja kupcev. Širši pregled znanja s področja kakovosti je podan v delu (Garvin 1988).

Za proizvodnjo izdelkov ustrezne kakovosti je bistvenega pomena kontrola kakovosti. Kontrola kakovosti za ADS ne predstavlja ključne funkcionalnosti, obenem pa je nepogrešljiva. Širši opis storitvenega pristopa h kontroli kakovosti v proizvodnji je predstavljen v delu (Zupančič 2012).

### 3.4.10 Proizvodne mreže in mrežni proizvodni sistemi

Mrežno povezovanje proizvodnih podjetij odpira nove možnosti in priložnosti predvsem malim in srednje velikim podjetjem. Proizvodne mreže (ang. *Production Networks* – PN) temeljijo na povezovanju, komunikaciji, kooperativnem delovanju in sodelovanju povezanih podjetij. Proizvodne

mreže podjetij nudijo novi potencial za izboljšavo procesa ustvarjanja dodane vrednosti (Wiendahl and Lutz 2002). Glavna ideja proizvodnih mrež je skupna uporaba virov in skupno načrtovanje procesov ustvarjanja dodane vrednosti.

Pomen proizvodnih mrež je poudarjen v strateškem dokumentu *ManuFuture*<sup>10</sup>, ki formulira:

*»Tako imenovana virtualna tovarna prihodnosti bo proizvajala v adaptivnih mrežah, ki povezujejo OEM (izvirne proizvajalce opreme) s partnerji v verigi dodane vrednosti (pogosto mala in srednje velika podjetja) ter dobavitelji opreme in storitev, ki bodo izbrani na podlagi potreb v določenem času. Njihova sestava ne bo omejena s predpostavkami fizične lokacije, niti potrebami po čvrstih in dolgoročnih odnosih«.*

V članku (Janez Peklenik 2005), Peklenik predlaga pristop k strukturiranju mrežnih proizvodnih sistemov. Mrežni proizvodni sistemi (MPS) predstavljajo v mrežo povezane proizvodne sisteme, ki želijo izkoristiti prednosti povezovanja in predstavitve v obliki večjih sistemov. Za MPS je značilno, da gradniki mreže ohranijo avtonomijo odločanja, z medsebojno koordinacijo pa dosegajo konkurenčno prednost. MPS tvorijo visoko kompetentni partnerji, izbrani v relativno kratkem času, na osnovi potreb posameznega projekta (Westkämper and Hummel 2006).

Mrežne proizvodne sisteme je mogoče opazovati iz dveh osnovnih pristopov:

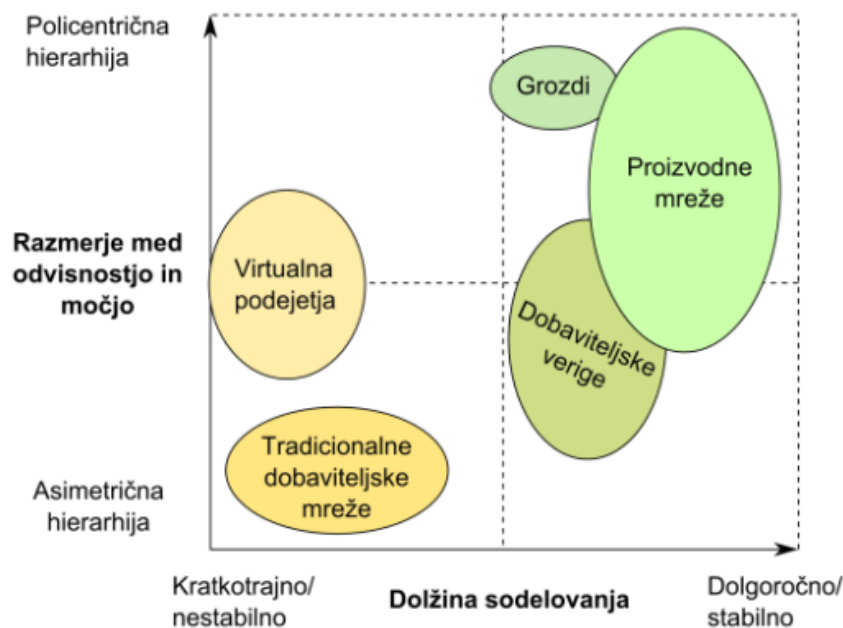
- koncept proizvodnih mrež, katerega v svojem delu predlagata Wiendahl in Lutz (Wiendahl and Lutz 2002). Vozlišča takšnih mrež so celotna podjetja, oziroma kompleksne hierarhične strukture, ki so zaradi številnih komunikacijskih kanalov in ravni odločanja neodzivne in neprilagodljive ter se upirajo krmiljenju. Glede na to se kompleksnost mreže s številom vključenih partnerjev še povečuje.
- koncept proizvodnih mrež, katerega predlagata Butala in Sluga v članku (Butala and Sluga 2006). Vozlišče mreže predstavlja avtonomni delovni sistem, ki omogoča obvladovanje strukturne kompleksnosti proizvodnih mrež. Gradniki mreže so relativno enostavne strukture z avtonomnim vedenjem. Avtonomni delovni sistem razpolaga s funkcionalnostmi in kompetencami, ki so potrebne za upravljanje in operiranje njegovih ključnih proizvodnih procesov, kot tudi za komunikacijo v mreži.

V proizvodnih mrežah je cilj povezovanja sodelovanje med organizacijsko enakovrednimi proizvodnimi sistemi z večinoma horizontalnimi relacijami. Lastnosti, ki ločijo proizvodne mreže od ostalih proizvodnih organizacijskih struktur, Slika 3.22, so dolgoročna povezanost sodelujočih v mreži, raznolikost in namenoma vzpostavljena redundanca proizvodnih sredstev. Vloga posameznega proizvodnega sistema in relacije med sistemi v proizvodni mreži so odvisne od proizvodnega koncepta, ki je implementiran (Wiendahl and Lutz 2002).

---

<sup>10</sup> *Manufuture High Level Group and Support Group, "ManuFuture Platform – Strategic Research Agenda, assuring the future of manufacturing in Europe", Manufacturing Conference 2005*

Slika 3.22. Klasifikacija konceptov sodelovanja proizvodnih sistemov (Wiendahl and Lutz 2002)



V članku (Butala and Sluga 2006), sta Butala in Sluga definirala koncept proizvodnih mrež kot:

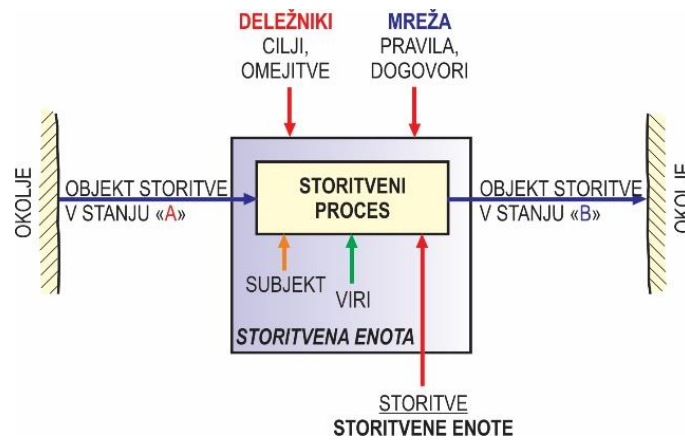
»Proizvodna mreža predstavlja osnovo za konkurenčnost, inovativnost, agilnost in prilagodljivost ter omogoča medsebojno povezanim partnerjem, da (1) oblikujejo dolgoročne poslovne koalicije, (2) razvijajo medsebojno razumevanje in zaupanje, (3) skupaj reagirajo na poslovne priložnosti, (4) s sodelovanjem ustvarjajo sinergijske učinke in (5) delijo informacije, znanje, vire, kompetence in rizike«.

Storitvena podpora izvajanju operacij v ADS, skozi koncept proizvodno-orientiranih storitvenih mrež (POSM) (ang. *Manufacturing-oriented Service Network – MOSeN*) je predlagana v delu (Zupančič, Sluga, and Butala 2012). V tem konceptu storitvena enota (SE) (ang. *Service Unit – SU*) predstavlja ponudnika storitve. Pri uporabi zunanji funkcionalnosti, ki so realizirane skozi storitev, se vzpostavljajo povezave med ponudnikom storitev oz. SE in ADS, ki ima v tem primeru vlogo uporabnika storitev.

SE ustvarja novo vrednost z izvajanjem storitev. Storitve se izvaja na podlagi storitvenega procesa, ki objektu storitve spremeni določene lastnosti. Podobno kot pri konceptu ADS, koncept POSM predlaga dva seta krmilnih vhodov v SE, glej Sliko 3.23. Cilj POSM-a je omogočiti storitveno podporo za proizvodne operacije ADS. Za to so potrebne storitve in urejenost mreže ADS in SE.

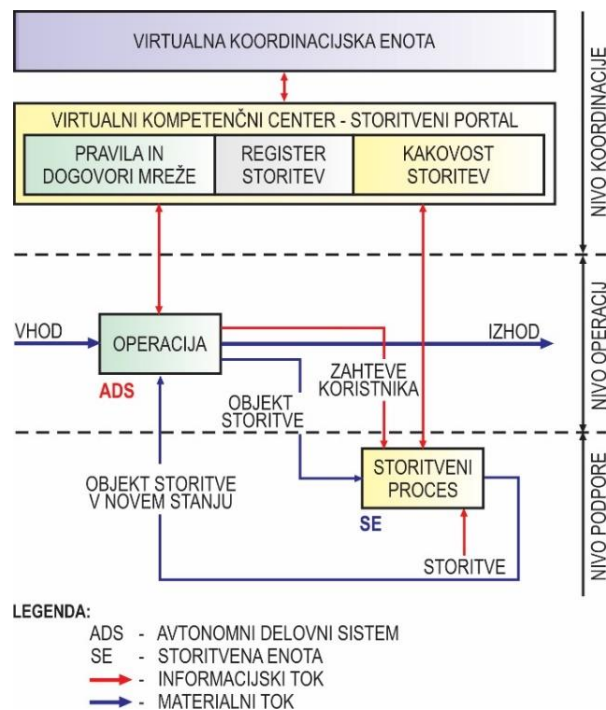
Koncept POSM predlaga skupno koriščenje določenih funkcionalnosti znotraj skupine ADS in SE. Koncept POSM je predvidel, da lahko ADS koristi različne proizvodno-orientirane storitve, od različnih storitvenih enot. Posamezna storitvena enota lahko podpira različne ADS.

Slika 3.23. Funkcijski diagram storitvene enote (Zupančič, Sluga, and Butala 2012)



Operativne aktivnosti POSM so, po mnenju avtorjev dela (Zupančič, Sluga, and Butala 2012), bazirane na proizvodno-orientiranih storitvenih arhitekturah (ang. *Manufacturing-oriented Service Architecture – MOSA*). MOSA določa, kako v okviru proizvodno orientirane storitvene mreže poteka storitvena podpora operacijam v ADS. Za nemoten potek operacij je potrebno med drugim ustrezno skrbeti za stroj, orodja, vpenjala in ostale pripomočke. Poleg tega obstajajo tudi deli operacij, za katere ADS ni ustrezno kompetenten in jih je potrebno realizirati s storitvami. Storitve izvede SE, pri čemer je storitev v bistvu proces, ki je izvršen nad objektom storitve, in sicer skladno z zahtevami koristnika. Proizvodno-orientirana storitvena arhitektura, ki obsega štiri vrste gradnikov POSM je prikazana na Sliki 3.24.

Slika 3.24. Proizvodno orientirana storitvena arhitektura (Zupančič, Sluga, and Butala 2012)



Vsaka proizvodno-orientirana mreža vsebuje poleg SE in ADS tudi dve posebni enoti, in sicer virtualni kompetenčni center (VCC) ter virtualno koordinacijsko enoto (VCU), kateri sta razvita v delu ([Sluga, Butala, and Peklenik 2005](#)).

Gradniki POSM so razvrščeni na treh nivojih. Storitve izvaja SE, ki se nahaja na nivoju podpore. Izvajanje operacij ADS podpirajo storitve. ADS se nahaja na nivoju izvajanja operacij. Sodelovanje med elementi mreže je realizirano skozi koordinacijski nivo, kjer obstajata VCC in VCU.

VCC je implementiran kot internetni portal, preko katerega so dostopni register storitev, kakovost storitev ter pravila in dogovori mreže. Preko VCC storitvene enote objavljajo informacije o razpoložljivih storitvah in kakšne so, v primeru potrebe po novih storitvah, njihove razpoložljive funkcionalnosti. Ta funkcionalnost VCC se imenuje register storitev.

V posamezni mreži veljajo pravila funkcioniranja njenih članov, ki so zavezujoča za vse člane mreže. Pravila mreže se nadgrajujejo z dogovori v okviru skupine, katero sestavljajo posamezni člani mreže. Dogovori določajo relacije med dvema ali več člani mreže, medtem ko pravila niso tako specifična in veljajo za vse člane. Za mrežo je značilno, da so storitve, ki so na razpolago njenim članom, ustrezne kakovosti. V ta namen je v okviru VCC omogočeno tudi ugotavljanje kakovosti storitve.

VCU nudi podporo pri razvoju novih storitev, kjer se zahteva sodelovanje različnih storitvenih enot. Za razvoj novih storitev je značilna funkcija modeliranja. Bodoči ponudnik storitve mora v funkcijski model v celoti vključiti vhode, izhode, mehanizme in kontrole. Vendar metodologija funkcijskega modeliranja ni omejena le na ponudnika storitve. Lahko jo uporablja tudi potencialni koristnik in sicer, kadar načrtuje potrebne funkcije za svoje proizvodnje. V primeru razpoložljivih storitev le-temu ni potrebno modelirati tistih funkcij, ki so lahko realizirane s storitvami ([Zupančič, Sluga, and Butala 2012](#)).

Uporaba naprednih IKT v domeni mrežnih proizvodnih sistemov in proizvodnih mrež je odprla pot k razvoju koncepta virtualnega podjetja (VP) (ang. *Virtual Enterprise* – VE). Pojem VP izhaja iz pojma virtualna organizacija ([Wiendahl, Engelbrecht, and Hamacher 2001](#)). VP je sistemska mrežna struktura, ki temelji na začasni, rekonfigurabilni povezavi ključnih kompetenc partnerjev (deležnikov mreže) in ima za cilj odgovoriti na kompleksne zahteve trga preko kooperativnega in kolaborativnega povezovanja podjetij, ki bodo realizirala proces razvoja, proizvodnje, distribucije in servisiranja zahtevanega proizvoda čez njegov celotni življenjski cikel.

Camarinha-Matos in Afsarmanesh sta v delu ([Camarinha-Matos and Afsarmanesh 1999](#)) definirala VP kot:

*»začasno zavezništvo podjetij, ki med sabo izmenjujejo veščine ali osnovne kompetence in vire, da bi se boljše odzvali na poslovne priložnosti in njihovo sodelovanje podpirajo računalniška omrežja«.*

Proizvodne mreže v tem primeru predstavljajo potencial, na osnovi katerega so lahko ad-hoc formirana različna VP za izpolnjevanje različnih nalog oz. zahtev kupcev.

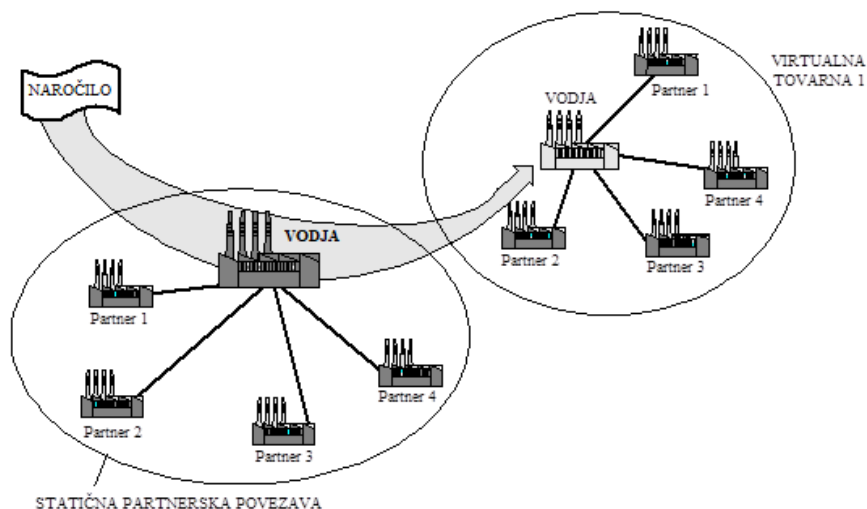
Poleg tega, da VP sestavljajo kompetence, ki jih prispevajo različni partnerji, pa VP deluje do kupca kot en, enoten in uglasen sistem. Dekompozicija VP se izvede, ko so enkrat zahteve kupca dosežene (ko je naročilo realizirano) ter se kompetence in izkušnje iz VP prenesejo na mrežo (Kalpič 2002), (Aerts, Szirbik, and Goossenaerts 2001). To pomeni, da VP predstavlja začasno organizacijsko strukturo in povezavo kompetenc udeležencev PN, dokler PN predstavlja dolgoročno povezovanje njenih članov.

Poznamo več vrst strukture VP, tako v smislu organizacije, kot tudi v smislu ciljev in delovanja. Osnovne strukture so (Kalpič 2002): 1) notranje VP, 2) statično VP, 3) VP s posrednikom, in 4) dinamično VP.

Notranje VP označuje organizacijsko obliko znotraj enega podjetja, pri kateri se podjetje odloči uporabljati zgoraj omenjene principe znotraj svojih meja. Pri tem posamezne elemente iz katerih se zgradi končna organizacijska struktura predstavljajo timi.

Statična VP združuje stalne partnerje in so zgrajena na podlagi statičnih partnerskih povezav med podjetji, Slika 3.25. Zaradi jasne delitve kompetenc in udeležbe partnerjev na riziku in dobičku, je ustvarjanje VP enostavnejše, cenejše in hitrejše, a predstavlja omejitev v smislu sposobnosti reagiranja na nove izzive s strani trga. Statična povezava je primerna za stabilno okolje, za dinamično pa ni dovolj fleksibilna (Kalpič 2002).

Slika 3.25. Statična partnerska povezava podjetji (Kalpič 2002)



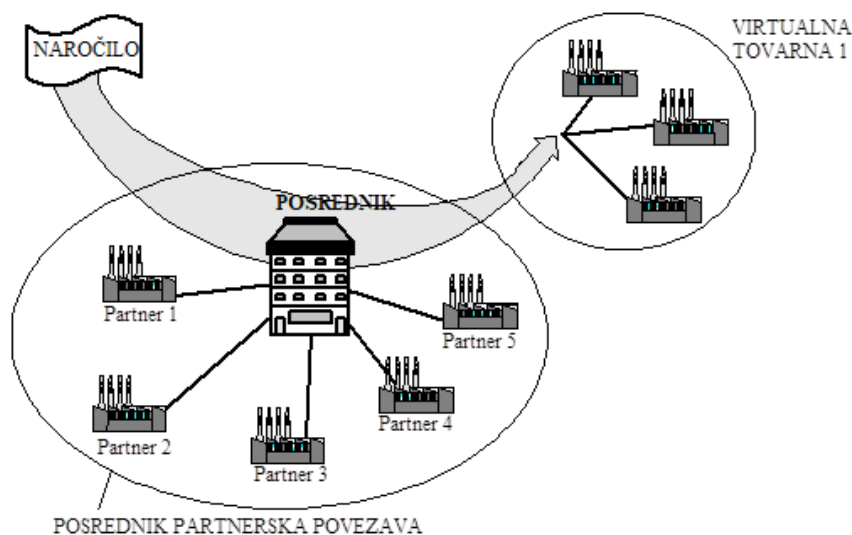
VP s posrednikom predstavlja povezavo enakovrednih partnerjev, pri čemer obvladovanje partnerskih povezav in gradnjo virtualnega podjetja prevzame posrednik, Slika 3.26. Njegova vloga obsega tudi neposredno komunikacijo z naročnikom in skrb za njegovo zadovoljstvo pri čemer se posrednik običajno zanaša na eno izmed podjetij v povezavi. Težava pri tej organizacijski obliki VP je v tem, da morajo partnerska podjetja posredniku zaupati informacije o kapacitetah, ki so običajno zaupne (Kalpič 2002).

Dinamično VP, včasih imenovano tudi podjetje brez meja, gradi na decentralizirani partnerski povezavi, Slika 3.27. Pri dinamičnem VP obstaja iniciativni partner, ki sproži gradnjo virtualnega podjetja. Včasih

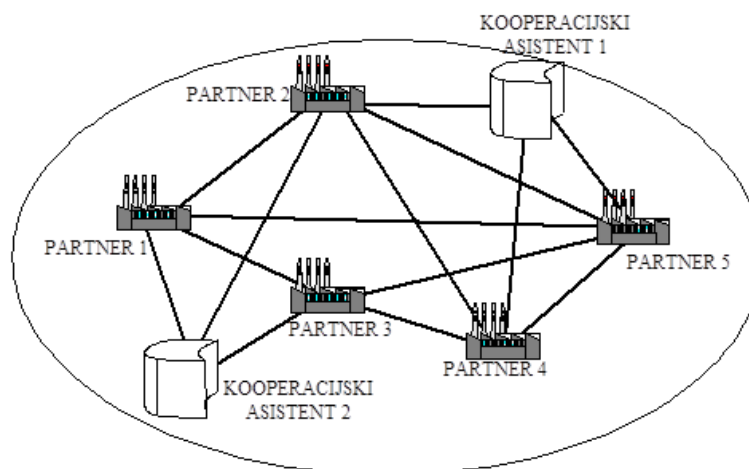


se pri tej obliki pojavljajo t.i. kooperacijski asistenti, katerih vloga je posredovanje kontaktov in informacij med partnerskimi podjetji.

Slika 3.26. Posrednik partnerskega podjetja (Kalpič 2002)



Slika 3.27. Decentralizirana partnerska povezava, podjetje brez meje (Kalpič 2002)



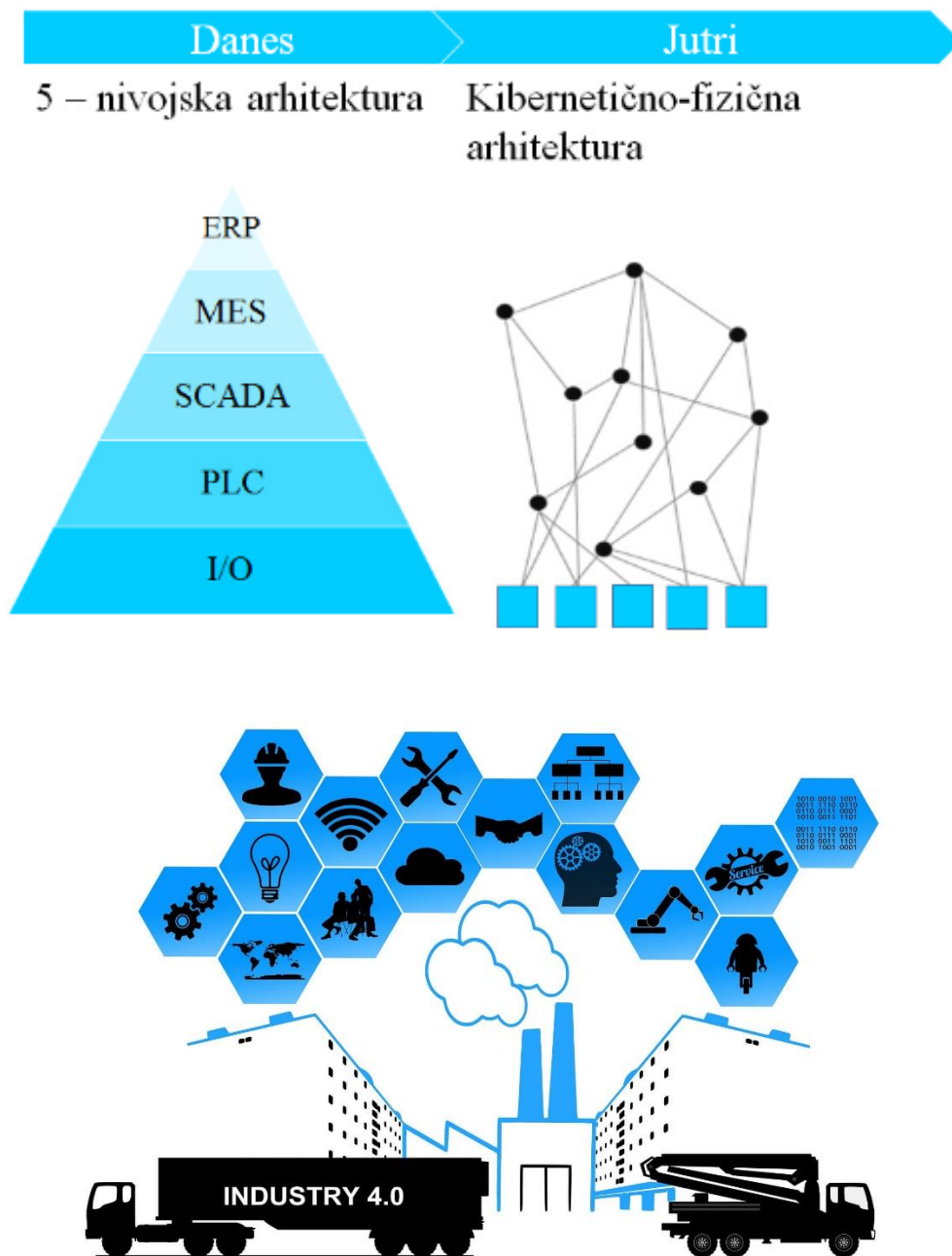
Koncept grozdov pomeni razširitev koncepta virtualnega podjetja. Grozd vključuje različne hierarhične mreže podjetij, njihovih kupcev in dobaviteljev, skratka vseh, ki so potrebni za delovanje takšne mreže. Grozd ima svoj fokus na posamezni trg ali sektor. Podjetja se lahko povežejo v več grozdov in grozdi se lahko pojavijo v sklopu drugih grozdov (Porter 1998), (Carrie 2000). Podjetja, ki delujejo v grozdih, niso omejena samo na proizvodna podjetja. Poznani so grozdi, ki zajemajo vse tipe poslovanja.

Peklenik v delu (Peklenik 2002) predlaga dinamične grozdne strukture kot novo paradigmo za proizvodnjo visokotehnoloških proizvodov. V tem konceptu poteka transfer znanja med proizvodnimi enotami in enotami za raziskave in razvoj, ki je zelo intenziven in učinkovit (Žapčević 2013).

### 3.5 Povzetek

V tem poglavju so izpostavljeni obstoječi koncepti naprednih proizvodnih sistemov in identificirane njihove ključne lastnosti.

Če povzamemo to poglavje lahko zaključimo, da izzivi, ki jih prinaša globalizacija, odpirajo pot za nove naprednejše koncepte in modele proizvodnih sistemov, ki bo temeljili na konceptu *Industrije 4.0*.



VIR: <https://www.integratedfoodprojects.com/news/what-is-industry-4-0/>

## 4 PAMETNI PROIZVODNI SISTEMI – PROIZVODNA PARADIGMA INDUSTRIJE 4.0: KONCEPTI IN MODELI

*»Pametni ljudje si prihranijo tudi kaj za jutri in ne tvegajo, da bi nosili vsa svoja jajca v eni košari.«*

*Miguel de Cervantes*

Raba interneta je na področju industrijskih procesov omogočila ustvarjanje t. i. »*pametnega okolja*« (ang. *Smart Environment*), ki predstavlja glavni dejavnik integracije v proizvodnem okolju oz. glavni potencial za povezovanje fizičnih in kibernetskih elementov sistema ter na tak način zgradbo t. i. »*pametnih sistemov*«, ki ustvarjajo t. i. »*pametne tovarne*« (ang. *Smart Factory – SF*) (Zuehlke 2010).

Izhodišča za utemeljitev in uresničitev novih, naprednih sistemov, t.i. »*pametnih proizvodnih sistemov*«, ki bodo dali odgovore na predhodno izpostavljena dejstva o problemih in izzivih v proizvodnji iz vidika informacijskih sistemov so opisana v delu Marc Weiser (Weiser 1991).

V knjigi »*Smart Factory*« (Lucke, Constantinescu, and Westkämper 2008) avtorji uporabljajo termin »*pametno*«, da bi opisali definicijo pametne tovarne. Pametna tovarna predstavlja tovarno ljudi in naprav, medsebojno povezanih z namenom realizacije določenih nalog. Vloga in strukturni elementi pametne tovarne so opisani v članku (Hozdić 2015).

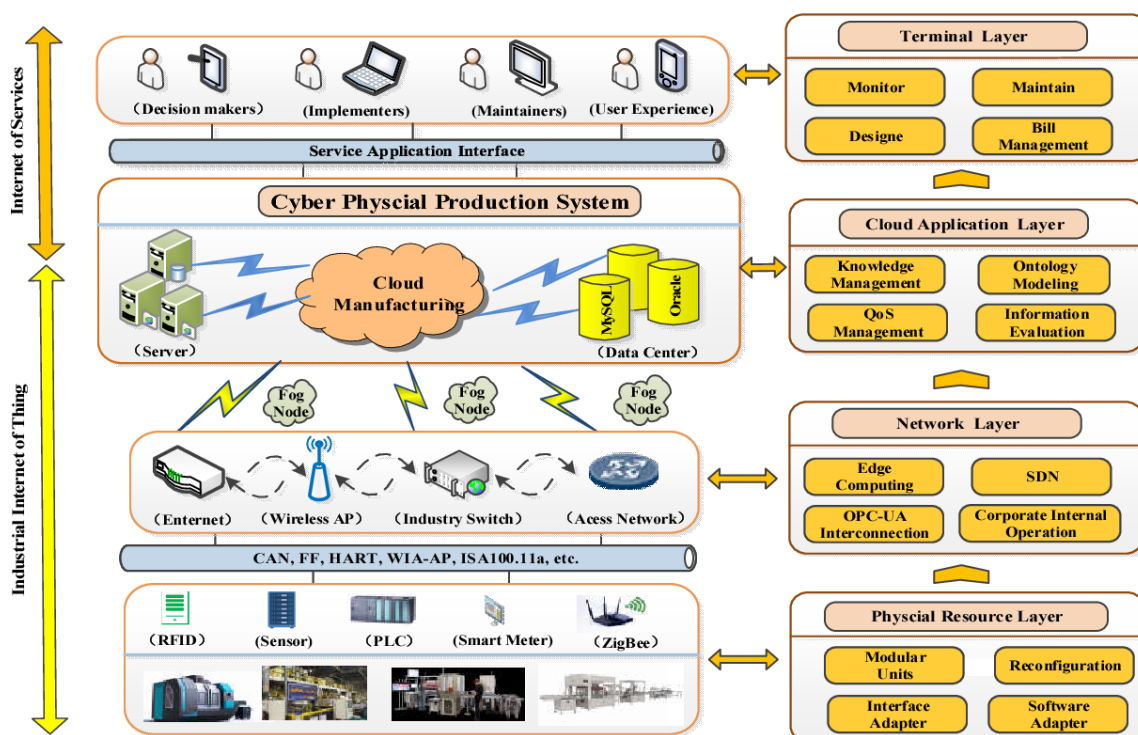
Radziwon in soavtorji v delu (Radziwon et al. 2014) predlagajo definicijo, ki je v znanstvenih krogih največ citirana:

*»Pametna tovarna je proizvodna rešitev, ki omogoča takšne fleksibilne in prilagodljive proizvodne procese, ki bodo rešili probleme v svetu, ki nastajajo v proizvodnem pogonu z dinamičnimi in hitro menjajočimi kritičnimi pogoji povečanja kompleksnosti. Te posebne rešitve se lahko po eni strani nanašajo na avtomatizacijo, kar se razume kot kombinacija programske opreme, fizične opreme in/ali mehanike, kar bi moralo doseči optimizacijo proizvodnje, kar pa posledično izzove zmanjšanje nepotrebne dela in izgube virov; po drugi strani, je to mogoče zapaziti v perspektivi sodelovanja med različnimi industrijskimi in neindustrijskimi partnerji, kjer uspešnost prihaja iz oblikovanja dinamičnih organizacij.«*

Globalno, distribuirana proizvodnja je, ob razvoju IKT, omogočila naglo širitev digitalnih in virtualnih podjetij, ravno tako pa tudi k razvoju digitalnih in virtualnih tovarn. V znanstvenih krogih obstajajo tudi drugi pojmi pri katerih je namen, da se definira oblika proizvodnih organizacij, sposobnih odgovoriti na zahteve sodobnih, globalnih mega trendov, kot so vseprisotna proizvodnja (Yoon, Shin, and Suh 2012), tovarna stvari (Lucke, Constantinescu, and Westkämper 2008), tovarna v realnem času (Zuehlke 2010), inteligentna tovarna prihodnosti (Hameed, Durr, and Rothermel 2011).

V knjigi »Towards the Re-Industrialization of Europe« je prikazana vizija razvoja bodoče proizvodnje v Evropi (Westkämper 2014). Hierarhična arhitektura pametne tovarne je prikazana na Sliki 4.1.

Slika 4.1. Hierarhična arhitektura pametne tovarne (Chen et al. 2018)



Na podlagi navedenih pristopov za prihodnji razvoj konceptov, paradigem in vizij proizvodnih sistemov (pametna proizvodnja, socialna proizvodnja, proizvodnja bazirana na oblaku, proizvodnja bazirana na znanju, proizvodnja bazirana na reciklaži, proizvodnja bazirana na kibernetško-fizičnih sistemih) v nadaljevanju je prikazan opis najpogostejše predlaganih pristopov k novi viziji industrijske proizvodnje v času Industrije 4.0, kot so: proizvodnja, ki bazira na oblaku (Li et al. 2010), vseprisotna proizvodnja (Putnik 2010), kibernetško-fizični proizvodni sistemi (Monostori 2014) in socialno kibernetško-fizični proizvodni sistemi (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić and Butala 2020).

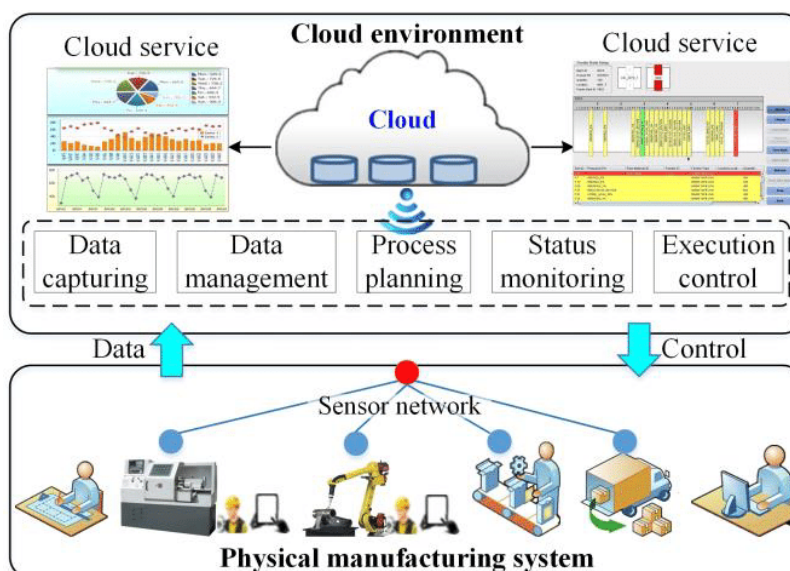
## 4.1 Proizvodnja zasnovana na oblaku

Računalniški oblak je nova tehnologija, ki je konceptualno že davno zamišljena, vendar šele zadnjih nekaj let prihaja v širšo uporabo (Caseres et al. 2010). Internet stvari, kolaboracija in »računalniški oblak« so pri avtorjih (Bughin, Chui, and Clouds Manyika 2010) spoznane kot ključni členi, ki bodo omogočili razvoj novih oblik podjetji in njihovih proizvodnih sistemov.

Računalniški oblak pri industrijski proizvodnji v uporabi najdemo v delih številnih avtorjev, med drugim v (Zhang et al. 2010), (Xu 2012), (Škulj et al. 2015). Proizvodnja v oblaku ja na prvi pogled mrežni koncept proizvodnje, pogosto identificiran s proizvodnjo bazirano na Internetu ali distribuirani proizvodnji. Prav tako se proizvodnja v oblaku smatra za novo multi-disciplinarno domeno, ki zajema omreženo proizvodnjo, proizvodne mreže, virtualno proizvodnjo, proizvodnjo bazirano na Internetu stvari in računalništvo v oblaku.

Proizvajanje v oblaku (ang. *Cloud Manufacturing* – CMfg) je opredeljeno kot na naročnika osredotočen model, ki izkorišča deljen dostop do različnih proizvodnih sredstev na zahtevo. S pridobljenimi proizvodnimi sredstvi se ustvaričasne proizvodne linije z možnostjo spreminjanja, ki imajo višji izkoristek, zmanjšan strošek obstoja izdelka in omogočajo optimalno razpolaganje s sredstvi glede na spreminjajoče zahteve naročnikov (Wu et al. 2013). Arhitektura proizvodnega sistema zasnovana na proizvodnji v oblaku je predstavljena na Sliki 4.2.

**Slika 4.2.** Arhitektura proizvodnega sistema zasnovanega na oblaku (Qi and Tao 2019)



Sistem proizvodnje zasnovane na oblaku vršijo trije ključni akterji: ponudnik storitev, operater oblaka in uporabnik storitve, kakor je opisano v delu (Wu et al. 2012). Po (Zhang et al. 2014), je proizvodnja zasnovana na oblaku nova proizvodna paradigma, ki temelji na računalniških mrežah. Le ta uporablja mrežo, računalništvo v oblaku, kot mogoča tehnologija za pretvorbo proizvodnih virov in proizvodnih možnosti v proizvodne storitve, s katerimi se lahko upravlja in deluje na pameten in enostaven način, da bi se zagotovila optimalna delitev proizvodnih virov in proizvodnih sposobnosti.

Referenčna arhitektura računalniškega oblaka in proizvodnega sistema baziranega na proizvodnji v oblaku je prikazana v delu (Xu 2012), decentralizirane mrežne arhitekture za proizvodnjo zasnovano na oblaku (Škulj et al. 2015), medtem ko so možnosti uporabe obravnavane, med ostalim, v delih (Wei and Liu 2015), (Lin and Chong 2015).

## 4.2 Vsepovsodna proizvodnja

Termin »vsepovsodna proizvodnja« (ang. *Ubiquitous Manufacturing*) izhaja iz termina »vsepovsodnega računalništva« (ang. *Ubiquitous Computing*), ki ga v svojem delu definira Mark Weiser (Weiser 1991), Weiser definira vsepovsodno računalništvo kot koncept za inicializacijo Interneta stvari, tako da predmeti vsebujejo informacije in skozi medsebojno komunikacijo te informacije tudi delijo. Njegova vizija vsepovsodnega računalniškega sistema se ni utemljevala zgolj na ideji komunikacije in prenosa informacij, pač pa tudi v avtonomni obdelavi podatkov, pri čemer se, v takšnih sistemih, ustvarja določen nivo inteligence.

Diegel in ostali avtorji v delu (Diegel, Bright, and Potgieter 2004) poudarjajo da vsepovsodno računalništvo zajema tudi neopazno komunikacijo/interakcijo med ljudmi in stroji (ang. *Human to Machine – H2M*) po eni strani kot tudi od strojev do strojev (*M2M*) po drugi strani. V delu (Subirana, Sarma, and Fleisch 2006) avtorji izpostavljajo, da takšne tehnologije v minulem obdobju niso bile prepoznane zaradi visoke cene njihove proizvodnje. Danes pa, ko se cena in velikost komponent vsepovsodnega računalništva vrtoglavo zmanjšuje, vsepovsodno računalništvo pridobiva na vse večji teži.

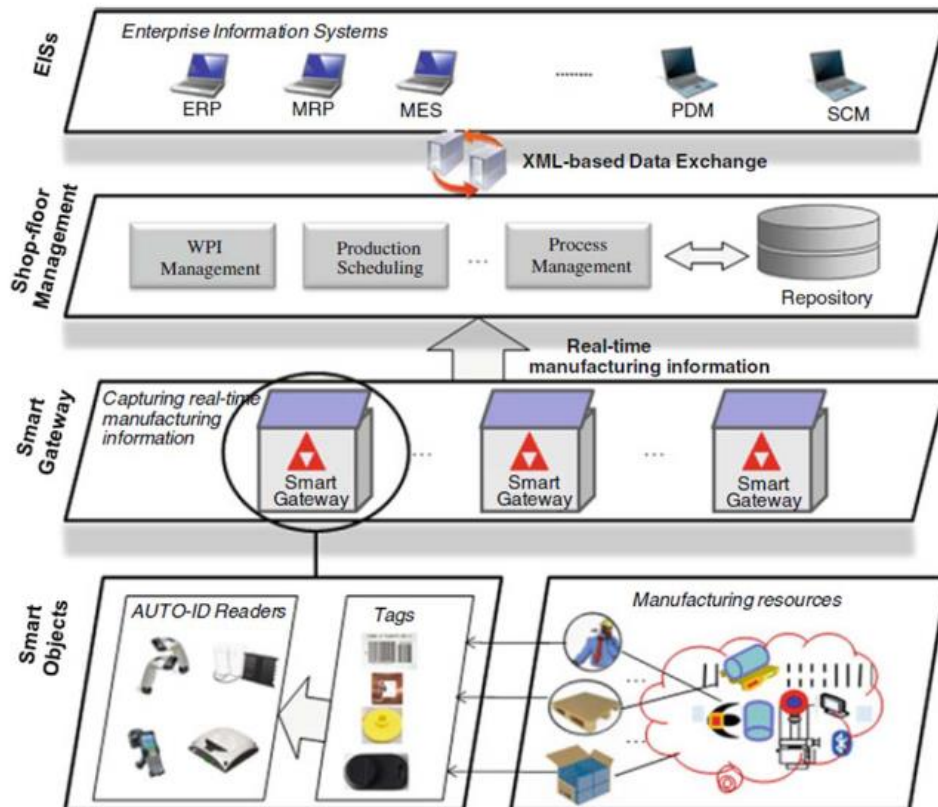
Avtorji v delu (Ma et al. 2005) vsepovsodno računalništvo definirajo kot most, ki povezuje virtualni, digitalni svet (digitalni podatki shranjeni na Internetu in podobno) in dejanski fizični svet.

V domeni industrijske proizvodnje, v zadnjih nekaj letih, obstaja termin »vsepovsodna proizvodnja« katerega si mnogi avtorji prizadevajo definirati. Tako koncept vsepovsodne proizvodnje definira Suh in soavtorji v delu (Suh et al. 2008), kot koncept ki se osredotoča na zbiranje informacij skozi celotni životni cikel proizvodov uporabljajoč jih za načrtovanje in proizvodnjo proizvodov. Putnik in ostali v delu (Putnik et al. 2007) uvajajo koncept vsepovsodnih proizvodnih sistemov in podjetja (ang. *Ubiquitous Production Systems and Enterprises – UPSE*), ki temelji na virtualnih in distribuiranih proizvodnih sistemih in podjetjih, medtem ko v delu (Putnik 2010) razpravlja o tem ali vsepovsodno računalništvo pomeni vsepovsodno dostopnost proizvedenega blaga ali le vsepovsodna dostopnost proizvodnih procesov. V delu (Putnik 2012) avtor predlaga arhitekturo, ki lahko vsebuje implementacijo in eksploatacijo vsepovsodne proizvodnje in proizvodnje zasnovane na oblaku, skozi neformalno in konceptualno predstavitev.

Skozi pregled literature so opažena različna področja preučevanja vsepovsodne proizvodnje, tako kot so v domeni vsepovsodni mrežni proizvodni sistemi (Lin and Chen 2017), vsepovsodni proizvodni sistemi zasnovani na oblaku v domeni robotskih aplikacij (Wang et al. 2017), konceptualni okvirji za vsepovsodne tovarne (Yoon, Shin, and Suh 2012), konceptualni okvirji za vsepovsodne avtonomne delovne sisteme (Husejnagić and Sluga 2015), v domeni uporabe IKT za implementacijo koncepta

vsepovsodnih proizvodnih sistemov (Vrabič et al. 2011) med tem ko je referenčna infrastruktura za uresničitev vsepovsodne proizvodnje prikazana v članku (Zhang et al. 2013). Referenčna infrastruktura za uresničitev vsepovsodno proizvodnjo je predstavljena na Sliki 4.3.

**Slika 4.3.** Referenčna infrastruktura za uresničitev vsepovsodno proizvodnjo (Zhang et al. 2013)



### 4.3 Kibernetско-fizični proizvodni sistemi

Pred samim definiranjem besedne zveze »kibernetско-fizični« je potrebno najprej definirati pojem »kibernetike«. Izraz »kibernetika« izhaja iz grške besede »kibernein« kar pomeni upravljati. Temelje kibernetike, v današnji obliki, je postavil ameriški znanstvenik Norbert Wiener, leta 1948 v svoji knjigi »CYBERNETICS or control and communication in the animal and the machine« (Wiener 1948).

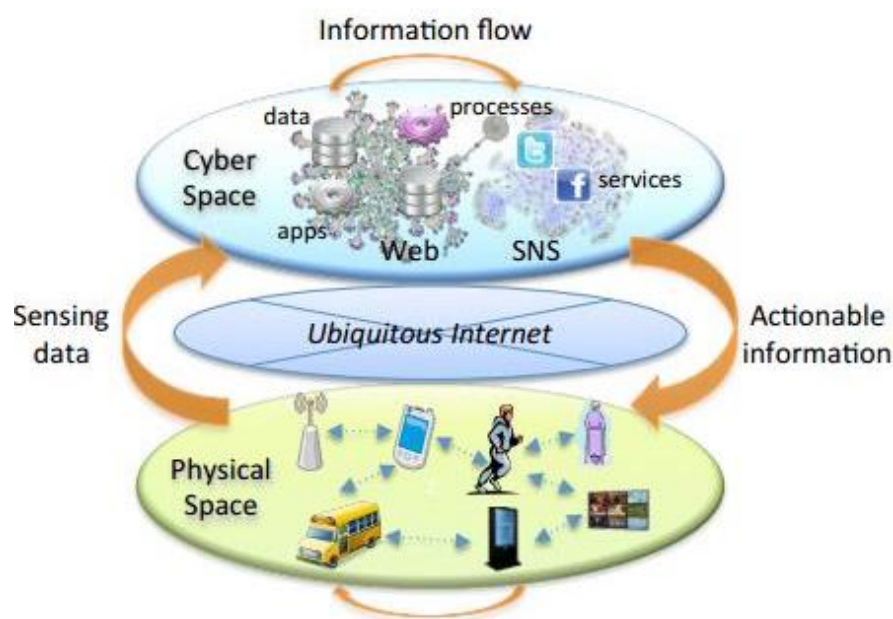
Leta 1982 William Gibson na temeljih kibernetске znanosti v delu (Gibson 1984) opredeli pojem kibernetskega prostora (ang. *cyberspace*) kot nove in neznane dimenzije. Pod vplivom razvoja interneta postaja izraz »kibernetски prostor« vse bolj običajen in domač v vsakdanjem življenju. Pogosto postaja sinonim za digitalni prostor, ki nas obdaja, katerega omogočajo napredne tehnološke aplikacije, ki lahko delijo in izmenjujejo podatke, informacije in znanja z drugimi sodelujočimi v kibernetickem prostoru. Tekom zadnjih dvajsetih let je bilo razvitih veliko različnih definicij kibernetického prostora. Benedikt v članku (Benedikt 1991) definira kiberneticki prostor kot neskončni umetni svet, kjer se ljudje gibljejo v informacijski bazi prostora.

Michael Heim v (Heim 1993) opredeli kibernetiski prostor kot:

»...elektronsko omrežje, v katerem se nahaja virtualna resničnost. Virtualna resničnost je pa samo eden od fenomenov v tem elektronskem prostoru. V okviru vsakdanjega sveta je kibernetiski prostor skupek orientacijskih točk, s pomočjo katerih lažje iščemo znotraj podatkovne baze«.

Kibernetisko-fizični sistemi (ang. *Cyber-Physical Systems* – CPS) so v bistvu nova generacija sistemov, ki integrirajo računalniške in fizične sposobnosti (Lee 2008), (Lee and Seshia 2011), Slika 4.4.

Slika 4.4. Kibernetisko-fizični sistemi (Eric et al. 2013)



Kompleksno definicijo KFS so podali avtorji v (Cardenas, Amin, and Sastry 2008):

*Kibernetisko-fizični sistemi združujejo računalniške in komunikacijske sposobnosti za spremljanje in nadzor subjektov v fizičnem svetu. Ti sistemi so običajno sestavljeni iz niza omreženih agentov, vključno s senzorji, aktuatorji, krmilnimi enotami in komunikacijskimi napravami.*

Kibernetisko-fizični sistemi omogočajo številne možnosti v različnih domenah človekovega življenja (Kumar 2012), (Geisberger and Broy 2012), (Hu 2013) kot so: dobava električne energije v distribucijskih mrežah; na področju medicinskih naprav in sistemov; pri kontroli in nadzoru prometa; naprednih avtomobilskih sistemih; kontrole okolja; letalskih kontrolnih sistemov; distribuiranih robotskih sistemov; obrambnih sistemov; inteligentnih proizvodnih struktur. V zadnjih desetih letih je področje kibernetisko-fizičnih sistemov postalo predmet zanimanja mnogih raziskovalcev in znanstvenih skupnosti.



Od leta 2012 je rapiden porast števila objavljenih znanstvenih del, ki se ukvarjajo s tematiko kibernetiko-fizičnih sistemov v različnih domenah (Monostori et al. 2016).

KFS ustvarjajo osnovo za strukturiranje novih proizvodnih sistemov (Monostori 2014), ki se lahko odzovejo na domala vsako spremembo na trgu v realnem času in prav tako z visoko fleksibilnostjo znotraj in zunaj meja samega podjetja. To ne dela proizvodnje samo hitrejše in skladnejše s posameznimi zahtevami kupcev, pač pa omogoča tudi, da so sami proizvodni procesi znotraj podjetja optimizirani, proizvodni sistemi pa inovativni, evolutivni in samoorganizirajoči. Prva področja rabe KFS v industrijski proizvodnji so vsekakor področja robotike, mehatronike in adaptivnih distribuiranih proizvodnih sistemov.

Kibernetiko-fizični proizvodni sistemi igrajo pomembno vlogo v razvoju industrijske proizvodnje v razvitih Evropskih državah in Severni Ameriki (Broy 2010), (Detlef and Lisa 2011), (Spath, Gerlach, and Schlund 2013) in predstavljajo temeljno možnost za uresničenje nove proizvodne filozofije, oziroma, strategije Industrije 4.0 (Kegermann, Wahlster, and Johannes 2013).

Kibernetiko-fizične proizvodne sisteme (KFPS) definira Monostori v svojem članku (Monostori 2014) kot:

*...utemeljeni na kibernetiko-fizičnih sistemih in so sestavljeni iz avtonomnih in kooperativnih elementov in podsistemov, ki se prek komunikacij in interakcij v najrazličnejši položajih povezujejo na vseh nivojih proizvodnje: od strojev in procesov do proizvodnih in logističnih mrež. Operativno modeliranje in krmiljenje kibernetiko-fizičnih proizvodnih sistemov omogoča realizacijo palete osnovnih aplikativno orientiranih nalog, predvsem pa nadzora sistema na kateremkoli nivoju v realnem času.*

V članku (Monostori et al. 2016), Monostori in soavtorji navajajo tri ključne karakteristike KFPS, ki so:

- *inteligentnost* – elementi so sposobni sami zbirati podatke iz svoje okolice;
- *povezljivost* – elementi se povezujejo prek interneta v smislu kooperacije in sodelovanja, kar vključuje tudi povezovanje ljudi;
- *odzivnost* na notranje in zunanje spremembe.

Sociološke aspekte v prihajajočih KFS v domeni proizvodnih mrež opisujejo Morosini in soavtorji v članku (Morosini et al. 2013). Pregled evolucijskega razvoja prihodnjih sistemov ob prikazu novih proizvodnih paradigem in novih proizvodnih konceptov je podan v članku (Esmaeilian, Behdad, and Wang 2016), v katerem avtorji obravnavajo tudi sociološke aspekte prihodnjih proizvodnih sistemov.

Uresničenje kibernetiko-fizičnih proizvodnih sistemov po načelih povezovanja holonov, agentskih struktur in funkcijskih blokov, je tematika članka (Wang and Haghghi 2016). Avtorji utemeljujejo koncept kibernetiko-fizičnih proizvodnih sistemov na osnovnih načelih holonskih proizvodnih sistemih. Prototipna implementacija industrijske avtomatizacije bazirane na tehnologijah kibernetiko-fizičnim sistemov, kot so SOA, agenti in oblak, opisujejo Leitão in ostali avtorji v članku (Leitão, Colombo, and Karnouskos 2016).

Prehod na nove proizvodne strukture, ki bodo temeljile na kibernetiko-fizičnih konceptih, zahteva razvoj novih modelov proizvodnih sistemov na vseh nivojih. Le ti morajo omogočiti: 1) ustrezno umestitev *subjekta* v sistem, katerega vloga se v kibernetiko-fizičnih sistemih bistveno spreminja; 2) digitalizacijo in kibernetizacijo obstoječih delovnih procesov; 3) razvoj in realizacijo novih funkcionalnosti, ki jih omogočata digitalizacija in kibernetizacija dela; 4) povezovanje v »*pametna okolja*«; 5) vertikalno povezovanje v integrirane delovne strukture; 6) horizontalno povezovanje v omrežja na različnih nivojih delovanja (Hozdić 2020b).

Razvoj novih konceptov KFS v proizvodni domeni torej predstavlja velik korak v evoluciji organizacijskih in sistemskih oblik proizvodnih struktur in njihov prehod iz socialno-tehničnih v socialno-kibernetiko-fizične sisteme. Novostrukturirani socialno-kibernetiko-fizični proizvodni sistemi (SKFPS) (ang. *Socio-Cyber-Physical Production Systems – SCPPS*) (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020a), (Hozdić 2020c) postajo sistemi z določeno stopnjo inteligence, oziroma postajo t. i. »*pametni sistemi*«, ki bodo omogočali bistveno večjo agilnosti in adaptivnost elementov proizvodnih podjetij za potrebe sodobnega tržišča in družbe. S tem SKFPS predstavljajo sisteme, ki temeljijo na principih predvidene nove industrijske revolucije, *Industrije 4.0*, in omogočajo delovanje na globalnem tržišču pod konkurenčnimi pogoji (Hozdić 2020b).

## 4.4 Socialno-kibernetiko-fizični proizvodni sistemi

Vsi proizvodni sistemi imajo karakter socialno-tehničnih sistemov<sup>11</sup> s tremi glavnimi vrstami relacij med elementi: 1) med napravami (stroji), 2) med ljudmi in 3) med napravami (stroji) in ljudmi. Znano je, da tehnični in socialni sistemi sledijo različnim zakonom. Tehnični sistemi so podvrženi zakonom naravoslovnih znanosti, medtem ko socialni sistemi sledijo zakonom socioloških, družboslovnih in humanističnih znanosti. V proizvodnem sistemu sta sistema v korelaciji zaradi narave procesov, ki zahteva medsebojne interakcije. Torej zgolj z izboljšavo enega sistema ni mogoče doseči večjih sprememb v proizvodnem sistemu. Samo z razvojem obeh sistemov skupaj je mogoče pričakovati ustrezne rezultate (Frei, Hugentobler, and Schurman 1993).

Socialno-tehnični vidiki niso pomembni samo pri načrtovanju in operiranju proizvodnega sistema, pač pa so enako pomembni tudi pri kreiranju platforme za učenje in razvoj proizvodnih sistemov. Težnja po takšnih sistemih, ki bi bili uspešni in bi lahko prosperirali v globalnem svetu, je povezana z zadovoljitvijo potreb posameznih deležnikov, ki segajo prek nivoja uresničevanja skupnih ciljev in hitrih odzivov na nenehne spremembe, značilne za današnje proizvodne aktivnosti (Hozdić 2020b).

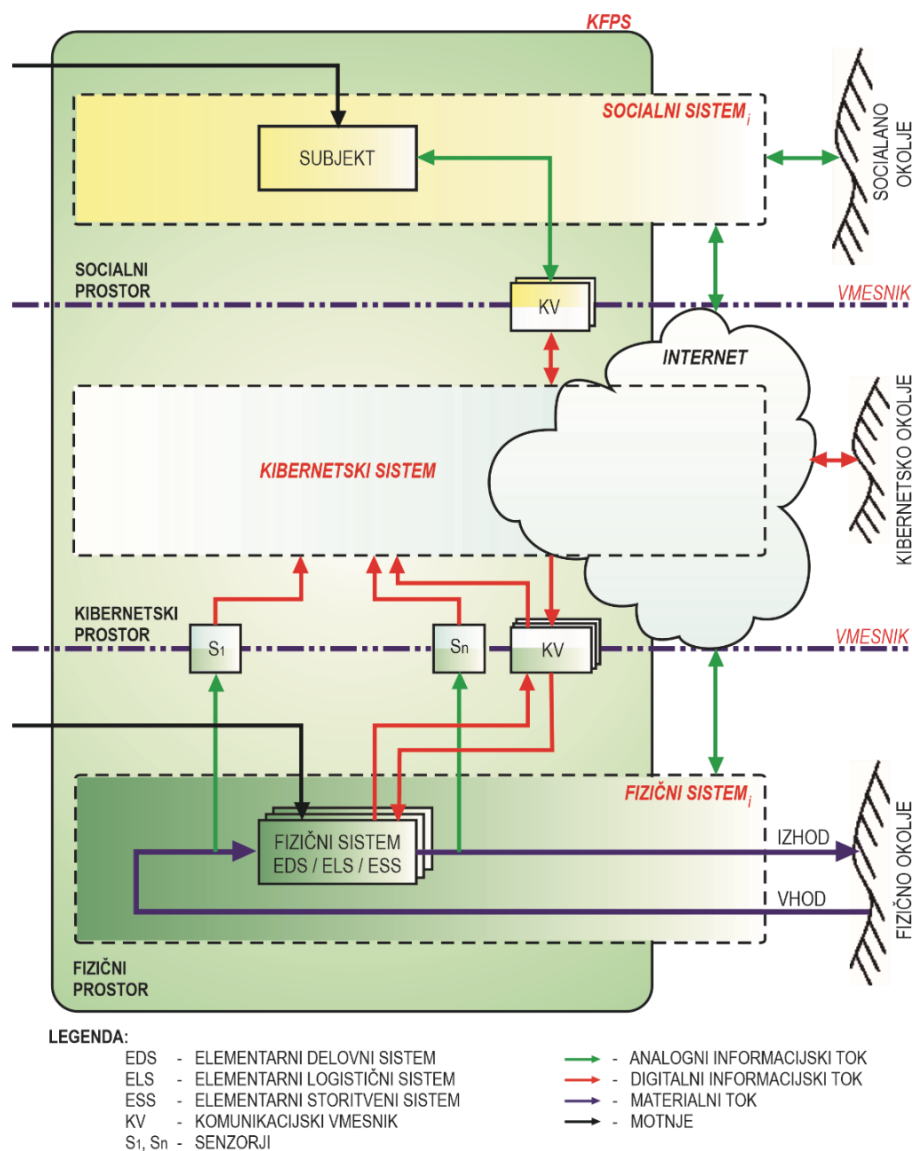
V konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b) prihaja do spremembe vloge *Subjekta* (posameznikov, skupin in/ali celotnega kolektiva), s čimer se s perspektive sodobnih dosežkov znatno spreminjajo načela strukturiranja socialno-tehničnih sistemov. Vloga *Subjekta* se oblikuje predvsem v dveh smereh: 1) v smer generiranja novih id ej in inovacij ob intenzivni rabi eksplisitnega znanja, socialnih tehnologij, kreativnosti in intuicij (*Subjekt* kot nosilec znanja – *knowledge worker*) ter

<sup>11</sup> Izraz *socialno-tehnični sistem* so na Tavistock inštitutu v Londonu skovali Eric Trist, Ken Bamforth in Fred Emery v II. svetovni vojni in temelji na delu z delavci v angleških premogovnikih.

2) v smer upravljanja SKFPS v realnem času na osnovi *on-line* informacij, diagnostike, prognostike in odločitvenih modelov (*Subjekt* kot nosilec odločitev).

V konceptu SKFPS je definirana nova vloga *subjekta*, ki je postavljen v socialni prostor, v katerem je povezan z ostalimi socialnimi sistemi ter tudi s kibernetičnim prostorom, *Slika 4.5*. V socialnem prostoru obstajajo socialne mreže in socialni sistemi s *subjektom* kot osnovnim elementom takšnih mrež in sistemov (*Hozdić 2020b*).

**Slika 4.5.** Konceptualni model povezovanja socialnega, kibernetičnega in fizičnega prostora (*Hozdić, Kozjek, and Butala 2020*), (*Hozdić 2020b*)



Socialni sistem je organizacijska entiteta (npr. podjetje, oddelek, laboratorij ipd.) znotraj katere veljajo določene specifične relacije in pravila. Le-ta karakterizirajo socialni procesi, ki se odvijajo znotraj in/ali zunaj sistema (*Parsons 1977*). V proizvodni domeni *Subjekt* kot osnovni gradnik socialnega sistema vzpostavlja kolaboracijske povezave z ostalimi deležniki socialnega procesa s ciljem izvajanja poslovnih

procesov. Interakcije znotraj socialnega sistema v današnjem globalnem svetu niso samo znotraj socialnega prostora. Napredna IKT je omogočila prenos medsebojnih interakcij med deležniki v kibernetški prostor.

Napredna IKT omogoča komunikacijo med deležniki v kibernetškem prostoru. Komunikacija *Subjekta* v socialnem sistemu se odvija prek socialnih medijev. Osnovo predstavljajo socialni mediji, ki vključujejo *web* temeljne in mobilne tehnologije, ki se uporabljajo za vzpostavitev komunikacije v interaktivnem dialogu (Hozdić 2020b).

Komunikacija *Subjekta* z elementi kibernetškega sistema je omogočena preko komunikacijskega vmesnika, ki se razlikuje od komunikacijskega vmesnika med kibernetškim in fizičnim prostorom. Komunikacija med komunikacijskim vmesnikom in *Subjektom* temelji na dvosmerni analogni komunikaciji. Komunikacija od *Subjekta* h komunikacijskemu vmesniku omogoča prenos ukazov s strani *Subjekta* do kibernetškega prostora čez različne vhode komunikacijskega vmesnika (tipkovnico, miško, računalniško palico, zvok, mimiko, elektroencefalografijo ipd.). Komunikacija od komunikacijskega vmesnika k *Subjektu* se ustvarja preko izhodov komunikacijskega vmesnika (kot tekst, grafika, audio, video, haptika, virtualna resničnost, obogatena resničnost ipd.) (Hozdić 2020b).

V fizičnem prostoru obstaja fizični sistem SKFPS. Fizični sistem SKFPS vsebuje sistemske strukture kot so fizični sistem EDS, fizični sistem elementarnega logističnega sistema (ELS), fizični sistem elementarnega storitvenega sistema (ESS) ipd. ELS omogočajo odvijanje logističnih procesov znotraj fizičnega sistema (sistemi transporta, sistemi vzdrževanja ipd.) ter definiranje materialnih in transportnih tokov čez definiranje logističnih kanalov. ESS predstavljajo elementarne sisteme znotraj storitvenih sistemov odjemalca, dobavitelja ali konkurence (Hozdić and Butala 2020).

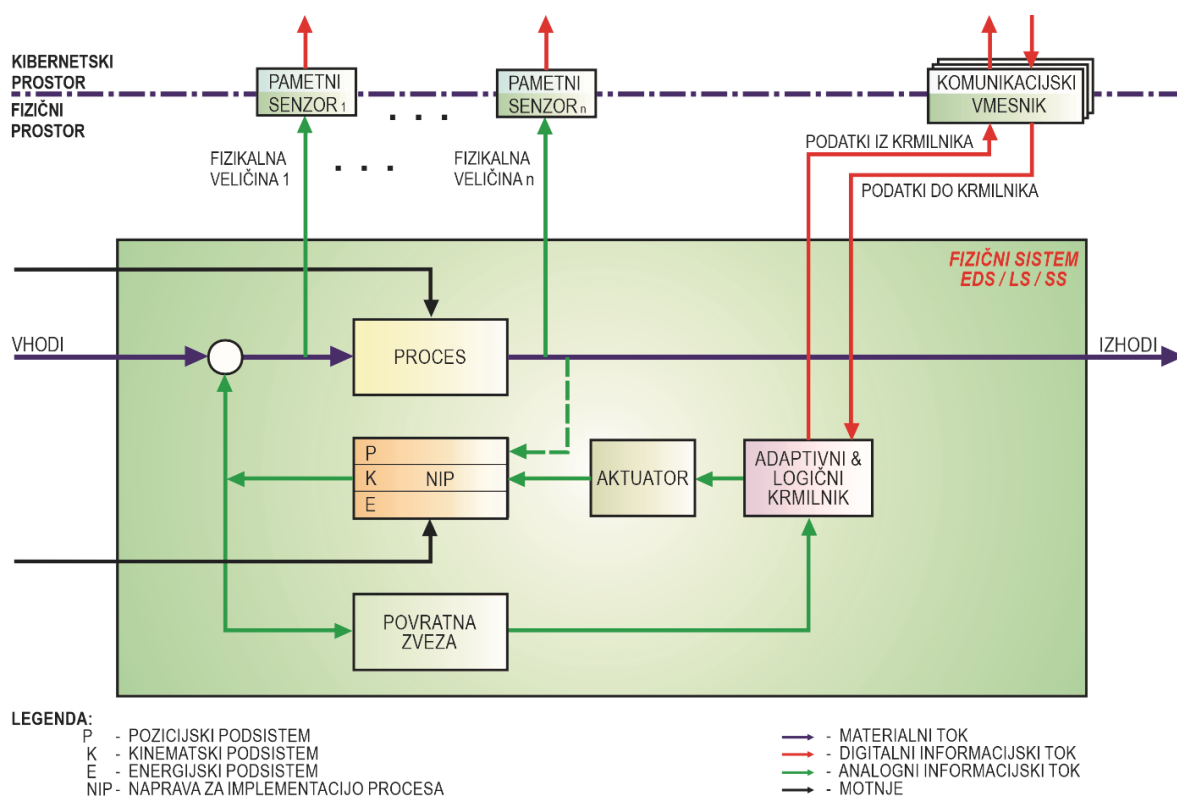
Povezovanje fizičnega prostora s kibernetškim prostorom je omogočeno s sensoriranjem, procesiranjem in zajemanjem podatkov ter prenosom v kibernetški prostor preko komunikacijskih vmesnikov in pametnih sensorjev. Pametni sensorji ( $S_1, \dots, S_n$ ) zajemajo analogne vrednosti fizikalnih veličin, ki jih digitalizirajo ter jih prenašajo v digitalni obliki v kibernetški prostor (sensoriranje sile, tlaka, temperature ipd.) (Hozdić 2020b).

Komunikacijski vmesnik (KV) ima vlogo zagotoviti dvosmerno komunikacijo elementov kibernetškega prostora z adaptivnim & logičnim krmilnikom v fizičnem sistemu. Ta komunikacija zagotavlja zajemanje podatkov iz adaptivnega & logičnega krmilnika in shranjevanje v bazo podatkov in znanja (D&K bazo) v kibernetškem prostoru (glede na stanje naprave, vrednosti doseženih procesnih parametrov ipd.) ter prenos podatkov iz kibernetškega prostora in nastavitvev na adaptivni & logični krmilnik fizičnega sistema (kot npr. nastavitvev procesnih parametrov, prenos NC kode ipd.) (Hozdić 2020b).

Fizični sistem EDS v konceptu SKFPS vsebuje podobne elemente definirane v konceptu Peklenikovega EDS (Peklenik 1988) z določenimi modifikacijami. Peklenik je v svojem delu (Peklenik 1988) definiral osnovne elemente EDS, brez katerih delo ne more biti izvedeno – torej s procesom z vhodi in izhodi, z napravo za implementacijo procesa (*NIP*) in s *Subjektom*. Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu SKFPS je prikazana na Sliki 4.6.

Proces ima vlogo transformacije vhodov v izhode, ki so opredeljeni s setom lastnosti. Naprava za implementacijo procesa je s procesom v povratni zvezi in jo razumemo kot vse, kar je potrebno za fizično izvedbo procesa. Ta zagotavlja ustrezne pozicijske, kinematične in energijske impulze vhodnim elementom procesa. Povratna zveza kontinuirano spremlja stanje parametrov NIP in jih posreduje adaptivnemu logičnemu krmilniku. Le-ta primerja informacije, pridobljene iz povratne zveze z referenco, in v kolikor nastopi razlika, preko krmilnih signalov aktivira aktuatorje za izvedbo korekcij. Adaptivni logični krmilnik je preko komunikacijskega vmesnika povezan s kibernetским prostorom. Informacije o tem, kako poteka proces (npr. obdelave, merjenja, transporta ipd.) zbirajo različni pametni senzorji in jih prinašajo v kibernetiski prostor. Elementi fizičnega sistema EDS / ELS / ESS so podvrženi notranjim in zunanjim motnjam (Hozdić 2020b).

**Slika 4.6.** Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b)

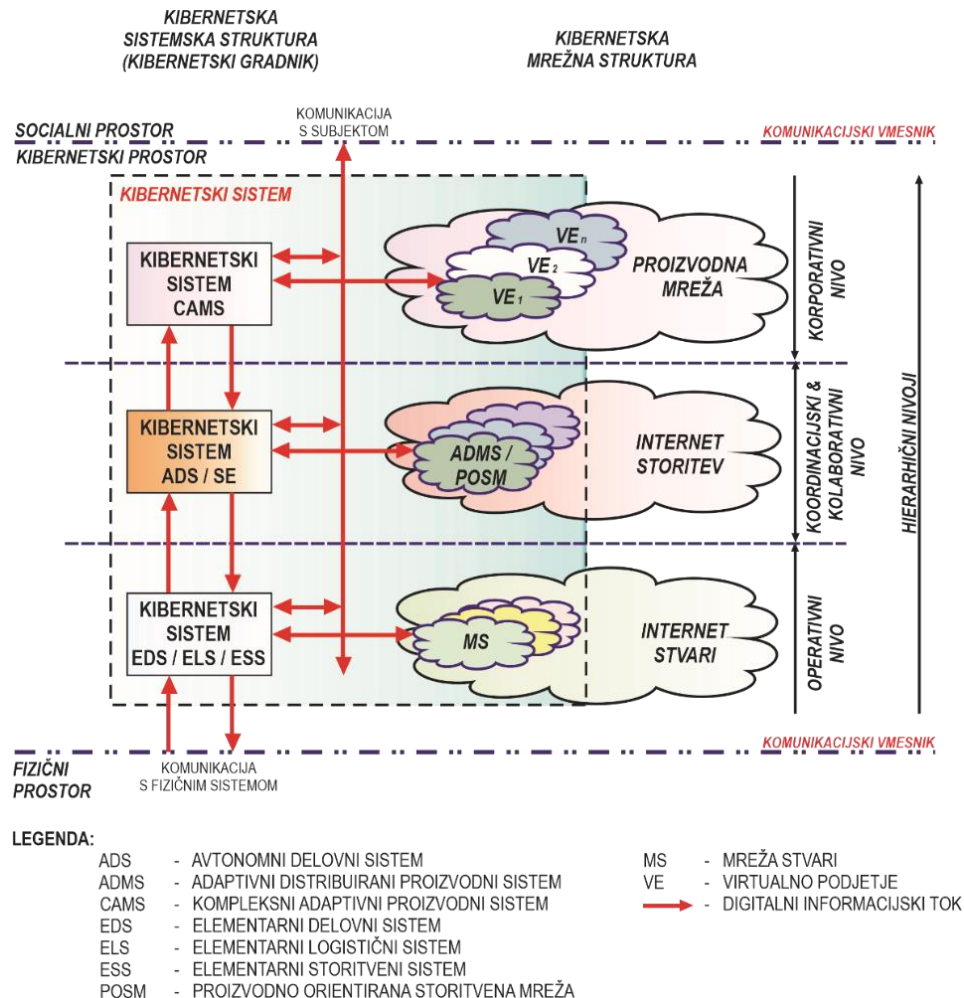


Kibernetiski prostor, prikazan na Sliki 4.5, je povezan na eni strani s fizičnim in na drugi s socialnim prostorom. To odpira pot k razvoju novih konceptov proizvodnih struktur in njihovem povezovanju v različne mrežne strukture. Sistemsko osnovo za vertikalno povezovanje sistemskih proizvodnih struktur kot tudi za horizontalne povezave v različne kibernetiske mrežne strukture omogoča vzpostavitev kibernetiskega sistema kot dela kibernetiskega prostora (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020).

Kibernetiski sistem je bistveni del kibernetiskega prostora, ki omogoča realizacijo vrste proizvodnih funkcij, kot so upravljanje s podatki in z znanjem, učenje, simulacije, nadzor, krmiljenje ipd., kot tudi povezovanje s fizičnimi in socialnimi elementi ter mrežno povezovanje v internet stvari, internet storitev in proizvodne mreže. Lahko ga definiramo kot strukturo s tremi nivoji: 1) operativni nivo, 2)

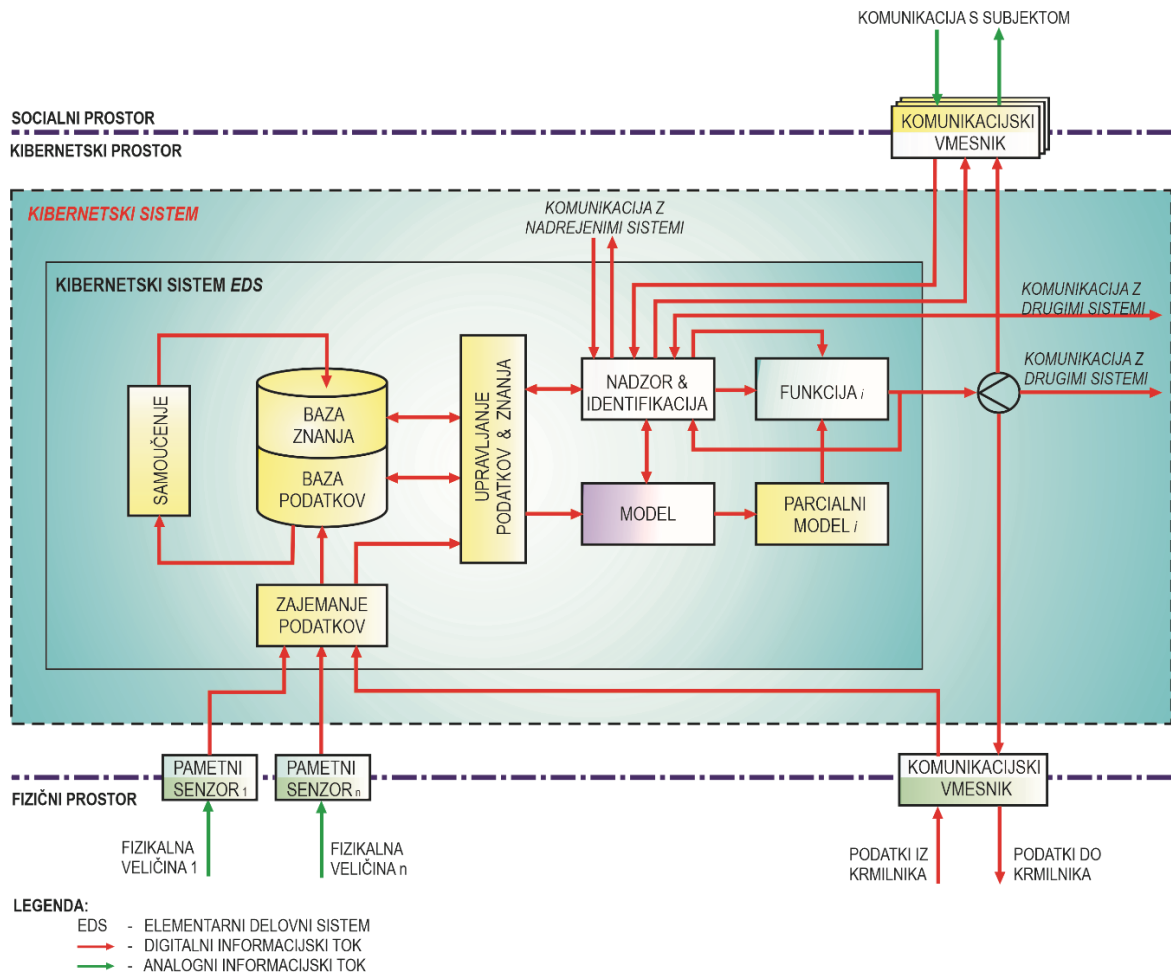
koordinacijsko-kolaborativni nivo in 3) korporativni (strateški) nivo. Struktura kibernetnega sistema KFPS je prikazana na Sliki 4.7.

**Slika 4.7.** Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b)



Operativni nivo kibernetnega sistema vsebuje kibernetne sistemske strukture v obliki kibernetnega sistema EDS, kibernetnega sistema ELS ter kibernetnega sistema ESS. Takšni gradniki so horizontalno povezani v mreže stvari (MS), ki so del globalnega IoT. Vertikalno povezovanje s koordinacijsko-kolaborativnim nivojem kibernetnega sistema omogoča povezovanje EDS, ELS ter ESS z nadrejenimi strukturami (Hozdić 2020b). Kibernetni sistem EDS, Slika 4.8, omogoča 1) povezovanje fizičnega in socialnega prostora v EDS (prek pametnih senzorjev in komunikacijskih vmesnikov); 2) digitalizacijo in kibernetizacijo obstoječih delovnih procesov na nivoju EDS; 3) razvoj in realizacijo novih funkcionalnosti, ki jih lahko vsebuje prestrukturirani EDS; 4) vertikalno povezovanje v integrirane delovne strukture (kot so: ADS, ADMS, CAMS, PM) in 5) horizontalno povezovanje v mrežo interneta stvari, predstavlja kibernetni sistem EDS.

Slika 4.8. Struktura kibernetnega sistema EDS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b)



Vertikalno povezovanje prestrukturiranega EDS v integrirane delovne strukture temelji na komunikaciji kibernetnega sistema EDS z nadrejenimi sistemi, ki omogoča prenos podatkov o procesih, virih, kakovosti, operacijah in okolju do koordinacijsko-kolaborativnega nivoja ter korporativnega nivoja kibernetnega sistema. Prek komunikacije z nadrejenimi sistemi pridobiva kibernetni sistem EDS podatke in nastavitve iz kibernetnega sistema SKFPS, kot so npr.: procesni parametri, NC kode, različna navodila, vzdrževalni ukrepi (npr. na podlagi komunikacije s proizvajalcem opreme) ipd., (Hozdić 2020b).

Kibernetni sistem EDS, kot je definirano v konceptualnem modelu SKFPS (E. Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), je gradnik mreže stvari (MS) (glej Sliko 4.7). MS je del širšega koncepta IoT, ki predstavlja omrežje stvari, ki znajo zbirati in deliti ogromne količine podatkov. Znotraj MS se zbrani podatki pošiljajo v računalniški oblak, kjer jih ustrezna rešitev ali storitev obdeluje in deli z ostalimi udeleženci v MS.

Horizontalno povezovanje kibernetnega sistema EDS v MS odpira možnosti komunikacije z drugimi sistemi v kibernetnem sistemu kot so: kibernetni sistemi drugih EDS, kibernetni sistemi ELS in kibernetni sistemi ESS. Ta komunikacija temelji na komunikaciji v realnem času (z izmenjavo izhodnih

vrednosti različnih funkcij) in na izmenjavi podatkov in informacij ter znanja med deležniki v kibernetskem sistemu (kot so npr.: podatki s pametnih senzorjev, podatki iz baze podatkov in znanja ipd.). Iz takšne komunikacije izhajajo sodelovalne odločitve brez človekovega posredovanja in nove digitalizirane ter kibernetizirane funkcionalnosti, ki bodo prestrukturiranemu EDS povečale učinkovitost, prilagodljivost in odzivnost (Hozdić 2020b).

Koordinacijsko-kolaborativni nivo je »vmesnik« med operativnim in korporativnim nivojem kibernetskega sistema, Slika 4.7. Omogoča eksistenco kibernetskih gradnikov ADS in SE, ter njihovo vključevanje v različne mrežne strukture, kot sta ADMS in POSM, ki sta del globalne mreže IoS.

Kibernetski sistem ADS (glej Slika 4.9) predstavlja element kibernetskega sistema SKFPS, ki omogoča: 1) vertikalno povezovanje prestrukturiranega ADS z nadrejenimi sistemi (kot so: CAMS in posredno PM) in s podrejenimi sistemi (kot so: EDS in posredno MS); 2) horizontalno povezovanje v mrežne sisteme, ki temeljijo na konceptu ADMS; 3) digitalizacijo in kibernetizacijo obstoječih delovnih procesov na nivoju ADS; in 4) razvoj ter realizacijo novih avtonomnih funkcionalnosti, ki jih lahko vsebuje prestrukturirani ADS in pri tem ohrani svojo vitkost ter razvoj in realizacijo funkcionalnosti, ki izhajajo iz sodelovanja prestrukturiranega ADS v mrežnih sistemih (Hozdić 2020b).

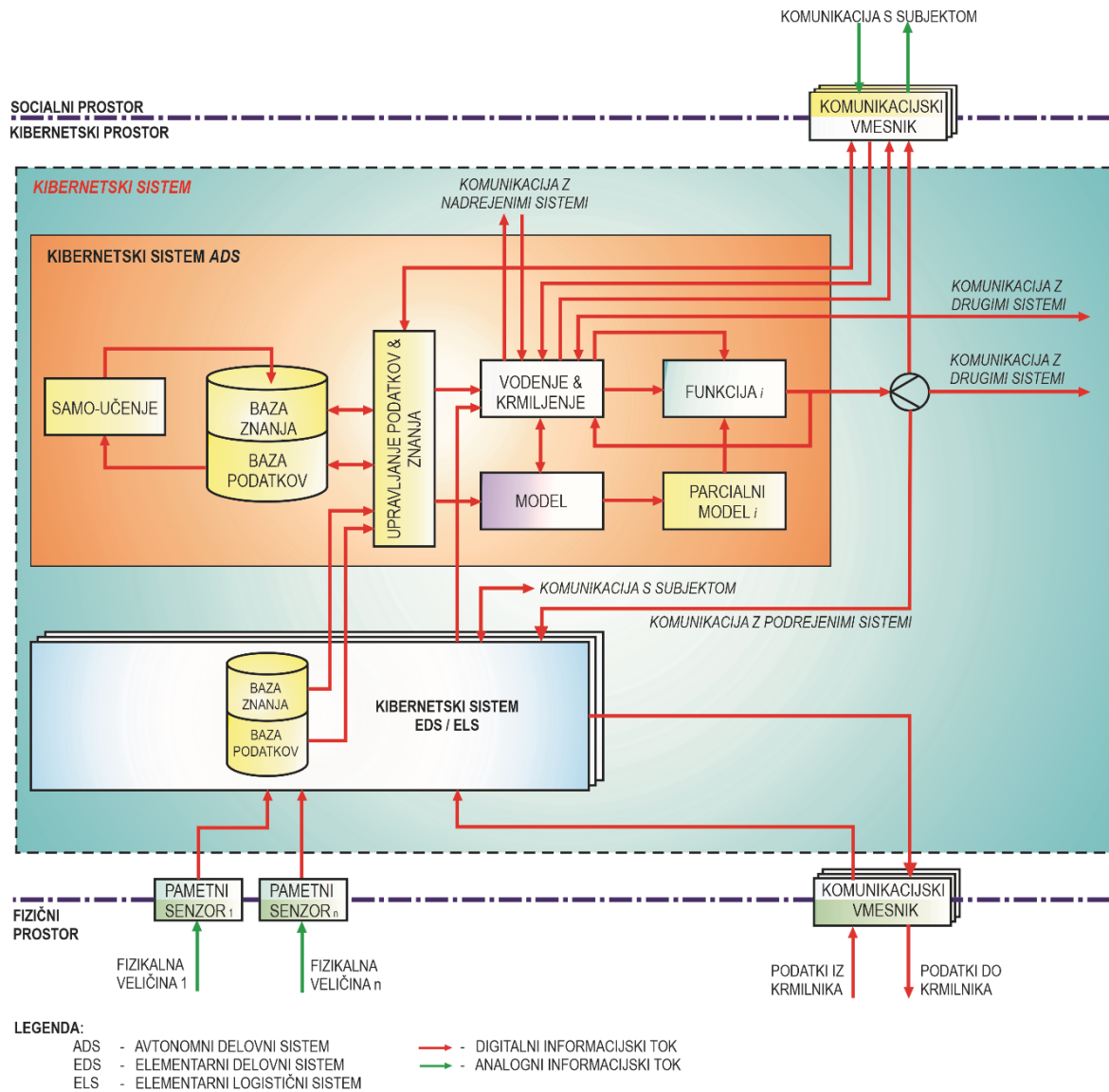
Funkcija vodenja in krmiljenja prestrukturiranega ADS omogoča sprožanje različnih digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij, ki omogočajo ustrezen potek operacij v prestrukturiranem ADS. Funkcioniranje prestrukturiranega ADS se lahko obravnava z različnih vidikov, in sicer z vidika: 1) procesa, 2) virov, 3) nalog, 4) kakovosti in 5) okolja.

Iz takšne obravnave izhajajo funkcije prestrukturiranega ADS, ki so v konceptih (Butala and Sluga 2006), (Žapčević 2013), predstavljene s: 1) krmilno povratno zvezo, ki obsega funkcije, kot so: nadzor in identifikacija, diagnosticiranje stanja, razporejanje delovnih nalogov, načrtovanje tehnologije (operacij), kontrola kakovosti ipd., 2) performančno povratno zvezo, ki obsega funkcije, kot so: nadzor in identifikacija, vrednotenje učinkov, napovedovanje oz. prognostika, upravljanje s človeškimi viri, z materiali, orodji, energijo in odpadki, upravljanje transporta, vzdrževanje znotraj ADS ipd., 3) zanko učenja, ki obsega funkcije, kot so: rudarjenje podatkov, odkrivanje znanja, upravljanje podatkov in znanja ipd. in 4) koordinacijsko zanko, ki vsebuje funkcije, ki izhajajo iz sodelovanja ADS v mrežnih strukturah, kot so: optimizacija procesnih parametrov, spremljanje dejanskih procesnih parametrov, spremljanje obremenitev virov, spremljanje operacij, spremljanje kakovosti, oskrba z orodji, vzdrževanje obdelovalnih strojev, izobraževanje človeških virov, umerjanje merilnih naprav, izračun in interpretacija kazalnikov uspešnosti, načrtovanje kontrolnih kart, interna in eksterna logistika itd., (Hozdić 2020b).

Korporativni nivo je del kibernetskega sistema v katerem je vzpostavljen kibernetski gradnik v obliki kibernetskega sistema CAMS, ki je zastopnik kompleksnega adaptivnega proizvodnega sistema oz. tovarne v kibernetskem okolju. Horizontalno povezovanje kibernetskega sistema CAMS v kibernetskem sistemu odpira možnost vključevanja podjetja v PM ter vzpostavitev različnih VE znotraj takšne mrežne strukture, glej Slika 4.7.



Slika 4.9. Struktura kibernetnega sistema ADS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b)

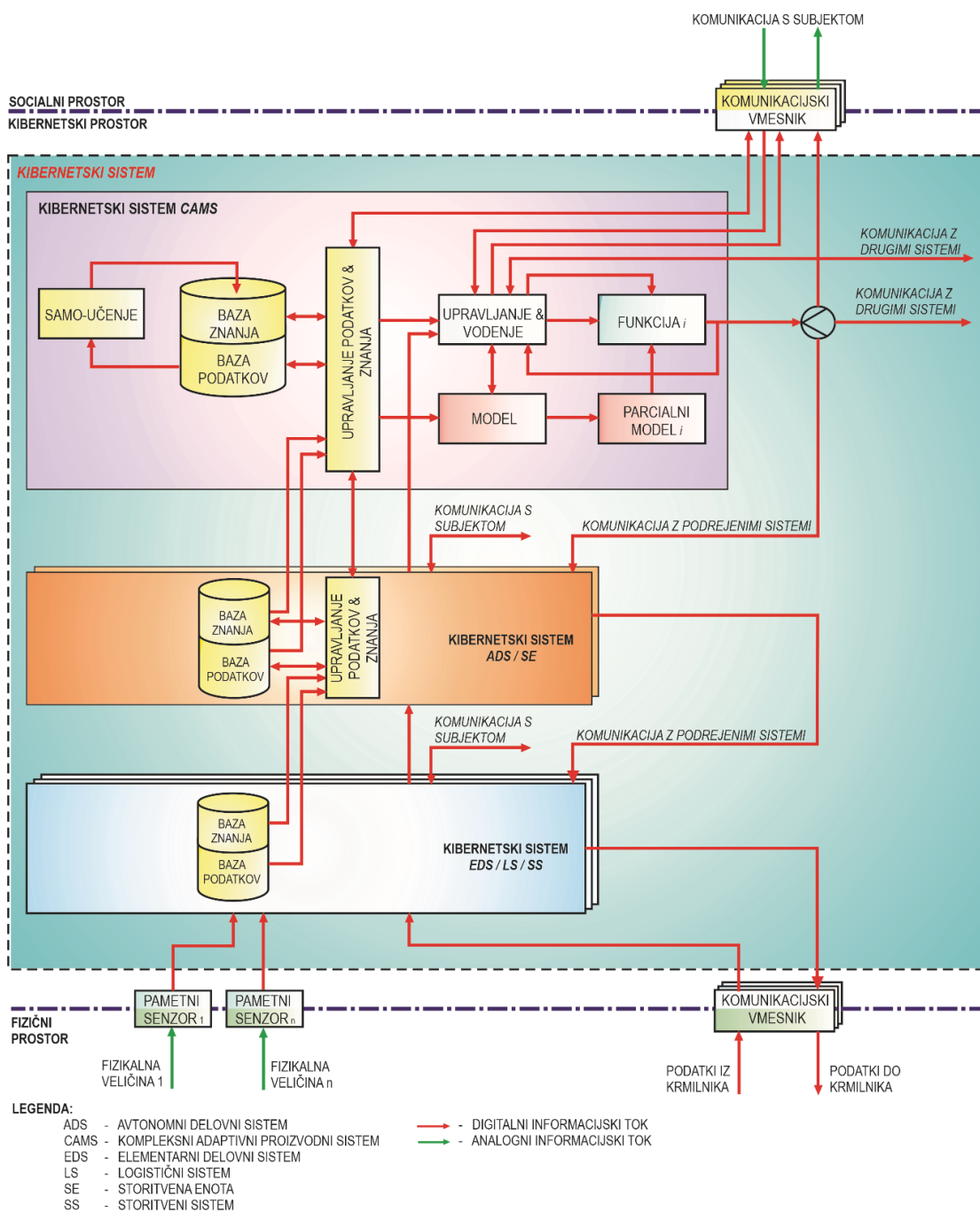


Element korporativnega nivoja kibernetnega sistema SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b), ki omogoča: 1) upravljanje in vodenje proizvodnega sistema na najvišjem nivoju; 2) realizacijo številnih digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij upravljanja in vodenja na najvišjem nivoju KFPS; 3) komunikacijo s podrejenimi sistemi, kot tudi sodelovanje KFPS v mrežnih sistemih, predstavlja kibernetni sistem CAMS. Struktura kibernetnega sistema prestrukturiranega CAMS je predstavljena na Sliki 4.10.

Na korporativnem nivoju kibernetnega sistema KFPS potekajo različni procesi, kot so: odločitveni procesi (operativni menedžment, projektni menedžment, upravljanje s sredstvi, upravljanje s človeški viri ipd.), transakcijski procesi (nabava, plačila ipd.), ustvarjalni procesi (raziskave, projektiranje in načrtovanje projektov in sistemov ipd.), operativno-tržni procesi (načrtovanje prodaje, priprava ponudb, priprave pogodb, sklepanje poslov, reševanje reklamacij kupcev ipd.), strokovno-analitični

procesi (analiza stroškov, tehnični nadzor, statistična analiza kakovosti ipd.), splošni in pravni procesi (stiki z javnostmi, varstvo zaposlenih, varstvo okolja, protipožarna zaščita, pravne zadeve...) itd. Iz naštetih procesov izhajajo različne poslovne funkcije, namenjene za zadovoljevanje potreb okolja sistema (npr. nabava, prodaja, proizvodnja, finance, kadrovska funkcija ipd.) ali za zadovoljevanje potreb samega KFPS (npr. raziskave in razvoj, planiranje proizvodnje, tehnični nadzor, upravljanje z viri ipd.) (Hozdić 2020b).

**Slika 4.10.** Struktura kibernetičnega sistema CAMS v konceptu SKFPS (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdić 2020b)



Uvedba kibernetskih elementov oz. kibernetskih gradnikov in horizontalnih ter vertikalnih povezav vpliva na bistveno spremembo vloge *Subjekta* v SKFPS. Ta sprememba je realizirana z digitalizacijo in kibernetizacijo delovnih procesov v SKFPS. Obe prispevata k izboljšanju načrtovanja, upravljanja, vodenja in krmiljenja kibernetsko-fizičnih proizvodnih in delovnih sistemov.

#### **4.4.1 Digitalizacija in kibernetizacija delovnih procesov v SKFPS**

Brennen in Kreiss v delu (Brennen and Kreiss 2016) definirata, da se digitalizacija nanaša na uvajanje ali povečanje rabe digitalne oz. računalniške tehnologije s strani podjetij, industrije, države itd. Henriette in ostali soavtorji (Henriette, Feki, and Boughzala 2015) izpostavljajo, da digitalna transformacija vključuje implementacijo digitalnih rešitev pri transformaciji poslovnih modelov, ki vplivajo na celotne organizacije, na operativne (delovne) procese, vire, interne in eksterne uporabnike.

Več avtorjev poudarja značilnosti in prednosti uvajanja digitalizacije na področju proizvodnje in njenih proizvodnih sistemov, ob večji odzivnosti, boljši izkoriščenosti virov, dvigu kvalitete in zmanjševanju števila reklamacij zaradi napačne dokumentacije, povečanje točnosti doseganja rokov dobave ipd. Splošni model digitalne transformacije, ki izhaja iz različnih industrijskih primerov in obstoječe literature, je podan v delu (Parviainen et al. 2017).

V delu (Hozdić 2020b) digitalizacija je definirana kot:

*»prenos procesov v digitalno okolje in njihovo izvajanje s pomočjo digitalnih mehanizmov«.*

Funkcije<sup>12</sup>, ki se izvajajo v digitaliziranih procesih, predstavljajo digitalizirane funkcije, kot je prikazano na Sliki 4.11a. Digitalizirane funkcije se izvajajo popolnoma avtomatizirano. Digitalni mehanizmi so vgrajeni v programsko opremo (v klasične algoritemske rešitve, ali na osnovi umetne inteligence), ki omogočajo izvajanje digitaliziranih funkcij. Digitalne kontrole predstavljajo digitalno obliko kontrolnih mehanizmov (z omejitvami, pravili, navodili itd.), ki nadzorujejo potek izvajanja digitaliziranih funkcij. Primere digitalizacije v proizvodni domeni lahko najdemo na področju naročanja materiala, načrtovanja proizvodnje, odjema v dobaviteljskih verigah, računovodstva, finančnih transakcij ipd., (Hozdić 2020b).

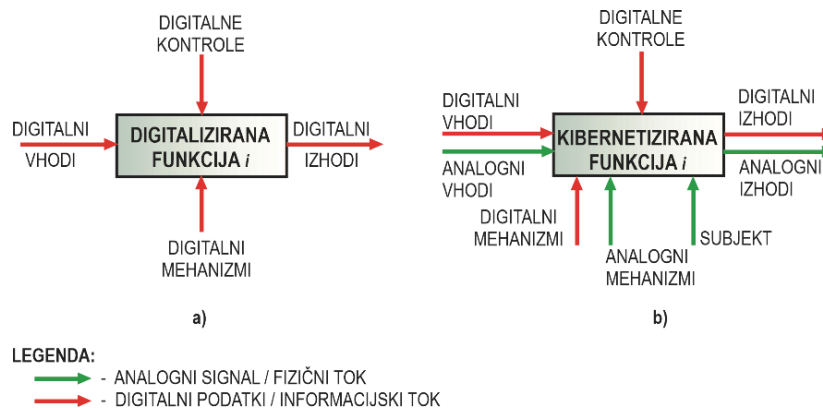
Digitalizacija torej omogoča transformacijo številnih informacijskih procesov tudi v proizvodni domeni in tako že intenzivno poteka, vendar imamo v proizvodnji poleg čistih informacijskih procesov tudi številne drugačne procese, ki jih ne moremo digitalizirati. Gre za procese materialne transformacije, ki so po naravi analogni. V to kategorijo spadajo procesi obdelave materiala, procesi montaže, logistični procesi, procesi testiranja proizvodov ipd. Ti procesi vključujejo tako analogne materialne tokove, kot tudi digitalno procesiranje podatkov in informacij v okviru računalniškega krmiljenja in nadzora. Za izvajanje procesov so potrebni fizični elementi (kot so: stroji in naprave, aktuatorji, senzorji, kot tudi

---

<sup>12</sup> Funkcija predstavlja strukturni element aktivnosti, kot je definirano v delu (Zaletelj et al. 2018). Širša definicija aktivnosti je predstavljena v četrtem poglavju tega doktorskega dela.

ljudje ipd.), kot tudi računalniški elementi (logični krmilniki, digitalni procesorji, krmilni programi, podatkovne baze ipd.), (Hozdič 2020b).

**Slika 4.11.** Digitalizirana in kibernetizirana funkcija v konceptu SKFPS (Hozdič, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdič 2020b)



Današnji proizvodni sistemi so torej sestavljeni iz številnih fizičnih in digitalnih elementov, ki so medsebojno povezani v »hibrid« analogno/digitalnega sveta, pri čemer postaja digitalna komponenta vedno bolj pomembna in napredna ter omogoča realizacijo naprednih krmilnih in nadzornih funkcij v okviru povezovanja digitalnega in fizičnega sveta. To pa odpira pot v t. i. *kibernetizacijo*.

V delih (Hozdič, Kozjek, and Butala 2020), (Hozdič 2020b) je podana definicija kibernetizacije, ki izhaja iz definicije pojma kibernetizacije ter temelji na Wienerovi definiciji kibernetike znanosti (Wiener 1948) ter Peklenikovi teoriji proizvodne kibernetike (Peklenik 1988):

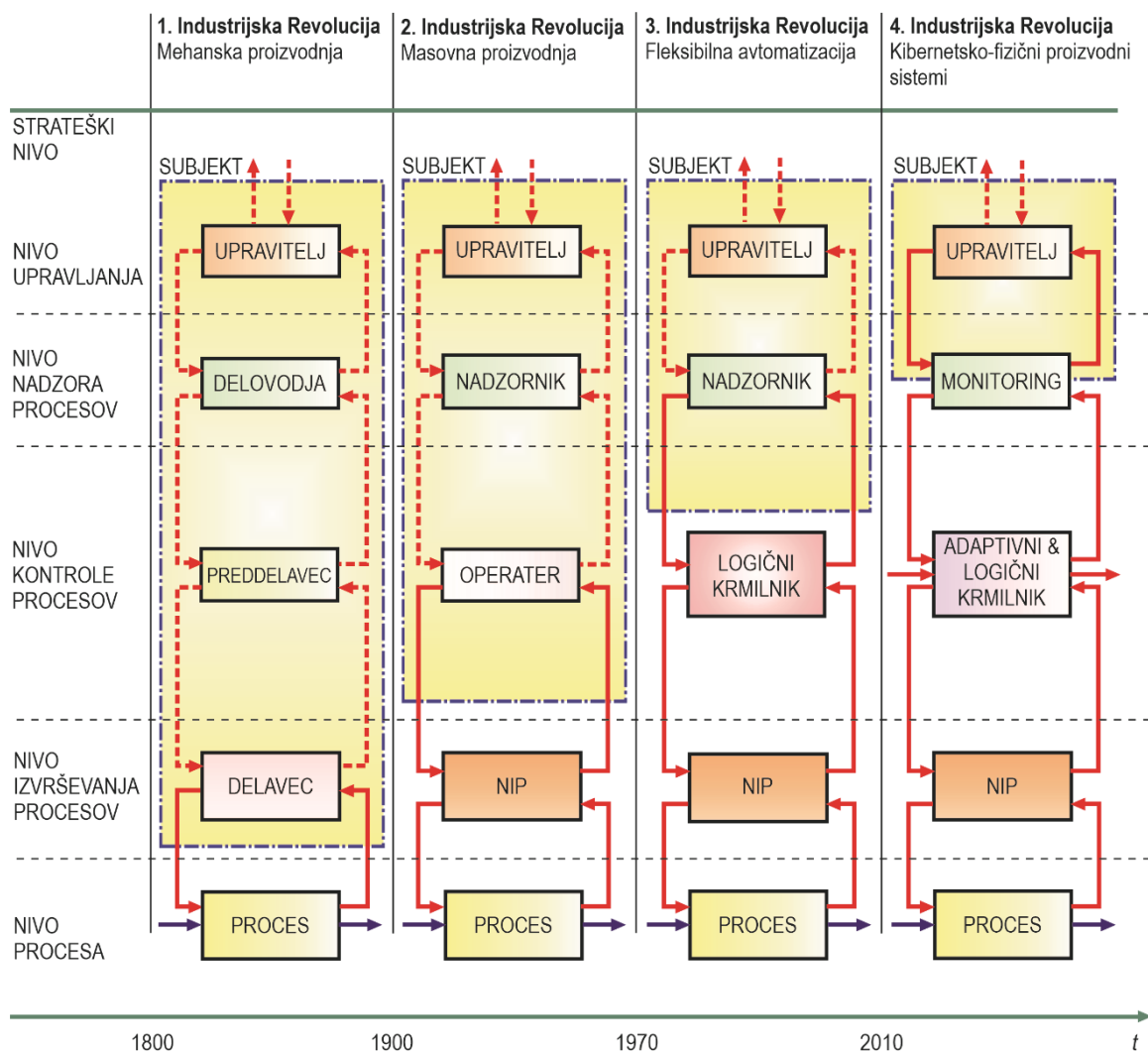
*Kibernetizacija je napredno, računalniško avtomatizirano upravljanje, vodenje, krmiljenje in nadzor fizičnih elementov proizvodnega sistema, kamor spadajo: procesi, stroji in naprave za implementacijo procesa ter Subjekti s pomočjo digitalnih računalniških elementov, kot so: logični krmilniki, digitalni procesorji, krmilni programi, podatkovne baze ipd.*

Funkcije, ki se izvajajo v kibernetiziranih procesih, predstavljajo kibernetizirane funkcije, kot je prikazano na Sliki 4.11b. Kibernetizirane funkcije se izvajajo v hibridnem analognem in digitalnem svetu; njihovi vhodi in izhodi so analogne in digitalne narave. Za izvajanje kibernetiziranih funkcij skrbijo digitalni mehanizmi (algoritmi, agenti, ekspertni sistemi, genetski algoritmi, baze podatkov ipd.) in fizični, analogni mehanizmi (naprave za implementacijo procesa, aktuatorji, senzorji ipd.). Kibernetizirane funkcije se lahko nanašajo na proces (npr. performančno krmiljenje procesa, samoorganizacija delovnih procesov ipd.), lahko na napravo za implementacijo tega procesa (npr. spremljanje stanja orodja in ukrepanje na podlagi tega spremljanja) ali na sam *Subjekt* (npr. spremljanje ukazov s strani *Subjekta*, informiranje *Subjekta* ipd.), (Hozdič 2020b).

Digitalne kontrole, podobno kot pri izvajanju digitaliziranih funkcij, predstavljajo digitalno obliko kontrolnih mehanizmov v obliki pravil, navodil ipd.

Prisotnost *Subjekta* kot upravitelja v izvajanju kibernetiziranih funkcij je še vedno pomembna. Zaradi intenzivne digitalizacije in kibernetizacije dela je večina rutinskih procesov avtomatiziranih. Tako bo *Subjekt* opravljal predvsem kreativne razvojne (inženirske) procese na osnovi znanja (*Subjekt* kot nosilec znanja - knowledge worker) in procese upravljanja in odločanja (glej [Slika 4.12](#)), ki pa jih bo zaradi intenzivne tehnološke podpore lahko izvajal v realnem času in od koder koli. V tem kontekstu seveda pojem delovna sila popolnoma izgubi svoj pomen.

**Slika 4.12.** Evolucija vloge *Subjekta* v proizvodnih sistemih skozi čas (Hozdić 2020b)



[Slika 4.12](#) nazorno prikazuje kako se je vloga *Subjekta* s časom postopoma spreminjala, od vira moči, kar je zahtevalo le trivialni del človekovega intelektualnega potenciala, do nosilca odločitev in znanja, ki ta potencial izkorišča v polni meri. Težko fizično delo je prevzela tehnologija ali bolj rečeno fizični elementi: mehanske naprave, aktuatorji, računalniški krmilniki, senzorji, nadzorni sistemi itd.

#### 4.4.2 Digitalizacija in kibernetizacija funkcij upravljanja SKFPS

Upravljanje proizvodnih sistemov, kot so SKFPS, je zaradi njihove vse večje kompleksnosti zelo zahtevna funkcija. Le-to vpliva na vse deležnike v proizvodnih sistemih kot tudi na performanco samih proizvodnih sistemov. Zaradi tega prinaša aplikacija koncepta digitalizacije in kibernetizacije funkcij v SKFPS pomembne izboljšave z različnih aspektih v realnih proizvodnih sistemih ([Hozdić, Kozjek, and Butala 2020](#)).

Funkcija upravljanja je razširjena na vse nivoje proizvodnega sistema. Pomemben del funkcije upravljanja v proizvodnem sistemu se nanaša na planiranje in krmiljenje proizvodnje (PPC). Področje planiranja in krmiljenja proizvodnje je zelo zahtevno področje. PPC sistem je hierarhičen sistem ([Bitran and Tirupati 1993](#)), ([Cai, Kutanoglu, and Hasenbein 2011](#)), kar pomeni, da se funkcije PPC izvajajo na vseh treh nivojih proizvodnega sistema – od korporativnega do operativnega nivoja. S tega vidika so funkcije PPC adekvatna domena za prikaz integracije konceptov SKFPS ([Hozdić, Kozjek, and Butala 2020](#)).

Problem planiranja in krmiljenja proizvodnje je ta, da prihaja med izvajanjem urnikov do številnih sprememb in motenj, ki so tudi naključne narave vse to pa rezultira v zamude, prekomerne obremenitve posameznih delovnih sistemov, izpade proizvodnje ipd. Gre za kompleksen problem, pri katerem klasični pristopi ne dajejo ustreznih rezultatov.

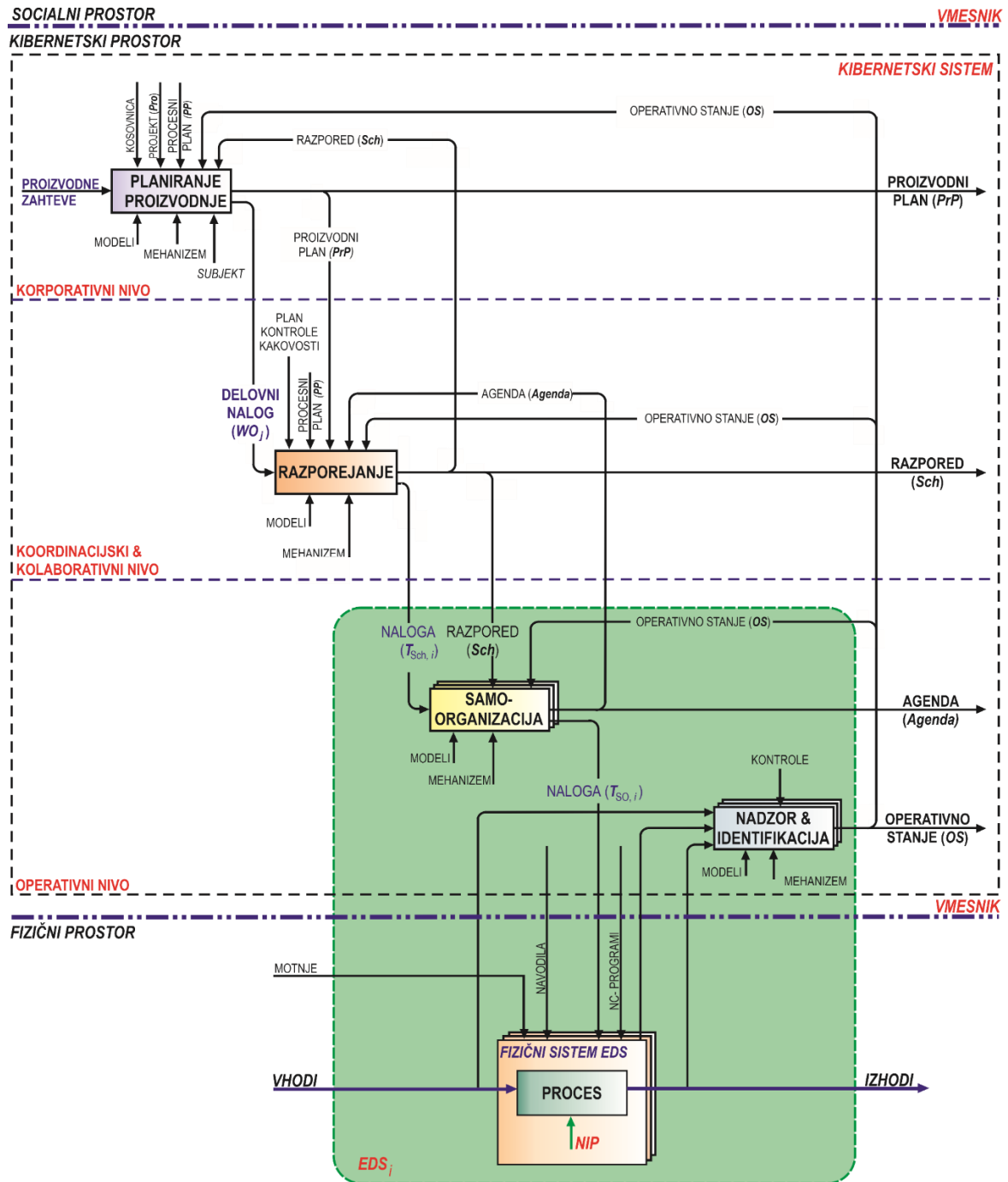
Digitalizacija in kibernetizacija funkcij PPC v konceptu SKFPS temelji na povezovanju digitalnih in kibernetiziranih funkcij, ki jih vsebuje PPC.

Osrednji del sistema PPC v konceptu SKFPS je postavljen v kibernetičnem sistemu SKFPS, kot je prikazano na [Sliki 4.13](#). Kibernetični sistem SKFPS prek svojih nivojev (korporativnega, koordinacijsko-kolaborativnega in operativnega nivoja) omogoča povezovanje različnih funkcij PPC oz. njihovih digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij. Poleg funkcij PPC, kot so načrtovanje (planiranje) proizvodnje, razporejanje ter nadzor in identifikacija, je na operativnem nivoju kibernetičnega sistema SKFPS prisotna funkcija samoorganizacije ([Hozdić 2020b](#)).

V delu ([Wiendahl 1986](#)) je Wiendahl funkcijo planiranja proizvodnje definiral kot sistemski, zavesten proces razmišljanja in odločanja o ciljih, obnašanju ter ukrepanju v prihodnosti. Cilj planiranja proizvodnje je vzpostavljanje proizvodnih procesov na podlagi tehnično-tehnoloških izhodišč v skladu z osnovnimi zahtevami, kot so stroški in roki dobave.

Funkcija planiranja proizvodnje (ang. *Production Planning*) vključuje: 1) dolgoročno planiranje (nekaj let vnaprej) s ciljem ocene zmogljivosti investicije in okvirne ocene prihodkov/stroškov (investicije v zgradbe, opremo, stroje in orodja ipd.); 2) srednjeročno planiranje (2-12 mesecev), ki obsega mesečno planiranje (usklajevanje potrebnih in razpoložljivih zmogljivosti po posameznih mesecih znotraj srednjeročnega planskega obdobja); in 3) kratkoročno ali operativno planiranje, ki predstavlja terminski in količinski plan izdelave posameznih proizvodov za nekaj tednov ali dni v naprej ([Russell and Taylor 1998](#)), ([Gaither and Frazier 1999](#)).

Slika 4.13. Funkcije PPC v konceptu SKFPS (Hozdić 2020b), (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020)



V nadaljevanju tega dela je poudarek na funkciji operativnega planiranja proizvodnje. Pri izvajanju funkcije planiranja proizvodnje morajo biti izpolnjeni določeni cilji in omejitve, kot so: 1) doseganje planiranih terminov za dobavo naročil kupcev; 2) minimiziranje časa trajanja odstopanja od planiranih terminov dobave naročil; 3) učinkovito izkoriščanje virov; 4) zmanjševanje stroškov ipd.

Vhodne podatke v digitalizirano funkcijo operativnega planiranja proizvodnje predstavljajo prodajni podatki o projektu, pridobljeni iz aktivnosti prodaje (napoved povpraševanja, napoved prodaje,

naročila kupcev, želeni roki dobave ipd.) in tehniško-tehnološki podatki (kosovnica, procesni plan), pridobljeni iz funkcije raziskave in razvoja ter tehnološke priprave proizvodnje (Hozdić 2020b), glej Slika 4.14. Pridobivanje takšnih podatkov in informacij v realnem času je zagotovljeno prek horizontalne komunikacije v kibernetnem sistemu CAMS.

Informacije o operativnem stanju elementov fizičnih sistemov EDS in informacije o trenutnem razporedu delovnih nalogov, kot tudi vhodni podatki za aktivnost operativnega planiranja proizvodnje, omogočajo preverjanje proizvodnih zmogljivosti za vse delovne sisteme (ob ugotovitvi razpoložljivosti EDS za izvršitev proizvodnega načrta) (Hozdić 2020b).

**Slika 4.14.** Digitalizirana funkcija planiranja proizvodnje (Hozdić 2020b)



Izhodno vrednost iz digitalizirane funkcije operativnega planiranja proizvodnje predstavljajo operativni proizvodni plan in delovni nalogi (ang. *Work Order*) s pripadajočimi nalogami (ang. *Task*), glej Slika 4.14.

V serijski proizvodnji proizvodov za široko potrošnjo je z operativnim proizvodnim planom zagotovljeno količinsko in časovno ustrezno dopolnjevanje zalog končnih proizvodov. Pri proizvodnji po naročilu je operativni proizvodni plan definiran preko sprejetih naročil. V tem primeru je planirana izvedba operativnega proizvodnega plana z vidika razpoložljivih zmogljivosti, nabavnih in proizvodnih časov (Hozdić 2020b).

Koncept digitalizacije funkcije planiranja proizvodnje v SKFPS uvaja digitalne mehanizme in omogoča avtomatizirano izvajanje funkcije planiranja proizvodnje v digitalnem (kibernetnem) okolju. Digitalni mehanizmi za izvajanje funkcije planiranja proizvodnje so lahko različna programska oprema (npr. programske rešitve, algoritmi, agentske tehnologije ipd.) (Hozdić 2020b).

Funkcija razporejanja (ang. *Scheduling*) v proizvodnji ima vlogo finega razporejanja posameznih nalog z delovnega naloga po ustreznih, razpoložljivih EDS in določati čas začetka ter čas zaključka posamezne naloge in pri tem upoštevati cilje ter omejitve z operativnega proizvodnega plana, ki v funkcijo razporejanja pride iz nadrejenega sistema (kibernetnega sistema CAMS ali PM), glej Slika 4.13.

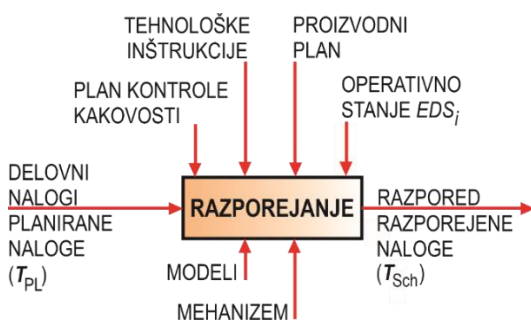
Vhodne vrednosti v funkcijo razporejanja predstavljajo delovni nalogi s pripadajočimi planiranimi nalogami, glej Slika 4.15. Na podlagi informacij z operativnega plana proizvodnje, operativnega stanja



posameznih EDS in tehnoloških inštrukcij ter plana kontrole kakovosti generira funkcija razporejanja nalog podatkovno množico v obliki razporeda z razporejenimi nalogami po ustreznih EDS.

Ob izvajanju funkcije razporejanja morajo biti izpolnjeni določeni cilji, kot so: 1) kratki pretočni časi naročil; 2) polna zasedenost EDS; 3) nizka nedokončana proizvodnja; 4) najvišje doseganje dobavnih rokov ipd. Za doseganje takšnih ciljev morajo biti v vsakem delu proizvodnje istočasno prisotna naprava za implementacijo procesa, *Subjekt*, material, viri ipd., kar predstavlja zahteven proces usklajevanja, ki ima namen zagotavljati red v proizvodnji. Koncept SKFPS zagotavlja procese usklajevanja prek horizontalne komunikacije med funkcijami na koordinacijsko-kolaborativnem nivoju kibernetkega sistema SKFPS (kot so: načrtovanje operacij, načrtovanje kontrole kakovosti, vrednotenje uspešnosti ipd.) kot tudi vertikalne komunikacije med funkcijami na korporativnem nivoju v kibernetkem sistemu SKFPS (npr. funkcija planiranja proizvodnje, nabava, prodaja, kadri ipd.) in med funkcijami na operativnem nivoju kibernetkega sistema KFPS (funkcija nadzora in identifikacije, funkcija samoorganizacije ipd.) (Hozdič 2020b).

**Slika 4.15.** Digitalizirana funkcija razporejanja nalog v kibernetkem sistemu ADS (Hozdič 2020b)



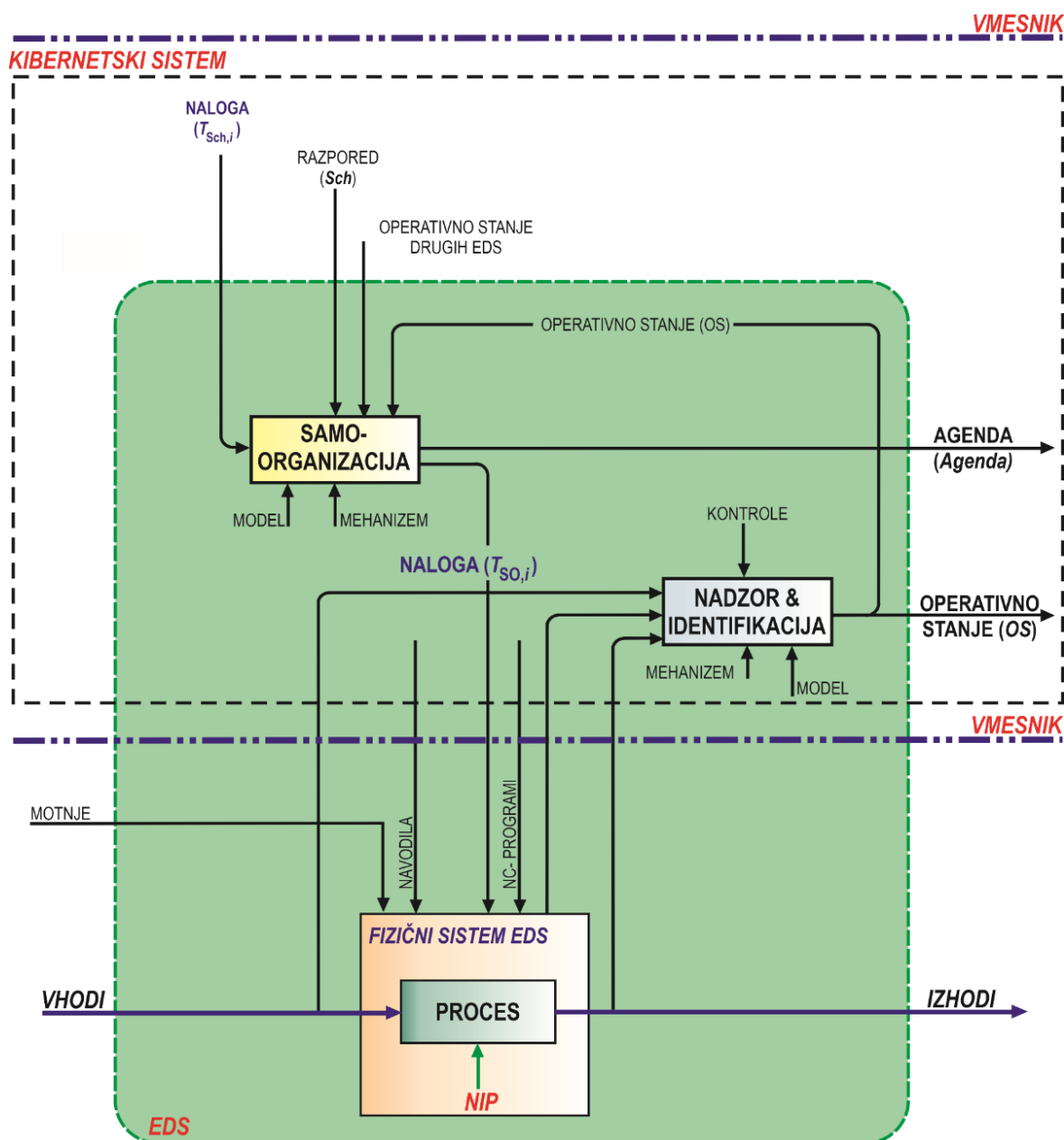
Razporejanje je kompleksen kombinatorični problem (Goldreich 2010). To pomeni, da za opis takšnih problemov ne obstajajo polinomski algoritmi. Vrabič v delu (Vrabič 2012) navaja primer in zaključuje, da je optimalno razporejanje velikih problemov časovno potratno ter izpostavlja, da so razporedi v trenutku, ko so izračunani, že zastareli.

Koncept SKFPS omogoča dinamični pristop k razporejanju, temelječ na generiranju razporeda paralelno z obratovanjem EDS. Takšen pristop omogoča odzivnost na spremembe v SKFPS, kot so npr.: nove naloge, izpadi, alarmi ipd. Za izvajanje dinamičnega pristopa k razporejanju so na voljo različna preprosta heuristična pravila, pri katerih sicer žrtvujemo zagotovilo, da bomo našli optimalno rešitev ter raba večagentne tehnologije (Hozdič 2020b).

Koncept SKFPS omogoča EDS samostojno delovanje znotraj SKFPS s ciljem povečanja učinkovitosti, fleksibilnosti, adaptivnosti, odzivnosti in robustnosti. Ta cilj je odvisen predvsem od sposobnosti prestrukturiranega EDS, da se samostojno in kreativno odloča v določeni situaciji ter pri tem upošteva cilje višjih sistemskih in organizacijskih proizvodnih struktur (ADS, ADMS, CAMS, proizvodne mreže). To pomeni, da prestrukturirani EDS potrebuje samostojno, sistemsko urejanje svojih aktivnosti. V delu (Hozdič, Kozjek, and Butala 2020) je to sistemsko urejanje lastnih aktivnosti posameznega EDS omogočeno skozi funkcijo samoorganizacije.

Kibernetizirana funkcija samoorganizacije v konceptu SKFPS ima nalogo zagotavljanja pravočasne dobave produktov in storitev na podlagi zahtev, ki prihajajo iz nadrejenega kibernetičnega sistema ADS, in omogočati EDS, da se samostojno odloča o svojih aktivnostih, pri čemer upošteva navodila in omejitve iz nadrejenih organizacijskih ter sistemskih struktur. Ta cilj zagotavljajo funkcija samoorganizacije in funkcija nadzora in identifikacije v kibernetičnem sistemu EDS, funkcija nadzora in identifikacije drugih EDS v kibernetičnem sistemu KFPS ter analogni procesi materialne transformacije v fizičnem sistemu EDS, glej [Slika 4.16](#).

**Slika 4.16.** Kibernetizirana funkcija samoorganizacije v kibernetičnem sistemu EDS ([Hozdić 2020b](#))



Funkcija samoorganizacije v kibernetičnem sistemu EDS ima vlogo pridobljene razporejene naloge ( $T_{Sch}$ ) lokalno prerazporejati (samoorganizirati) s ciljem zagotavljanja čim boljše izkoriščenosti virov

EDS, kot tudi zagotavljanja določenih časov dobave, ki jih definirajo nadrejene organizacijske in sistemske strukture. Aktivira se ob vsakem novem dogodku (npr. ko je dodeljena nova naloga, ko pride do zakasnitev v izvajanju naloge, ali če pride do alarmnih stanj zaradi napake v sistemu ipd.).

Izvajanje funkcije samoorganizacije v kibernetskem sistemu EDS je podprto z izvajanjem funkcije nadzora in identifikacije, z informacijami, ki v kibernetski sistem EDS pridejo iz koordinacijsko-kolaborativnega nivoja kibernetskega sistema KFPS (razpored, naloga) ter informacijami, ki so rezultat horizontalnega povezovanja in komunikacije na operativnem nivoju v kibernetskem sistemu KFPS (operativno stanje drugih EDS), glej [Sliko 4.16](#).

Mehanizme za izvajanje funkcije samoorganizacije v kibernetskem sistemu EDS predstavljajo večagentne strukture in hevristični algoritmi, ki jih zagotavljajo spletne storitve.

Rezultat izvajanja funkcije samoorganizacije v prestrukturiranemu EDS je lokalna agenda oz. vrstni red (lista) samoorganiziranih nalog, ki čakajo na izvedbo na EDS. Agenda se dinamično prilagaja situaciji v proizvodnem sistemu, s čimer je omogočeno adaptivno upravljanje celotnega proizvodnega sistema. Primeri spreminjanja agende EDS so s pomočjo simulacije prikazani v ([Hozdić 2020b](#)).

V fizičnem delovnem sistemu prestrukturiranega EDS potekajo analogni procesi materialne transformacije, glej [Sliko 4.16](#). Poleg NC programov vplivajo na izvajanje analognih procesov materialne transformacije še informacije, ki jih prinašajo samoorganizirane naloge, ki čakajo na izvajanje na obravnavanem EDS (čas začetka in zaključka izvajanja samoorganizirane naloge ter količina proizvodov).

Kibernetizirana funkcija samoorganizacije prestrukturiranega EDS zagotavlja določeno avtonomnost prestrukturiranemu EDS. To pomeni, da ima posamezni EDS zmožnost, da avtonomno sprejema neprisiljene odločitve, ampak s svojim odločanjem temelji na komunikaciji, ki izhaja iz vertikalnega povezovanja z nadrejenimi sistemi, kot tudi na komunikaciji, ki izhaja iz horizontalnega povezovanja v mrežo stvari. Širši opis kibernetizirane funkcije samoorganizacije je predstavljen v delu ([Hozdić, Kozjek, and Butala 2020](#)).

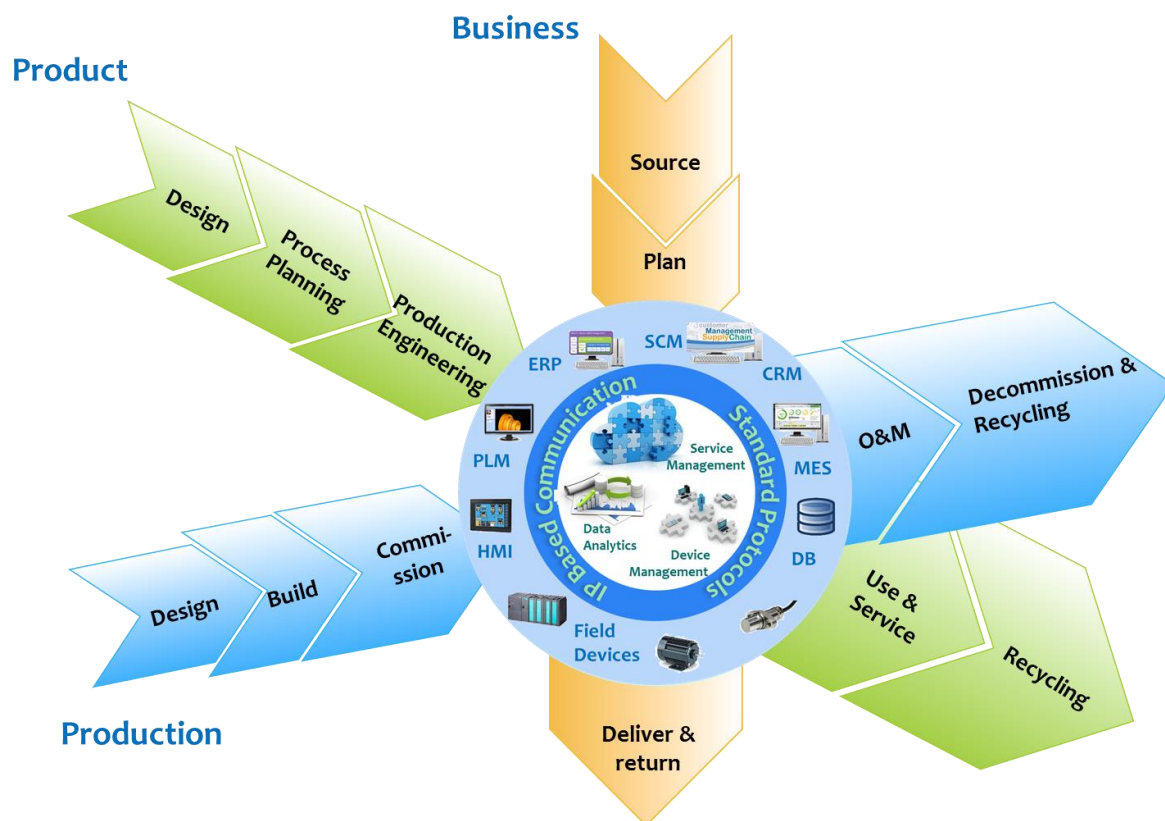
## 4.5 Povzetek

V tem poglavju je na kratko predstavljen koncept četrte industrijske revolucije in proizvodne paradigme pametnih proizvodnih sistemov. Le-ta je podal osnove za transformacijo tradicionalnih proizvodnih podjetji in njihovih proizvodnih in poslovnih sistemov v pametne proizvodne sisteme in pametne tovarne. Značilen poudarek je podan precej na koncepte socialno-kibernetško-fizičnih proizvodnih sistemov in njihove gradnike. Takšni proizvodni sistem so temelj za nadaljnje evolucije proizvodnih sistemov in njihovih gradnikov.

Močan vpliv skrajšanega življenjskega cikla izdelkov narejenih po željah kupcev, globalne konkurenčnosti, visoki standardi kakovosti in ne nazadnje posledice pandemije SARS-CoV-2 usmerjajo sodobna proizvodna podjetja na pot nove industrijske revolucije – *Industrije 5.0*.



VIR: <https://www.aquare.la/en/industry-4-0-web-3-0-and-digital-transformation/>



VIR: <http://blog.mesa.org/2016/03/smart-manufacturing-isnt-so-smart.html>

## 5 ADAPTIVNI KOGNITIVNI PROIZVODNI SISTEMI: PARADIGMA ZA NASLEDNJO INDUSTRIJSKO REVOLUCIJO – INDUSTRIJO 5.0

*»Modrost ni vedenje. Vedenje je znanje, ki ga je moč pridobiti iz mnogih virov: knjig, šol, občil, izkustev. Meri se z inteligenčnim količnikom. Človek je lahko izjemno inteligenčen, čeprav nima niti grama modrosti. Modrost je uporaba vedenja, je namerna, izbirna odločitev za neko delovanje ali nedelovanje, upošteva blagor vseh vpletenih.«*

Marlo Morgan

Industrija je ključno gonilo gospodarskega razvoja (Zizic Crnjac et al. 2022), še posebej v času nepričakovanih kriznih situacijah kot je bila pandemija. Evropska komisija v dokumentu *»Industrija 5.0 – Na poti k trajnostni, na človeka osredotočeni in odporni evropski industriji«* (European Commission 2021) poudarja, da je industrija največji posamezni dejavnik, ki prispeva k evropskemu gospodarstvu, saj zagotavlja delovna mesta in blaginjo po vsej celini.

Različni praktiki in raziskovalci iz industrije so podali različne definicije *Industrije 5.0*. V članku (Maddikunta et al. 2022), velja *Industrija 5.0* za naslednji industrijski razvoj.

*“Industrija 5.0 vrne človeško delovno silo v tovarno, kjer sta človek in stroj povezana za povečanje učinkovitosti procesa z uporabo človeške možganske moči in ustvarjalnosti prek integracije delovnih tokov z inteligentnimi sistemi”* (Nahavandi 2019).

Koncept *“Industrije 5.0”* je bil med 2. in 9. julijem 2020 obravnavan med udeleženci iz raziskovalnih in tehnoloških organizacij, ki jih je organiziral Direktorat za *“blaginjo”* Generalnega direktorata za raziskave in inovacije Evropske komisije. V dokumentu Evropske komisije (European Commission 2021), najdemo izhodišča koncepta *Industrije 5.0*. Po mnenju Evropske komisije je *Industrija 5.0* nujen korak v *Industriji 4.0*, saj zagotavlja drugačen fokus ter poudarja pomen raziskav in inovacij za podporo industriji pri njenem dolgoročnem služenju človeštvu znotraj planetarnih meja (European Commission 2021). Koncept *Industrije 5.0* je Evropska komisija opredelila na naslednji način:

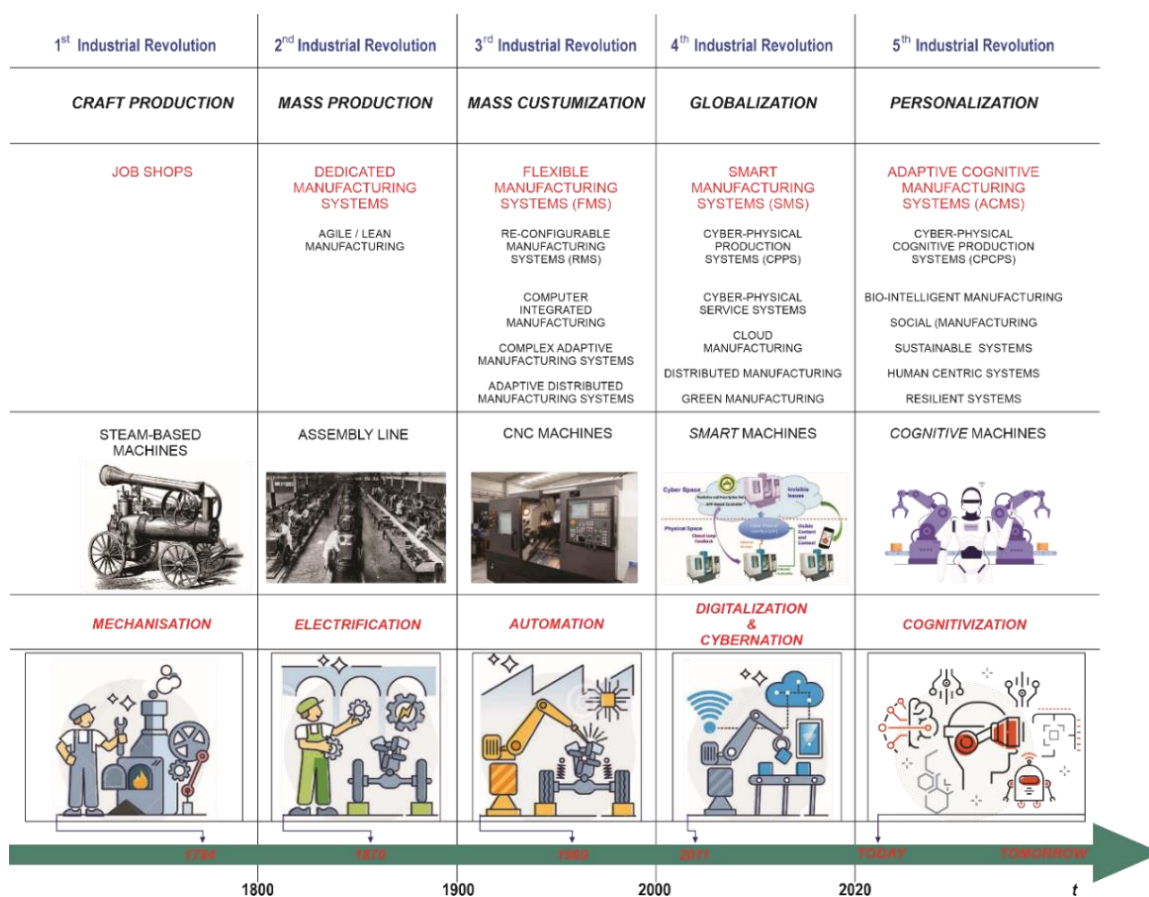
*“Industrija 5.0 priznava moč industrije za doseganje družbenih ciljev, ki presegajo delovna mesta in rast, da postane odporen ponudnik blaginje, tako da poskrbi, da*

proizvodnja spoštuje meje našega planeta in postavi dobro počutje delavcev v industriji v središče proizvodnega procesa” (European Commission 2021).

Koncept Industrije 4.0 je bolj osredotočen na tehnologijo, medtem ko je *Industrija 5.0* bolj usmerjena k praktičnemu izvajanju razpoložljivih omogočitvenih tehnologij v industriji (Pathak et al. 2019).

Na Sliki 5.1 je predstavljen evolutivni razvoj industrijskih revolucij na poti k *Industriji 5.0*.

Slika 5.1. Evolucija od Industrije 1.0 do koncepta Industrije 5.0



Na podlagi pregleda literature (Zizic Crnjac et al. 2022), (Romero and Stahre 2021), (ElMaraghy et al. 2021), (Monostori and Váncza 2020), (Mourtzis 2021), (Longo, Padovano, and Umbrello 2020), (Grabowska, Saniuk, and Gajdzik 2022), (Margherita and Braccini 2021), (Xu et al. 2021), (Neumann et al. 2021) in dokumentov Evropske komisije (European Commission 2021) izstopajo trije ključni dejavniki *Industrije 5.0*: osredotočen na človeka, trajnosten in odporen. Ti trije ključni dejavniki *Industrije 5.0* so predstavljeni v prispevku (Zizic Crnjac et al. 2022), glej Sliko 5.2.

Človeško osredotočen dejavnik se nanaša na razvoj novih proizvodnih sistemov, ki vključuje delavce. Trajnostno se nanaša na proizvodne sisteme, ki spodbujajo varčevanje z energijo, čistejšo proizvodnjo in prakse krožnega gospodarstva. Odpornost se nanaša na odnos proizvodnih sistemov in organizacije za premagovanje gospodarske krize in ohranjanje konkurenčne prednosti pred konkurenti (Margherita and Braccini 2021).

**Slika 5.2.** Ključni dejavniki Industrije 5.0 (Breque, De Nul, and Petridis 2021)



V članku (Grabowska, Saniuk, and Gajdzik 2022), so avtorji identificirali okvir koncepta *Industrije 5.0*. Okvir koncepta *Industrije 5.0* temelji na simbiozi treh segmentov: tehnološkega, socialnega in ekološkega, ki tvorijo bistvo *Industrije 5.0* (Grabowska, Saniuk, and Gajdzik 2022).

V članku (Grabowska, Saniuk, and Gajdzik 2022) so avtorji tudi, predstavili zbirko znanstvenih študij, ki poudarjajo nujnost simbioze človeka z novimi tehnologijami. V prispevku (Longo, Padovano, and Umbrello 2020) je predstavljena simbioza človeka s tehnologijo. Podobno sta tudi Bednar in Welch v dokumentu (Bednar and Welch 2020) opisala prakse »pametnega dela«.

Industrija 4.0, ki je v teku, vse bolj združuje fizični, virtualni in biološki svet ter utira pot za naslednjo fazo razvoja proizvodnih sistemov in opredeljuje prihodnje nove paradigme proizvodnih sistemov (ElMaraghy et al. 2021). V članku (ElMaraghy et al. 2021), ElMaraghy in soavtorji so predstavili vizijo za novo prihodnjo paradigmo prilagodljivih kognitivnih proizvodnih sistemov (ang. *Adaptive Cognitive Manufacturing Systems – ACMS*) in njene značilnosti, gonilne sile in dejavnike. Ta nova proizvodna paradigma odpira pot novi industrijski revoluciji (*Industriji 5.0*) in omogoča razvoj novih konceptov proizvodnih sistemov.

V nadaljevanju so predstavljene ključne omogočitvene tehnologije za razvoj novih konceptov proizvodnih sistemov po načelih Industrije 5.0 in nekateri koncepti proizvodnih sistemov, ki se že razvijajo v duhu nove industrijske revolucije.

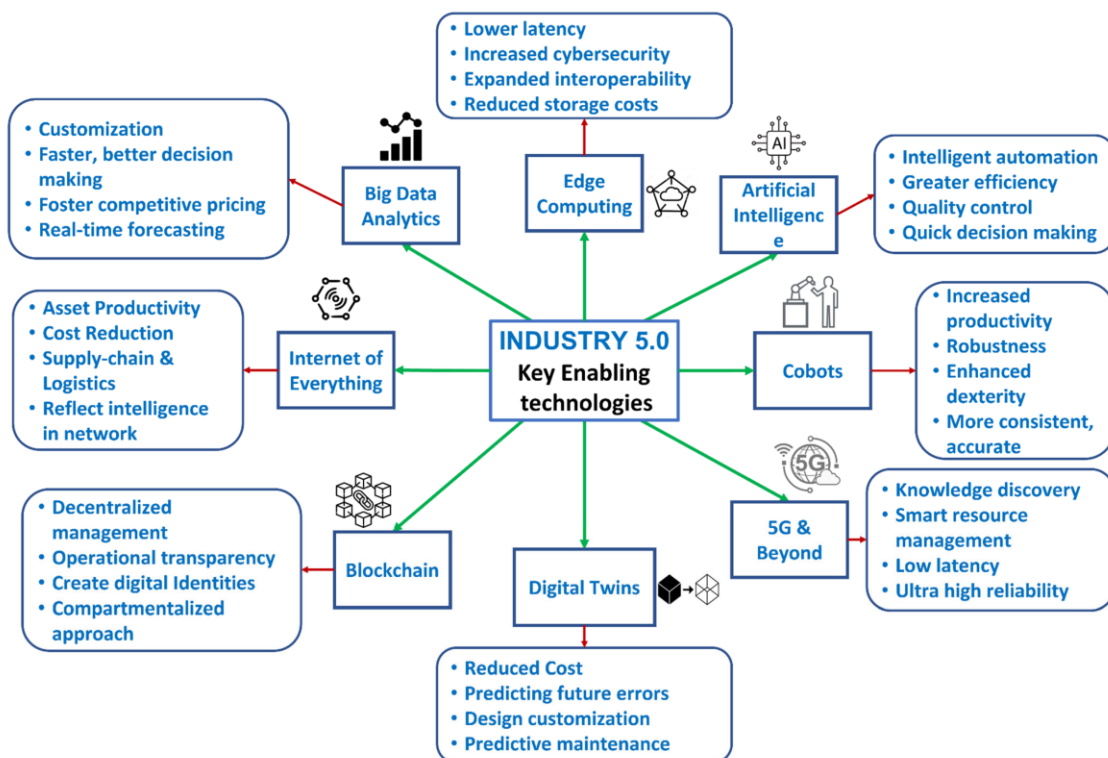
## 5.1 Ključne tehnologije za *Industrijo 5.0*

Na podlagi dokumenta Evropske komisije (European Commission 2020) so avtorji v prispevku (Xu et al. 2021) identificirali naslednje omogočitvene tehnologije za prehod iz Industrije 4.0 na koncept *Industrije 5.0*:

- individualizira tehnologije interakcije človek-stroj, ki med seboj povezujejo in združujejo prednosti ljudi in strojev,
- bio-navdihnjene tehnologije in pametni materiali, ki omogočajo materiale z vgrajenimi senzorji in izboljšanimi funkcijami, hkrati pa jih je mogoče reciklirati,
- digitalni dvojčki in simulacije za modeliranje celotnih sistemov,
- prenos podatkov, shranjevanje in tehnologije za analizo, ki lahko obdelujejo podatke in interoperabilnost sistemov,
- umetna inteligenca za odkrivanje, na primer, vzročnosti v kompleksnih, dinamičnih sistemih, kar vodi do uporabne inteligence,
- tehnologije za energetska učinkovitost, obnovljive vire energije, shranjevanje in avtonomijo.

Ključne omogočitvene tehnologije koncepta *Industrije 5.0*, kot so robno računalništvo (ang. *Edge Computing*), analitika vele podatkov (ang. *Big Data Analytics*), Internet vsega (ang. *Internet of Everything*), tehnologija veriženja podatkovnih blokov (ang. *Blockchain*), digitalni dvojčki (ang. *Digital Twin*), oblčne tehnologije in shranjevanje podatkov (ang. *5g & Beyond*), kolaborativni roboti (ang. *Cobots*) in umetna inteligenca (ang. *Artificial Intelligence*), so opisane v delu (Mourtzis, Angelopoulos, and Panopoulos 2022). Tehnologije, ki omogočajo koncept *Industrije 5.0*, so prikazane na Sliki 5.3.

**Slika 5.3.** Ključne omogočitvene tehnologije Industrije 5.0 (Mourtzis, Angelopoulos, and Panopoulos 2022)





## 5.2 Novi koncepti proizvodnih sistemov za *Industrijo 5.0*

V zadnjem desetletju, kot smo videli v predhodnem poglavju, sta evropska in svetovna industrija v dobi digitalizacije in kibernetizacije, kjer proizvodna podjetja želijo prilagoditi svoje proizvodne strukture in sisteme v skladu z načeli Industrije 4.0 (Hozdić, Kendić, and Jurković 2022).

Ključni dejavniki, ki omogočajo Industrijo 4.0, kot so decentralizacija, povezljivost, horizontalna in vertikalna integracija, sodelovanje, digitalizacija in kibernetizacija, pametni stroji in izdelki, avtomatizacija itd., (Hozdić, Kendić, and Jurković 2022) so spremenili industrijski sektor. Ti elementi so odprli pot novim organizacijskim oblikam in inovativnim načelom upravljanja.

Nove organizacijske oblike in inovativni principi upravljanja nastajanja, samoorganizacije, učenja, odprtega inoviranja, sodelovanja in mreženja ljudi in organizacij, kot smo že videli v predhodnem poglavju, so postali ključni elementi proizvodnih sistemov industrije 4.0 (Hozdić, Kozjek, and Butala 2020), tako imenovanih pametnih proizvodnih sistemov.

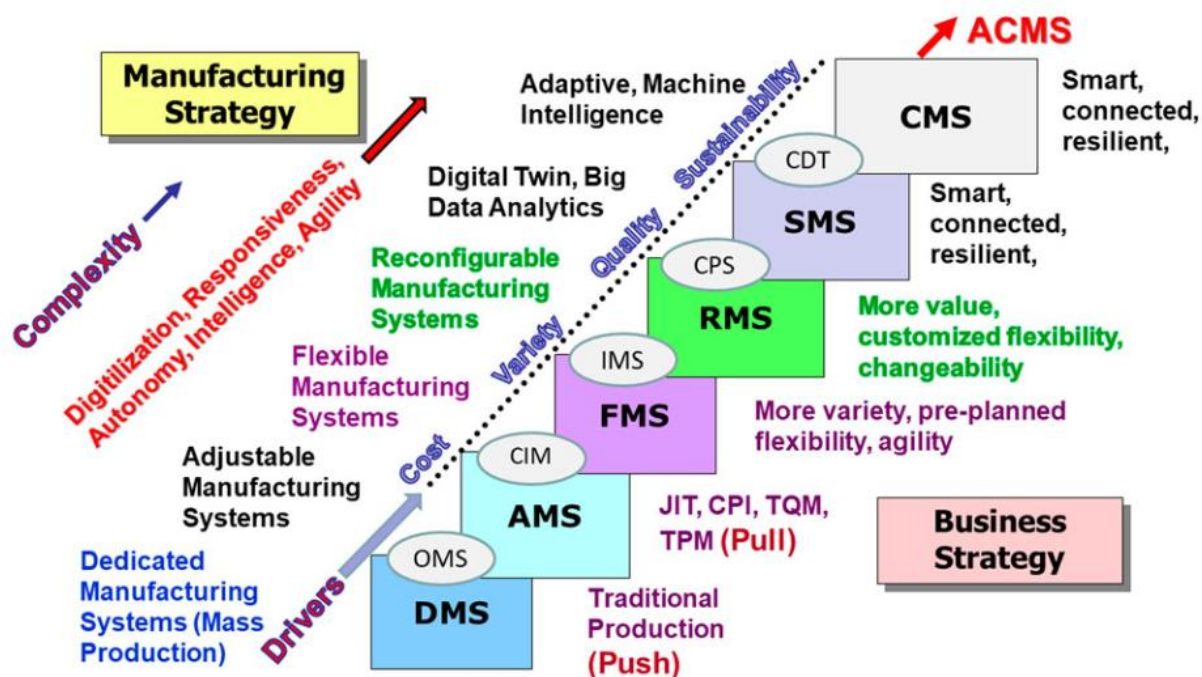
Inovacije in transformativne spremembe izdelkov, proizvodnih tehnologij, poslovnih strategij in proizvodnih paradigem so temeljito spremenile proizvodne sisteme. Poleg tega, da so proizvodni sistemi postali okoljsko, gospodarsko in družbeno trajnostni, vse pogosteje uporabljajo inteligentne tehnologije, kar jim omogoča boljšo prožnost, odzivnost in prilagodljivost (ElMaraghy and ElMaraghy 2022).

Proizvodni sistemi so se transformirali in evalvirali kot odziv na številne dejavnike, kot je razvoj novih izdelkov, novih materialov, novih proizvodnih strojev, procesov, tehnologij in novih poslovnih strategij. Nedavna pandemija je razkrila ranljivosti sodobnih proizvodnih sistemov za prenašanje motečih sprememb. Kot odgovor na takšne krizne izzive obstaja nujna potreba po izboljšanju odpornosti proizvodnje z uporabo avtomatizacije, digitalizacije in umetne inteligence (Lee et al. 2022).

Ilustrativni prikaz evalvacije proizvodnih sistemov od proizvodne linije do adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov je prikazan na [Sliki 5.4](#).

Prihodnji proizvodni sistemi, sistemi nove industrijske revolucije – *Industrije 5.0*, kot so na človeka osredotočena prilagodljiva proizvodnja, živi proizvodni sistemi, socialno-kibernetično-fizični proizvodni sistemi, prožni proizvodni sistemi, kibernetično-fizični kognitivni proizvodni sistemi »bodo v prihodnosti maksimalno prilagodljivi, fizično in logično razširljivi, in agilni; uporabita več statičnih, dinamičnih in kognitivnih dejavnikov prilagodljivosti za izboljšanje produktivnosti in poudarjanje vseh treh vidikov trajnosti; povečanje skupnega sodelovanja med človekom in strojem ter sprejemanje odločitev, nadomestitev implicitne interakcije z eksplicitno delitvijo nalog in užitek v večji prepoznavnosti veskozi. Prihodnji proizvodni sistemi bodo pri delovanju in nadzoru sistemov uporabljali hibridno razširjeno naravno in umetno inteligenco. Uporaba avtonomnih strojev, robotov, načrtovanja in nadzora proizvodnje, izboljšane diagnostike, predikativnega vzdrževanja in preverjanja kakovosti bo obsežna. Uporaba inteligentnega upravljanja in poslovnih funkcij; razširjena izmenjava podatkov in znanja z vzpostavljenimi ukrepi kibernetične varnosti bo običajna« (ElMaraghy et al. 2021).

Slika 5.4. Evolucija proizvodnih sistemov (ElMaraghy and ElMaraghy 2022)



ElMaraghy in soavtorji (ElMaraghy et al. 2021) so napovedovali novo paradigmo proizvodnih sistemov t.i. paradigmo adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov.

V okvirju nove paradigme so se začeli razvijati novi koncepti proizvodnih sistemov kot so odporni proizvodni sistemi, trajnostna proizvodnja, bio-inteligentni proizvodni sistemi, na človeka osredotočena proizvodnja, adaptivni kognitivni proizvodni sistemi, kibernetsko-fizični kognitivni proizvodni sistemi ipd. V nadaljevanju sta predstavljena 1) koncept odpornih proizvodnih sistemov in 2) koncept adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov.

### 5.2.1 Odporni proizvodni sistemi

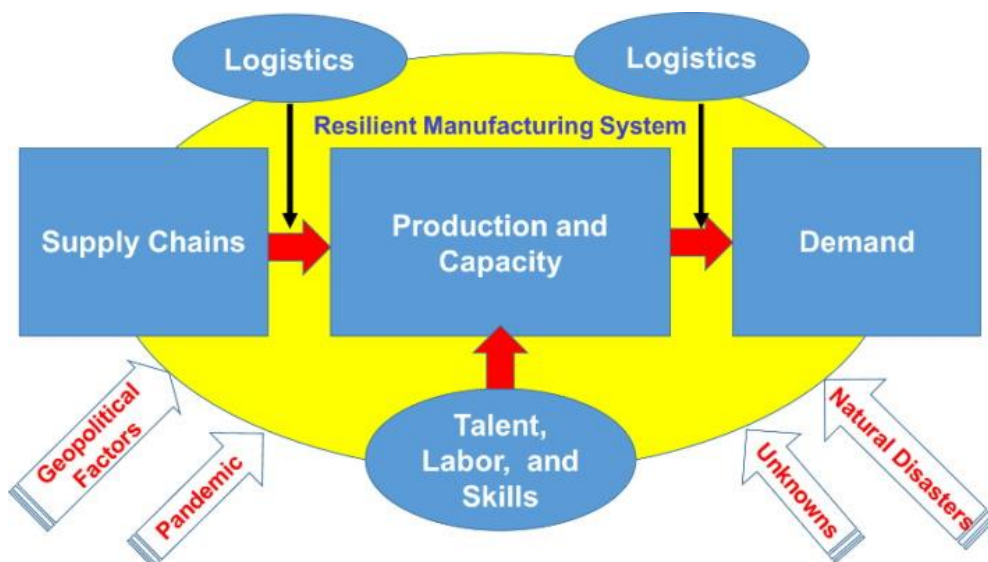
Odporni proizvodni sistem (ang. *Resilient Manufacturing System* – ReMS) je sistem, ki postavlja v ospredje zmogljivost zagotavljanja uspešnosti proizvodnje kljub nepričakovanim in za sistem škodljivim spremembam okolja, glej Slika 5.5. Odpornost proizvodnega sistema ReMS je sposobnost uspešne povrnitve proizvodne zmogljivosti po njenem zmanjšanju zaradi zunanje motnje (Škulj 2016).

Načrtovanje odpornosti proizvodnega sistema temelji na (1) redundanci, (2) poznavanju generalnih in specifičnih funkcionalnosti vseh komponent sistema, (3) učenju in pripravi sistema na različne konfiguracije in (4) ontološkem modeliranju sistema z namenom zagotavljanja mehanizma za upravljanje rekonfiguracije (Zhang and van Luttervelt 2011).

Odpornost je kombinacija robustnosti in agilnosti. Odporen sistem manjše motnje obvladuje brez neposrednega prilagajanja z lastno robustnostjo. V primeru večjih motenj se sistem prilagodi s spremembo strukture ali načina delovanja in kar najhitreje vzpostavi nivo zmogljivosti, ki ga je imel

pred začetkom negativnih vplivov motnje (Mensah, Merkurjev, and Longo 2015). Krajši kot je čas do popolne obnovitve zmogljivosti sistema relativno glede na jakost motnje, večja je odpornost sistema (Škulj 2016).

Slika 5.5. Odporni proizvodni sistem (Ding et al. 2014)



Upravljanje proizvodnje s strani neposredno udeleženih uporabnikov proizvodnih procesov omogoča, da sta robustnost in agilnost proizvodnega sistema v prilagodljivem ravnotežju, in s tem uresničuje koncept odpornosti. Primeri proizvodnih sistemov, ki so privzeli pristop odpornosti, izkazujejo zmanjšane pripravljalne čase in povečano stabilnost proizvodnih procesov (Heinicke 2014).

Odpornost proizvodnega sistema ReMS je opredeljena z merami izgube produktivnosti, časom ustalitve in skupnim časom zmanjšane proizvodnje. Analiza merjene odpornosti proizvodnega sistema je izvedena z uporabo Bernoullijevega modela zanesljivosti (Gu et al. 2015). Kot primer proizvodne dobavne verige imajo največji pričakovani negativni vpliv motnje, povezane z odpovedjo telekomunikacij, s slabim vremenom, z odpovedjo storitev zunanjih izvajalcev in izgubo strokovnega znanja (Mensah, Merkurjev, and Longo 2015).

### 5.2.2 Adaptivni kognitivni proizvodni sistemi

Današnji izzivi na področju proizvodnje so orientirani k reševanju problematike nepredvidljivosti proizvodnega okolja z namenom povečanja adaptivnosti proizvodnih sistemov, usmerjenih v personalizirano proizvodnjo. Spremembe okolja imajo dandanes velik vpliv na delovanje proizvodnih sistemov in posledično na okolje v katerem delujejo. Večja sposobnost adaptiranja proizvodnih sistemov izboljšuje zanesljivost doseganja njihovih ekonomskih in poslovnih ciljev (Škulj 2016).

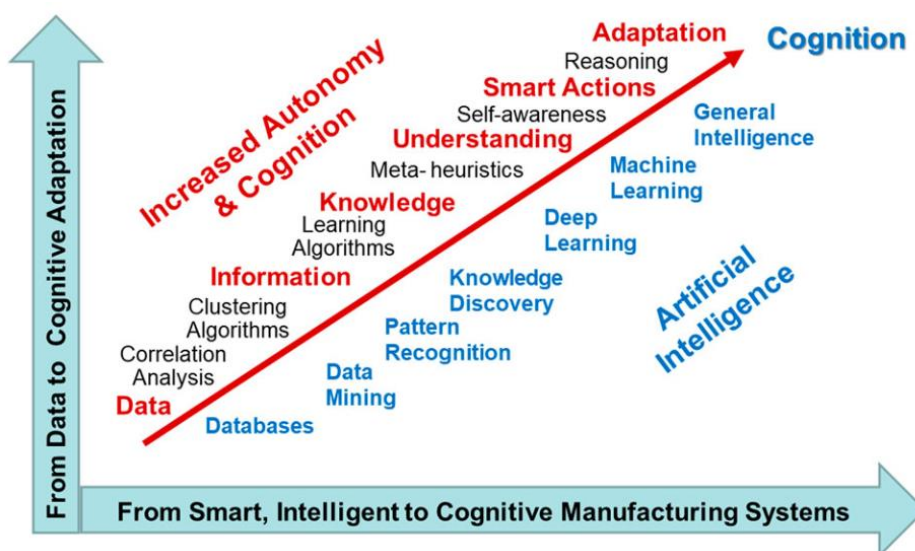
V članku (ElMaraghy et al. 2021) avtorji uvajajo novo klasifikacijo prilagodljivosti proizvodnih sistemov in sicer: statično, dinamično, kognitivno in ekstremno prilagodljivost.

Adaptivni kognitivni proizvodni sistemi (ang. *Adaptive Cognitive Manufacturing Systems* – ACMS) (ElMaraghy et al. 2021), (ElMaraghy and ElMaraghy 2022) so sistemi proizvodne paradigme kognitivnih sistemov, ki izkoriščajo dosežke in »moč« Industrije 4.0 in jih razširjajo z novimi tehnologijami precej z tehnologijo umetne inteligence, da bi dosegli bolj odzivne, prilagodljive in razmišljajoče proizvodne sisteme, v katerimi vloga človeka bo spremenjena. Vloga človeka in njegove odločitve v takšnih sistemih bodo podpirali in dopolnjevali inteligentni kognitivni sistemi in aplikacije.

Prilagodljivi kognitivni proizvodni sistemi lahko prepoznajo, ocenijo, načrtujejo, napovedujejo, optimizirajo, reagirajo, prilagodijo in izboljšajo svoje delovanje z določeno stopnjo avtonomije, sprejemajo odločitve in izvajajo dejanja za doseganje ciljev, ki so analogni kognitivnemu vedenju v realnem svetu v spreminjajočem se okolju (ElMaraghy and ElMaraghy 2022).

Na Sliki 5.6 je prikazana tranzicijska pot od podatka do kognicije v razvoju proizvodnih sistemov na poti do adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov.

Slika 5.6. Tranzicija iz podatkov do kognicije (ElMaraghy and ElMaraghy 2022)



Veliko faktorjev je prispevalo k tranziciji pametnih proizvodnih sistemov v adaptivne kognitivne proizvodne sisteme. Vse oblike trajnostnega razvoja kot so socialne, ekonomske in okoljske so vitalna gonila za razvoj prilagodljivih in kognitivnih proizvodnih sistemov.

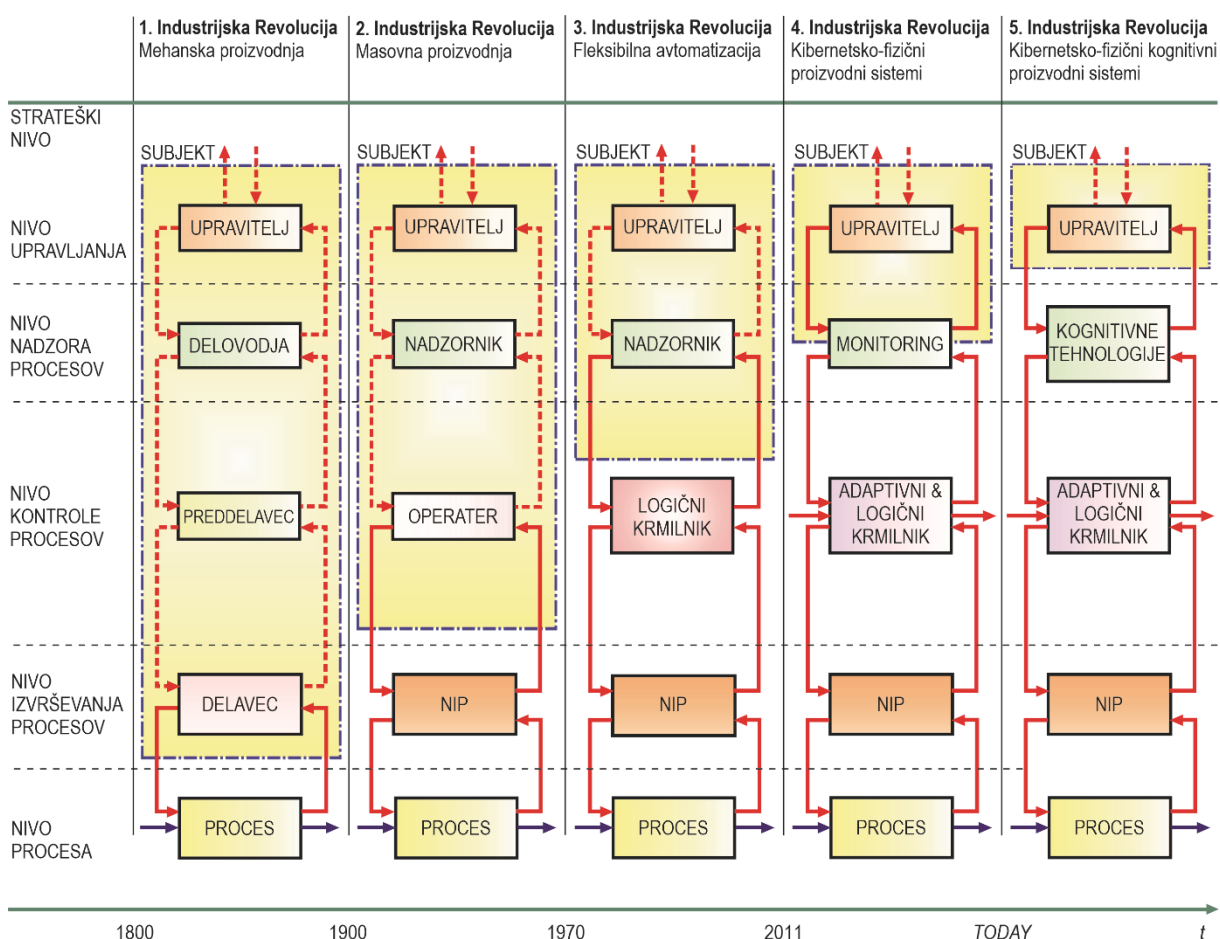
Prejšnji koncepti proizvodnih sistemov, vključno z najnovejšim CPPS, nekako podcenjujejo, zanemarjajo ali ignorirajo vlogo ljudi v proizvodnji. Izhodišče za razvoj novih konceptov proizvodnih sistemov, ki močno izpostavlja vlogo ljudi v proizvodnji, je generični model kibernetično-fizičnih proizvodnih sistemov (CPPS), ki je bil razvit v članku (Hozdič, Kozjek, and Butala 2020).

V predlaganem konceptu CPPS je spremenjena vloga človeka - *Subjekta*. Njegova vloga se oblikuje predvsem v dveh smereh: 1) v smeri generiranja novih idej in inovacij z intenzivno uporabo eksplicitnega znanja, socialnih tehnologij, ustvarjalnosti in intuicije (*Subjekt* kot nosilec znanja) in 2) v smeri upravljanja CPPS v realnem času na podlagi on-line informacij, diagnostike, prognostike in

odločitvenih modelov (*Subjekt* kot odločevalec). Takša vloga *Subjekta* bo v prihodnjih proizvodnih sistemih nedvomno vplivala na agilnost, učinkovitost, prilagodljivost in robustnost proizvodnih sistemov (Hozdič, Kendić, and Jurković 2022).

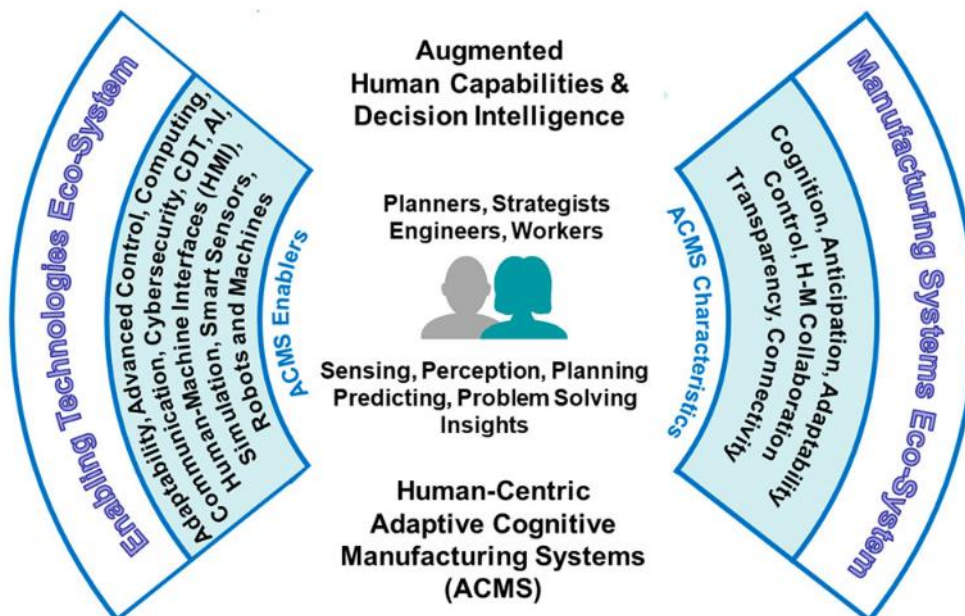
Koncept adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov odpira pot uvajanju naprednih, kognitivnih tehnologij na področju proizvodnih sistemov. To bo omogočilo, da bo *Subjekt* potisnjen na najvišjo raven (Slika 5.7), to je na vodstveni nivo, kjer bo *Subjekt* močno podprt z naprednimi, kognitivnimi tehnologijami in bo tako lahko upravljal proizvodne procese v realnem času. *Subjekt* bo sprejemal odločitve na visoki ravni v realnem času ter sodeloval, se pogajal in usklajeval z drugimi *Subjekti*. Vsa ostala dela in procese krmiljenja, nadziranja in vodenja procesov bodo prevzeli in opravili elementi fizičnega in kibernetskega sistema.

**Slika 5.7.** Nivoji upravljanja in vodenja proizvodnih procesov, prilagojeno po (Hozdič 2020b)

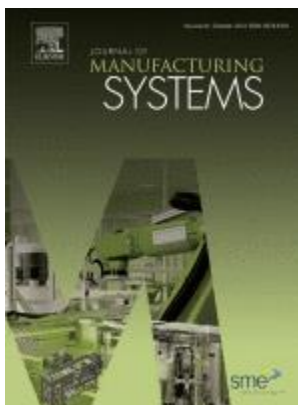
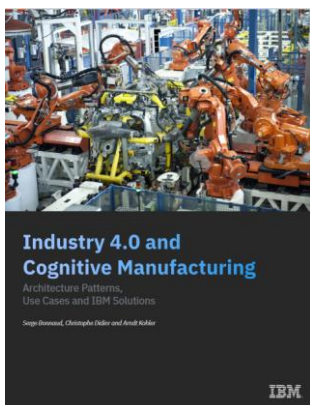


Kognitivne tehnologije (kognitivno računalništvo, industrijski internet stvari, napredna analitika ipd.) bo omogočila napredno optimizacijo proizvodnih sistemov in njihovih procesov. Ljudje bodo še naprej igrali bistveno in osrednjo vlogo pri interaktivnem odločanju na nivoju upravljanja in strateškega managementa. Integracija človeških izkušenj in umetne inteligence bo močno vplivala na kolaborativne procese v novih proizvodnih sistemih. Na Sliki 5.8 je prikazana kolaboracija človeka (*Subjekta* in kognitivne tehnologije v kontekstu ACMS).

Slika 5.8. Na človeka osredotočeni adaptivni kognitivni proizvodni sistemi (ElMaraghy and ElMaraghy 2022)



ACMS predstavljajo na človeka osredotočene proizvodne sisteme v katerih biološka inteligenca in umetna inteligenca izvajata delo v tandemu in na ta način proizvodni sistemi postajajo bolj prožni, odzivni, prilagodljivi in trajnostni. To pomeni, da bo bodoči ACMS omogočali skupno sodelovanje med človekom in strojem ter sprejemanje odločitev. Implicitne interakcije bodo nadomestile eksplicitno delitev nalog v kognitivni proizvodnji. To pa bo usmerjalo proizvodne sisteme k izboljšavam produktivnosti in kakovosti, učinkovitosti in zanesljivosti proizvodnega okolja.



## 6 ZAKLJUČEK

*Moder je tisti, ki se zna v pravem trenutku ustaviti..*

*Homer*

V delu so predstavljene napredne IKT in novi koncepti proizvodnih sistemov, ki omogočajo prehod iz Industrije 4.0 v novo industrijsko revolucijo t.i. *Industrijo 5.0*.

Namen tega dela je bil, da na podlagi temeljitega pregleda domače in tuje znanstvene literature poskuša približati širši javnosti tematiko konceptov Industrije 4.0 kot tudi izpostaviti smernice za razvoj proizvodnih sistemov v prihodnosti kot jih načrtujejo novi koncepti, ki temeljijo na osnovah nove industrijske revolucij – *Industrije 5.0*.

Predstavljeno delo izhaja iz dosedanjih raziskav na področju kompleksnih adaptivnih proizvodnih sistemov in adaptivnih distribuiranih proizvodnih sistemov ter konceptov kibernetiko-fizičnih proizvodnih sistemov, ki so bile opravljene v okvirju raziskovalnega dela na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani kot tudi iz raziskovalnega dela raziskovalne skupine *Tehnologije in sistemi* na Fakulteti za strojništvo Univerze v Novem mestu.

Podpora temu delu je projekt STE(A)M (*Promocija študija s STEAM področji za poklice prihodnosti s kakovostnimi aktivnostmi in vsebinami za mlade izven javnih univerzitetnih središč*), ki ga je bil razpisan s strani Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport R Slovenije in v katerem so vključeni visokošolski partnerji in sicer: Fakulteta za strojništvo Univerze v Novem mestu (FS UNM), Fakulteta za tehnologijo polimerov (FTP) Slovenj Gradec, Visoka šola za varstvo okolja Celje in Univerza v Novi Gorici (UNI NG).

Naša vloga, Fakultete za strojništvo Univerze v Novem mestu je, da spodbujamo zanimanje za STE(A)M področja, predstavljamo poklice prihodnosti, spodbujamo radovednost in kreativnost pri mladih, zvišujemo kakovost dela na osnovnih in srednjih šolah v regijah, ponujamo kakovostne in inovativne obšolske aktivnosti, prenašamo dobre prakse in razvijamo inovativne koncepte, uvajamo inovativne pedagoške prakse in ponujamo višji nivo znanja za učitelje, povečujemo izkoriščenost šolske opreme, zmanjšujemo razvojne razlike med regijami...

Upamo, da nam je uspelo.

*9<sup>th</sup> International Conference*  
**"New Technologies,  
 Development and Application"**  
**NT-2023**  
 CALL FOR PAPERS



**Sarajevo, 22<sup>th</sup> - 24<sup>th</sup>, June 2023**  
 ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS  
 OF BOSNIA AND HERZEGOVINA


[www.icnt.ba](http://www.icnt.ba)

<https://easychair.org/conferences/?conf=nt2023>



All papers from the 9<sup>th</sup> International Conference "New Technologies, Development and Application" NT-2023, will be published by "SPRINGER" Deutschland.

 **Springer**  
 (Web page: <https://www.springer.com/us/book/9783319908922>)



All original and research papers from the 9<sup>th</sup> International Conference „New Technologies, Development and Application NT-2023“, which successfully pass the review process, will be published in the journal SN Applied Sciences (ISSN 2523-3971)

**SPRINGER NATURE**  
 (Web page: <https://www.springer.com/snappedsciences>)



## 7 LITERATURA

- Abdul Rahman, A. A. 2020. "Revolution of Production System for the Industry 4.0." In *Mass Production Processes*.
- Aerts, A. T. M., N. B. Szirbik, and J. B. M. Goossenaerts. 2001. "Flexible Infrastructure for Virtual Enterprises." In *Global Engineering, Manufacturing and Enterprise Networks*, 26–37. Boston, MA: Springer US.
- Agha, G., P. Wegner, and A. Yonezawa. 1993. *Research Directions in Concurrent Object-Oriented Programming*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Ahson, S. A., and M. Ilyas. 2010. *RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy*. CRC Press.
- Akyildiz, F. I., and M.C. Vuran. 2010. *Wireless Sensor Networks*. Vol. 4. John Wiley and Sons.
- Alrubaian, M., M. Al-Qurishi, A. Alamri, M. Al-Rakhami, M. Mehedi Hassan, and G. Fortino. 2019. "Credibility in Online Social Networks: A Survey." *IEEE Access* 7: 2828–55.
- Applegate, L., R. Austin, and D. Soule. 2007. *Corporate Information Strategy and Management: Text and Cases*. McGraw-Hill Education.
- Baheti, R., and H. Gill. 2011. "Cyber - Physical Systems." In *The Impact of Control Technology*, 161–66.
- Baird, M., B. Ng, and W. Seah. 2017. "WiFi Network Access Control for IoT Connectivity with Software Defined Networking." In *Proceedings of the 8th ACM on Multimedia Systems Conference*, 343–48. New York, NY, USA: ACM.
- Bakopoulos, J. Y. 1985. "Toward a More Precise Concept of Information Technology." In *ICIS*. Sloan School of Management, Boston.
- Barnes, J. A. 1954. "Class and Committees in a Norwegian Island Parish." *Human Relations* 7 (1): 39–58.
- Bednar, P. M., and C. Welch. 2020. "Socio-Technical Perspectives on Smart Working: Creating Meaningful and Sustainable Systems." *Information Systems Frontiers* 22: 281–98.
- Bellifemine, F., A. Poggi, and G. Rimassa. 1999. "JADE - A FIPA - Compliant Agent Framework." In *Proceedings of PAAM 99*, 97–108.
- Bellifemine, F. L., G. Caire, and D. Greenwood. 2007. *Developing Multi - Agent Systems with JADE*. John Wiley and Sons.
- Benedikt, M. 1991. *Cyberspace: First Steps*. Mit Pr; First Edition, First Printing edition (November 1991).
- Bitran, G. R., and D. Tirupati. 1993. "Chapter 10 Hierarchical Production Planning." In *Handbooks in Operations Research and Management*, 523–68.
- Blažun, H. 2012. *Vključevanje Starostnikov Računalniško Podprto Mreženje*. Doktorsko. Maribor: Univerza v Mariboru, Ekonomsko-poslovna fakulteta.
- Bottani, E. 2010. "Profile and Enablers of Agile Companies: An Empirical Investigation." *International Journal of Production Economics* 125 (2): 251–61.

- Boyd, D. M., and N. B. Ellison. 2007. "Social Network Sites: Definition, History, and Scholarship." *Journal of Computer-Mediated Communication* 13 (1): 210–30.
- Brennen, S., and D. Kreiss. 2016. "Digitalization." *The International Encyclopedia of Communication Theory and Philosophy*.
- Breque, M., L. De Nul, and A. Petridis. 2021. *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*.
- Browne, J., D. Dubois, K. Rathmill, S. P. Sethi, and K.E. Stecke. 1984. "Classification of Flexible Manufacturing Systems." *The FMS Magazine* 2 (2): 114–17.
- Broy, M. 2010. *Cyber-Physical Systems. Cyber-Physical Systems: Innovation Durch Software - Intensive Eingebettete Systeme*. Berlin: Springer.
- Brussel, H. Van. 1994. "Holonics Manufacturing Systems, the Vision Matching the Problem." In *Proceedings of First European Conference on Holonic Manufacturing Systems*. Hannover.
- Brussel, H. Van, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts, and P. Peeters. 1998. "Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA." *Computers in Industry* 37 (3): 255–74.
- Buddhakulsomsiri, J., and D. S. Kim. 2007. "Priority Rule-Based Heuristic for Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problems with Resource Vacations and Activity Splitting." *European Journal of Operational Research* 178 (2): 374–90.
- Bughin, J., M. Chui, and J. Clouds Manyika. 2010. *Big Data, and Smart Assets: Teh Tech-Enabled Business Trends to Wath*. McKinsey Quarterly. McKinsey Global Institute.
- Butala, P., and A. Sluga. 2002. "Dynamic Structuring of Distributed Manufacturing Systems." *Advanced Engineering Informatics* 16 (2): 127–33.
- Butala, P., and A. Sluga. 2006. "Autonomous Work Systems in Manufacturing Networks." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (1): 521–24.
- Cai, Y., E. Kutanoglu, and J. Hasenbein. 2011. "Production Planning and Scheduling: Interaction and Coordination." In *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise*, 15–42.
- Camarinha-Matos, L. M., and H. Afsarmanesh. 1999. "The Virtual Enterprise Concept." In *Infrastructures for Virtual Enterprises: Networking Industrial Enterprises, IFIP TC5 WG5.3 / PRODNET Working Conference on Infrastructures for Virtual Enterprises (PRO-VE '99)*, 3–14.
- Cardenas, A. A., S. Amin, and S. Sastry. 2008. "Secure Control: Towards Survivable Cyber-Physical Systems." In *2008 The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 495–500. Beijing.
- Carrie, A. 2000. "From Integrated Enterprises to Regional Clusters: The Changing Basis of Competition." *Computer in Industry* 42: 289–98.
- Caseres, J., L. Vaquero, L. Rodero-Merino, A. Polo, and J. Hierro. 2010. "Service Scalability Over the Cloud." In *Handbook of Cloud Computing*, edited by Borko Furht and Armando Escalante, 357–77. New York, NY, USA: Springer.
- Chen, B., J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, and B. Yin. 2018. "Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges." *IEEE Access* 6: 6505–19.
- Chen, T., and C. W. Lin. 2020. "Smart and Automation Technologies for Ensuring the Long-Term Operation of a Factory amid the COVID-19 Pandemic: An Evolving Fuzzy Assessment Approach." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111 (11–12): 3545–58.



- Cheng, K., D. K. Harrison, and P. Y. Pan. 1998. "Implementation of Agile Manufacturing—an AI and Internet Based Approach." *Journal of Materials Processing Technology* 76 (1–3): 96–101.
- Christensen, J. H. 2003. "HMS/FB Architecture and Its Implementation." In *Agent Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach*, edited by S.M. Deen, 53–87. Berlin, Heidelberg: Springer - Verlag.
- CISCO. 2012. "IPv6 Internetworking Technology Handbook."
- Compton, W. D., H. K. Bowen, H. E. Cook, J. F. Lardner, and A. B. Pritsker. 1992. "Report of the Committee on Foundations of Manufacturing." In *Manufacturing Systems: Foundations of World-Class Practice*, 1–82. Washington, DC USA: Foundations of World-Class Practice, National Academy Press.
- Curbera, F., M. Duftler, R. Khalaf, W. Nagy, N. Mukhi, and S. Weerawarana. 2002. "Unraveling the Web Services Web: An Introduction to SOAP, WSDL, and UDDI." *IEEE Internet Computing* 6 (2): 86–93.
- d’Inverno, M., and M. Luck. 1997. "Development and Application of a Formal Agent Framework." *First IEEE International Conference on Formal Engineering Methods*.
- Davidrajuh, R., B. Skolud, and D. Krenczyk. 2018. "Performance Evaluation of Discrete Event Systems with GPenSIM." *Computers* 7 (8).
- Davis, J., T. Edgar, J. Porter, J. Bernaden, and M. Sarli. 2012. "Smart Manufacturing, Manufacturing Intelligence and Demand-Dynamic Performance." *Computers & Chemical Engineering* 47 (December): 145–56.
- Detlef, Z., and O. Lisa. 2011. "Agile Automation Systems Based on Cyber - Physical Systems and Service - Oriented Architectures." In *Advances in Automation and Robotics, Vol. 1*, edited by Geuk Lee, 567–74. Springer - Verlag Berlin Heidelberg.
- Devedžić, V. 2004. *Technologies of Intelligent Systems*. Edited by Nevenka Žarkić Joksimović. Belgrade: Department of Information Systems and Technologies FON - School of Business Administration University of Belgrade.
- Diegel, O., G. Bright, and J. Potgieter. 2004. "Bluetooth Ubiquitous Networks: Seamlessly Integrating Humans and Machines." *Assembly Automation* 24 (2): 168–76.
- Ding, S., S. Yang, Y. Zhang, C. Liang, and C. Xia. 2014. "Combining QoS Prediction and Customer Satisfaction Estimation to Solve Cloud Service Trustworthiness Evaluation Problems." *Knowledge-Based Systems* 56 (January): 216–25.
- Dohler, M., T. Watteyne, and J. Alonso-Zarate. 2010. "Machine-to-Machine: An Emerging Communication Paradigm." *Presentation Report*, 88–107.
- Dubey, R., and A. Gunasekaran. 2015. "Agile Manufacturing: Framework and Its Empirical Validation." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76 (9–12): 2147–57.
- Duffie, N. A., and R. S. Piper. 1986. "Nonhierarchical Control of Manufacturing Systems." *Journal of Manufacturing Systems* 5 (2): 141.
- Elango, B. 2004. "Geographic Scope of Operations by Multinational Companies: An Exploratory Study of Regional and Global Strategies." *European Management Journal* 22 (4): 431–41.
- Elkins, D. A., N. Huang, and J. M. Alden. 2004. "Agile Manufacturing Systems in the Automotive Industry." *International Journal of Production Economics* 91 (3): 201–14.
- ElMaraghy, H. A. 2006. "Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms." *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17 (4): 261–76.
- ElMaraghy, H., and W. ElMaraghy. 2022. "Adaptive Cognitive Manufacturing System (ACMS) – a New Paradigm."

- International Journal of Production Research* 60 (24): 7436–49.
- ElMaraghy, H., L. Monostori, G. Schuh, and W. ElMaraghy. 2021. "Evolution and Future of Manufacturing Systems." *CIRP Annals* 70 (2): 635–58.
- Eric, D. S., K. Kyoung-sook, E. Subrahmanian, R. Lee, F. J. de Vault, Y. Murakami, K. Zettsu, and R. D. Sriram. 2013. *A Vision of Cyber - Physical Cloud Computing for Smart Networked Systems*. National Institute of Information and Communications Technology, Department of Commerce.
- Esmailian, B., S. Behdad, and B. Wang. 2016. "The Evolution and Future of Manufacturing: A Review." *Journal of Manufacturing Systems* 39 (April): 79–100.
- Espinoza Pérez, A. T., D. A. Rossit, F. Tohmé, and Ó. C. Vásquez. 2022. "Mass Customized/Personalized Manufacturing in Industry 4.0 and Blockchain: Research Challenges, Main Problems, and the Design of an Information Architecture." *Information Fusion* 79 (March): 44–57.
- Estrem, W. A. 2003. "An Evaluation Framework for Deploying Web Services in the Next Generation Manufacturing Enterprise." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 19 (6): 509–19.
- ETSI. 2011. *Machine- to- Machine Communications (M2M): Functional Architecture*. TS 102 690.
- European Commission. 2020. "Enabling Technologies for Industry 5.0: Results of a Workshop with Europe's Technology Leaders."
- European Commission. 2021. "Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry."
- Feigenbaum, A. V. 1991. *Total Quality Control*. New York, New York, USA: McGraw - Hill.
- Finkenzeller, K. 2003. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. John Wiley and Sons, Inc.
- FIPA. 2014. "Foundation for Intelligent Agents." <http://www.fipa.org>.
- Fletcher, M., and J. Brusey. 2003. "The Story of the Holonic Packing Cell." In *Proceedings of 2nd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Melbourne, Australia: ACM Press.
- Frei, F., M. Hugentobler, and S. Schurman. 1993. *Work Design for the Competent Organization*. Praeger, Westport, CT.
- Gaither, N., and G. Frazier. 1999. *Production and Operations Management*. 8th editio. South-Western.
- Gao, R., L. Wang, R. Teti, D. Dornfeld, S. Kumara, M. Mori, and M. Helu. 2015. "Cloud-Enabled Prognosis for Manufacturing." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2): 749–72.
- Garvin, D. A. 1988. *Managing Quality: The Strategic and Competitive Edge*. New York, New York, USA: Harvard Business School, Simon and Schuster.
- Geisberger, E., and M Broy. 2012. *Agenda CPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber - Physical Systems*. Springer.
- Gibson, W. F. 1984. *NEUROMANCER*. New York, Berkley Pub. Group.
- Gill, H. 2006. "NSF Perspective and Status on Cyber-Physical Systems. In National Workshop on Cyber-Physical Systems,." Austin, TX.
- Giusto, D., A. Iera, G. Morabito, and L. Atzori. 2010. *The Internet of Things*. Springer.
- Goldreich, O. 2010. *P, NP, and NP-Completeness: The Basics of Computational Complexity*. Cambridge University Press.



- Grabowska, S., S. Saniuk, and B. Gajdzik. 2022. "Industry 5.0: Improving Humanization and Sustainability of Industry 4.0." *Scientometrics* 127 (6): 3117–44.
- Gu, X., X. Jin, J. Ni, and Y. Koren. 2015. "Manufacturing System Design for Resilience." *Procedia CIRP* 36: 135–40.
- Gubbi, J., R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami. 2013. "Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions." *Future Generation Computer Systems* 29 (7): 1645–60.
- Gunasekaran, A. 1998. "Agile Manufacturing: Enablers and an Implementation Framework." *International Journal of Production Research* 36 (5): 1223–47.
- Gunasekaran, A. 1999. "Agile Manufacturing: A Framework for Research and Development." *International Journal of Production Economics* 62 (1–2): 87–105.
- Haller, S. 2009. "Internet of Things." In *An Integral Part of the Internet*. Prag.
- Hameed, B, F. Durr, and K. Rothermel. 2011. *RFID Based Complex Event Processing in a Smart Real - Time Factory, Expert Discussion: Distributed Systems in Smart Spaces*.
- Hanisch, H.-M., and V. Vyatkin. 2004. "Achieving Reconfigurability of Automation Systems by Using the New International Standard {IEC} 61499: A Developer's View." In *The Industrial Information Technology Handbook*. CRC Press.
- Hatwany, J. 1983. "The Efficient Use of Deficient Information." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 32 (1): 423–25.
- Heim, M. H. 1993. *The Metaphysics of Virtual Reality*. Oxford University Press, Inc. New York, NY, USA.
- Heinicke, M. 2014. "Implementation of Resilient Production Systems by Production Control." *Procedia CIRP* 19: 105–10.
- Henriette, E., M. Feki, and I. Boughzala. 2015. "The Shape of Digital Transformation: A Systematic Literature Review." In *Proc. 9th Mediterranean Conference on Information Systems*, 1–13. Samos, Greece.
- Hiertz, G., D. Denteneer, L. Stibor, Y. Zang, X. Costa, and B. Walke. 2010. "The IEEE 802.11 Universe." *IEEE Communications Magazine* 48 (1): 62–70.
- Hon, K. K. B. 2005. "Performance and Evaluation of Manufacturing Systems." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (2): 139–54.
- Hozdić, E. 2015. "Smart Factory for Industry 4.0: A Review." *International Journal of Modern Manufacturing Technologies* 7 (1): 28–35.
- Hozdić, E. 2020a. "Integrating Cyber and Physical Environment for Adaptive Process Control in Work Systems." In *Handbook of Research on Integrating Industry 4.0 in Business and Manufacturing*, edited by I. Karabegović, A. Kovačević, M. L. Banjanović, and P. Dašić. Springer.
- Hozdić, E. 2020b. *Model kiberntesko-fizičnih proizvodnih sistemov*, doktorsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- Hozdić, E. 2020c. "Socio-Cyber-Physical Systems Alternative for Traditional Manufacturing Structures." In *New Technologies, Development and Application II. NT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems*, edited by I. Karabegović. Vol. 76. Cham: Springer.
- Hozdić, E. 2020. "Concept of Socio-Cyber-Physical Work Systems for Industry 4.0." *Technical Gazette* 27 (2).
- Hozdić, E., S. Kendić, and Z. Jurković. 2022. "Complex Adaptive Manufacturing System Concept as a Cyber-Physical Production System: Solutions to the Covid-19 Pandemic Challenges." In *Cyber-Physical Systems*, 129–56. Boca Raton: CRC Press.

- Hozdić, E., D. Kozjek, and P. Butala. 2020. "A Cyber-Physical Approach to the Management and Control of Manufacturing Systems." *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 66 (1): 61–70.
- Hu, F. 2013. *Cyber-Physical Systems: Integrated Computing and Engineering Design*. CRC Press.
- Hu, Y., X. Zhou, and C. Li. 2010. "Internet-Based Intelligent Service-Oriented System Architecture for Collaborative Product Development." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 23 (2): 113–25.
- Huang, G., T. Qu, R.Y. Zhong, Z. Li, H.D. Yang, Y.F. Zhang, Q.X. Chen, P.Y. Jiang, and X. Chen. 2011. "Establishing Production Service System and Information Collaboration Platform for Mold and Die Products." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52 (9): 1149–60.
- Husejnagić, D., and A. Sluga. 2015. "A Conceptual Framework for a Ubiquitous Autonomous Work System in the Engineer-To-Order Environment." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- IEEE. 1997. "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", ANSI/IEEE Std 802.11." Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Inman, R. A., R. S. Sale, K. W. Green, and D. Whitten. 2011. "Agile Manufacturing: Relation to JIT, Operational Performance and Firm Performance." *Journal of Operations Management* 29 (4): 343–55.
- Iwata, K., M. Onosato, M. Fuse, Y. Fucuda, and M. Miki. 1993. "Manufacturing Systems Evolution: Historical and Structural Aspects of Manufacturing Systems Research." In *Flexible Manufacturing Systems - Past, Present, Future*, edited by J. Peklenik, 113–27. Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering Ljubljana.
- Jain, A., P. K. Jain, F. T. Chan, and S. Singh. 2013. "A Review on Manufacturing Flexibility." *International Journal of Production Research* 51 (19): 5946–70.
- Jennings, N., K. Sycara, and M. Georgeff. 1998. "A Roadmap of Agent Research and Development." In *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*.
- Jovane, Francesco, Y. Koren, and C. R Boer. 2003. "Present and Future of Flexible Automation : Towards New Paradigms." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52 (1): 543–60.
- Jovanović, M., S. Zupan, M. Starbek, and I. Prebil. 2014. "Virtual Approach to Holonic Control of the Tyre-Manufacturing System." *Journal of Manufacturing Systems* 33 (1): 173–79.
- Kalpič, B. 2002. "Nove Proizvodne Organizacijske Strukture." In *Dinamične Grozdne Strukture, Prehod v Novo Proizvodno Paradigmo*, edited by A. Sluga and P. Butala. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- Kaplan, A. M., and M. Haenlein. 2010. "Users of the World, Unite! The Challenges and Opportunities of Social Media." *Business Horizons* 53 (1): 59–68.
- Katz, R. 2007. "Design Principles of Reconfigurable Machines." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 34: 430–39.
- Kegermann, H., W. Wahlster, and H. Johannes. 2013. "Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 Final Report of the Industrie 4.0 Working Group." Frankfurt an Main.
- Kim, D. -H., J. -Y. Song, J. -H. Lee, and S. -K. Cha. 2009. "Development and Evaluation of Intelligent Machine Tools Based on Knowledge Evolution in M2M Environment." *Journal of Mechanical Science and Technology* 23 (10): 2807–13.
- Kingsley, D. 2008. "Sensing the Future: Complex Geographies of Connectivity and Communication." *World Futures* 64 (1): 22–33.
- Kirshbaum, D. 2011. "Introduction to Complex Systems." Dostupno Na: [Http://www.calresco.org/intro.htm](http://www.calresco.org/intro.htm)



- Knapik, M., and J. Johnson. 1998. *Developing Intelligent Agents for Distributed Systems*. McGraw - Hill.
- Koestler, A. 1969. *The Ghost in the Machine*. London: Arkana Books.
- Koren, Y., T. Moriwaki, and Hendrik Van Brussel. 1999. "Reconfigurable Manufacturing Systems." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 48 (2): 527–40.
- Koren, Y., and A. G. Ulsoy. 2002. "Vision, Principles and Impact of Reconfigurable Manufacturing Systems." *Powertrain International*, 14–21.
- Koren, Y. 2010a. *The Global Manufacturing Revolution Product - Process - Businee Integration*. John Wiley.
- Koren, Y. 2010b. *The Global Manufacturing Revolution*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Kruger, K., and A. Basson. 2013. "Multy-Agent Systems vs IEC 61499 for Holonic Resource Control in Reconfigurable Systems." *Procedia CIRP* 7: 503–8.
- Kulkarni, N. and V. Dwivedi. 2008. "The Role of Service Granularity in a Successful SOA Realization: A Case Study." In *2008 IEEE Congress on Services - Part I*, 423–30. IEEE.
- Kumar, A., S. Luthra, S. K. Mangla, and Y. Kazançoğlu. 2020. "COVID-19 Impact on Sustainable Production and Operations Management." *Sustainable Operations and Computers* 1: 1–7.
- Kumar, P. R. 2012. "Cyber–Physical Systems: A Perspective at the Centennial." *Proceedings of the IEEE* 100 (Special Centennial Issue): 1287–1308.
- Kusiak, A. 2018. "Smart Manufacturing." *International Journal of Production Research* 56 (1–2): 508–17.
- Lee, E. A. 2008. "Cyber Physical Systems: Design Challenges." In *In International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 363–69. Orlando, Florida, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Lee, E. A. and S. A. Seshia. 2011. *Introduction to Embedded Systems A Cyber - Physical Systems Approach*. California, USA: Berkeley University of California.
- Lee, J., S. Siahpour, X. Jia, and P. Brown. 2022. "Introduction to Resilient Manufacturing Systems." *Manufacturing Letters* 32: 24–27.
- Lee, J., Y. Su, and C. Shen. 2007. "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi." In *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 46–51. IEEE.
- Lee, S. and K. Ryu. 2022. "Development of the Architecture and Reconfiguration Methods for the Smart, Self-Reconfigurable Manufacturing System." *Applied Sciences* 12 (10): 5172.
- Leiner, R. M., V. G. Cerf, D. D. Clark, R. E. Kahn, L. Kleinrock, D. C. Lynch, J. Postel, L. G. Roberts, and S. Wolff. 2009. "A Brief History of the Internet." *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 39 (5): 22–31.
- Leitao, P., A. W. Colombo, and F. J. Restivo. 2005. "ADACOR: A Collaborative Production Automation and Control Architecture." *IEEE Intelligent Systems* 20 (1): 58–66.
- Leitão, P. and S. Karnouskos. 2015. *Industrial Agnets: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Elsevier.
- Leitão, P., A. W. Colombo, and S. Karnouskos. 2016. "Industrial Automation Based on Cyber-Physical Systems Technologies: Prototype Implementations and Challenges." *Computers in Industry* 81 (September): 11–25.
- Li, B. H., L. Zhang, S. L. Wang, F. Tao, J. W. Cao, X. D. Jiang, X. Song, and X. D. Chai. 2010. "Cloud Manufacturing: A New Service-Oriented Networked Manufacturing Model." *Computer Integrated Manufacturing Systems* 16 (1): 1–8.

- Lin, Y-K., and C. S. Chong. 2015. "Fast GA-Based Project Scheduling for Computing Resources Allocation in a Cloud Manufacturing System." *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–13.
- Lin, Y. -C. and T. Chen. 2017. "A Ubiquitous Manufacturing Network System." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 45 (June): 157–67.
- Long, S. 2013. *Socioanalytic Methods: Discovering the Hidden in Organisations and Social Systems*. London: Karnac Books Ltd.
- Longo, F., A. Padovano, and S. Umbrello. 2020. "Value-Oriented and Ethical Technology Engineering in Industry 5.0: A Human-Centric Perspective for the Design of the Factory of the Future." *Applied Sciences* 10 (12): 4182.
- Lucke, D., C. Constantinescu, and E. Westkämper. 2008. "Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing." In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, edited by M. Mitsuichi, K: Ueda, and F. Kimura, 115–18. London: Springer London.
- Luftman, J. N. 2003. *Competing in the Information Age: Align in the Sand*. Oxford University Press.
- Lukas, C. 1999. "Complex Adaptive Systems - Webs of Delight." Dostupno Na: [Http://Calresco.Org/Lucas/Cas.Htm](http://Calresco.Org/Lucas/Cas.Htm).
- Ma, J., L. Yang, B. Apduhan, R. Huang, L. Barolli, and M. Takizawa. 2005. "Towards a Smart World and Ubiquitous Intelligence: A Walkthrough from Smart Things to Hyperspaces and UbiKids." *Journal of Pervasive Computing & Communication*, 53–68.
- Maddikunta, P. K. R., Q.-V. Pham, P. B, N. Deepa, K. Dev, T. R. Gadekallu, R. Ruby, and M. Liyanage. 2022. "Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Applications." *Journal of Industrial Information Integration* 26 (March): 100257.
- Maes, P. 1994. "Agents That Reduce Work and Information Overload." *Communications of the ACM* 37 (7): 31–40.
- Margherita, E. G., and A. M. Braccini. 2021. "Socio-Technical Perspectives in the Fourth Industrial Revolution - Analysing the Three Main Visions: Industry 4.0, the Socially Sustainable Factory of Operator 4.0 and Industry 5.0." In *7th International Workshop on Socio-Technical Perspective in IS Development (STPIS 2021)*. Trento, Italy.
- Maturana, F.P., P. Tichý, P. Šlechta, V. Discenzo, R.J. Staron, and K.H. Hall. 2004. "Distributed Multi-Agent Architecture for Automation Systems." *Expert Systems with Applications* 26 (1): 49–56.
- Mensah, P., Y. Merkurjev, and F. Longo. 2015. "Using ICT in Developing a Resilient Supply Chain Strategy." *Procedia Computer Science* 43: 101–8.
- Miorandi, D., S. Sicari, F. De Pellegrini, and I. Chlamtac. 2012. "Internet of Things: Vision, Applications and Research Challenges." *Ad Hoc Networks*.
- Monostori, L., B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, and K. Ueda. 2016. "Cyber-Physical Systems in Manufacturing." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2): 621–41.
- Monostori, L. and J. Váncza. 2020. "Towards Living Manufacturing Systems." *Procedia CIRP* 93: 323–28.
- Monostori, L. 2003. "AI and Machine Learning Techniques for Managing Complexity, Changes and Uncertainties in Manufacturing." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (4): 277–91.
- Monostori, L. 2014. "Cyber-Physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges." In *Procedia*





- CIRP, 17:9–13. Elsevier B.V.
- Montgomery, D. C. 2009. *Introduction to Statistical Quality Control*. 6th Editio. John Wiley and Sons.
- Morosini, E., J. Hartmann, T. Makuschewitz, and B. Scholz-Reiter. 2013. "Towards Socio-Cyber-Physical Systems in Production Networks." *Procedia CIRP* 7: 49–54.
- Mourtzis, D. 2021. "Towards the 5th Industrial Revolution: A Literature Review and a Framework for Process Optimization Based on Big Data Analytics and Semantics." *Journal of Machine Engineering* 21 (September): 5–39.
- Mourtzis, D., J. Angelopoulos, and N. Panopoulos. 2022. "A Literature Review of the Challenges and Opportunities of the Transition from Industry 4.0 to Society 5.0." *Energies* 15 (17): 6276.
- Mourtzis, D., M. Doukas, and N. Milas. 2016. "A Knowledge-Based Social Networking App for Collaborative Problem-Solving in Manufacturing." *Manufacturing Letters* 10 (October): 1–5.
- Nacional Institute of Standard and Technology (NIST). 2014. "Smart Manufacturing Operations Planning and Control." <https://www.nist.gov/programs-projects/smart-manufacturing-operations-planning-and-control-program>.
- Nahavandi, S. 2019. "Industry 5.0—A Human-Centric Solution." *Sustainability* 11 (16): 4371.
- Neumann, W. P., S. Winkelhaus, E. H. Grosse, and C. H. Glock. 2021. "Industry 4.0 and the Human Factor – A Systems Framework and Analysis Methodology for Successful Development." *International Journal of Production Economics* 233 (March): 107992.
- O'Brien, J. A. 2003. *Introduction to Information Systems: Essentials for the E-Business Enterprise*. McGraw-Hill Education.
- Okino, N. 1989. "Bionical Manufacturing Systems - Modelon Based Approach." In *Proceedings of the CAM-I 18th Annual International Conference*, 485–92. New Orleans.
- Parsons, T. 1977. "Social System." In *Social System and Evolution of Action Theory*, edited by T. Parsons. New York: Free Press London.
- Parunak, H. V. D., A. D. Baker, and S. J. Clark. 1997. "The AARIA Agent Architecture: An Example of Requirements-Driven Agent-Based Design." In *Proceedings of the First International Conference of Autonomous Agents*.
- Parviainen, P., M. Tihinen, J. Kääriäinen, and S. Teppola. 2017. "Tackling the Digitalization Challenge: How to Benefit from Digitalization in Practice." *International Journal of Information Systems and Project Management* 5 (1): 63–77.
- Pathak, P., R. P. Pal, M. Shrivastava, and P. Ora. 2019. "Fifth Revolution: Applied AI & HumanIntelligence with Cyber Physical Systems." *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* 8 (3).
- Patriarca, R., J. Bergström, G. Di Gravio, and F. Costantino. 2018. "Resilience Engineering: Current Status of the Research and Future Challenges." *Safety Science* 102 (February): 79–100.
- Peklenik, J. 1991. *Proizvodna Kibernetika z Računalniško Tehnologijo*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- Peklenik, J. 2002. "The Dynamic Cluster Structures: A New Manufacturing Paradigm for Production of High-Tech Products." In *AMST'02 Advanced Manufacturing Systems and Technology*, 1–13. Vienna: Springer Vienna.
- Peklenik, J. 1988. *Fertigungskybernetik, Eine Neue Wissenschaftliche Duszpllin Fur Die Produktionstechnik*. Berlin: Festvortrag anlässlich der Verleihung des Georg - Schlesinger Preises 1988 des Landes Berlin.
- Peklenik, J. 1995. "Complexity in Manufacturing Systems." *CIRP Journal of Manufacturing Systems* 24: 17–25.

- Peklenik, J. 1998. "Structural and Operational Complexity of Manufacturing Systems." *Manufacturing Systems* 27 (1): 5–11.
- Peklenik, J. 2005. "A New Structure of an Adaptable Manufacturing System Based on Elementary Work Units and Network Integration." *7th International Conference AMST 2005, Springer*, 27–40.
- Perry, C. B. 1971. "Variable-Mission Manufacturing Systems." In *The Opening Door to Productivity and Profits, Numerical Control Society*, 409–33.
- Pfeifer, R., and C. Scheier. 1999. *Understanding Intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Porter, M. 1998. "Clusters and the New Economies of Competition." *Harvard Business Review* 76: 77–90.
- Putnik, G. D. 2010. "Ubiquitous Manufacturing Systems vs. Ubiquitous Manufacturing Systems: Two Paradigms." In *Proceedings of the 7th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '10*, 23–254. Italy.
- Putnik, G. D., C. Cardeira, P. Leitão, F. Restivo, J. Santos, A. Sluga, and P. Butala. 2007. "Towards Ubiquitous Production Systems and Enterprises."
- Putnik, G. D. 2012. "Advanced Manufacturing Systems And Enterprises : Cloud And Ubiquitous", *Journal of Applied Engineering Science*, 10 (3): 127–34.
- Putnik, G. D., G. Škulj, R. Vrabič, L. Varela, and P. Butala. 2015. "Simulation Study of Large Production Network Robustness in Uncertain Environment." *CIRP Anals - Manufacturing Technology* 64: 439–42.
- Putnik, G. D., A. Sluga, H. ElMaraghy, R. Teti, Y. Koren, T. Tolio, and B. Hon. 2013. "Scalability in Manufacturing Systems Design and Operation: State-of-Art and Future Developments Roadmap." *CIRP Anals, Manufacturing Technology* 62: 751–74.
- Qi, Q., and F. Tao. 2019. "A Smart Manufacturing Service System Based on Edge Computing, Fog Computing, and Cloud Computing." *IEEE Access* 7: 86769–77.
- Radziwon, A., A. Bilberg, M. Bogers, and E. S. Madsen. 2014. "The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions." *Procedia Engineering* 69: 1184–90.
- Romero, D., and J. Stahre. 2021. "Towards The Resilient Operator 5.0: The Future of Work in Smart Resilient Manufacturing Systems." *Procedia CIRP* 104: 1089–94.
- Russel, S., and P. Norving. 1995. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice - Hall.
- Russell, R, and B.W. Taylor. 1998. *Operations Management: Focusing on Quality and Competitiveness*. 2nd editio. New Jersey: Prentice - Hall Inc.
- Ryu, K., and M. Jung. 2003. "Agent - Based Fractal Architecture and Modelling for Developing Distributed Manufacturing Systems." *International Journal of Production Research* 41 (17): 4233–55.
- Schermerhorn, J. R., J. G. Hunt, and R. N. Osborn. 2002. *Organizational Behavior*. New York, SAD: John Wiley and Sons.
- Scholz-Reiter, B., and H. Höhns. 2003. "Integrated Software Agents: Enabling Technology for Collaborative E-Logistics and E-Business." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 16: 517–25.
- Schwab, K. 2016. *The Fourth Industrial Revolution*. World Econ. Geneva, Switzerland: Currency.
- Seidel, D., and M. Mey. 1994. *IMS-Holonic Manufacturing Systems: Glossary of Terms*. IMS-Holo. Hannover: University of Hannover, Nemčija.
- Shannon, C. E. 1948. "A Mathematical Theory of Communication." *Bell System Technical Journal* 27 (3): 379–423.



- Shaw, M. J. 1988. "Dynamic Scheduling in Cellular Manufacturing Systems: A Framework for Networked Decision Making." *Journal of Manufacturing Systems* 7 (2): 83–94.
- Shen, W., L. Wang, and Q. Hao. 2006. "Agent-Based Distributed Manufacturing Process Planning and Scheduling: A State-of-the-Art Survey." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews* 36 (4): 563–77.
- Škulj, G. 2016. *Samoorganizacija avtonomnih delovnih sistemov v decentraliziranem proizvodnem sistemu*, doktorsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- Škulj, G., R. Vrabič, and P. Butala. 2014. "Experimental Study of Work System Networking in Production Environment." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (1): 401–4.
- Škulj, G., R. Vrabič, P. Butala, and A. Sluga. 2015. "Decentralised Network Architecture for Cloud Manufacturing." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, July, 1–14.
- Sluga, A., P. Butala, and J. Peklenik. 2005. "A Conceptual Framework for Collaborative Design and Operations of Manufacturing Work Systems." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (1): 437–40.
- Sluga, A. and P. Butala. 1998. "Structuring of the Information System for Distributed Manufacturing." *Manufacturing Systems* 27 (2): 177–82.
- Sluga, A., P. Butala, and G. Bervar. 1998. "A Multi-Agent Approach to Process Planning and Fabrication in Distributed Manufacturing." *Computers & Industrial Engineering*.
- Sohraby, K., D. Minoli, and T. Znati. 2007. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley and Sons.
- Spath, D., S. Gerlach, and S. Schlund. 2013. "Cyber-Physical System for Self-Organised and Flexible Labour Utilisation." In *22nd International Conference on Production Research, ICPR 2013*, 6. Iguassu Falls, Brazil.
- Subirana, B., S. Sarma, and E. Fleisch. 2006. "High-Resolution Management." *IESE Alumni Magazine*, 8–13.
- Suh, N. P. 2005. *Complexity: Theory and Applications*. Oxford University Press.
- Suh, N. P. 2005. "Complexity in Engineering." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (2): 46–63.
- Suh, S., S.-J. Shin, J. S. Yoon, and J. M. Um. 2008. "UbiDM: A New Paradigm for Product Design and Manufacturing via Ubiquitous Computing Technology." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21 (5): 540–49.
- Sundmaeker, H., P. Guillemin, P. Friess, and S. Woelffle. 2010. "Vision and Challenges for Realising the Internet of Things." *Cluster of European Research Projects on the Internet of Things - CERP IoT*.
- Suthar, A. A. 2013. "An Overview of Using Cloud Computing in Libraries." *Indian Journal Of Applied Research* 3 (6): 303–5.
- Tao, F., Y. Cheng, L. Zhang, and Y. C. A. Nee. 2017. "Advanced Manufacturing Systems: Socialization Characteristics and Trends." *Journal of Intelligent Manufacturing* 28 (5): 1079–94.
- Taylor, F. W. 1911. *The Principles of Scientific Management*. New York, NY, USA and London UK: Harper & Brothers.
- Tharumarajah, A., A. J. Wells, and L. Nemes. 1998. "Comparison of Emerging Manufacturing Concepts." *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.98CH36218)* 1.
- Tissir, S., S. El Fezazi, and A. Cherrafi. 2020. "Lean Management and Industry 4.0 Impact in COVID19 Pandemic Era." In *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations*

- Management, 3123–29. Detroit, Michigan, USA.
- Tolio, T., D. Ceglarek, H. A. ElMaraghy, A. Fischer, S.J. Hu, L. Laperrière, S.T. Newman, and J. Váncza. 2010. "SPECIES—Co-Evolution of Products, Processes and Production Systems." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2): 672–93.
- Tseng, M. M., and J. Jiao. 2001. "Mass Customization." In *Handbook of Industrial Engineering*, 684–709. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Tseng, M. M., J. Jiao, and M. E. Merchant. 1996. "Design for Mass Customization." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 45 (1): 153–56.
- Tseng, M. M., R. J. Jiao, and C. Wang. 2010. "Design for Mass Personalization." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (1): 175–78.
- Turban, E., L. Volonino, and G. Wood. 2013. *Information Technology for Management: Advancing Sustainable, Profitable Business Growth*. Wiley.
- Ueda, K., T. Kito, and N. Fujii. 2006. "Modeling Biological Manufacturing Systems with Bounded-Rational Agents." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (1): 469–72.
- Ueda, K., T. Takenaka, J. Vancza, and L. Monostori. 2009. "Value Creation and Decision-Making in Sustainable Society." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2): 681–700.
- Ueda, K., J. Vaario, and K. H. Ohkura. 1997. "Modelling of Biological Manufacturing Systems for Dynamic Reconfiguration." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 46 (1): 343–46.
- UNCTAD. 2020. "Impact of the COVID-19: Pandemic on Trade and Development - Transitioning to a New Normal." *The United Nations Conference on Trade and Development*. Geneva, Switzerland.
- Verma, P. K., R. Verma, A. Prakash, A. Agrawal, K. Naik, R. Tripathi, M. Alsabaan, T. Khalifa, T. Abdelkader, and A. Abogharaf. 2016. "Machine-to-Machine (M2M) Communications: A Survey." *Journal of Network and Computer Applications* 66: 83–105.
- Vrabič, R., G. Škulj, A. Sluga, and P. Butala. 2011. "Towards Ubiquitous Manufacturing Systems : ICT Infrastructure for a Global Manufacturing Network." In *44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 1–6. Madison, Wisconsin, Usa: Madison: University of Wisconsin.
- Vrabič, R. 2012. *Krmljenje avtonomnih obdelovalnih sistemov v proizvodnem okolju*, doktorsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- Vrabič, R., and P. Butala. 2012. "Assessing Operational Complexity of Manufacturing Systems Based on Statistical Complexity." *International Journal of Production Research* 50 (14): 3673–85.
- Vrabič, R., D. Husejnagić, and P. Butala. 2012. "Discovering Autonomous Structures within Complex Networks of Work Systems." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (1): 423–26.
- Wahlster, W. 2013. "Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things." In *SemProM*. Vol. 49. Springer.
- Wan, J., M. Chen, F. Xia, and K. Zhou. 2013. "From Machine-to-Machine Communications towards Cyber-Physical Systems." *Computer Science and Information Systems* 10 (3): 1105–28.
- Wan, J., M. Chen, and V. Leung. 2014. "M2M Communications in the Cyber-Physical World: Case Studies and Research Challenges." In *Machine-to-Machine Communications*, 1–30. CRC Press.
- Wang, L., and G. von Laszewski. 2008. *Cloud Computing – A Perspective Study*. Rochester, New York: Rochester Institute of Technology.



- Wang, L., and A. Haghighi. 2016. "Combined Strength of Holons, Agents and Function Blocks in Cyber-Physical Systems." *Journal of Manufacturing Systems*.
- Wang, X. V., L. Wang, A. Mohammed, and M. Givehchi. 2017. "Ubiquitous Manufacturing System Based on Cloud: A Robotics Application." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 45 (June): 116–25.
- Wang, Z. Y., K. P. Rajurkar, and A. Kapoor. 1996. "Architecture for Agile Manufacturing and Its Interface with Computer Integrated Manufacturing." *Journal of Materials Processing Technology* 61 (1–2): 99–103.
- Want, R. 2006. "An Introduction to RFID Technology." *IEEE Pervasive Computing* 5 (1): 25–33.
- Warnecke, H. J. 1993. *Die Fraktale Fabrik, Revolution Der Unternehmenskultur*. Springer - Verlag.
- Wei, X., and H. A. Liu. 2015. "A Cloud Manufacturing Resource Allocation Model Based on Ant Colony Optimization Algorithm." *International Journal of Grid Distributed Comput.* 8 (1): 55–66.
- Weill, P., and M. Broadbent. 1998. *Leveraging the New Infrastructure: How Market Leaders Capitalize on Information Technology*. Harvard Business Review Press.
- Weiser, M. 1991. "The Computer for the 21 St Century." *Scientific American* 265 (3): 94–104.
- Westkämper, E., and V. Hummel. 2006. "The Stuttgart Enterprise Model - Integrated Engineering of Strategic & Operational Functions." In *Manufacturing Systems. Proceedings of the CIRP Seminars on Manufacturing Systems*, 89–93.
- Westkämper, E. 2008. "Manufuture and Sustainable Manufacturing." In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, edited by M. Mitsuishi, K. Ueda, and F. Kimura, 11–14. London: Springer London.
- Westkämper, E. 2014. *Towards the Re - Industrialization of Europe*. Stuttgart: Springer Heidelberg Nev York Dordrecht London.
- Wiendahl, H. -P., H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zäh, H. -H. Wiendahl, N. Duffie, and M. Brieke. 2007. "Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2): 783–809.
- Wiendahl, H. -P., A. Engelbrecht, and O. Hamacher. 2001. "From Single Enterprises to Complementary Networks." In *Global Engineering, Manufacturing and Enterprise Networks*, 66–73. Boston, MA: Springer US.
- Wiendahl, H. 1986. *Betriebsorganisation Für Ingenieure*. Munchen: Hanser.
- Wiendahl, H. P., and S. Lutz. 2002. "Production in Networks." *Annals of the CIRP* 51 (2): 573–86.
- Wiener, N. 1948. *CYBERNETICS or Control and Communication in the Animal and the Machine*. The Massachusetts Institute of Technology.
- Will, T., and T. Blecker. 2012. "RFID-Driven Process Modifications in Container Logistics: SOA as a Solution Approach." *International Journal of Logistics Research and Applications* 15 (2): 71–86.
- Wittmann, W. 1959. "Unternehmung Und Unvollkommene Information." In *Unternehmerische Voraussicht - Ungewissheit Und Planung*, 230. Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Wooldridge, M., and N. R. Jennings. 1995. "Intelligent Agents: Theory and Practice." *Knowledge Engineering Review* 10: 115–52.
- World Health Organization (WHO). 2020. "Coronavieus Disease (COVID-19)." <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>.

- Wu, B., L. Xi, and B. Zhou. 2008. "Service-Oriented Communication Architecture for Automated Manufacturing System Integration." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21 (5): 599–615.
- Wu, D., M. J. Greer, D. W. Rosen, and D. Schaefer. 2013. "Cloud Manufacturing: Strategic Vision and State-of-the-Art." *Journal of Manufacturing Systems* 32 (4): 564–79.
- Wu, D., J. L. Thames, D. W. Rosen, and D. Schaefer. 2012. "Towards a Cloud-Based Design and Manufacturing Paradigm: Looking Backward, Looking Forward." In *Proceedings 32nd Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B*, 315–28.
- Xu, X., Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang. 2021. "Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, Conception and Perception." *Journal of Manufacturing Systems* 61 (October): 530–35.
- Xu, X. 2012. "From Cloud Computing to Cloud Manufacturing." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28 (1): 75–86.
- Yoon, J. S., S. J. Shin, and S. H. Suh. 2012. "A Conceptual Framework for the Ubiquitous Factory." *International Journal of Production Research* 50 (8): 2174–89.
- Yoshikawa, H. 1992. "Intelligent Manufacturing Systems Program (IMS)." *Technical Cooperation That Transcends Cultural Differences*. University of Tokyo, J.
- Yusuf, Y. Y., M. Sarhadi, and A. Gunasekaran. 1999. "Agile Manufacturing:: The Drivers, Concepts and Attributes." *International Journal of Production Economics* 62 (1–2): 33–43.
- Zaletelj, V., R. Vrabič, E. Hozdić, and P. Butala. 2018. "A Foundational Ontology for the Modelling of Manufacturing Systems." *Advanced Engineering Informatics* 38.
- Žapčević, S. 2013. *Model samoučečega proizvodnega delovnega sistema*, doktorsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- Žapčević, S., and P. Butala. 2012. "Adaptive Process Control Based on a Self-Learning Mechanism in Autonomous Manufacturing Systems." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66 (9–12): 1725–43.
- Zhang, D. Z. 2011. "Towards Theory Building in Agile Manufacturing Strategies—Case Studies of an Agility Taxonomy." *International Journal of Production Economics* 131 (1): 303–12.
- Zhang, L., Y. -L. Luo, F. Tao, L. Ren, and H. Guo. 2010. "Key Technologies for the Construction of Manufacturing Cloud." *Computer Integrated Manufacturing Systems* 16 (11): 2510–20.
- Zhang, L., Y. Luo, F. Tao, B. H. Li, L. Ren, X. Zhang, H. Guo, Y. Cheng, A. Hu, and Y. Liu. 2014. "Cloud Manufacturing: A New Manufacturing Paradigm." *Enterprise Information Systems* 8 (2): 167–87.
- Zhang, W. J., and C. A. van Luttervelt. 2011. "Toward a Resilient Manufacturing System." *CIRP Annals* 60 (1): 469–72.
- Zhang, Y., G.O. Huang, T. Qu, and S. Sun. 2013. *Cloud Manufacturing*. London: Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer-Verlag.
- Zhang, Y, J. Wen, and F. Mo. 2014. "The Application of Internet of Things in Social Network." In *2014 IEEE 38th International Computer Software and Applications Conference Workshops*, 223–28. IEEE.
- Zizic Crnjac, C., M. Mladineo, N. Gjeldum, and L. Celent. 2022. "From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology." *Energies* 15 (14): 5221.
- Zuehlke, D. 2010. "Smart Factory - towards a Factory - of - Things." *Annual Reviews in Control* 34 (1): 129–38.



Zupančič, R. 2012. *Strukturiranje avtonomnih delovnih sistemov*, doktorsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.

Zupančič, R., A. Sluga, and P. Butala. 2012. "A Service Network for the Support of Manufacturing Operations." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 25 (9): 790–803.

## Skupaj z mladimi in za mlade v družbo 5.0



Spodbujamo zanimanje za STE(A)M področja, predstavljamo poklice prihodnosti, spodbujamo radovednost in kreativnost pri mladih, zvišujemo kakovost dela na SŠ in OŠ v regijah, ponujamo kakovostne in inovativne obšolske aktivnosti, prenašamo dobre prakse in razvijamo inovativne koncepte, uvajamo inovativne pedagoške prakse, povečujemo izkoriščenost opreme na SŠ in OŠ, zmanjšujemo razvojne razlike med regijami...

