

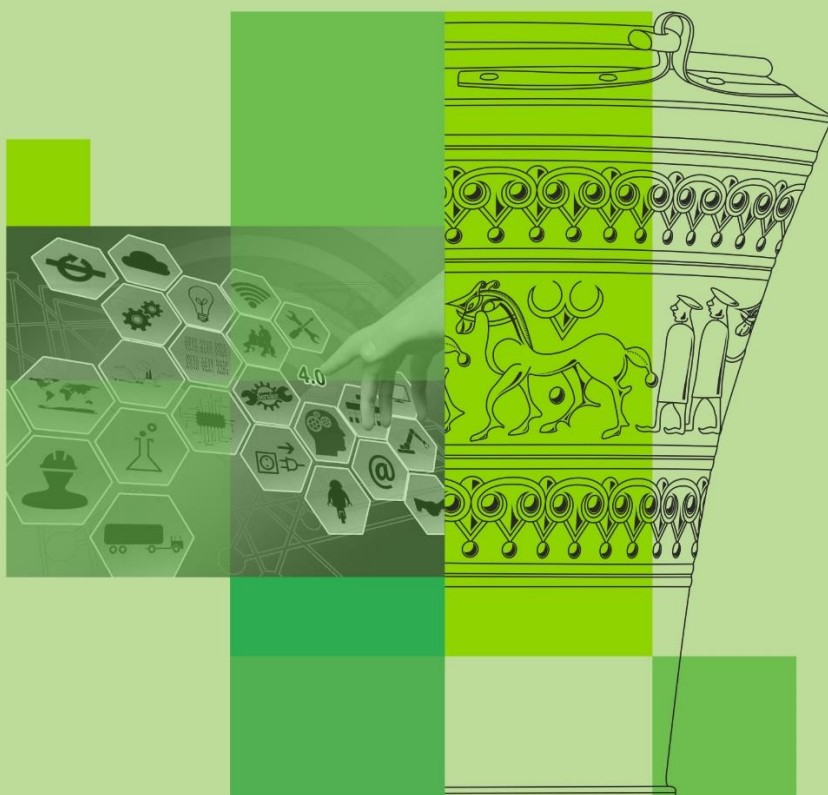


Univerza v Novem mestu
Fakulteta za *strojništvo*

Napredni proizvodni sistemi

*Osnove za strukturiranje, modeliranje,
upravljanje, vodenje in krmiljenje*

Elvis Hozdić





Univerza v Novem mestu
Fakulteta za *strojništvo*

Elvis Hozdić

NAPREDNI PROIZVODNI SISTEMI

osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje,
vodenje in krmiljenje

Novo mesto, 2023

Elvis Hozdić

NAPREDNI PROIZVODNI SISTEMI

Osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in kr- miljenje

Znanstvena monografija

<i>Izdaja</i>	Elektronska izdaja
<i>Izdajatelj</i>	Univerza v Novem mestu Fakulteta za strojništvo
<i>Založnik</i>	Založba Univerze v Novem mestu
<i>Urednik</i>	dr. Andrej Lipej
<i>Strokovna recenzija</i>	dr. Mirko Soković, dr. Sandro Doboviček
<i>Jezikovni pregled</i>	Aleksandra Repe
<i>Dostopno na</i>	https://www.zalozba-unm.si/index.php/press/ca- talog/book/62
<i>Cena</i>	Brezplačna publikacija
<i>Izdano</i>	Novo mesto, 2023



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.

Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani
[COBISS.SI](https://cobiss.si)-ID **169852419**
ISBN 978-961-6770-67-5 (PDF)

PREDGOVOR

Sodobna industrijska proizvodnja se odvija v okolju nenehnih sprememb ob prilagajanju novim okoliščinam in zahtevam po spremembi strukture proizvodnje z namenom, da bi sledila potrebam tržišča in pospešenemu tehnološkemu razvoju. Takšna proizvodnja mora postati del nove proizvodne filozofije, ki temelji na znanju, novih poslovnih modelih, proizvodnih procesih in tehnologijah, še posebej pa na informacijskih in komunikacijskih tehnologijah ter umetni inteligenci in kognitivnih tehnologijah v sleherni fazi priprave in izvedbe proizvodnega procesa. Turbulentno stanje tržišča, ki je nepredvidljivo in dinamično, zahteva proizvodne sisteme, ki se bodo agilno odzivali na nestanovitnost in negotovost zaradi velikega števila dejavnikov, kot so kakovost, količine, dobavni roki, asortima, variante, cene, konkurenca in podobno.



Na slovenskem govornem področju je zelo malo domače znanstvene literature, ki na sistematičen način obravnava napredne proizvodne sistemi v luči konceptov četrte industrijske revolucije, ki jo v znanstvenih krogih imenujejo Industrija 4.0, in konceptov prihajajoče nove industrijske revolucije, *t. i. Industrije 5.0*. Ta pomanjkljivost znanstvene literature s tega področja je navedla avtorja predložene znanstvene monografije, da na enem mestu na vseobsegajoči način sistematizira dostopno tujo znanstveno literaturo s področja naprednih proizvodnih sistemov, njihovih konceptov in modelov ter na ta način približa bralcu teoretične osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje naprednih proizvodnih sistemov, kot so pametni proizvodni sistemi, ki predstavljajo proizvodno paradigmo Industrije 4.0, in adaptivni kognitivni proizvodni sistemi, ki so identificirani kot nova proizvodna paradigma za prihodnjo industrijsko revolucijo – *Industrijo 5.0*.

Poleg tega predstavljanja širokega spektra dostopne znanstvene literature avtor v tem znanstvenem delu temeljito obravnava nove koncepte proizvodnih sistemov, ki so se razvili v zadnjih 15 letih v okvirju proizvodne paradigme pametnih proizvodnih sistemov, kot so proizvodnja v oblaku, vsepovsodna proizvodnja, kibernetko-fizični proizvodni sistemi, in podaja svoj pogled na to, precej v

domeni kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov. Na ta način je avtor želel globoko in sistematično predstaviti razvite koncepte kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov in novih kognitivni kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov z vidika njihovega strukturiranja, modeliranja, upravljanja, vodenja in krmiljenja. V tem okvirju je predstavljena znanstvena raziskava, ki utemeljuje potencialno uporabnost razvitih konceptov v proizvodni domeni.

Na koncu znanstvene monografije je avtor odprl pot za nova znanstvena raziskovanja, ki izpostavljajo vizije nove proizvodne paradigme adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov, ki se v zadnjih časih zagovarja v znanstvenih krogih.

Prispevek k znanosti predlaganega znanstvenega dela se bo odražal v novih znanjih za razvoj in implementacijo pametnih in adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov. Koncept kognitivnih kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov kot osnovni gradnik proizvodne paradigme adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov bo omogočil bolj napredno upravljanje in vodenje kompleksnih proizvodnih sistemov v realnem času. Takšen pristop k upravljanju in vodenju proizvodnih sistemov, v katerih se sprejemajo odločitve v realnem času, bo omogočal pridobivanje novih znanj na področju sodobnih proizvodnih sistemov za povečanje njihove učinkovitosti, fleksibilnosti, odzivnosti in kakovosti proizvodov ter storitev.

Vsebina monografije »*Napredni proizvodni sistemi – osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje*« je sestavljena iz uvodnega poglavja, šestih vsebinskih poglavji, zaključka in referenc v obliki seznama literature in virov. Poglavja so strukturirana tako, da omogočajo sistematično obravnavo predstavljene snovi s ciljem temeljitega spoznavanja predstavljene problematike. V tem kontekstu je vsebina monografije namenjena raziskovalcem, inženirjem in tehnologiji v proizvodni domeni, študentom tehničnih fakultet druge in tretje stopnje ter kot tudi vsem posameznikom tehniških strok, ki se na svoji poklicni poti srečajo s problematiko, predstavljeno v tej monografiji, ali imajo interes, da razširijo svoje znanje o praktični aplikaciji sodobnih tehnologij in sistemov, precej informacijsko-komunikacijskih tehnologij in umetne inteligence v proizvodno domeno.

Na tem mestu avtor izkorišča priložnost, da izkaže svojo zahvalo in spoštovanje recenzentu prof. dr. Mirku Sokoviću (Fakulteta za strojništvo Univerze v Novem mestu) in izr. prof. dr. Sandri Doboviček (Tehniška fakulteta Univerze na Reki), ki sta mi podala svoje predloge in nasvete s ciljem dvigovanja kakovosti

predložene znanstvene monografije. Hvala tudi upravi Fakultete za strojništvo Univerze v Novem mestu.

Prav posebna zahvala za podporo pri pisanju tega znanstvenega dela pa gre tistim, brez katerih vse to ne bi bilo mogoče. Čeprav ne razumejo mnogo tega, kar je napisano v tej monografiji, vendar to znanstveno delo brez njihove brezpogojne ljubezni in vsakodnevnega odrekanja nikoli ne bi zagledalo belega dne, zato hvala moji družini – soprogi Emini, hčerki Amini in sinu Ahmedu.

Avtor

Nove mesto, 5. 4. 2023

VSEBINA

1	UVOD	1
2	INDUSTRIJSKE REVOLUCIJE, PROIZVODNE PARADIGME IN SISTEMI	7
2.1	Proizvodni sistem	8
2.1.1	Kompleksnost kot ključna lastnost naprednih proizvodnih sistemov	14
2.2	Industrijske revolucije	16
2.3	Proizvodne paradigme kot proizvodni modeli industrijskih revolucij ...	19
2.4	Koncepti naprednih proizvodnih sistemov	23
2.4.1	Fleksibilni proizvodni sistemi	24
2.4.2	Rekonfigurabilni proizvodni sistemi	25
2.4.3	Inteligentni proizvodni sistemi	26
2.4.4	Fraktalni proizvodni sistemi	27
2.4.5	Biološki proizvodni sistemi	28
2.4.6	Holonski proizvodni sistemi	30
2.4.7	Agilni proizvodni sistemi	31
2.4.8	Kompleksni adaptivni proizvodni sistemi	33
2.4.9	Adaptivni distribuirani proizvodni sistemi	35
2.4.10	Proizvodne mreže in mrežni proizvodni sistemi	42
2.5	Povzetek	51
3	TEHNOLOGIJE IN SISTEMI ZA STRUKTURIRANJE, UPRAVLJANJE, VODENJE IN KRMILJENJE NAPREDNIH PROIZVODNIH SISTEMOV	53
3.1	Napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije	55
3.1.1	Internet	56
3.1.2	Socialne mreže	63
3.1.3	Komunikacijske tehnologije	65
3.1.4	Računalniški oblak	66
3.2	Agenti in večagentni sistemi	67

4	OSNOVE ZA MODELIRANJE NAPREDNIH PROIZVODNIH SISTEMOV.....	73
4.1.	Temeljne ontologije v modeliranju naprednih proizvodnih sistemov	74
4.1.1	Modelirni okvir za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov	76
4.2	Metodologije, metode in jeziki za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov	86
4.2.1	Modeliranje, zasnovano na večagentskih sistemih	90
4.2.2	Modeliranje, zasnovano na kompleksnih mrežah.....	91
4.3	Modelirna orodja	92
4.4	Modeli znanja v naprednih proizvodnih sistemih	93
4.4.1	Odkrivanje znanja.....	94
4.4.2	Rudarjenje podatkov.....	95
4.5	Simulacija modela	96
4.6	Ocenjevanje modela	99
5	PAMETNI PROIZVODNI SISTEMI – PROIZVODNA PARADIGMA ZA INDUSTRIJO 4.0.....	101
5.1.	Koncepti in modeli pametnih proizvodnih sistemov	103
5.1.1	Proizvodnja zasnovana na oblaku.....	103
5.1.2	Vsepovsodna proizvodnja	104
5.1.3	Kibernetško-fizični sistemi.....	106
5.2	Kibernetško-fizični proizvodni sistemi kot gradniki pametnih proizvodnih sistemov	110
5.2.1	Digitalizacija in kibernetizacija delovnih procesov.....	113
5.2.2	Konceptualni model povezovanja socialnega, kibernetkega in fizičnega prostora v proizvodni domeni	116
5.3	Povzetek	131
6	ADAPTIVNI KOGNITIVNI PROIZVODNI SISTEMI – PROIZVODNA PARADIGMA ZA INDUSTRIJO 5.0	133
6.1	Industrija 5.0.....	134
6.2	Ključne tehnologije za Industrijo 5.0	136
6.3	Adaptivni- kognitivni proizvodni sistemi.....	137
6.4	Prihodnji koncepti proizvodnih sistemov za Industrijo 5.0	140
6.4.1	Odporni proizvodni sistemi	141

6.4.2	Kognitivni kibernetско-fizični proizvodni sistemi	142
6.5	Transformacija vloge človeka v proizvodnih sistemih Industrije 5.0...	148
7	UPRAVLJANJE, VODENJE IN KRMILJENJE PAMETNIH IN ADAPTIVNIH KOGNITIVNIH PROIZVODNIH SISTEMOV	151
7.1	Digitalizacija in kibernetizacija funkcij PPC	152
7.2	Ontološki pristop k upravljanju in krmiljenju naprednih proizvodnih sistemov	157
7.3	Agentske strukture za implementacijo funkcij PPC v konceptu KFPS	164
7.4	Simulacija izvajanja funkcij PPC v konceptih naprednih proizvodnih sistemov	176
7.4.1	Izhodišča.....	176
7.4.2	Rezultati simulacije	176
8	ZAKLJUČEK.....	185
9	LITERATURA.....	189

KAZALO SLIK

Slika 2.1. Elementi proizvodnega sistema [35]	9
Slika 2.2. Osnovni elementi delovne strukture [38]	10
Slika 2.3. Generična struktura naprednih proizvodnih sistemov [45]	12
Slika 2.4. Struktura samoučečega proizvodnega sistema [46]	13
Slika 2.5. Industrijske revolucije skozi čas [51]	17
Slika 2.6. Proizvodne paradigme in razvoj proizvodnih konceptov v času, predelano po [57, 64]	21
Slika 2.7. Fleksibilni proizvodni sistem [74]	24
Slika 2.8. Rekonfigurabilni proizvodni sistem, razvit s strani FESTO grupe [79]	26
Slika 2.9. Fraktalni proizvodni sistem [85]	27
Slika 2.10. Koncept bioloških proizvodnih sistemov [89]	29
Slika 2.11. Model agenta BMS z omejeno racionalnostjo [90]	29
Slika 2.12. Arhitektura holonskega proizvodnega sistema [92]	30
Slika 2.13. Konceptualni model razvoja AMS [100]	32
Slika 2.14. Struktura kompleksnega adaptivnega proizvodnega sistema [35]	33
Slika 2.15. Elementarni delovni sistem [36]	34
Slika 2.16. Virtualni delovni sistem [109]	36
Slika 2.17. Osnovni funkcijski diagram ADS [110]	37
Slika 2.18. Avtonomni delovni sistem [110]	38
Slika 2.19. Samoučeči avtonomni delovni sistem [46]	39
Slika 2.20. Adaptivno krmiljenje procesa v EDS [46], prilagojeno po [35]	40
Slika 2.21. Konceptualni okvir ADMS [114]	41
Slika 2.22. Klasifikacija konceptov sodelovanja proizvodnih sistemov [119] ...	45
Slika 2.23. Funkcijski diagram storitvene enote [126]	47
Slika 2.24. Proizvodno orientirana storitvena arhitektura [126]	48
Slika 2.25. Statična partnerska povezava podjetji [129]	50
Slika 2.26. Posrednik partnerskega podjetja [129]	50
Slika 2.27. Decentralizirana partnerska povezava, podjetje brez meje [129]	51
Slika 3.1. Napredne IKT	56
Slika 3.2. Predstavitev koncepta Interneta stvari [144]	58
Slika 3.3. Omogočitvene tehnologije Interneta stvari [151]	59
Slika 3.4. Evolucija socialnih medijev in mrež [174]	64
Slika 3.5. Računalniški oblak [188]	66
Slika 3.6. Generična struktura agenta [197]	68
Slika 3.7. Medagentska komunikacija po FIPA-standardu [197]	69

Slika 3.8. Kombinacija agentov z IEC 61131-3 / 61499 programa PLC, predelano po [170]	71
Slika 4.1. Struktura ADMO-okvirja [241]	77
Slika 4.2. Ontološki modelirni okvir za podporo modeliranju naprednih proizvodnih sistemov [241]	79
Slika 4.3. Ohranitev konsistentnosti v času [236]	85
Slika 4.4. Transformacija vhodov v izhode	88
Slika 4.5. Model krmiljenja v proizvodni kibernetiki	89
Slika 5.1. Hierarhična arhitektura pametne tovarne [305]	102
Slika 5.2. Arhitektura proizvodnega sistema, zasnovanega na oblaku [311]	104
Slika 5.3. Referenčna infrastruktura za uresničitev vsepovsodne proizvodnje [321]	106
Slika 5.4. Kibernetiko-fizični sistemi [327]	107
Slika 5.5. Evolucija vloge človeka v proizvodnih sistemih skozi čas [1]	111
Slika 5.6. Digitalizirana in kibernetizirana funkcija [1, 51]	114
Slika 5.7. Horizontalne in vertikalne integracije ter povezave v tradicionalnih podjetjih [1]	116
Slika 5.8. Konceptualni model povezovanja socialnega, kibernetkega in fizičnega prostora [1, 9]	118
Slika 5.9. Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu KFPS [1, 9]	120
Slika 5.10. Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu KFPS [1, 9]	121
Slika 5.11. Struktura kibernetkega sistema EDS v konceptu KFPS [1, 9]	122
Slika 5.12. Model mreže stvari [1, 9]	123
Slika 5.13. Model mrežne strukture koordinacijsko-kolaborativnega nivoja kibernetkega sistema [1, 9]	125
Slika 5.14. Struktura kibernetkega sistema ADS v konceptu KFPS [1, 9]	126
Slika 5.15. Struktura kibernetkega sistema CAMS v konceptu KFPS [1, 9]	128
Slika 5.16. Model proizvodne mreže v konceptu KFPS [1, 9]	130
Slika 6.1. Evolucija iz Industrije 4.0 v Industrijo 5.0 [51]	135
Slika 6.2. Ključne omogočevalne tehnologije Industrije 5.0 [354]	137
Slika 6.3. Tranzicija na poti iz podatkov do kognicije [30]	138
Slika 6.4. Evolucija proizvodnih sistemov [30]	139
Slika 6.5. Na človeka osredotočeni adaptivni kognitivni proizvodni sistemi [30]	140
Slika 6.6. Odporni proizvodni sistem [358]	142
Slika 6.7 Model kognitivnih kibernetko-fizičnih proizvodnih sistemov [1, 51]	143
Slika 6.8. Kibernetki sistem EDS v konceptu kognitivnih kibernetko-fizičnih proizvodnih sistemov [51]	146
Slika 6.9. Evolucija vloge človeka iz Industrije 4.0 v Industrijo 5.0 [51]	149

Slika 7.1. Digitalizirana funkcija planiranja proizvodnje v konceptu KFPS [1]	153
Slika 7.2. Digitalizirana funkcija razporejanja nalog v kibernetiskem sistemu ADS [1].....	154
Slika 7.3. Kibernetizirana funkcija samoorganizacije v kibernetiskem sistemu EDS [1].....	156
Slika 7.4. Parcialni referenčni model CAMS za PPC v konceptu KFPS [1, 9].	158
Slika 7.5. Prikaz entitet aktivnost, operacija in naloga ter njihovih časov [1] ..	161
Slika 7.6. Tok opazovane naloge v KFPS [1].	163
Slika 7.7. UML-diagram za agenta planiranja	165
Slika 7.8. UML-diagram za agenta razporejanja.....	167
Slika 7.9. UML-diagram za agenta nadzora in identifikacije.....	169
Slika 7.10. UML-diagram za agenta samoorganizacije	171
Slika 7.11. Medagentska komunikacija v izvajanju funkcij PPC.....	175
Slika 7.12. Ureditev agende na podlagi rabe FIFO hevrističnega algoritma za EDS145 [1].....	177
Slika 7.13. Ureditev agende na podlagi rabe EPT-hevrističnega algoritma za EDS145 [1].....	178
Slika 7.14. Ureditev agende na podlagi rabe EPT & WSO-hevrističnega algoritma za EDS145 [1].....	179
Slika 7.15. Povprečni čas trajanja odstopanja od termina dobave nalogov [1].	180
Slika 7.16. Število delovnih nalogov z zamudo oz. predčasno zaključitvijo [1]	181
Slika 7.17. Povprečni čas čakanja aktualnih nalog na EDS [1].....	182
Slika 7.18. Povprečno število čakajočih delovnih nalogov v obravnavani ETO- proizvodnji [1].....	182
Slika 7.19. Rezultati distribucije časa trajanja odstopanja od zahtevanega (planiranega) termina dobave delovnih nalogov [9]	183

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 4.1: Definicije modela [241].....	80
Preglednica 4.2: Relacij proizvodni sistem–model [241]	81
Preglednica 4.3: Definicije entitet in relacij [241]	81
Preglednica 7.1: Osnovni termini in definicije elementov v proizvodni domeni [236]	160
Preglednica 7.2: Ontološke definicije entitet za PPC [1]	161

SEZNAM KRATIC IN SIMBOLOV

Okrajšava	Pomen
AARIA	Agentska arhitektura (ang. <i>Autonomous Agent at Rock Island Arsenal</i>)
ABM	Simulacijske metode, ki temeljijo na osnovi agentskih struktur (ang. <i>Agent-based model – ABM</i>)
ACL	Agentski komunikacijski jezik (ang. <i>Agent Communication Language</i>)
ACMS	Adaptivni kognitivni proizvodni sistemi (ang. <i>Adaptive cognitive manufacturing systems</i>)
ADACOR	Adaptivne holonske krmilne arhitekture za krmiljenje distribuiranih proizvodnih sistemov (ang. <i>ADaptive holonic aRchitecture for distributed manufacturing systems</i>)
ADMO	Adaptivni distribuirani modelirni okvir
ADMS	Adaptivni distribuirani proizvodni sistemi (ang. <i>Adaptive Distributed Manufacturing System</i>)
ADS	Avtonomni delovni sistem
AI	Umetna inteligenca (ang. <i>Artificial Intelligence</i>)
ALC	Adaptivni logični krmilnik (ang. <i>Adaptive Logic Controller</i>)
AMS	Agilni proizvodni sistemi (ang. <i>Agile manufacturing systems</i>)
B2MN	Poslovni pristop k proizvodnemu omrežju (ang. <i>Business-to-Manufacturing Network</i>)
BMS	Biološki proizvodni sistemi (ang. <i>Biological manufacturing systems</i>)
CAD	Računalniško podprto snovanje in konstruiranje (ang. <i>Computer Aided Design</i>)
CAM	Računalniško podprta proizvodnja (ang. <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CAMS	Kompleksni adaptivni proizvodni sistemi (ang. <i>Complex Adaptive Manufacturing System</i>)
CAPP	Računalniško podprto planiranje procesov (ang. <i>Computer Aided Process Planning</i>)
CAS	Kompleksni adaptivni sistemi (ang. <i>Complex Adaptive Systems</i>)
CC	Računalniški oblak (ang. <i>Cloud Computing</i>)
CIM	Računalniško integrirana proizvodnja (ang. <i>Computer Integrated Manufacturing</i>)
CMfg	Proizvodnja, ki bazira na oblaku (ang. <i>Cloud Manufacturing</i>)
CNC	Računalniško numerično krmiljenje (ang. <i>Computer Numerical Control</i>)
CPPS	Kibernetsko-fizični proizvodni sistemi (ang. <i>Cyber-physical</i>)

	<i>production systems)</i>
CRM	Sistem za upravljanje odnosov s strankami (ang. <i>Customer Relationship Management</i>)
D&K base	Baza podatkov in znanja (ang. <i>Data Knowledge Base</i>)
DES	Diskretna simulacija (ang. <i>Discrete-event simulation – DES</i>)
DM	Rudarjenje podatkov (ang. <i>Data Mining</i>)
DML	Namenska proizvodna linija (ang. <i>Dedicated Manufacturing Lines</i>)
DNA	Dezoksiribonukleinska kislina (ang. <i>Deoxyribonucleic acid</i>)
DSS	Sistemi za podporo odločanju (ang. <i>Decision Support Systems</i>)
DT	Digitalni dvojček (ang. <i>Digital twin</i>)
EDD	Prioritetno pravilo (hevristični algoritem) kjer najvišjo prioriteto dobi naročilo z najzgodnejšim rokom izdelave (ang. <i>Earliest-Due-Date</i>)
EDS	Elementarni delovni sistem
EIS	Ekspertni informacijski sistemi (ang. <i>Expert Information Systems</i>)
ELS	Elementarni logistični sistemi
EPT	Prioritetno pravilo (hevristični algoritem) za razporejanje (ang. <i>Earliest-Planned-Time</i>)
ERP	Informacijski sistem za celotno upravljanje podjetja (ang. <i>Enterprise Resource Planning</i>)
ESS	Elementarni storitveni sistemi
ETO	Proizvodnja po naročilu (ang. <i>Engineer-to-Order</i>)
FIFO	Prioritetno pravilo (hevristični algoritem) prvi pride, prvi melje (ang. <i>First-In-First-Out</i>)
FIPA	Neprofitna organizacija, ki ureja področje standardizacije agentov (ang. <i>Foundation for Intelligent Physical Agents</i>)
FMS	Fleksibilni proizvodni sistem (ang. <i>Flexible Manufacturing System</i>)
FrPS	Fraktalni proizvodni sistemi
GERAM	Modelirni okvir (ang. <i>Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology</i>)
H2M	Komunikacija človek-stroj
HMI	Vmesnik človek-računalnik
HMS	Holonski proizvodni sistem (ang. <i>Holonic Manufacturing System</i>)
IaaS	Infrastruktura kot soritev (ang. <i>Infrastructure as a Service</i>)
IDEF	IDEF metodologija (ang. <i>Integration DEFinition</i>)
IDEF0	Metodologija funkcijskega modeliranja
IKT	Informacijsko-komunikacijske tehnologije (ang. <i>Information Communication Technology – ICT</i>)
IMS	Inteligentni proizvodni sistem (ang. <i>Intelligent Manufacturing System</i>)
IoS	Internet storitev (ang. <i>Internet of Service</i>)
IoT	Internet stvari (ang. <i>Internet of Things</i>)
IP	Internet protokol

IS	Inteligentni sistem
JADE	Programska knjižnica, ki omogoča agentsko orientiran pristop k programiranju v programskem jeziku Java (ang. <i>Java Agent Development framework</i>)
JAF	Agentsko okolje JAF (ang. <i>Java Agent Framework</i>)
JAT	Agentsko okolje JAT (ang. <i>Java Agent Template</i>)
KDD	Odkrivanje znanja (ang. <i>Knowledge Discovery in Data</i>)
KFPS	Kibernetско-fizični proizvodni sistem (ang. <i>Cyber-Physical Production System – CPPS</i>)
KFS	Kibernetско-fizični sistem (ang. <i>Cyber-Physical System – CPS</i>)
K-KFPS	Kognitivni kibernetско-fizični proizvodni sistemi (ang. <i>Cognitive Cyber-Physical Production Systems – C-CPPS</i>)
KMS	Sistemi za upravljanje z znanjem (ang. <i>Knowledge Management Systems – KMS</i>)
KV	Komunikacijski vmesnik
LAN	Lokalno omrežje (ang. <i>Local Area Network</i>)
M2M	Komunikacija med stroji (ang. <i>Machine to Machine communication</i>)
MAP	Večagentna platforma (ang. <i>Multi-agent Platform</i>)
MAS	Večagentni sistem (ang. <i>Multi-agent System</i>)
MES	Proizvodni informacijsko-komunikacijski sistem (ang. <i>Manufacturing Execution System</i>)
MIS	Upravljalni informacijski sistemi (ang. <i>Management Information Systems – MIS</i>)
MPS	Mrežni proizvodni sistemi
MS	Mreža stvari
MTP	Sistem za izmenjavo sporočil (ang. <i>Message Transport Systems</i>)
NIP	Naprava za implementacijo procesa (ang. <i>Process Implementation Device – PID</i>)
OAS	Sistemi za avtomatizacijo pisarniškega poslovanja (ang. <i>Office Automation Systems – OAS</i>)
OEM	Izvirni proizvajalec opreme (ang. <i>Original Equipment Manufacturer</i>)
PaaS	Platforma kot storitev (ang. <i>Platform as a Service</i>)
PLC	Programski logični krmilnik (ang. <i>Programable Logical Controller</i>)
PLM	Informacijski sistem za upravljanje življenjskega cikla izdelka (ang. <i>Product Lifecycle Management – PLM</i>)
PM	Proizvodna mreža
PN	Petrijeva mreža (ang. <i>Petri Network – PN</i>)
POSM	Proizvodno orientirana storitvena mreža (ang. <i>Manufacturing-oriented Service Network – MoSN</i>)
PPC	Sistem planiranja in kontrole proizvodnje (ang. <i>Production Planning and Control</i>)

PROSA	Referenčna arhitektura holonskih proizvodnih sistemov (ang. <i>Product-Resource-Order-Staff-Architecture</i>)
QR	Dvodimenzionalna koda (ang. <i>Quick Response Codes</i>)
ReMS	Odporni proizvodni sistem (ang. <i>Resilient Manufacturing System – ReMS</i>)
RFID	Radio frekvenčna identifikacija (ang. <i>Radio Frequency Identification</i>)
RMS	Rekonfigurabilni proizvodni sistemi
SaaS	Programska oprema kot storitev (ang. <i>Software as a Service</i>)
SE	Storitvena enota (ang. <i>Service Unit – SU</i>)
SF	Pametna tovarna (ang. <i>Smart Factory – SF</i>)
SKFPS	Socialno-kibernetično-fizični proizvodni sistemi
SL.AWS	Samoučeči avtonomni delovni sistem (ang. <i>Self-Learning Autonomous Work System</i>)
SMS	Pametni proizvodni sistemi (ang. <i>Smart manufacturing systems</i>)
SOA	Storitveno orientirane arhitekture (ang. <i>Service Oriented Architecture</i>)
SOAP	Protokol za spletne storitve (ang. <i>Simple Object Access Protocol</i>)
SPT	Prioritetno pravilo (hevristični algoritem) kjer čakajoče naročilo z najkrajšim časom obdelave na elementarnem delovnem sistemu dobi najvišjo prioriteto (ang. <i>Shortest Processing Time</i>)
SS	Storitveni sistem (ang. <i>Service System</i>)
TPS	Sistemi za obdelavo transakcij (ang. <i>Transaction Processing Systems – TPS</i>)
UDDI	Standardni mehanizem za registracijo in kasnejše odkrivanje, integracijo spletnih storitev
UML	Splošni modelirni jezik (ang. <i>Unified Modelling Language</i>)
UPSE	Vsepovsodni proizvodni sistemi in podjetja (ang. <i>Ubiquitous Production Systems and Enterprises</i>)
VCC	Virtualni kompetenčni center (ang. <i>Virtual Competence Centre</i>)
VCU	Virtualna koordinacijska enota (ang. <i>Virtual Coordination Unit</i>)
VDS	Virtualni delovni sistem (ang. <i>Virtual Work System</i>)
VP	Virtualno podjetje (ang. <i>Virtual Enterprises – VE</i>)
WBS	Delovna razčlenitev (komponenta projekta) (ang. <i>Work Breakdown Structure</i>)
WfS	Sistemi za podporo delovnim procesom (ang. <i>Workflow Systems – WfS</i>)
WS	Spletne storitve (ang. <i>Web Service</i>)
WSDL	Jezik za opis spletnih storitev (ang. <i>Web Service Description Language</i>)
XML	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 ter je zato ključna za nacionalne ekonomije. V zadnjih dvajsetih letih so se na področju industrijske proizvodnje dogajale pomembne spremembe: izbrisane so državne meje glede tržišča, 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 ter terjajo preobrazbo obstoječih proizvodnih industrij v industrijo, ki bo temeljila na naprednih konceptih, tehnologijah in komunikacijah [1].

V današnjem času globalizacije in vse bolj prisotne personalizacije, ki pomembno vplivata na konkurenčnost proizvodnih podjetij, se nahajajo proizvodna podjetja pred izzivom, kako biti in ostati konkurenčen na globalnem trgu. Zato je treba raziskave in razvoj na področju naprednih proizvodnih sistemov usmeriti v razvoj inovativnih konceptov proizvodnje, pri katerih bodo presežene tradicionalne fizične in časovne omejitve in ki bodo omogočali povezovanje geografsko dislociranih elementov, virov in storitev ter njihovo integracijo v t. i. *pametno in kognitivno kibernetsko-fizično okolje*. Takšno okolje, integrirano s pomočjo interneta, kot hrbtenice novih informacijsko-komunikacijskih tehnologij (ang. *Information and Communication Technology – ICT*), omogoča distribuirano delo, sodelovanje in soustvarjanje. To pomeni, da mora takšno integrirano socialnotehnološko okolje podjetju zagotoviti povečanje učinkovitosti in konkurenčnosti skozi:

- mreženje proizvodnih podjetij v smislu komunikacije in izmenjave informacij. Proizvodni sistemi se lahko prek mreženja povezujejo z drugimi sistemi in partnerji, kot so kupci in dobavitelji;
- razvoj proizvodnih sistemov in njihov storitev v odprtem omrežju, kar omogoča zmožnosti rekonfigurabilnosti, v vsakem pogledu, s tem, da se pri tem ne ogroža integritete obstoječega sistema;
- kooperacijo in interakcijo na relaciji človek – sistem na različnih ravneh sodelovanja ob hitrem in učinkovitem dostopu do informacij.

Brisanje meja tržišč in razvoj naprednih informacijsko-komunikacijskih tehnologij (IKT) sta ustvarila pogoje za razvoj novih struktur proizvodnih sistemov [2], kot so: distribuirani adaptivni proizvodni sistemi, proizvodne mreže in avtonomni 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 [1].

Današnji kompleksni proizvodni sistemi so sestavljeni iz številnih elementov, ki skušajo dosegati medsebojno komunikacijo, interakcijo in porazdelitev proizvodnih aktivnosti [3]. 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. *kibernetško-fizični proizvodni sistemi* (KFPS). KFPS predstavljajo novo področje proizvodnih sistemov, ki temeljijo na načelih *kibernetško-fizičnih sistemov* (KFS), ki jih je Helen Gill [4] prvič definirala leta 2006.

KFS so sestavljeni iz dveh podsistemov, kibernetškega (digitalnega, virtualnega) in fizičnega (realnega, materializiranega). Pri tem predstavljajo kibernetški podsistemi strukturo komunikacijskih, logičnih in senzorskih enot, prek katerih se sistem povezuje v kibernetški 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 [1]. Sposobnost komunikacije in interakcije v kibernetškem prostoru temelji na digitalnem procesiranju informacij, rabi naprednih IKT [5] in nadzornih mehanizmov, ki omogočajo sklenjeno zanko med kibernetskim in fizičnim

podsystemom, kar pa je temelj za izboljšanje učinkovitosti delovnih procesov in optimalno podporo ljudem v procesih odločanja [6].

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 [7].

Terminološko pomeni *Industrija 4.0* [8] horizontalno integracijo pretoka podatkov, informacij in znanja med partnerji, dobavitelji in uporabniki in tudi vertikalno integracijo znotraj samih proizvodnih organizacij – od razvoja proizvoda do njegove izdelave, rabe, storitvene podpore in do zaključka življenjskega cikla.

Ključni dejavniki, ki omogočajo Industrijo 4.0, kot so decentralizacija, povezljivost, horizontalna in vertikalna integracija, sodelovanja, digitalizacija, kibernetizacija, pametni stroji in izdelki, avtomatizacija itd., [7] 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 [9], tako imenovanih pametnih proizvodnih sistemov (ang. *Smart Manufacturing Systems* – SMS) [10].

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: kibernetično-fizični proizvodni sistemi [11], proizvodnja v oblaku [12], vseprisotni proizvodni sistemi [13], socialno-kibernetično-fizični sistemi (ang. *Socio-Cyber-Physical Systems* – SCPS) [14], socialno-kibernetično-fizični proizvodni sistemi (ang. *Socio-Cyber-Physical Manufacturing Systems* – SCPMS) [15], personalizirana izdelava [16], itd.

Ključni tehnologiji Industrije 4.0 in SMS sta aktivno vključeni v evropsko industrijo, vendar je hud akutni respiratorni sindrom koronavirus tipa 2 (SARS-CoV-2) povzročil številne težave v gospodarstvu, industriji, delu proizvodnih dejavnosti, transportu itd. Pandemija SARS-CoV-2 [17] 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 [18]. Glede na pregled literature [19-22] 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 [23]. Sodobna industrija, proizvodna podjetja in njihovi proizvodni sistemi morajo biti med drugim usklajeni z agilnimi, povezanimi, storitveno usmerjenimi, zelenimi in socialnimi proizvodnimi praksami [24], bolj okoljsko, socialno in ekonomsko trajnostni ter bolj osredotočenimi na človeka [23, 25] in prilagodljivi [18, 26].

Evropska komisija je napovedala novo filozofijo proizvodnje za trajnostno, na človeka osredotočeno in odporno 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.

Odpornost, okoljska, socialna in ekonomska trajnost ter osredotočenost na človeka so ključni koncepti, ki napovedujejo novo industrijsko revolucijo, t. i. Industrijo 5.0 [27-29]. Nova ideja *Industrije 5.0* predstavlja ekstenzijo koncepta Industrije 4.0 v socialni in ekološki dimenziji [28].

Koncept prihajajoče *Industrije 5.0* bolj združuje fizični, kibernetski in socialni svet ter utira pot za naslednjo fazo razvoja proizvodnih sistemov in opredeljuje prihodnje nove paradigme proizvodnih sistemov. Vizijo za novo paradigmo prihodnjih adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov (ACMS), njene karakteristike in omogočitvene elemente je prikazal ElMaraghy v delih [23, 30].

Omogočitveni elementi paradigme ACMS so koncepti KFPS, umetna inteligenca in kognitivne tehnologije. Z implementacijo kognitivnih tehnologij in umetne inteligence v koncepte KFPS se poraja potreba po oblikovanju novega koncepta kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov, t. i. kognitivnih kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov (K-KFPS) (ang. *Cognitive Cyber-Physical Production Systems – C-CPPS*).

Doseganje ciljev nove industrijske revolucije, t. i. *Industrije 5.0*, bo v prihodnosti predvsem odvisno od možnosti integracije proizvodnih podjetij in njihovih proizvodnih sistemov v globalne verige in mreže, temelječe na učinkoviti vertikalni in horizontalni integraciji vseh strukturnih elementov proizvodnega sistema. Takšna integracija bo zahtevala razvoj novih konceptov proizvodjanja ter implementacijo naprednih IKT, umetne inteligence in kognitivnih tehnologij. V

tem kontekstu izhajajo nove zamisli o soočenju in povezovanju komunikacijsko povezanega kibernetskega sveta z resničnim oz. fizičnim svetom, ki ga sestavljajo stvari in živa bitja, predvsem pa ljudje, kar vodi v smer razvoja novega koncepta K-KFPS. Od takšnih sistemov se pričakuje harmonizirana interakcija ljudi s fizičnimi objekti in z virtualnimi elementi ter ustvarjanje sinergij med elementi, kar bo pripomoglo k povečanju učinkovitosti, odzivnosti, odpornosti in konkurenčnosti proizvodnih podjetij ter k povečanju dodane vrednosti v globalnem območju.

Na teh osnovah pričakujemo, da bo razvoj koncepta in modela K-KFPS omogočil realizacijo učinkovitejših, odpornih, okolju prijaznih, na človeka osredotočenih in bolj odzivnih mrežnih proizvodnih sistemov.

Razvoj novih konceptov K-KFPS v proizvodni domeni torej predstavlja naslednji korak v evoluciji organizacijskih in sistemskih oblik proizvodnih struktur in njihov prehod iz socialnotehničnih v socialno-kibernetsko-fizične proizvodne sisteme.

Novostrukturirani K-KFPS bodo postali sistemi z določeno stopnjo inteligence, ki bodo omogočali bistveno večjo agilnosti in adaptivnost elementov proizvodnih podjetij za potrebe sodobnega tržišča in družbe. S tem K-KFPS predstavljajo sisteme, ki temeljijo na principih predvidene nove industrijske revolucije, *Industrije 5.0*, in bodo omogočili delovanje na globalnem tržišču pod konkurenčnimi pogoji. Pri tem se pričakuje, da bo spremenjena vloga človeka, ki bo sposoben upravljati proizvodni sistem v realnem času, vplivala na odzivnost, robustnost in učinkovitost proizvodnih sistemov, strukturiranih po načelih K-KFPS.

Raziskave v tej znanstveni monografiji se navezujejo na predhodno navedene usmeritve EU. Njen osnovni namen je podrobno predstaviti koncepte proizvodjanja v distribuiranem mrežnem okolju v obliki socialno-kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov in kognitivnih kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov, ki bodo omogočili dvig konkurenčnosti proizvodnih podjetij in njihovo hitrejše odzivanje in prilagajanje na specifične in kompleksne potrebe trga. Poleg tega bodo omogočali večjo ustvarjalnost in kakovostnejše odločanje človeka v takih sistemih, boljše razumevanje interakcij med udeleženci v proizvodnem sistemu in s tem prispeval k boljšemu razumevanju kompleksnosti proizvodnih sistemov ter njenemu obvladovanju.

Med ustvarjanjem tega znanstvenega dela in celotnim raziskovalnim delom na predstavljeni tematiki bodo uporabljena znanje in metode s področja mehatronike

in proizvodne kibernetike, teorije kompleksnih sistemov in kompleksnih mrež, industrijskega inženiringa, upravljanja v realnem času, tehnologij s področja IKT, umetne inteligence in kognitivnih tehnologij. Za analizo proizvodnih sistemov se bodo uporabila znanja s področja avtonomnih delovnih sistemov v mrežnem okolju, ki temeljijo na distribuiranosti in sodelovanju.

Na teh osnovah so v nadaljevanju:

- predstavljen zgodovinski pot razvoja industrije skozi industrijske revolucije; definiran je proizvodni sistem in opisane njegove ključne lastnosti,
- podan je pregled proizvodnih paradig in pripadajočih konceptov, ki se dotikajo področja strukturiranja, modeliranja, upravljanja in krmiljenja proizvodnih sistemov,
- opisane tehnologije in sistemi za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje novih konceptov naprednih proizvodnih sistemov,
- opisane so metodologije, metode in orodja za modeliranje in simulacijo naprednih proizvodnih sistemov,
- predstavljeni so koncepti naprednih proizvodnih sistemov, ki izhajajo iz osnov četrte industrijske revolucije – 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 prihodnje delo na poti prehoda iz Industrije 4.0 v novo industrijsko revolucijo t. i. *Industrijo 5.0*.

2 INDUSTRIJSKE REVOLUCIJE, PROIZVODNE PARADIGME IN SISTEMI

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

Nikola Tesla

Pojava računalnikov in hitri razvoj tehnike v zadnjih štiridesetih letih sta vplivala na največje tehnično-tehnološke spremembe v človekovi zgodovini. Globalna družbenoekonomska 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 kot tudi v načinu komunikacije. Pod pritiskom takšne vseobsegajoče globalizacije na prehodu dveh stoletij prihaja v industrijski proizvodnji do korenitih sprememb. Proizvodna podjetja opuščajo klasično proizvodno filozofijo [31] 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, ki 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 [1].

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

2.1 Proizvodni sistem

Proizvodni sistem je kompleksna sistemska struktura, katere funkcija je transformacija determiniranih vhodov v želene izhode. Osnovna funkcija proizvodnje je ustvarjanje nove vrednosti [32]. Pri tem je cilj proizvodnje novih proizvodov in storitev. Za doseganje ciljev je proizvodne sisteme neizogibno treba ustrezno modelirati, strukturirati, upravljati in krmiliti [33]. Proizvodne sisteme je treba obravnavati kot strukturo transformacijskih podsistemov, ki se med seboj ustrezno povezujejo v procesno/vrednostne verige. Ti lahko vključujejo podsisteme za transformacijo materiala; podsisteme za transformacijo zahtev kupcev; podsisteme za znanje, učenje in izboljšave; podsisteme za organizacijski razvoj [34].

Proizvodne sisteme je kot kibernetske sisteme modeliral Peklenik [33], [35-37]. 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 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 so načrtovanja, razvoj in izdelava proizvodov ter 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 kakovosti, testiranje proizvodov in najrazličnejše logistične funkcije (oskrba, skladiščenje, transport, odprema itd.). Vsi trije nivoji so medsebojno povezani prek integriranega informacijskega sistema s sistemi baz podatkov in znanja.

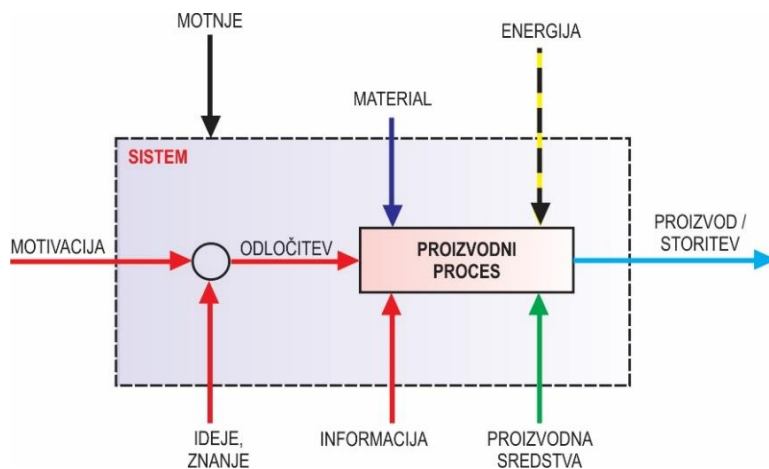
Proizvodni sistem je definiran kot [33]:

»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 med delovnim procesom 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 [33], je podan na Sliki 2.1.

Slika 2.1. Elementi proizvodnega sistema [35]



Proizvodni sistem izvaja transformacijo vhodov $\{X\}$ v izhode $\{Y\}$. Vhodi $\{X\}$ v proizvodni sistem so sredstva $\{R\}$ (finance, zaposleni, management, stavbe, stroji, računalniška oprema, različne tehnologije) informacije $\{I\}$ (vsebuje različne tipe

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 [36], [41-42].

Stohastičnost se kaže v tem, da ni možno z absolutno gotovostjo napovedati poteka proizvodnih procesov. Vzrok temu je množica različnih veličin, ki vplivajo na proizvodni sistem in procese v njem [33].

Proizvodni sistemi delujejo v globaliziranem svetu. Globalizacija se nanaša predvsem na dinamični in večdimenzionalni proces ekonomske integracije, pri čemer nacionalna sredstva postajajo vedno bolj internacionalno mobilna, medtem ko nacionalne ekonomije postajajo vedno bolj medsebojno odvisne [43].

Globalizacija je neposredna posledica razvoja globalne informacijsko-komunikacijske infrastrukture in globalne logistike. Na podlagi tega imajo proizvodni sistemi možnost globalnega delovanja z uporabo storitev, ki jih zagotavljajo ponudniki internetnih in transportnih storitev.

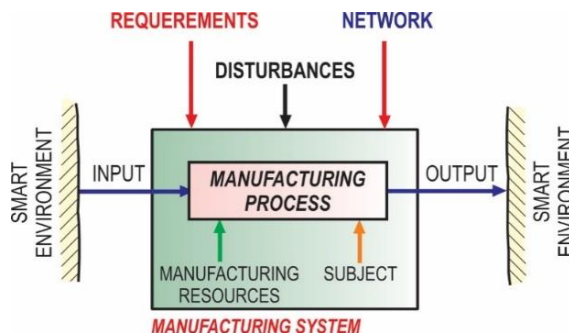
Proizvodno okolje vpliva na delovanje proizvodnega sistema, obenem pa proizvodni sistem s svojim delovanjem vpliva na proizvodno okolje in ga s tem spreminja. Okolje proizvodnega sistema šteje sledeče [44]: 1) tehnološko-ekonomski sistemi s kupci, dobavitelji, vhodnimi materiali in izdelki, 2) družbenokulturni sistemi s sistemom vrednot, predpisi in določili, 3) naravno okolje s svojimi viri in omejeno sposobnostjo razgrajevanja različnih škodljivih ekoloških vplivov, ki jih proizvodni sistemi proizvajajo kot stranske izdelke.

Tradicionalne proizvodne sisteme je treba zaradi naraščajoče kompleksnosti neizogibno nadomestiti z dinamičnimi in integriranimi koncepti s prepletenimi in soodvisnimi funkcijami. Takšne zahteve z 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, ki vključuje avtomatizacijo, robotiko, merilne sisteme, napredno procesiranje informacij, obdelavo signala in vodenje proizvodnje z visoko sofisticiranimi informacijskimi in komunikacijskimi

sistemi¹². Generična struktura naprednih proizvodnih sistemov je prikazana na Sliki 2.3.

Slika 2.3. Generična struktura naprednih proizvodnih sistemov [45]



Glavne značilnosti naprednih proizvodnih sistemov so [46]:

- 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.

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 2.4 je prikazana struktura proizvodnega sistema s posebnim poudarkom na znanju in učenju.

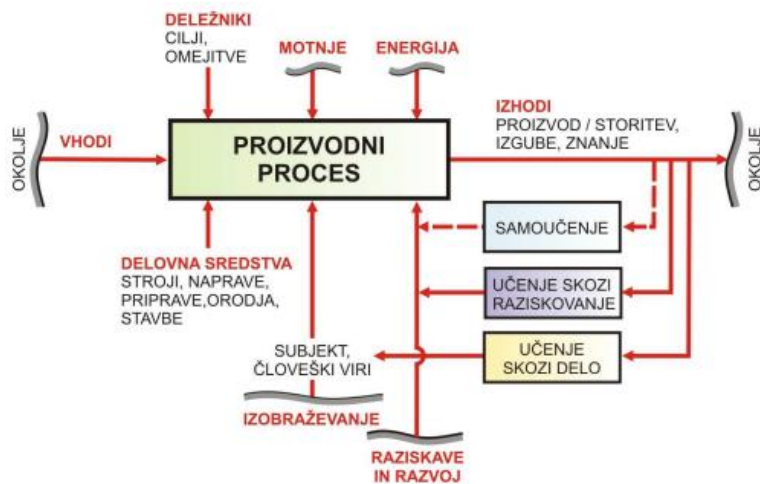
Znanje vstopa v proizvodni sistem skozi dva komunikacijska kanala, in sicer kot zapisano (eksplicitno) znanje ali pa prek zaposlenih kot skrito (tacitno) znanje. Pri tem znanje izvira iz treh virov [46]:

¹ High Level Group, „High Level Group on Key Enabling Technologies“, 2010

² Opazovana naloga je na Sliki 7.6. označena s okvirjem, ki ima polno črto.

- 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 diseminacijo 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 prek delovnih izkušenj in ga uporabljajo pri izvajanju procesov. To znanje se z delom stalno dopolnjuje.

Slika 2.4. Struktura samoučечеlega proizvodnega sistema [46]



Navedeni trije viri znanja so v obstoječih proizvodnih sistemih povezani v dve učni zanki, kot je prikazano na Sliki 2.4.

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 ne znajo artikulirati, lahko pa ga prenašajo na druge skozi praktično poučevanje oz. trening [46].

Novo znanje, ki izhaja iz rezultatov znanstvenoraziskovalnega 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 [46].

2.1.1 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 [47]. Imajo veliko avtonomnih delov, ki so se sposobni odzvati na pobude iz okolja ter na samovzdrževalne zahteve prek različnih internih povratnih zank [48]. 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 [44] so identificirani trije nivoji adaptacije: 1) optimizacija, 2) stabilizacija in 3) samoorganizacija.

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 samoorganizacija [49].

Kompleksnost je svojstvo prepletenih sistemov, sestavljenih iz večjega števila elementov, ki so v medsebojni interakciji. Skozi svojo teorijo kompleksnosti, Suh [50] 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 [36] 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 setu manj kompleksnih podsistemov zmanjša celotno (skupno) kompleksnost. S ponavljanjem postopka dekompozicije se kompleksnost zmanjšuje, dokler so novonastali podsistemi oziroma elementi še sposobni samostojne realizacije posameznih funkcij. Nadaljnja dekompozicija ne zmanjšuje kompleksnosti posameznih elementov, ampak se celotna kompleksnost spet povečuje. Do tega pride zaradi vse večjega števila na 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, kjer 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.

2.2 Industrijske revolucije

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

Z vidika industrijske proizvodnje je prvi pomemben dosežek odkritje parnega stroja³, 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, ki je zajela razvoj strojev na osnovi uporabe energije vodne pare. Parni stroj je poganjal druge stroje in omogočal obsežnejšo prostorsko in proizvodno koncentracijo, 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 Sliko 2.5.

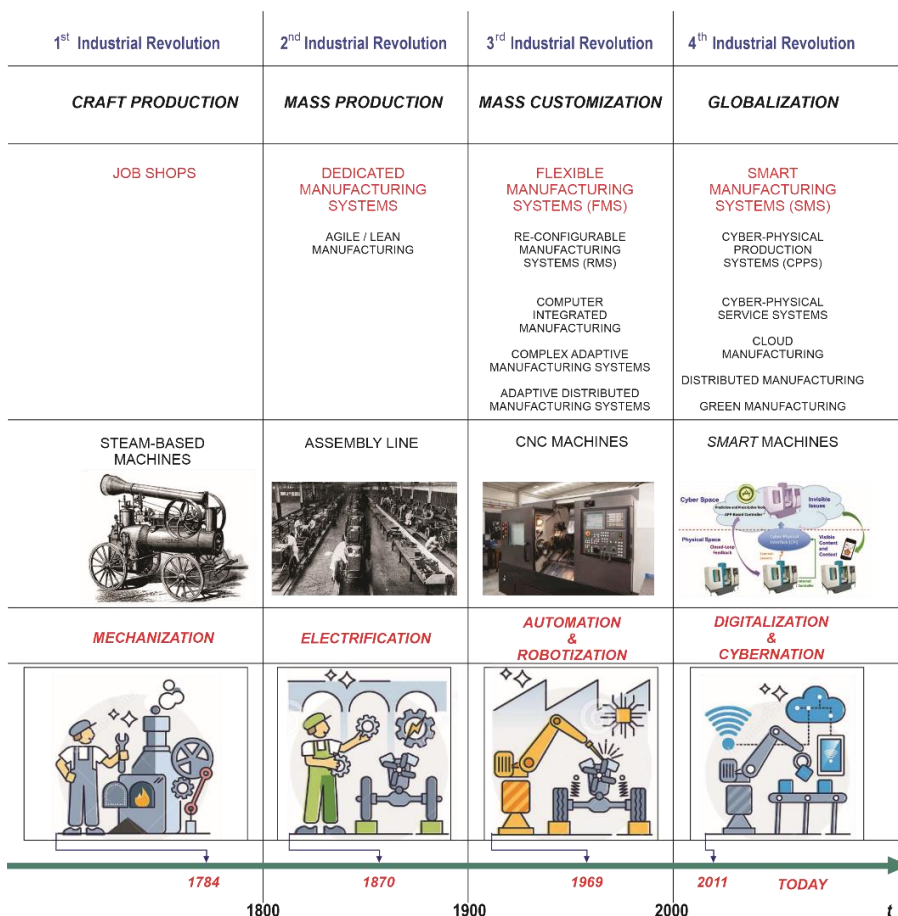
Razvoj se je nadaljeval v smeri novih odkritij (enosmerni in izmenični električni tok, žarnica, elektrarne, daljnovodi, motorji z notranjim izgorevanjem, telekomunikacije in podobno), ki so se zgodila v drugi polovici 19. stoletja. Vodna para kot vir energije v tovarnah se je nadomestila z elektriko, 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 označijo naslednje ekonomske spremembe:

- povečuje se prostorski obseg poslovanja;
- širi se svetovna trgovina; razvije se tehnologija svetovne trgovine s čimer se značilno zmanjšajo stroški in povečata varnost ter učinkovitost trgovine;

³ 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.

- razvije se tovarniški sistem proizvodjanja na osnovi znanstvenih principov upravljanja (F. W. Taylor);
- razvijejo se principi masovne proizvodnje (H. Ford).

Slika 2.5. Industrijske revolucije skozi čas [51]



Tretja industrijska revolucija se je začela v 60. letih 20. stoletja. To obdobje označuje pomembne tehnološke dosežke na področju informacijskih in komunikacijskih znanosti, elektronike in računalništva ter tudi na področju avtomatizacije proizvodnje. Običajno jo imenujemo računalniška ali digitalna revolucija, saj so jo spodbudili razvoj računalnikov in računalniško krmiljenih strojev in 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.

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 Hannovru, da bi opisali revolucijo v organizaciji globalnih vrednostnih verig [52].

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 [8].

Kegermann in ostali avtorji v delu [53] 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.

Vzporedno z vseobsegajočim tehnološkim razvojem, predvsem na področju IKT, doživlja industrijska proizvodnja v zadnjih nekaj letih močne in globoke spremembe. Tovarne postajajo bolj odzivne 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 prihodnje proizvodne sisteme [54].

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 [52]. Pametna tovarna predstavlja tovarno ljudi in naprav, medsebojno povezanih z namenom realizacije določenih nalog [55, 56].

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 nanotehnologije 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 delih sveta še vedno niso popolnoma zaključile. Poleg hitrosti in obsega je četrta industrijska revolucija edinstvena tudi zaradi vse večjega usklajevanja različnih disciplin in odkritij 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 t. i. *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 [52].

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

V knjigi »*Towards the Re-Industrialization of Europe*« je prikazana vizija razvoja prihodnje proizvodnje v Evropi [8].

2.3 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 [57]. Razvoj proizvodnih sistemov skozi proizvodne paradigme je opisan v delih [58-60].

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 kot tudi glede načina njegove izdelave. Kakovost in ostale karakteristike posameznih proizvodov so določale zahteve posameznega kupca.

V članku [61] 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, ki 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 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 [62].

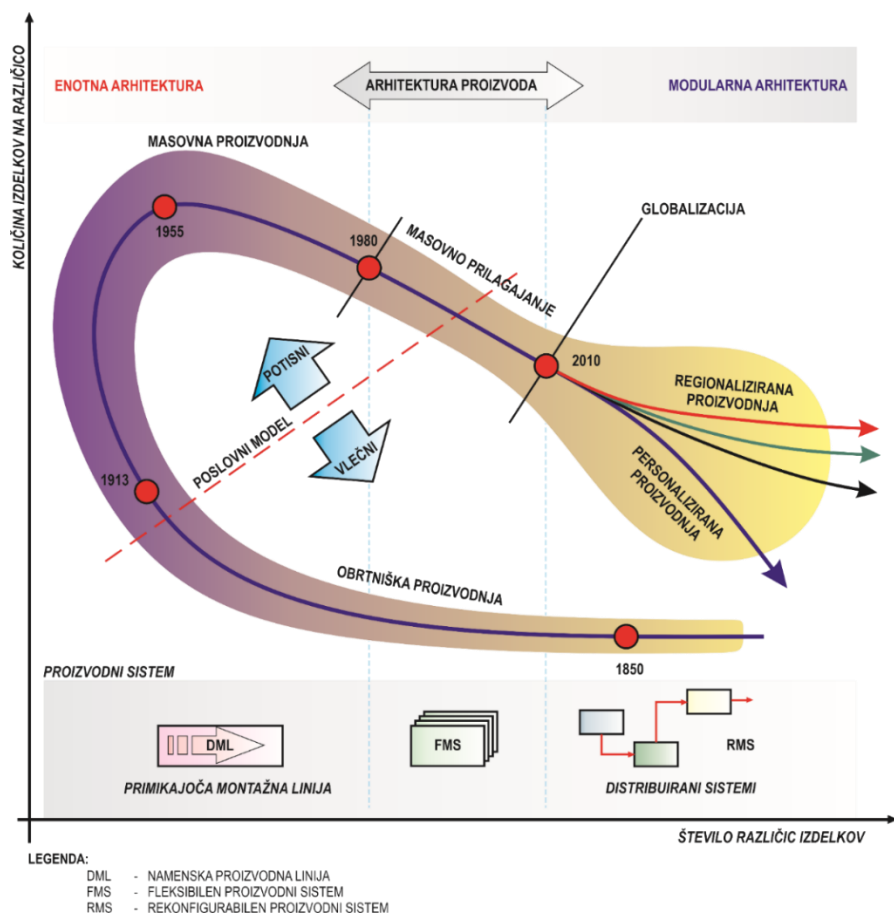
Masovna proizvodnja temelji na potisnem poslovnem modelu⁴ (razvij, izdelaj, sestavi, prodaj). Ključna proizvodna tehnologija masovne proizvodnje je Fordova premikajoča montažna linija⁵. Za tak tip proizvodnje so bili razviti namenski proizvodni sistemi oziroma namenske proizvodne linije (ang. *Dedicated Manufacturing Lines – DML*), kjer so stroji nadomestili človeško delo [63]. Ta paradigma temelji na principih znanstvenega upravljanja, ki so podani v delu [31]. Principi znanstvenega upravljanja obravnavajo človeka v proizvodnem sistemu kot orodje, ki se mora prilagajati stroju. Taylorjev prispevek predstavlja temelj

⁴ Pri potisnem proizvodnem modelu je izdelek potisnjen skozi proces neodvisno od kupca, pri vlečnem pa kupec zahteva izdelek in ga tako potegne skozi proces.

⁵ Utemeljitelj serijske proizvodnje avtomobilov Henry Ford je nekoč humorno povzel glavni princip: "Kupec lahko kupi avto katerekoli barve, samo da je črna".

masovne proizvodnje, ki je sledila predhodnemu obrtniškem načinu dela in prehod iz vlečnega poslovnega modela v potisnega, glej Sliko 2.6.

Slika 2.6. Proizvodne paradigme in razvoj proizvodnih konceptov v času, predelano po [57, 64]



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 [65]:

».... proizvodnjo produktov in storitev, ki izpolnjujejo individualne potrebe kupca, z učinkovitostjo, ki je blizu masovni proizvodnji.«

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*).

Poslovni model je tu vlečni, saj kupec najprej odda naročilo in plača, šele na to gre izdelek v izdelavo, glej Sliko 2.6.

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 [66] je nadaljevanje variantne proizvodnje, proizvodnje s poudarkom na variantah, prilagojenim posebnostim (kulturnim, pravnim, bivanjskim, itd.) določene regije. Pri personalizirani proizvodnji [67] pa so kupci udeleženi pri načrtovanju izdelkov, ki jih kupijo. Ravno ta kokreacija je gonilo ustvarjanja nove vrednosti [32]. Personalizirana proizvodnja zahteva prilagodljive in rekonfigurabilne proizvodne sisteme (ang. *Re-configurable Manufacturing System – RMS*). Najnovejša konceptualna modela, osredotočena na personalizirano proizvodnjo, sta modela agilnega proizvodjanja (ang. *Agile Production*) in proizvodjanje 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*) [68]. Pametno proizvodnjo kot novo proizvodno paradigmo definiramo kot [68]:

»... 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.«

Pametna proizvodnja združuje današnja in prihodnja proizvodna sredstva s senzorji, računalniškimi platformami, komunikacijsko tehnologijo, nadzorom

podatkovnega intenzivnega modeliranja, simulacijo in napovednim inženiringom. Pametna proizvodnja uporablja koncept kibernetiko fizičnih sistemov, interneta stvari, računalništva v oblaku, storitveno usmerjenega računalništva, umetne inteligence in podatkovne znanosti. Ko bodo ti prekrivajoči, so koncepti in tehnologije uvedeni in proizvodnja bo postala zaščitni znak naslednje industrijske revolucije [69], tako imenovane *Industrije 5.0*.

Radziwon in sodelavci v [70] predlagajo definicijo pametne tovarne, ki je v znanstvenih krogih najvišje 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 zanašajo na avtomatizacijo, kar se razume kot kombinacija programske opreme, hardvera in/ali mehanike, kar bi moralo doseči optimizacijo proizvodnje, kar pa posledično izzove zmanjšanje nepotrebnega 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.«

Vsako izmed opisanih paradigem ženejo določeni cilji, ki se realizirajo v novih konceptih proizvodnih sistemov, ti pa se realizirajo z novimi tehnologijami [61].

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

2.4 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 [71]. Integracija novih proizvodnih sistemov z novimi poslovnimi modeli in z arhitekturo proizvoda ustvarja novo proizvodno paradigmo [63].

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

2.4.1 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 [72].

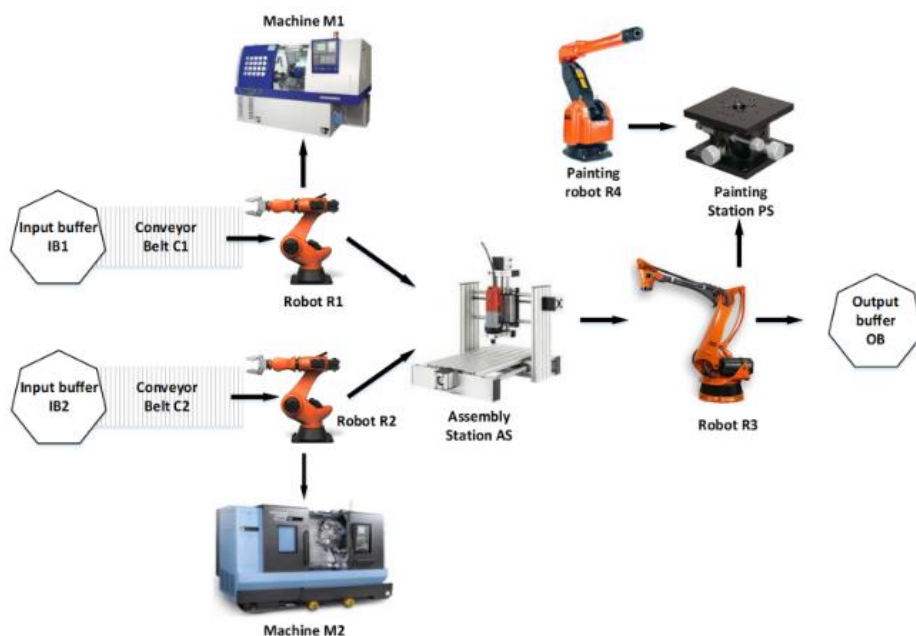
Fleksibilni proizvodni sistem (FMS) je definiran v članku [57] kot:

»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 popolnoma primerni za prilagajanje v smislu kapacitet glede na potrebe. Prav tako pa ni možna postopna sprememba njihove funkcionalnosti [73].

Primer fleksibilnega proizvodnega sistema je prikazan na Sliki 2.7.

Slika 2.7. Fleksibilni proizvodni sistem [74]



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 [75, 76].

Globalizacija in nagli porast konkurence med proizvajalci na svetovnem trgu je omogočila fleksibilne proizvodne sisteme z le delno uspešno rešitvijo proizvodnega sistema, ki 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, temveč je pomembnejša odzivnost na spremembe.

2.4.2 Rekonfigurabilni proizvodni sistemi

Rekonfigurabilni 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.

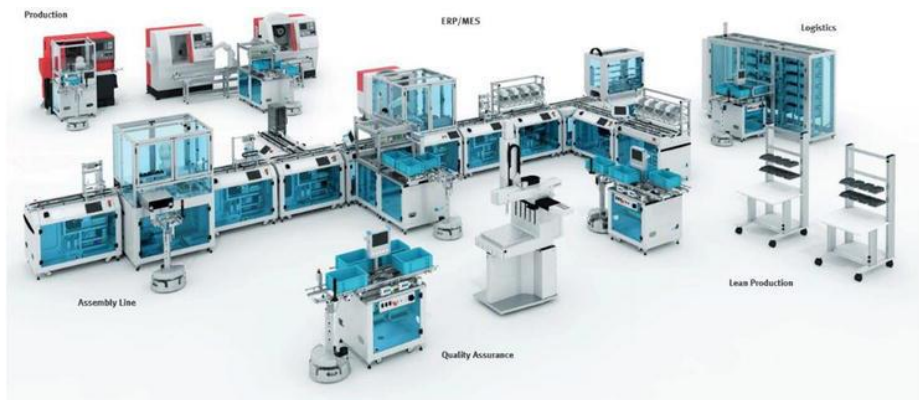
V članku [77] avtorji definirajo RMS kot:

»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 označen 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 [78].

Primer rekonfigurabilnega proizvodnega sistema je prikazan na Sliki 2.8.

Slika 2.8. Rekonfigurabilni proizvodni sistem, razvit s strani FESTO grupe [79]



2.4.3 *Inteligentni proizvodni sistemi*

Inteligenca predstavlja sposobnost učenja na osnovi izkušenj, uspešnega prilagajanja novim stanjem in spremembam v okolju ali sposobnost abstraktnega razmišljanja [80]. Na osnovi takšne definicije je mogoče ovrednotiti umetno inteligenco (ang. *Artificial Intelligence* – *AI*) kot sposobnost računalnika ali programa, da imitira človekove kognitivne procese, kot sta razmišljanje in učenje.

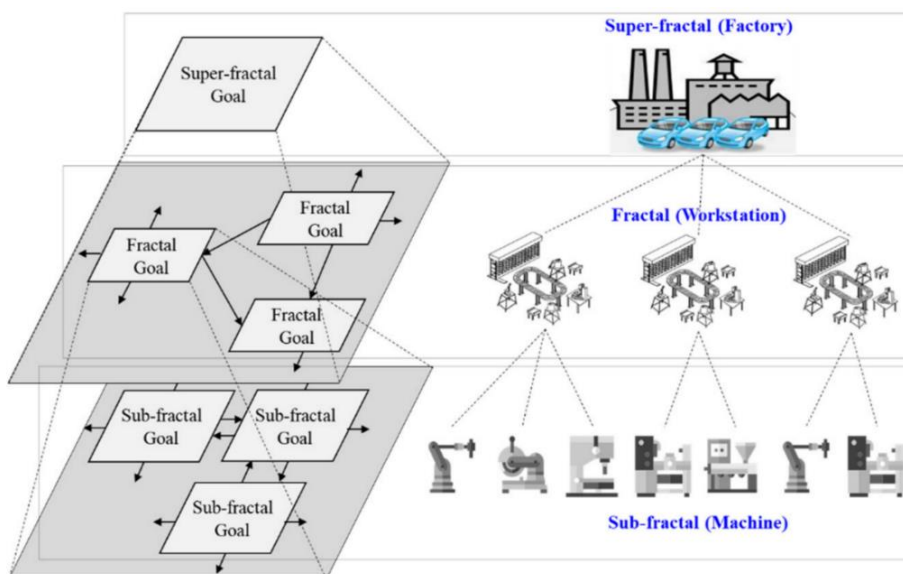
Nadvse pomembni atributi, ki vodijo k inteligentnim sistemom (ang. *Intelligent Systems* – *IS*), so izraženi skozi učenje, intuicijo, kreativnost, hitro razmišljanje, razumevanje, samostojno delovanje, prilagoditev in posredovanje znanja. Na osnovi takšnih svojstev so sposobni zbirati in uporabljati 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 [81], 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 pojava nepredvidenih težav, povzročenih s strani nepopolnih in nenatančnih informacij. Inteligentni proizvodni sistemi, zasnovani na umetni inteligenci in strojnem učenju, so opisani v delih [82, 83].

2.4.4 Fraktalni proizvodni sistemi

Fraktalni proizvodni sistem (ang. *Fractal Production System – FrPS*) je koncept, privzet iz koncepta fraktalne tovarne. Koncept fraktalne tovarne [84] 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 2.9. Nadzor nad celoto je skupen, s čimer je možno zagotavljanje strateških ciljev podjetja.

Slika 2.9. Fraktalni proizvodni sistem [85]



Osnovni element je fraktal, ki nastopa kot samostojna enota z možnostjo samoorganizacije. 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 deluje 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 [86].

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 samoorganizacija, druga značilnost je dinamičnost in tretja je samopodoba. Ta svojstva FrPS je možno opisati in modelirati ob uporabi agentskih in večagentskih struktur v distribuiranem okolju. FrPS ima dobre konceptualne značilnosti, čeprav je njihova implementacija zelo zahtevna [87].

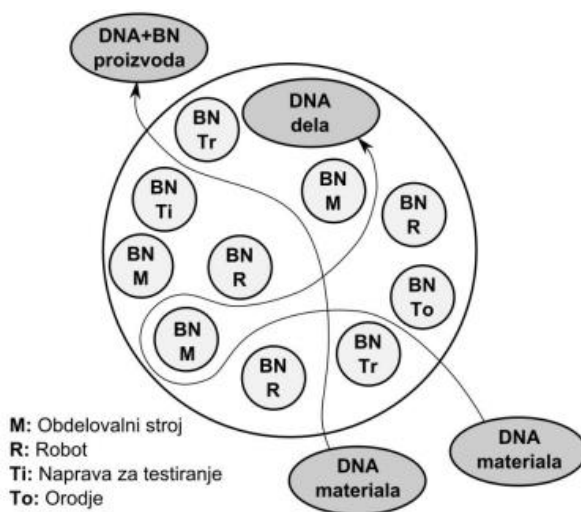
2.4.5 Biološki proizvodni sistemi

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, samoorganizacija, uporaba naravne inteligence in dinamična struktura z naravno hierarhijo. Na podlagi takšnih lastnosti Okino v članku [88] vleče vzporednice z biološkimi sistemi in predlaga zasnovo za uresničitev pomembnih svojstev prihodnjih proizvodnih sistemov.

Biološki proizvodni sistemi v svojo funkcionalnost vključujejo nedeterministične spremembe v proizvodnih okoljih, z idejo in konceptom, ki izhaja iz bioloških sistemov, kot jih najdemo v naravi, kot so avtonomnost in samodejnost, socialna usklajenost do organizacije, samoorganizacija, prilagajanje (adaptacija), rast in evolucija. Navedene funkcije so v bioloških organizmih kodirane skozi dva tipa bioloških informacij v obliki DNA-tipa, ki se razvija skozi generacije, in BN-tipa, ki se individualno naučijo in dosegajo skozi življenjsko obdobje vsak organizem. 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 [86, 88], glej Sliko 2.10.

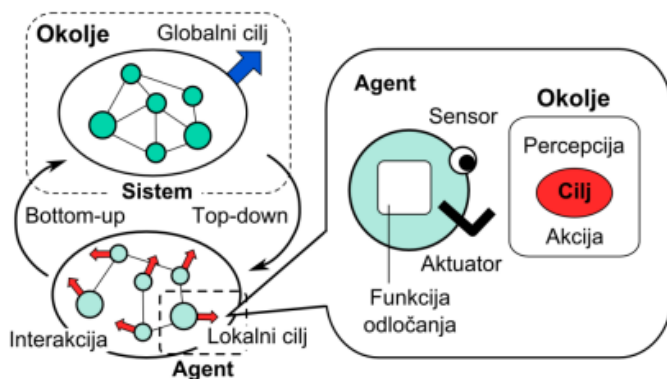
Slika 2.10. Koncept bioloških proizvodnih sistemov [89]



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 Sliko 2.11. Proizvodni sistem, ki vsebuje agente z omejeno racionalnostjo, izkazuje večjo stopnjo prilagodljivosti v primerjavi s sistemom, ki ga sestavljajo le klasični agenti [90].

Biološki proizvodni sistemi so izjemno prilagodljivi, pa čeprav jih je z današnjo tehnologijo težko realizirati [89].

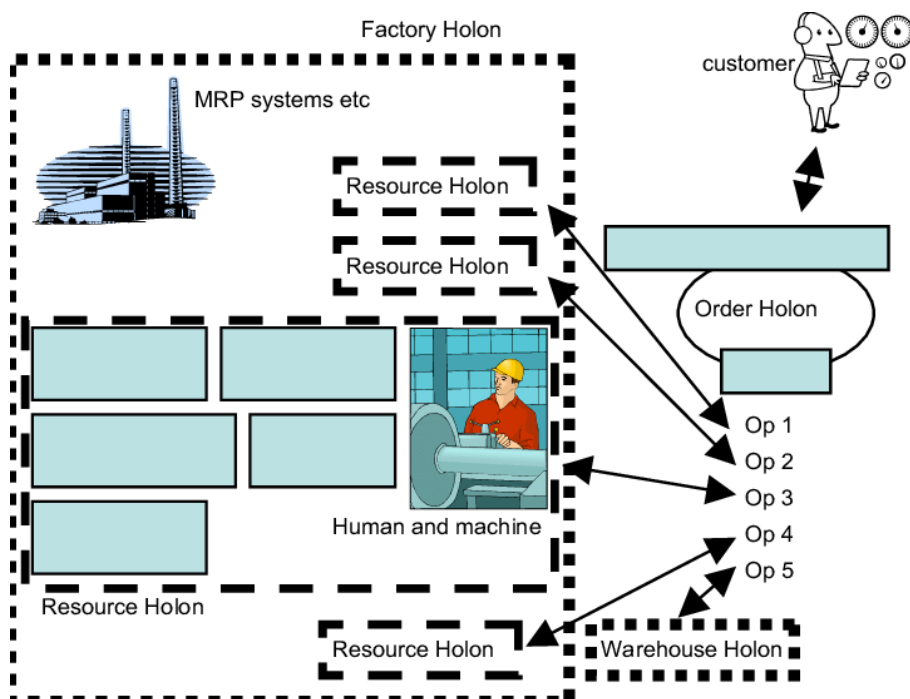
Slika 2.11. Model agenta BMS z omejeno racionalnostjo [90]



2.4.6 Holonski proizvodni sistemi

Koncept holonskih sistemov temelji na konceptu, ki ga je razvil Arthur Koestler [91] za organizme in socialne organizacije opisujoč hierarhično strukturo kompleksnih sistemov, sestavljeno iz holonov, ki so istočasno celota in del neke druge celote ali holona v hierarhični strukturi. Ta hierarhija holonov se imenuje »holarhija«, glej Sliko 2.12.

Slika 2.12. Arhitektura holonskega proizvodnega sistema [92]



Holon predstavlja avtonomni, inteligentni, fleksibilni, distribuirani in kooperativni gradnik holonskih proizvodnih sistemov (ang. *Holonic Manufacturing System – HMS*) opisanih v delu [93].

Avtonomnost in kooperativnost sta dve najznačilnejši karakteristiki holonov. Avtonomnost izhaja skozi samostojno načrtovanje in krmiljenje aktivnosti, kooperativnost pa se izraža skozi njihovo sposobnost usklajevanja 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 [94]. PROSA definira tri osnovne holone: holon proizvoda, holon vira, holon naročila. Referenčna arhitektura holonskih proizvodnih sistemov zagotavlja preprosto integracijo z uporabo principa samopodobnosti novih proizvodnih elementov in rekonfiguracijo proizvodnega sistema.

Leitao in Restivo [95] sta razvila arhitekturo ADACOR (ang. *ADaptive holonic Control aRchitectutre for distributed manufacturing systems*), ki 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 [96] sta izvedla raziskavo, v kateri sta za razvoj holonskega krmilnega sistema kot alternativne tehnologije uporabila agentsko tehnologijo in tehnologijo funkcijskih blokov standarda IEC 61499⁶. 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 [97], 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.

2.4.7 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 [98].

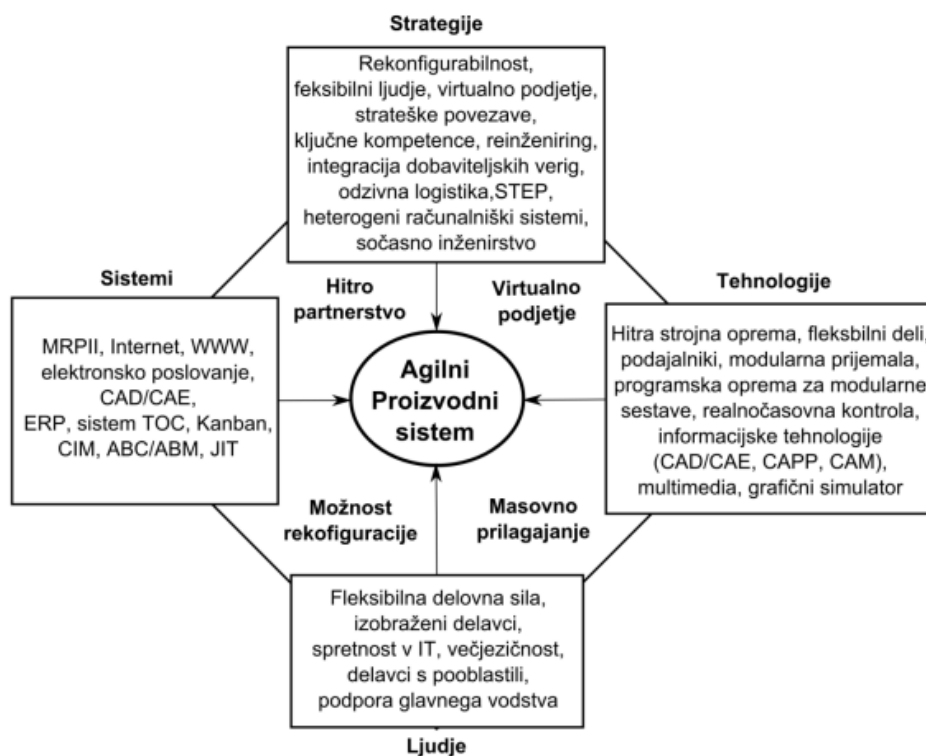
AMS je močno vpet v poslovno okolje, v katerem deluje, in se zanaša na poslovne partnerje, s čimer si zagotavlja lastno prilagodljivost. Agilni proizvodni sistemi in njihove lastnosti so opisani skozi literaturo [99-107].

⁶ IEC 61499 – standard ki definira referenčno arhitekturo distribuiranih krmilnih sistemov

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 2.13, [100, 101].

Agilnost v proizvodnih podjetjih glede na različne definicije predvideva (1) visok nivo kakovosti 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 [108].

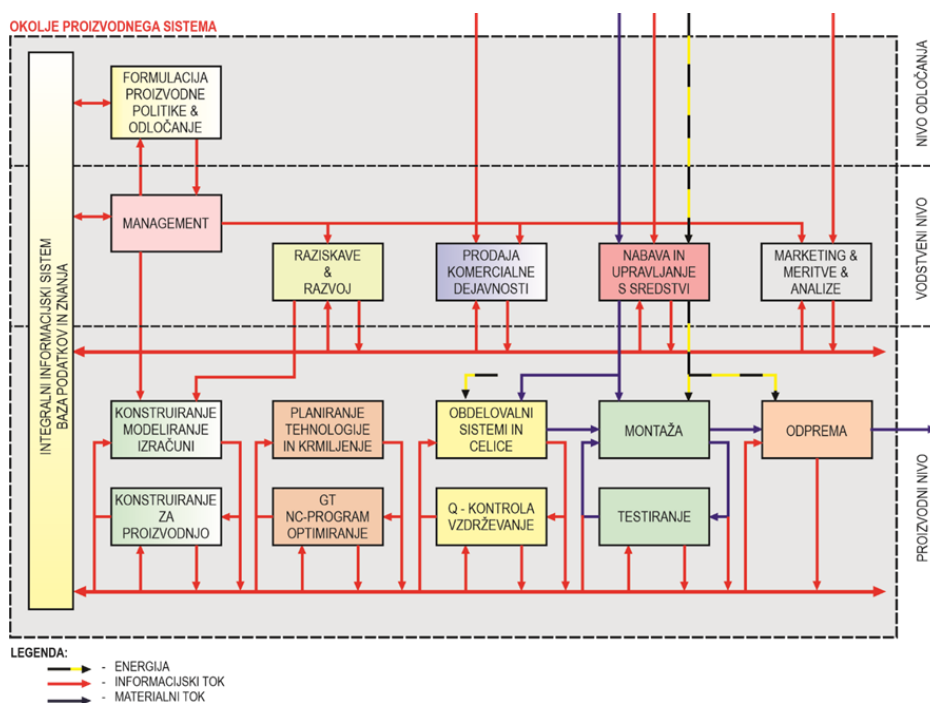
Slika 2.13. Konceptualni model razvoja AMS [100]



2.4.8 Kompleksni adaptivni proizvodni sistemi

Koncept kompleksnih adaptivnih proizvodnih sistemov (ang. *Complex Adaptive Manufacturing System – CAMS*) [35, 36] 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 trinivojski strukturi, glej Sliko 2.14.

Slika 2.14. Struktura kompleksnega adaptivnega proizvodnega sistema [35]

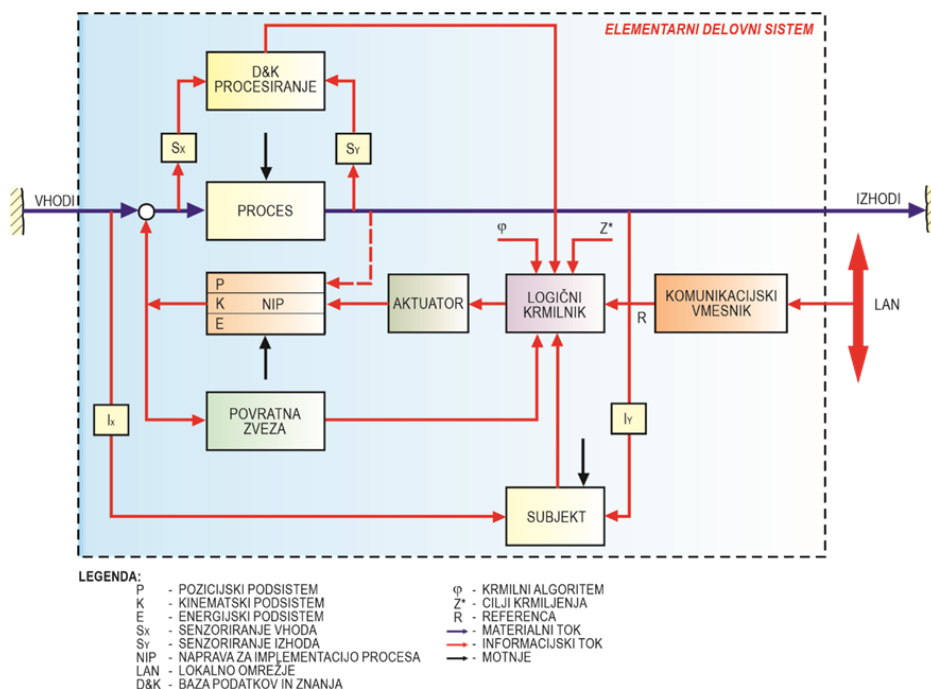


Ključne značilnosti, ki jih definira koncept CAMS, so nenehne spremembe gradnikov proizvodnega sistema kot posledica adaptacije tržišču, novostim v znanosti in tehnologijah ter zaradi drugih vzrokov. Tako proizvodni sistem skoraj nikoli ni v ravnotežju, temveč v stanju nenehne tranzicije. To pomeni, 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.

Elementarni delovni sistem (EDS) (ang. *Elementary Work System – EWS*) je osnovni gradnik za izgradnjo kateregakoli proizvodnega sistema [35]. 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*⁷ in okolje, glej Sliko 2.15.

Slika 2.15. Elementarni delovni sistem [36]



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_x*) in (*S_y*) se zbirajo podatki o stanju sistema pred in po izvedbi procesa, po tem se obdelujejo in posredujejo v obliki

⁷ Peklenik v delu [35] definira vlogo človeka v proizvodnih sistemih in uvaja termin *Subjekt*.

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_p), (V_d) in (V_s).

Krmilni signali se od logičnega krmilnika do NIP prenašajo prek pogonov, ki pridobivajo signale (U) in posredujejo močnostni signal (U_0) do naprave za implementacijo procesa, glej Sliko 2.15. Napotki se po algoritmu (φ) posredujejo do logičnega kontrolerja s ciljem realizacije strateške optimizacije, adaptivnega krmiljenja in podobno.

Obstoj komunikacijskega vmesnika omogoča povezovanje logičnega krmilnika z drugimi napravami ali delovnimi sistemi in integracijo v kompleksne adaptivne proizvodne sisteme [35].

2.4.9 Adaptivni distribuirani proizvodni sistemi

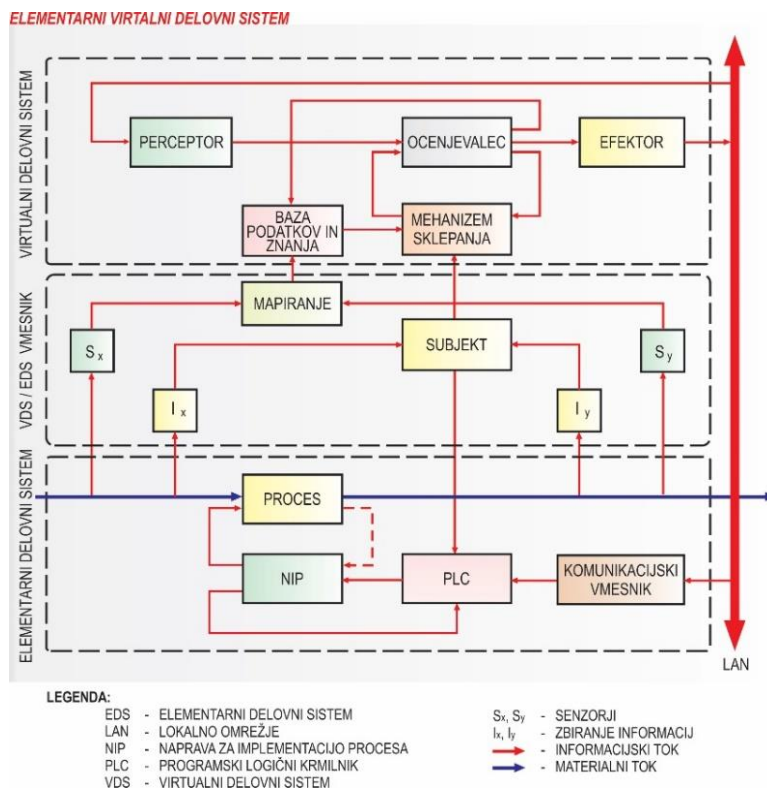
Koncept adaptivnih distribuiranih proizvodnih sistemov (ang. *Adaptive Distributed Manufacturing System – ADMS*) je bil razvit na podlagi koncepta CAMS [36]. Podobno kot koncept CAMS tudi koncept ADMS obravnava proizvodni sistem kot mrežo gradnikov, ki pa so distribuirani.

Koncept ADMS temelji na strukturiranju proizvodnih sistemov, na osnovi proizvodnih nalog za izdelavo komponent proizvodov. ADMS sestavlja mreža delovnih sistemov, ki so medsebojno povezani prek odgovarjajočih agentov oziroma virtualnih delovnih sistemov. Virtualni delovni sistem (VDS) [109] je uveden v koncept ADMS s ciljem, da zastopa EDS v distribuiranem okolju, Slika 2.16.

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, ki ima štiri osnovne funkcionalne elemente: perceptor, ocenjevalec, efektor in mehanizem sklepanja. Agenti delujejo in komunicirajo prek mreže in koordinirajo svoje aktivnosti, izvršujejo zapletene 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 2.16. Virtualni delovni sistem [109]

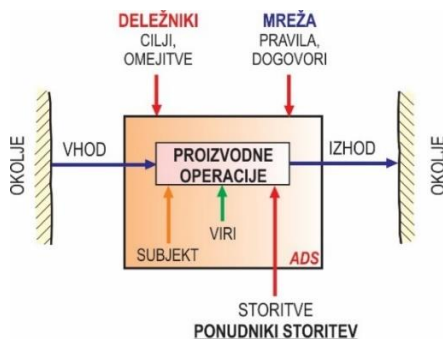


V konceptu ADMS gradniki proizvodnega sistema niso neposredno elementarni delovni sistemi, ampak avtonomni delovni sistemi (ADS) (ang. *Autonomous Work System* – AWS) [110], Slika 2.17, kjer vsak ADS vsebuje tudi enega ali več EDS. ADS je strukturiran s ciljem minimalne strukturne kompleksnosti mrežnih proizvodnih sistemov.

S tem so gradniki, ki sestavljajo mrežo, relativno preproste strukture z avtonomnim obnašanjem, namesto kompleksnih struktur, tj. podjetij. Proizvodne mreže so kompleksne, zato je očitno, 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 funkcionalnost in so hkrati sposobni avtonomno delovati v mreži [46].

Slika 2.17. Osnovni funkcijski diagram ADS [110]



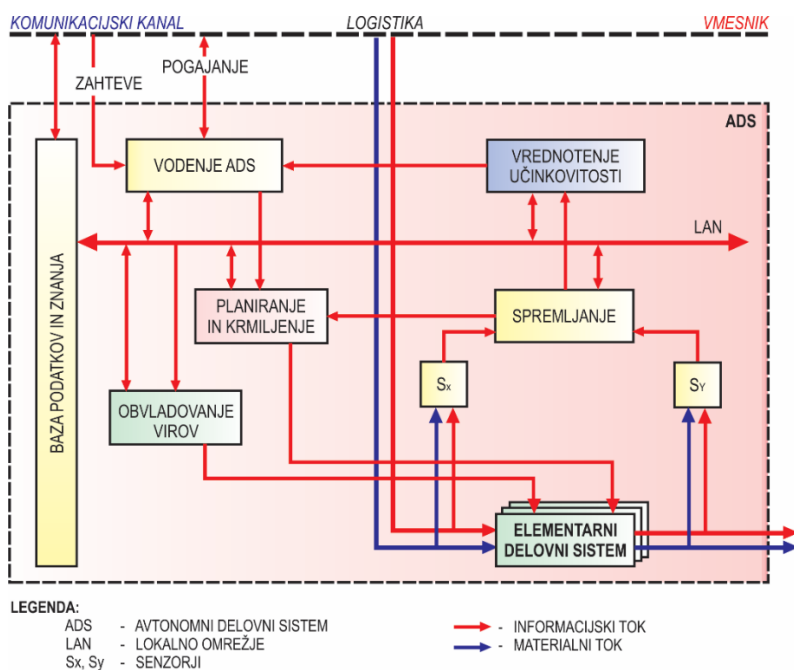
Butala in Sluga sta definirala ADS [110] kot sistem z zaokroženo tehnološko funkcionalnostjo in ustrezno funkcijo upravljanja. Tehnološka funkcionalnost je v osnovi zgrajena kot elementarni delovni sistem, ki ga po definiciji sestavljajo: proces, naprava za implementacijo procesa in subjekt. Funkcije upravljanja predstavljajo upravne funkcionalnosti, ki ADS omogočajo avtonomnost. Avtonomija ADS se odraža skozi njegovo specifično kompetenco v smislu znanja, izkušenj in virov. V delu [111] 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 [112] avtorja definirata avtonomnost kot sposobnost entitete, da ustvarja in krmili izvajanje lastnih planov in/ali strategij.

Osnovna funkcionalnost ADS je transformacija vhoda v izhod, glej Sliko 2.18. 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, ki ADS omogočajo določeno prednost pred konkurenco. Poleg ključnih funkcionalnosti ADS potrebuje tudi druge funkcionalnosti, ki 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

njihovi koordinaciji 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 takimi aktivnostmi se uravnoveša odnos med kontroliranim in porajajočim vedenjem ADS. Drugi set sestavljajo pravila in dogovori v proizvodni mreži, ki omogočajo skladno in učinkovito delovanje mreže. Ti se realizirajo skozi pravila, protokole, komunikacije, sintakso in semantiko izmenjave informacij, različnih vzorcev medsebojnih pogodb ipd.

Slika 2.18. Avtonomni delovni sistem [110]



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

Druga notranja upravljalna oziroma performančna zveza omogoča upravljanje s sistemom na osnovi parametrov, ki merijo ključne dimenzije, izvedenih na

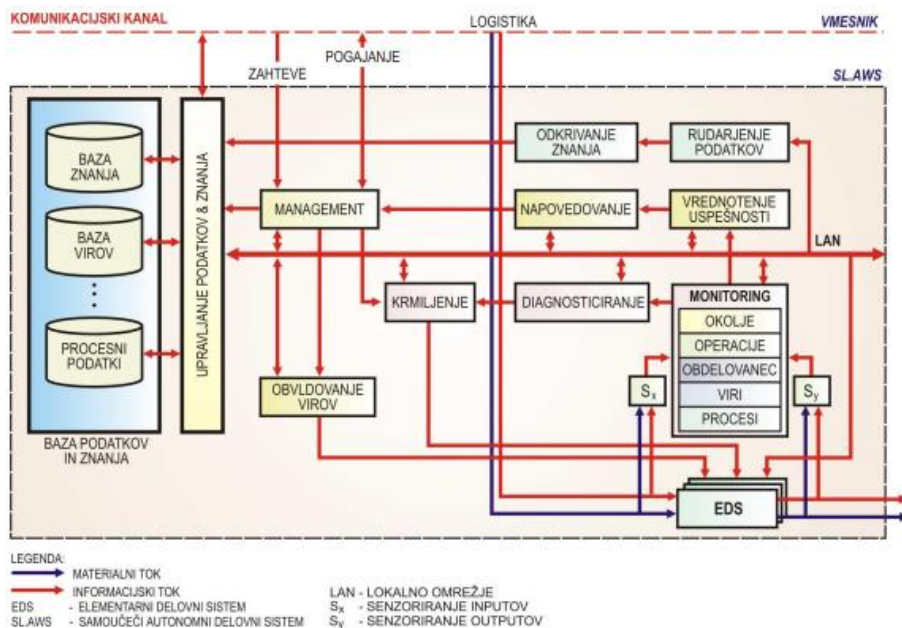
temelju informacij o dogodkih in dejanskem stanju v EDS. Potrebna pa je za kakovostno odločanje v okviru upravljanja z viri.

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

Osnovno strukturo ADS prav tako gradi baza podatkov in znanja ter mrežno komunikacijsko infrastrukturo 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 prek komunikacijskih in logističnih vmesnikov povezuje v mrežo.

Poleg navedenih krmilni zank v delu [113] avtorja predlagata koncept samoučечеga avtonomnega delovnega sistema (ang. *Self-Learning Autonomous Work System – SLAWS*), ki omogoča ADS izvedbo funkcije samoučenja, Slika 2.19.

Slika 2.19. Samoučеči avtonomni delovni sistem [46]

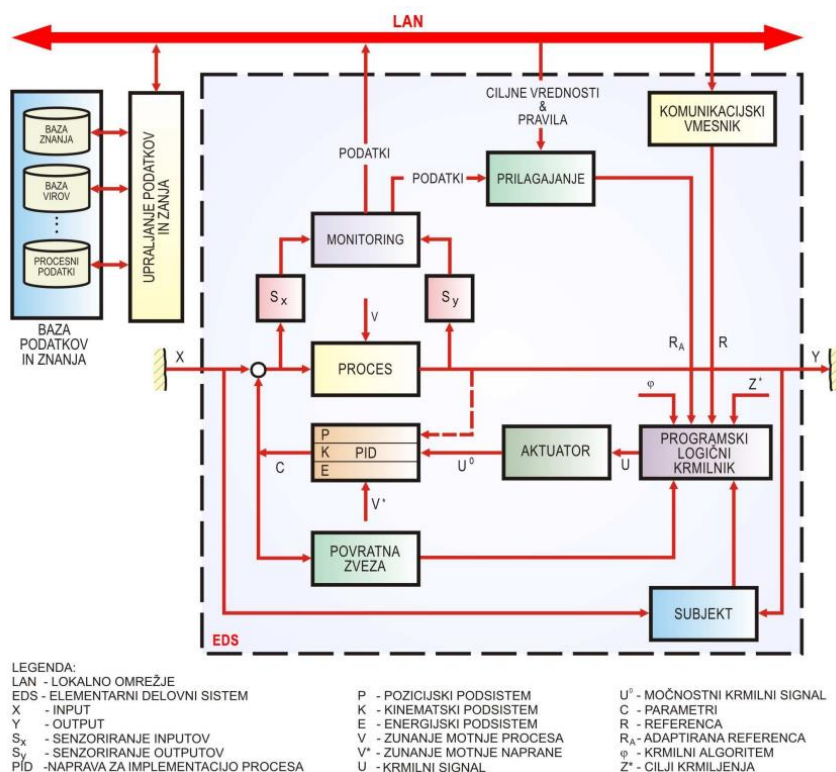


V tej raziskavi je osnovni strukturi ADS, ki je definirana v konceptu [110], še dodana zanka za samoučenje. Zanka samoučenja izhaja iz baze podatkov, v kateri so shranjeni proizvodni podatki, ki se zbirajo v okviru krmilne zanke v realnem času. Temeljni cilj zanke samoučenja je, da se iz proizvodnih podatkov izlušči novo znanje. Novo odkrito znanje se shranjuje v bazo znanja v obliki modelov znanja. Širši opis koncepta SL. AWS in funkcije samoučenja sta predstavljena v delu [46].

Samoučenje omogoča adaptacijo in evolucijo katerega koli proizvodnega sistema. V delih [46, 113] je predstavljen primer uporabe novo odkritega znanja v avtomatiziranem krmiljenju, in sicer pri adaptivnem krmiljenju procesov.

Osnovna ideja adaptivnega krmiljenja procesov izhaja iz dela [35] in je prikazana na blokovni shemi na Sliki 2.20. Jedro sheme predstavlja t. i. elementarni delovni sistem (EDS), ki je sestavljen iz treh vitalnih elementov: procesa, naprave za implementacijo procesa in človeškega subjekta.

Slika 2.20. Adaptivno krmiljenje procesa v EDS [46], prilagojeno po [35]

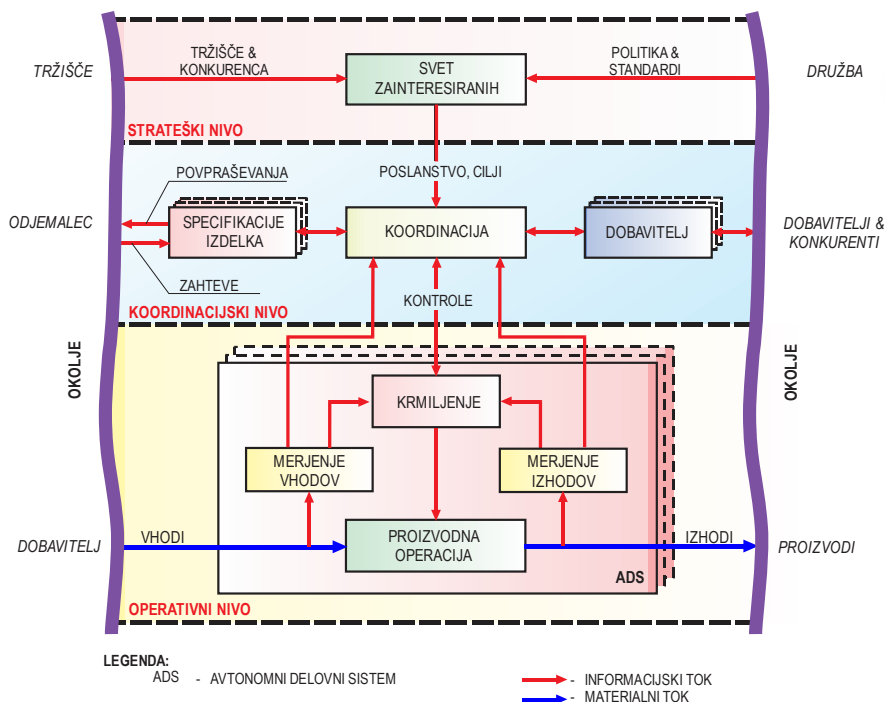


V EDS je oblikovana osnovna krmilna zanka, prek katere se krmili naprava za implementacijo procesa. V tej zanki logični krmilnik prek močnostnih elementov (aktuatorjev) aktira posamezne podsisteme naprave (npr. obdelovalnega stroja) (glej spodnji del sheme na Sliki 2.19). Druga krmilna zanka, ki je prikazana na zgornjem delu sheme, pa je namenjena adaptivnemu krmiljenju procesa. V okviru te zanke je treba 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 2.19, [46].

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.

Koncept ADMS predstavlja tri nivoje kompleksnega proizvodnega sistema, Slika 2.21.

Slika 2.21. Konceptualni okvir ADMS [114]



Osnovni nivo je nivo operativnega delovanja s heterogenimi in redundantnimi avtonomnimi delovnimi sistemi, sposobnimi izvajanja različnih proizvodnih procesov. Drugi, srednji nivo, je nivo koordinacije, ki zagotavlja koordiniran proces specifikacije produkta med stranko povpraševanja in stranko 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, ki jim poseduje (vsak ADS je specializiran za določeno področje, npr. lakiranje, struženje in frezanje obdelovancev večjih dimenzij, visokotlačno 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, ki so namenjene proizvodnji, avtorji v delu [115] imenujejo proizvodno-orientirane storitve.

Posamezen ADS vsebuje znanje in izkušnje za posamezno področje proizvodjanja, 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 [116]. Feigenbaum v knjigi [117] definira kakovost kot celoten splet značilnosti proizvoda in storitev, ki jih 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 [118].

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 [49].

2.4.10 Proizvodne mreže in mrežni proizvodni sistemi

Pod vplivom turbulentnega okolja, podvrženega nenehnim spremembam, imajo ljudje in proizvodne organizacije težnjo, da dodeljujejo in se udeležujejo v delitvah poslovnih aktivnosti, informacij in znanja, da bi uresničili skupne interese in cilje. V odvisnosti od stopnje kompleksnosti teh povezav je možno identificirati

nekaj nivojev sodelovanja, kot so mreženje, koordinacija, kooperacija, kolaboracija in integracija.

Mreženje predstavlja najnižji nivo sodelovanja; neizogiben pogoj za procese sodelovanja; skupni interes je izmenjava informacij brez pomembnega vpliva zaupanja med sodelavci.

Koordinacija zahteva višjo stopnjo medsebojnega zaupanja in boljšo organizacijo; poleg podatkov je ključnega pomena tudi delitev aktivnosti med sodelavci. Pri koordinaciji gre za izmenjavo virov, medtem ko imajo posamezniki, ki si te vire izmenjujejo, vsak svoje cilje in so samostojno zaslužni za dosežene rezultate. Koordinacija je prisotna na različnih področjih življenja, kot na primer pri bioloških organizmih (koordinirano gibanje rok in nog, koordinirano gibanje glave in oči ipd.), pri organizaciji prireditvev, usklajevanju aktivnosti različnih projektov, dobaviteljskih verigah (usklajenost dobav) itd. [40].

Kooperacija ob značilnosti koordinacije vsebuje tudi razdeljevanje človekovih, finančnih in tehničnih virov, da bi uresničili skupni cilj. Kooperacija nudi visoko stopnjo organizacije in medsebojnega zaupanja med sodelavci; ustvarja temelj za oblikovanje dobaviteljskih verig podjetij, ki sodelujejo z dobavitelji in odjemalci, da bi izboljšali poslovno performanco [119]. Pri tem je cilj, da se zaobjame vse proizvodne in logistične procese, ki so potrebni za izdelavo nekega proizvoda, in se jih integrira v poslovno verigo [120].

Kolaboracija predstavlja najvišji nivo usklajevanja aktivnosti. Vključuje izmenjavo informacij, razdelitev aktivnosti, ljudskih, finančnih in tehničnih virov in tudi promocijo skupnih kapacitet. Ključna razlika v odnosu na kooperacijo se vidi v možnosti, da organizacije ali posamezniki aktivno izmenjujejo znanje in se eni od drugih učijo in na ta način postanejo v svojem delu uspešnejši. Kolaboracija predstavlja sposobnost povezovanja raznovrstnih izvorov znanja v cilju skupnega odkrivanja novih možnosti za osebni, skupni in organizacijski razvoj ter uspeh [121]. V procesu kolaboracije se zahteva zelo visok nivo zaupanja in organizacije v smislu razdelitve tveganja, odgovornosti kot tudi dobička.

V članku [122], Hribernik in sodelavci definirajo kolaborativna delovna okolja, utemeljena na aktivnostih kolaboracije. Kolaborativno delovno okolje (ang. *Collaborative Working Environment – CWE*) omogoča ljudem, da opravljajo individualna in skupna dela v sistemu, kjer se omejitve časovne in prostorninske dimenzije presega z uporabo programskih orodji. Pod pojem kolaborativno okolje razumemo učinkovito uporabo najnovejših informacijskih in komunikacijskih

tehnologij ter metod v domeni organizacije in poslovanja. Pojem kolaboracije je v domeni proizvodnih aktivnosti obravnavan v delu [121].

Strategija današnjih sodobnih proizvodnih sistemov in podjetja je osredotočena na kolaboracijo zaradi dislocirane proizvodne infrastrukture na globalnem nivoju kot tudi zaradi potrebe po hitrejši reakciji na turbulentne zahteve trga [123].

Integracija predstavlja najvišji nivo sodelovanja, pri čemer se izvaja popolno spajanje organizacijskih in administrativnih struktur.

Mrežno povezovanje proizvodnih podjetij odpira nove možnosti in priložnosti predvsem malim in srednje velikim podjetjem. Proizvodne mreže (PM) (ang. *Production Networks*) temeljijo na povezovanju, komunikaciji, kooperativnem delovanju in sodelovanju povezanih podjetij. Proizvodne mreže podjetij nudijo novi potencial za izboljšavo procesa ustvarjanja dodane vrednosti [119]. Glavna ideja proizvodnih mrež je skupna uporaba virov ter skupno načrtovanje procesov ustvarjanja dodane vrednosti.

V članku [124] 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 mrež 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 [125].

Mrežne proizvodne sisteme je mogoče opazovati iz dveh osnovnih pristopov:

- Koncept proizvodnih mrež, ki ga v svojem delu predlagata Wiendahl in Lutz [119]. 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.

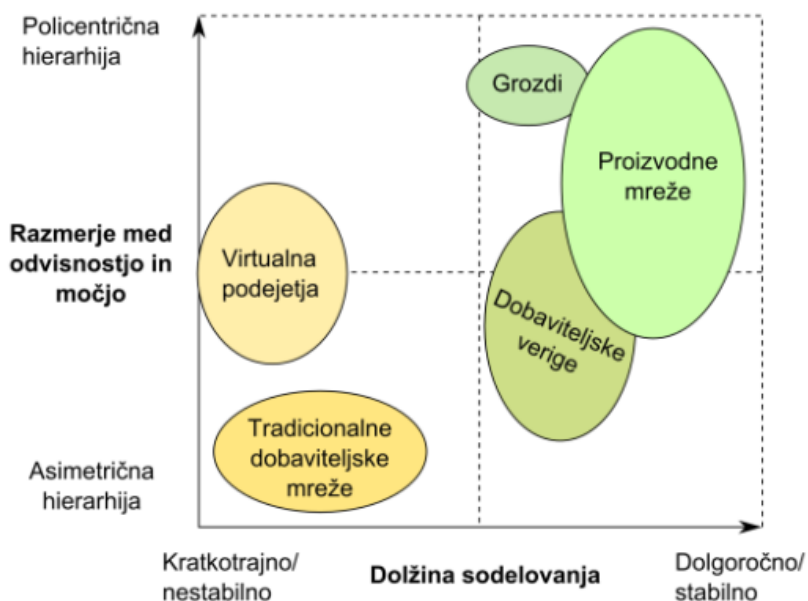
Koncept proizvodnih mrež, ki ga predlagata Butala in Sluga v članku [110]. Vozlišče mreže predstavlja avtonomni delovni sistem, ki omogoča obvladovanje strukturne kompleksnosti proizvodnih mrež. Gradniki mreže so relativno preproste strukture z avtonomnim vedenjem. Avtonomni delovni sistem razpolaga s funkcionalnostmi in kompetencami, ki so potrebne za upravljanje in operiranje njegovih ključnih proizvodnih procesov ter 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 2.22), 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 [119].

V članku [110] 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.«

Slika 2.22. Klasifikacija konceptov sodelovanja proizvodnih sistemov [119]



Pomen proizvodnih mrež je poudarjen v strateškem dokumentu *ManuFuture*⁸, 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. Njena sestava ne bo omejena s predpostavkami fizične lokacije, niti potrebami po čvrstih in dolgoročnih odnosih.«

Storitvena podpora izvajanju operacij v ADS skozi koncept proizvodno-orientiranih storitvenih mrež (POSM) (ang. *Manufacturing-oriented Service Network – MOSeN*) je predlagana v delu [126]. V tem konceptu storitvena enota (SE) (ang. *Service Unit – SU*) predstavlja ponudnika storitve. Pri uporabi zunanje 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 nova vrednost z izvajanjem storitev. Storitve se izvajajo 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 2.23. Cilj POSM-a je omogočiti storitveno podporo za proizvodne operacije ADS. Za to so potrebne storitve in urejenost mreže ADS in SE.

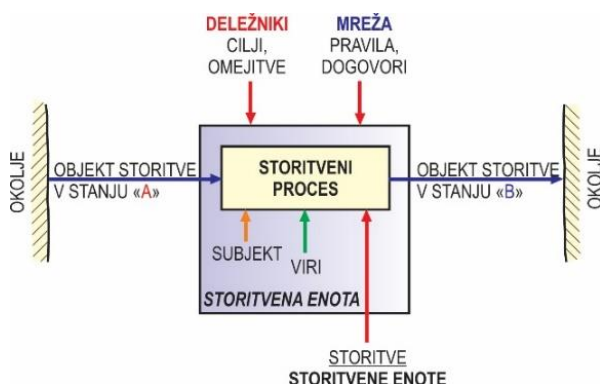
Koncept POSM predlaga skupno koriščenje določenih funkcionalnosti znotraj skupine ADS in SE. Koncept POSM je predvidel, da lahko ADS koristi različne proizvodno-orientirane storitve od različnih storitvenih enot. Posamezna storitvena enota lahko podpira različne ADS.

Operativne aktivnosti POSM so po mnenju avtorjev dela [126] 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 med drugim treba ustrezno skrbeti za stroj, orodja, vpenjala in ostale pripomočke. Poleg tega obstajajo tudi deli operacij, za katere ADS ni ustrezen in jih je treba realizirati s storitvami. Storitve izvede SE, pri

⁸ *Manufuture High Level Group and Support Group, "ManuFuture Platform – Strategic Research Agenda, assuring the future of manufacturing in Europe", Manufacturing Conference 2005*

čemer je storitev v bistvu proces, ki je izvršen nad objektom storitve, in sicer skladno z zahtevami uporabnika. Proizvodno-orientirana storitvena arhitektura, ki obsega štiri vrste gradnikov POSM, je prikazana na Sliki 2.24.

Slika 2.23. Funkcijski diagram storitvene enote [126]



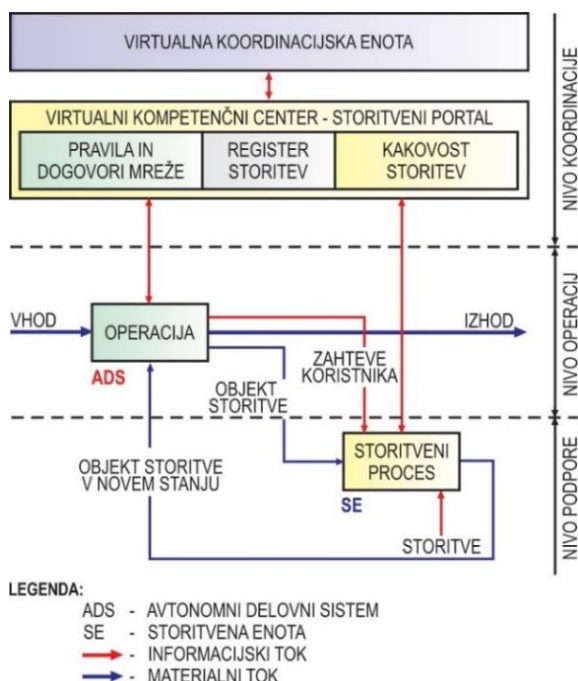
Vsaka proizvodno-orientirana mreža vsebuje poleg SE in ADS tudi dve posebni enoti, in sicer virtualni kompetentni center (VCC) ter virtualno koordinacijsko enoto (VCU), ki sta razvita v delu [114].

Gradniki POSM so razvrščeni na treh nivojih. Storitve izvajajo 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, prek katerega so dostopni register storitev, kakovost storitev ter pravila in dogovori mreže. Prek 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, ki jo 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.

Slika 2.24. Proizvodno orientirana storitvena arhitektura [126]



VCU nudi podporo pri razvoju novih storitev, kjer se zahteva sodelovanje različnih storitvenih enot. Za razvoj novih storitev je značilna funkcija modeliranja. Prihodnji 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 uporabnik, in sicer kadar načrtuje potrebne funkcije za svoje proizvodjanje. V primeru razpoložljivih storitev temu ni treba modelirati tistih funkcij, ki so lahko realizirane s storitvami [126].

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 [127]. 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 prek 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 [128] definirala VP kot:

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

Proizvodne mreže v tem primeru predstavlja 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 uglašen 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 [129, 130]. To pomeni, da VP predstavlja začasno organizacijsko strukturo in povezavo kompetenc udeležencev PN, dokler PN predstavlja dolgoročno povezovanje njenih članov.

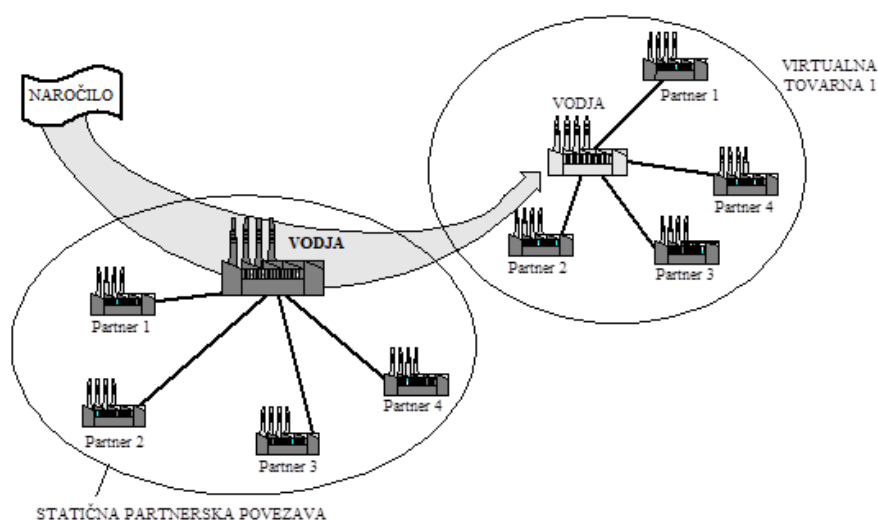
Poznamo več vrst strukture VP, tako v smislu organizacije kot tudi v smislu ciljev in delovanja. Osnovne strukture so [129]: 1) notranje VP, 2) statično VP, 3) VP s posrednikom, in 4) dinamično VP.

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.

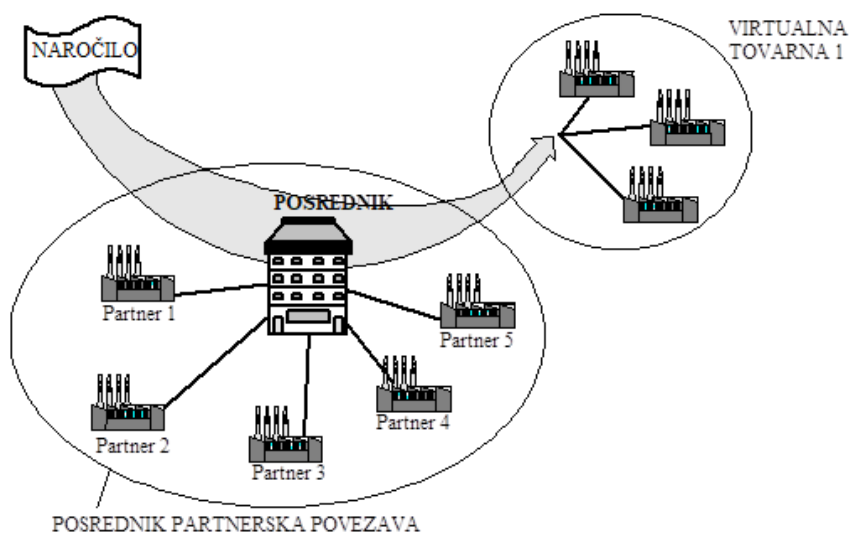
Statična VP združujejo stalne partnerje in so zgrajena na podlagi statičnih partnerskih povezav med podjetji, Slika 2.25. Zaradi jasne delitve kompetenc in udeležbe partnerjev na tveganju in dobičku je ustvarjanje VP bolj preprosto, cenejše in hitrejše, a predstavlja omejitve v smislu sposobnosti odzivanja na nove izzive s strani trga. Statična povezava je primerna za stabilno okolje, za dinamično pa ni dovolj fleksibilna [129].

VP s posrednikom predstavlja povezavo enakovrednih partnerjev, pri čemer obvladovanje partnerskih povezav in gradnjo virtualnega podjetja prevzame posrednik, Slika 2.26. 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 [129].

Slika 2.25. Statična partnerska povezava podjetji [129]

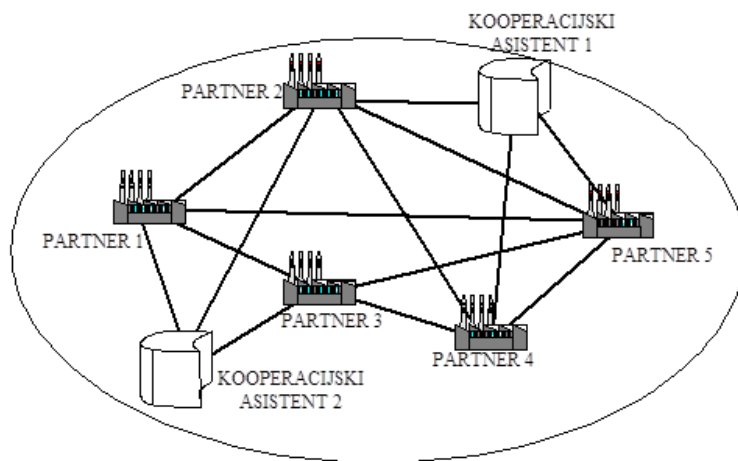


Slika 2.26. Posrednik partnerskega podjetja [129]



Dinamično VP, včasih imenovano tudi podjetje brez meja, gradi na decentralizirani partnerski povezavi, Slika 2.27. 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 stikov in informacij med partnerskimi podjetji.

Slika 2.27. Decentralizirana partnerska povezava, podjetje brez meje [129]



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 [131, 132]. Podjetja, ki delujejo v grozdih, niso omejena samo na proizvodna podjetja. Znani so grozdi, ki zajemajo vse tipe poslovanja.

Peklenik v delu [133] 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 [46].

Mrežno povezovanje proizvodnih podjetij odpira nove možnosti in priložnosti predvsem malim in srednje velikim podjetjem. Proizvodne mreže temeljijo na povezovanju, komunikaciji, kooperativnem delovanju in sodelovanju povezanih podjetij.

2.5 Povzetek

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

Če povzamemo to poglavje, lahko zaključimo s tem, da izzivi, ki jih prinašata globalizacija in personalizacija, odpirajo pot za nove bolj napredne koncepte in modele proizvodnih sistemov, ki bo temeljili na konceptih današnje četrte industrijske revolucije – Industrije 4.0 in konceptih prihodnje industrijske revolucije, t. i. *Industrije 5.0*.

V nadaljevanju so predstavljene tehnologije in sistemi, ki omogočajo strukturiranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje naslednje generacije naprednih proizvodnih sistemov, ki izhajajo iz proizvodne paradigme pametnih proizvodnih sistemov, kot tudi prihajajoče proizvodne paradigme adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov.

3 TEHNOLOGIJE IN SISTEMI ZA STRUKTURIRANJE, UPRAVLJANJE, VODENJE IN KRMILJENJE NAPREDNIH PROIZVODNIH SISTEMOV

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

Mahatma Gandhi

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 [134] o matematični teoriji informacije, ki postavlja temeljna načela komunikacije. Shanno-ova teorija komunikacije temelji na izmenjavi »nečesa neznanega« od pošiljatelja, prek kanala 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 nedoločenoost.

Iz predhodno navedene Shannonove teorije informacij so izpeljane številne definicije informacije, od katerih v tem delu izpostavljam [135]:

»Informacija je namensko upravljano znanje s ciljem, da pripravi obnašanje, ki mora biti učinkovito za dosego 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.«

Na osnovi predhodne definicije se lahko zaključi, da je informacija novo spoznanje, ki ga 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 [136]. 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 [137].

Danes obstajajo številne definicije IKT. Bakopoulos je v delu [138] definiral IKT kot:

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

Weill in Broadbendt v knjigi [139] 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/podporo poslovnih in proizvodnih procesov. V delu [140] 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 [141] 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 sistemskih 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, prilagodljivosti, zmanjševanju stroškov, skrajšanju časa izvajanja proizvodnih in poslovnih procesov, boljšega razumevanja zahtev kupca ipd. Integracija različnih sistemskih rešitev oz. informacijskih sistemov je omejena zaradi problemov kompatibilnosti in interoperabilnosti.

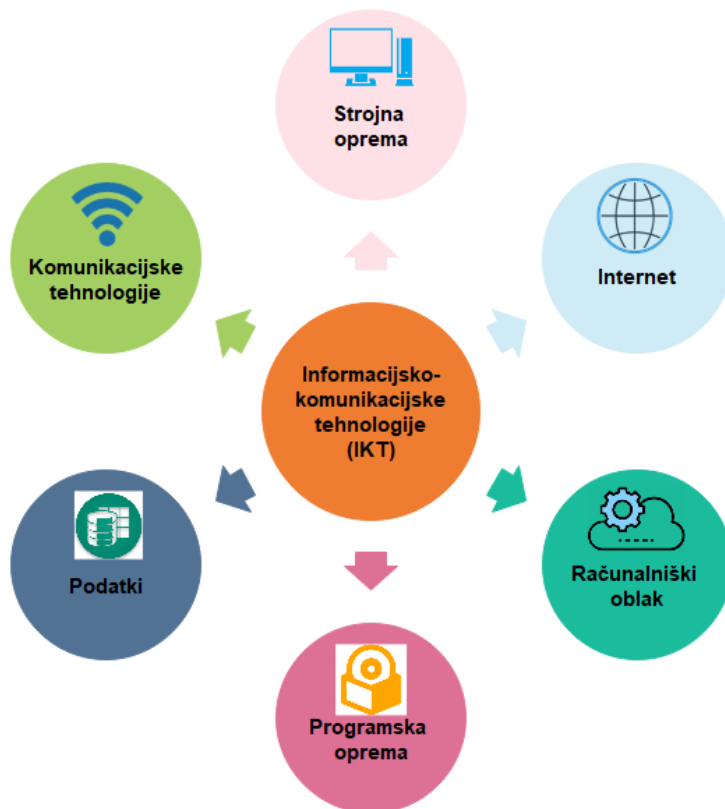
Poleg tega, da so IKT značilno vplivale na spremembe načina poslovanja proizvodnih podjetij, so tudi postale strateški dejavniki v proizvodnih podjetjih [142], ki omogočajo prestrukturiranje obstoječih proizvodnih sistemov v nove proizvodne in sistemske strukture.

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.

3.1 Napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije

Napredna IKT je z vidika industrijske proizvodnje tehnologija za razvoj informacijskih sistemov proizvodnih podjetij in mrežnih proizvodnih sistemov, glej Sliko 3.1. Komunikacijske tehnologije predstavljajo medij za posredovanje informacij med udeleženci v komunikaciji.

Slika 3.1. Napredne IKT



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 (intranet) ali masovni medij (internet).

3.1.1 Internet

Internet je nova, hitro razvijajoča se paradigma [5], 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 ... [143].

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.

3.1.1.1 Internet stvari

Prvo uradno rabo termina »internet stvari« (ang. *Internet of Things* – IoT) je mogoče povezati z Ashtonovim citatom iz leta 1999,⁹ 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 [144], glej Sliko 3.2.

V članku [5] 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.

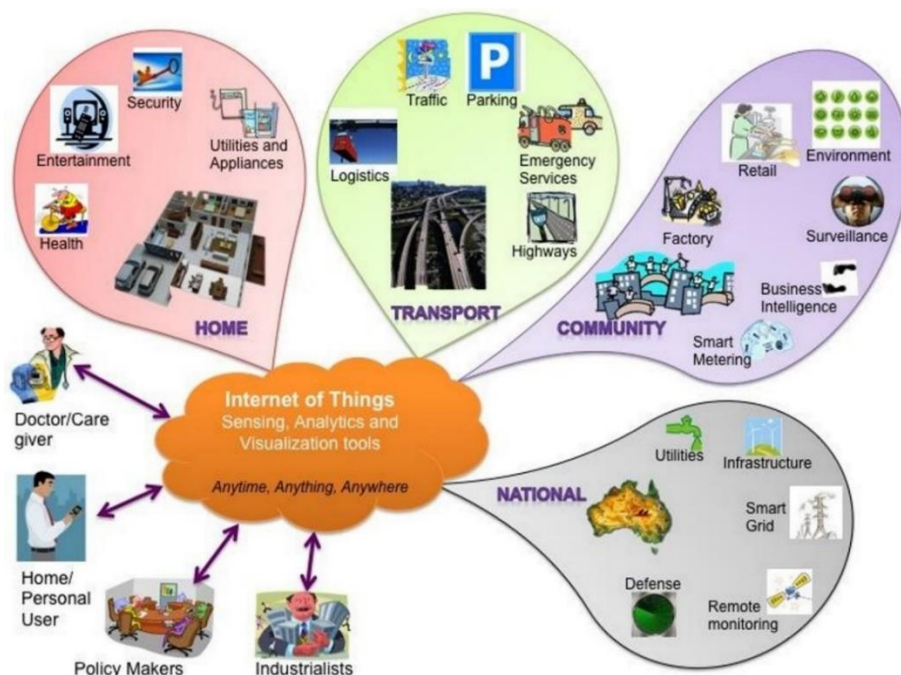
IoT je koncept in paradigma [144, 145], ki temelji na trditvi, da lahko prisotnost raznih stvari (predmetov, elementov) iz fizičnega sveta v kolaboracijskem svetu interneta, ki lahko medsebojno komunicirajo prek komunikacijskih kanalov (žične in brezžične mreže, TCP/IP-protokolov) in pri tem ustvarjajo 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 [144, 145].

IoT je revolucionarni napredek na področju interneta, kjer stvari (objekti) postanejo samoprepoznavne in komunikativne, kar vodi k stvaritvi določene

⁹ »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.

intelligence skozi sposobnost zaključevanja in sprejemanja odločitev. S takšnimi lastnostmi postanejo stvari »pametne«.

Slika 3.2. Predstavitev koncepta Interneta stvari [144]



V delu [145] »pametne stvari« avtorji opredeljujejo kot aktivne udeležence v poslovnem, informacijskem in društvenem procesu, v katerem so te sebi omogočile medsebojno komunikacijo ter si z okolico izmenjujejo podatke in dobivajo informacije prek 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.

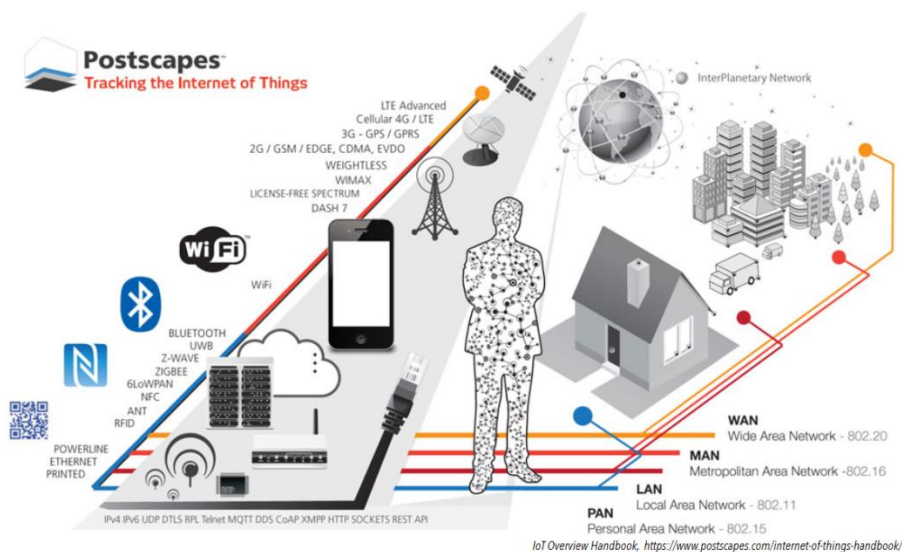
Pri analizi literature, ki obravnava tematiko Interneta stvari, je mogoče opaziti, da številni avtorji [144, 146, 147] predlagajo različne definicije, čeprav v grobem rečeno oziroma lahko zaključimo, da je cilj Interneta stvari povezati v fizične objekte v svetovno omrežje, pri katerem imajo svojo identifikacijo ter komunicirajo z ostalimi objekti z namenom pridobivanja informacij in generiranja novega znanja.

Najpogostejše 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 tehnologij¹⁰.

Omogočitvene tehnologije za izvedbo interneta stvari so radiofrekvenčna identifikacija (ang. *Radio Frequency Identification* – RFID) [148], senzorske mreže (ang. *Sensor Network* – SNet), brezžične tehnologije (ang. *Wireless Technology*) [149], dvodimenzionalne kode (ang. *Quick Response codes* – QR), komunikacija med napravami (ang. *machine-to-machine communication* – M2M communication) [150], internetni protokoli (ang. *Internet Protocol* – IP), semantična integracija podatkov, agentske tehnologije itd., glej Sliko 3.3.

Slika 3.3. Omogočitvene tehnologije Interneta stvari [151]



Radiofrekvenčna identifikacija predstavlja tehnologijo za brezkontaktno samodejno identifikacijo objektov s pomočjo radijskih valov. RFID tehnologija

¹⁰ International Telecommunication Union - ITU - T Y.2060, *Next Generation Networks – Frameworks and functional architecture models – Overview of the Internet of Things*, 2012.

povezuje znanja z različnih področij, kot so: elektromagnetni, telekomunikacije, polprevodna tehnologija, zaščita podatkov in kriptografija, proizvodnja, avtomatizirani sistemi in tudi številne druge povezane panoge [152]. Pri uporabi RFID-tehnologije je omogočena identifikacija različnih objektov (stvari, elementov) oziroma identificirati je možno praktično kar koli, kar je prisotno v fizičnem svetu, ki nas obdaja. Identifikacija z uporabo RFID-tehnologije razumemo kot uporabo RFID-oznake, ki predstavlja elektronsko oznako, ki je nosilec podatkov za identifikacijo, s katerimi se obeležuje objekt, ki ga je treba 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, ki 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 [153].

Brezžične senzorske mreže so se razvile zahvaljujoč naglemu razvoju različnih tehnologij, med katerimi so: tehnologija mikroeletromehanskih 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 mikrokontrolerji zadostne vire, da lahko obdelajo podatke s senzorja; kot tudi komunikacijske in informacijske tehnologije, ki omogočajo pošiljanje podatkov s senzorja drugim brezžičnim senzorskim modulom oziroma glavni upravljalni aplikaciji sistema [154]. 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 [155].

Z razvojem interneta kot globalne računalniške mreže kot 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 čimer se število IP-naslovov večkratno povečuje [156].

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 preproste radio tehnologije, kjer se signali pretvarjajo v ničle in enice, pošiljajo pa se na frekvencah 2.4 GHz in 5 GHz [157].

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 katerim se razume avtonomna komunikacija med stroji, neodvisno od interakcije uporabnika [158].

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 [159]. Komunikacija M2M se v glavnem vrši s paketnim prometom (izmenjavo sporočil) z uporabo protokola IP (IPv4 ali IPv6). Arhitekture, standardi in aplikacije komunikacijske paradigme M2M so opisani v [160].

3.1.1.2 *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 kot tudi za razvoj različnih oblik spletnih storitev. Xu [161] 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 prek IoS v obliki storitev, ki se najemajo po potrebi, namesto da bi jih kupovali kot lastniške programe, ki jih je treba 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 prek strežnika, ki je dostopen prek 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, operacijskih sistemov in strežnikov, 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, temveč 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 prek standardnih industrijskih vmesnikov, kot so storitveno orientirane arhitekture (ang. *Service Oriented Architecture* – SOA) in spletne storitve (ang. *Web Service* – WS).

Po [162] 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 bolj preproste, doslednejše in bolj fleksibilne.

Temeljni pomen SOA je, da se storitve lahko iščejo prek mreže, ki so v času izvajanja dostopne [163]. To omogoča zagon istih storitev v različnih procesih, ne da bi bilo treba 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 katerokoli programsko aplikacijo, ki je dostopna prek mreže, ki pa koristi standardizirani XML-standard za izmenjavo sporočil (ang. *eXtensible Markup Language* – XML). Arhitektura spletnih storitev je opisana v članku [164].

Tehnologijo spletnih storitev poosebljajo storitve same kot primarni gradniki in 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 najpogostejše realizirani skozi UDDI (ang. *Universal Description, Discovery and Integration*).

UDDI predstavlja standard za opis, *on-line* registracijo, objavljanje in dinamično ugotavljanje objavljenih spletnih storitev. XML, SOAP, UDDI in WSDL omogočajo definiranje, pakiranje, pristopanje in obdelavo podatkov in tudi izvrševanje programa prek interneta, ne glede na posamezne implementirane tehnologije, s čimer se zagotavlja interoperabilnost med entitetami informacijskih sistemov [165].

Tehnologija spletnih storitev v domeni proizvodnih sistemov je prikazana v nekaterih delih. Storitvena komunikacijska arhitektura za avtomatizirano integracijo obdelovalnih strojev je prikazana v delu [166]. V delu [167] tehnologija spletnih storitev podpira izmenjavo podatkov in znanja v fazi razvoja izdelka. Estrem v delu [168] 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 večagentskih sistemov je imela poudarek v delih [169, 170].

3.1.2 Socialne mreže

Termin »socialne mreže« (ang. *Social Networks* – SN) je prvi opredelil Barnes v delu [171], in sicer kot:

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

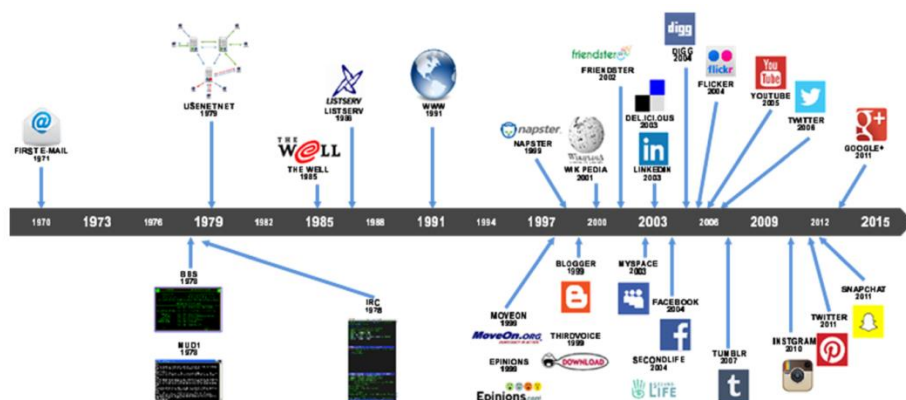
Tudi socialna mreža se lahko definira kot socialna struktura, ki jo sestavljajo množice socialnih akterjev (oseb ali organizacij). Ko računalniška mreža ali omrežje povezuje ljudi ali organizacije, govorimo o socialnem omrežju [172].

Socialne mreže so v svetu interneta (t. i. *spletne socialne mreže*) eden od najpogostejših medijev, ki omogočajo realizacije različnih sodelujočih strategij. 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 [173, 174], glej Sliko 3.4.

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.

Slika 3.4. Evolucija socialnih medijev in mrež [174]



Skozi socialne mreže lahko ljudje delijo svoj status in razpoloženje svojim prijateljem po svetu in kadar koli s samo enim klikom. Uporabniki socialnih mrež uporabljajo sporočila, slike, video in spletne strani, da delijo različne vsebine. Danes je mogoče dostopati do socialnih mrež prek osebnih računalnikov, pametnih telefonov in tabličnih računalnikov. Torej, če so lahko pametne naprave vključene v socialne mreže, lahko tudi one pošiljajo različna sporočila na socialne mreže kot ljudje. Popolnoma jasno je, da je internet stvari lahko dobro povezan s socialnim omrežjem.

Kingsley v delu [175] 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 [176-179].

3.1.3 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 vzporedni komunikaciji (po standardu IEEE488).

Danes se veliko uporabljajo standardi *Fieldbus* kot hrbtenica distribuiranega sistema ter *Ethernet*, kot naslednik *Fieldbusa*. 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. 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, operatorskih 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, medtem ko 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 zunanje naprave (Bluetooth, ZigBee, RFID ipd.), 2) brezžična razširitev ožičenega omrežja (IEEE 802.11x – WiFi) [180] 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 [150]. Komunikacijo M2M razumemo kot vsakršno komunikacijo med napravami, ki so med seboj žično ali brezžično povezane. Ta komunikacija podpira sodelovalne odločitve brez človekovega posredovanja [181]. Pomembnost komunikacije M2M v proizvodni domeni je poudarjena v delih [182-184].

3.1.4 Računalniški oblak

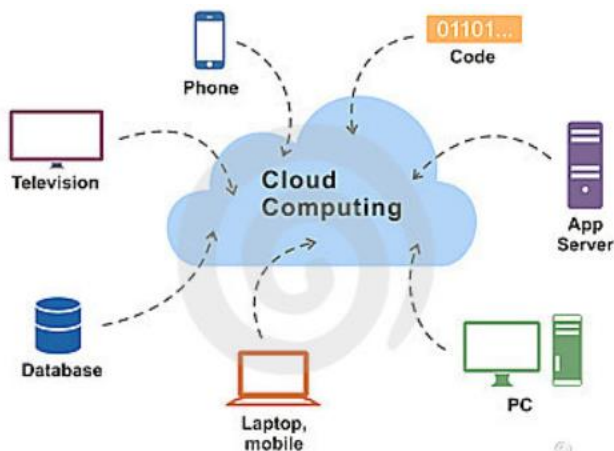
Računalniški oblaki so nova tehnologija, ki je konceptualno že davno domišljena, vendar prihaja v širšo rabo šele v zadnjih letih [185], Slika 3.5. Kolaboracija, IoT in »računalniški oblak« (ang. *Cloud Computing* – CC) so pri avtorjih [186] spoznani kot ključni členi, ki bodo omogočili razvoj novih oblik podjetij po svetu.

Velika večina raziskovalcev, med drugim [187], 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*).

Slika 3.5. Računalniški oblak [188]



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 se

zahteve naročnikov [189]. Sistem proizvodnje, zasnovane na oblaku, izvajajo trije ključni akterji: ponudniki storitev, operater oblaka in uporabniki storitev [189].

Osnovna lastnost proizvodjanja 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 [98].

Referenčna arhitektura računalniškega oblaka in proizvodnega sistema, temelječega na proizvodnji v oblaku, je prikazana v [161], decentralizirana mrežna arhitektura za proizvodnjo zasnovano na oblaku je podana v [190], medtem ko so možnosti rabe med ostalimi obravnavane v delih [191, 192].

3.2 Agenti in večagentni sistemi

Za implementacijo naprednih konceptov distribuiranih proizvodnih sistemov predstavljajo agenti in večagentni sistemi najbolj naraven 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 [193], objektno programiranje [194] in človek–računalnik vmesnik (ang. *Human Computer Interface* – HCI) [195]. V 90. letih prejšnjega stoletja je prišlo do integracije navedenih disciplin, s ciljem, da bi se ustvarilo temeljni elementi za razvoj agentskih tehnologij [196]. Danes obstaja ne malo število definicij, ki opisujejo agente in agentske strukture.

V nadaljevanju so prikazane najpogostejše citirane definicije agentov:

»... *agent je računalniški (ali pogostejše programski) sistem, ki zadovoljuje naslednje pogoje*, [197]:

- *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, kibernetsko 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, temveč so v stanju, da demonstrirajo vedenje, inicirano s predhodno determiniranim ciljem.

V delu [198] avtorja definirata agenta kot:

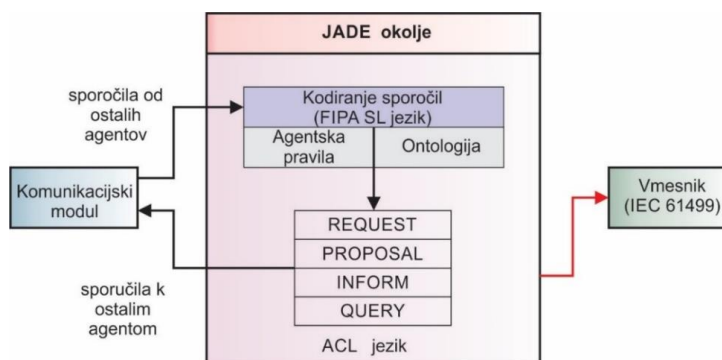
»... so programske entitete, ki izvršujejo določeno množico operacij v korist uporabnikov ali drugega programa z določeno stopnjo neodvisnosti, za kar uporabljajo določeno znanje ali reprezentacijo uporabnikovih želja ali ciljev. Vsakega agenta torej karakterizirajo njegova avtonomija in inteligenca.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

V članku [199] 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 [199].

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

Generična struktura agenta v JADE okolju je prikazana na Sliki 3.6.

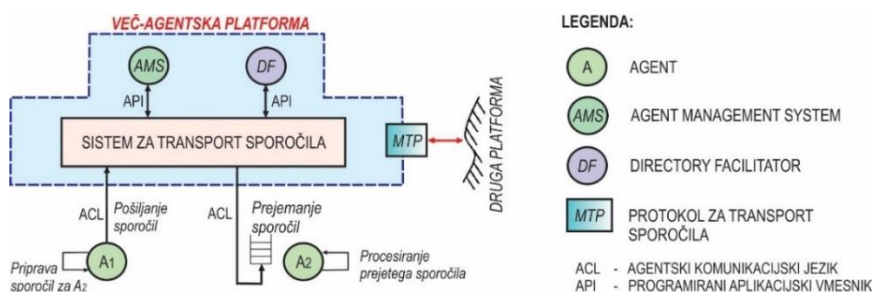
Slika 3.6. Generična struktura agenta [197]



Agentje potrebujejo programsko okolje, znotraj katerega bodo oblikovani in znotraj katerega bodo realizirali naloge, kot tudi storitve, ki jih bodo agentje koristili za pristop do virov, bodisi za uresničitev kompleksnih algoritmov [200]. Do danes je bilo razvito veliko število agentskih okolij, izmed katerih so najbolj značilna agentska okolja JAF (ang. *Java Agent Framework*), JAT (ang. *Java Agent Template*) in JADE (ang. *Java Agent DEvelopment framework*) [201]. Sodelovanje med heterogenimi agentskimi okolji definirajo standardi, priloženi s strani neprofitne organizacije FIPA¹¹ [202].

Agentsko okolje omogoča izmenjavo sporočil med agenti, mobilnost agentov in zaščito agenta pred nezaželenimi učinki (neavtoriziran pristop do agentov in servisov, zaščita pred virusnimi agenti ipd.). To pomeni, da agenti ne komunicirajo neposredno, ampak se sporočila pošiljajo do agentskega okolja. Agentsko okolje vsebuje mehanizme za iskanje ustreznega agenta, glej Sliko 3.7.

Slika 3.7. Medagentska komunikacija po FIPA-standardu [197]



Agent deluje v okolju, ki vključuje tudi druge agente. Takšna skupnost interaktivnih agentov kot celota, deluje kot večagentski sistem (ang. *Multi-Agent System* – MAS) [197]. MAS je oblikovan kot mreža agentov, ki vstopajo v interakcije in medsebojno komunicirajo, ter se lahko na podlagi tega razumejo kot sistemi, ki so hkrati asinhroni, stohastični in distribuirani. Za uresničitev večagentskih sistemov je potrebna prisotnost večagentske platforme (ang. *Multi-Agent Platform* – MAP) v agentskem okolju kot infrastruktura za implementacijo MAS. Primer takšne platforme je JADE-platforma.

Agenti v večagentnem sistemu se lahko prek svojega protokola za transport sporočila MTP (ang. *Message Transport Protocol* – MTP) povezujejo z bazo

¹¹ FIPA – Foundation for Intelligent Physical Agents

podatkov in znanja (D&K bazo) na temeljih DKBP-protokola (ang. *Data & Knowledge Base Protocol* – DKBP).

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

Po [203] 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 sistemov.

V projektu holonskih proizvodnih sistemov [204] je Christensen predstavil način povezovanja funkcijskih blokov, ki so izvedeni v soglasju s standardom IEC 61499 in opravljajo funkcijo krmiljenja na najnižjem nivoju, z večagentskim tehnologijami, ki jih definira FIPA-standard, ki opravljajo koordinacijske in sodelujoče funkcije.

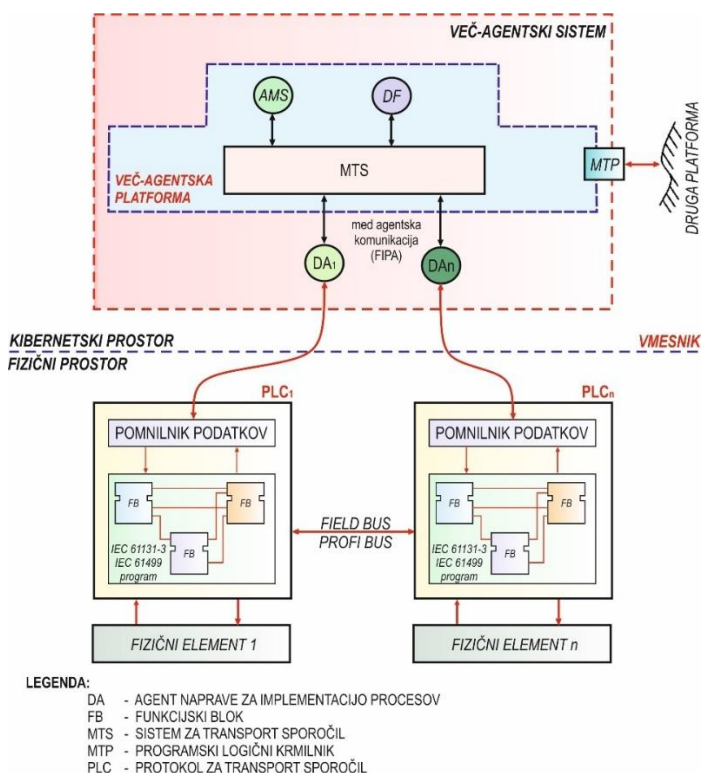
Povezovanje večagentnega sistema s standardnim komunikacijskim funkcijskim blokom dvosmernega podatkovnega prenosa *CLIENT/SERVER*, ki temelji na komunikacijskem protokolu UDP (ang. *User Datagram Protocol*), omogoča dvosmerno komunikacijo v realnem času med operativnimi in izvršnimi funkcijami delovnega sistema. To pomeni, da bodo proizvodni parametri uporabljeni v realnem času v adaptivnem procesu odločanja, kar zagotavlja obratovanje strojev v optimalnih mejah. Povezovanje agentov s PLC je prikazano na Sliki 3.8.

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 [205].

Shaw [206] 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 [207].

Parunak, Baker in Clark [208] 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.

Slika 3.8. Kombinacija agentov z IEC 61131-3 / 61499 programa PLC, predelano po [170]



Shen in soavtorji podajajo v delu [209] 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 [169, 170]. Nekateri primeri in opisi hevrističnih algoritmov so podani v delu [210].

Razvoj arhitektur industrijskih MAS in njihova potencialna implementacija sta predstavljena v delih [211, 212]. Uporaba agentskih tehnologij na področju industrijskih sistemov je obravnavana v delih [213-215].

4 OSNOVE ZA MODELIRANJE NAPREDNIH PROIZVODNIH SISTEMOV

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

Miguel de Cervantes

Primarni namen modeliranja je definiranje modelov proizvodnih sistemov, ki so neobhodni za optimizacijo, simulacijo, revitalizacijo, upravljanje in krmiljenje procesov in sistemov.

Na podlagi standarda ISO-15704¹² je model definiran kot abstraktna predstavitev realnosti, ki prikazuje določen pogled na opazovani problem v iskanju odgovora na postavljena vprašanja.

Zaletelj v svojem doktorskem delu [216] definira model proizvodnega sistema kot:

»... predstavitev strukture, aktivnosti, procesov, informacij, resursov, ljudi, obnašanja, ciljev in omejitev, povezav, politik in povezanih proizvodnih sistemov. Vloga modela proizvodnega sistema je doseči modelno vodeno načrtovanje, eksperimentiranje, analizo in operiranje realnega proizvodnega sistema«.

Zaletelj nadalje navaja, da je modeliranje logični korak v procesu razvoja proizvodnih sistemov s ciljem uspešnega operativnega delovanja. Model proizvodnega sistema pomaga razumeti in predstaviti kompleksno strukturo in

¹² Organization for Standardization, „ISO-15704: Industrial automation systems – Requirements for enterprise-reference architectures and methodologies“, Geneva, 2000

dinamiko opazovanega sistema ter s tem omogoči izvedbo optimizacije, adaptacije in krmiljenja.

Pri reševanju kompleksnih problemov v proizvodnih sistemih je za celovito obravnavo treba razviti hkrati več različnih modelov. Različne soodvisnosti, ki se pri tem pojavijo, zahtevajo stabilno in sistematično okolje, sposobno ponuditi orodja za integracijo modelov, hrambo in izmenjavo podatkov ter aktivno medsebojno sodelovanje med razvijalci.

Za podporo operativnemu delovanju mrežnih proizvodnih struktur je potrebna jasna predstavitev znanj in konceptov. Velika raznolikost gradnikov mreže in njihovih ekspertov zahteva zmanjšanje nedoločenosti ter povečanje razumevanja in natančnosti v medsebojni komunikaciji. To pomeni, da je potrebna ustrezna ontologija.

4.1. Temeljne ontologije v modeliranju naprednih proizvodnih sistemov

Ontologija je termin, prevzet iz filozofije. V filozofiji termin »*ontologija*« označuje vejo metafizike, ki se ukvarja z bistvom bitja in to v smislu širine njegove vsebine. Iz informacijskih znanosti se ontologija definira kot način predstavljanja znanja (ideja, stvari, dejstev ...) na način, ki definira odnose in klasifikacije konceptov v določeni domeni znanja [217].

Ontologija nudi nedvoumne definicije pojmov, ki se lahko koristijo pri tako programskih sistemih kot tudi za uporabnike programov. Skupno razumevanje strukture informacij med ljudmi in programski agenti je eden od najpogostejših ciljev pri razvoju ontologije [218, 219]. Po Gruberju ontologija predstavlja eksplicitno specifikacijo konceptualizacije.

V članku [220] je ontologija definirana kot formalna specifikacija deljene konceptualizacije določene domene za skupino uporabnikov.

Danes v namen definiranja in razumevanja ontologije obstajajo številna stališča. V fazi reševanja težav slabe komunikacije, interoperabilnosti, izmenjave informacij ter njihove vnovične uporabe je pomembno stališče, da ontologije lahko integrirajo modele različnih domen v koherentni okvir [221]. To je še posebej pomembno v distribuiranem okolju, v katerem imajo vozlišča različne vidike na isti sistem, in sicer kot posledica različnih kontekstov.

Pomen ontologije v omogočanju interoperabilnosti med heterogenimi viri, kot tudi nudenju podpore v kreiranju skupnih odgovorov pri uporabi znanja med različnimi domenami je izpostavljen v delih [222, 223].

Na področju proizvodnje imajo ontologije različne pomene. Danes obstajajo različni pristopi, ki opisujejo proizvodne ontologije iz različnih konceptualnih pogledov, kot je prikazano v literaturi [224] in [225]. Ramos v članku [226], ter Zdravković in Trajanović v članku [227] uveljavljajo potrebe integracije ontoloških pristopov v smislu proizvodov, procesov in virov. Bock in sodelavci v članku [228] integrirajo ontološke tehnike in tehnike, zasnovane na modelu za kolaborativno oblikovanje.

V domeni modeliranja podjetja in organizacija se uveljavljajo ontologije: »Enterprise Ontology«, opisana v delu [229], in TOVE, opisan v delu [230]. Ti ontologiji dajeta osnovne definicije z možnostjo, da se do končne informacije pride z uporabo logike prve vrste.

V članku [231] je definirana ADACOR ontologija [95], ki temelji na DOLCE temeljni ontologiji [232], s ciljem, da bi definirala ontologije na nivoju proizvodnih pogonov. Takšna ontologija je utemeljena na paradigmi holonskih proizvodnih sistemov, kjer avtonomni in povezani holoni predstavljajo proizvodne komponente kot logične entitete.

Za ontologije proizvodnih verig je danes na voljo mnogo opisov, začnši od tistih, ki so podani v delu [233]. Petnga in Austin v članku [234] predlagata nov pristop ontologijam, zasnovanim na znanju za kibernetско-fizične sisteme in okvir za podporo odločanja v razvoju različnih modelov kibernetско-fizičnih sistemov.

V članku [235] Garrett in sodelavci predlagajo definicijo strukturnih entitet proizvodnih sistemov, razporejenih v tri sloje različnih vidikov, kot so fizični, tehnološki in kontrolni. Na temelju tega ontološko integracijo kontrolnih arhitektur s tehnologijami spletnih storitev, ki omogoča preprosto konfiguracijo in rekonfiguracijo kontrole proizvodnih sistemov, predlagajo avtorji v članku [235].

Temeljne ontološke definicije naprednih proizvodnih sistemov so opisane v delu [236]. Zaletelj in soavtorji so v delu [236] predstavili ontološki modelirni okvir za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov.

Temeljna ontologija je zelo pomembna tako za konsistenten razvoj modelov kot tudi za razumevanje problematike komunikacije med različnimi elementi naprednih proizvodnih sistemov.

V nadaljevanju tega znanstvenega dela bodo povzete temeljne ontološke definicije entitet proizvodnega sistema, ki so definirane v delu [236] (kot so aktivnost, operacija, naloga, delovni nalog ipd.), in na tej osnovi bo razširjen ontološki pristop k modeliranju naprednih proizvodnih sistemov, kot so KFPS, v domeni upravljanja in krmiljenja takšnih sistemov. Na ta način bo razvito okolje, v katerem bo mogoč kibernetiski pristop k načrtovanju, strukturiranju, operiranju, upravljanju, vodenju in krmiljenju proizvodnje v KFPS.

Pri reševanju kompleksnih problemov v proizvodnih sistemih je za celovito obravnavo treba razviti hkrati več različnih modelov. Različne soodvisnosti, ki se pri tem pojavijo, zahtevajo stabilno in sistematično okolje, sposobno ponuditi orodja za integracijo modelov, hrambo in izmenjavo podatkov ter aktivno medsebojno sodelovanje med razvijalci.

4.1.1 Modelirni okvir za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov

Stabilno in sistematično okolje za razvoj modelov proizvodnih sistemov je mogoče označiti kot modelirni okvir. Modelirni okvir [237] predstavlja abstraktno kategorijo, ki opredeljuje koncepte, logiko ter gradnike za obravnavo izbranega domenskega področja. Okvir povezuje proizvodni sistem z okoljem ter omogoča sistematičnost obravnave in obvladovanja sistema.

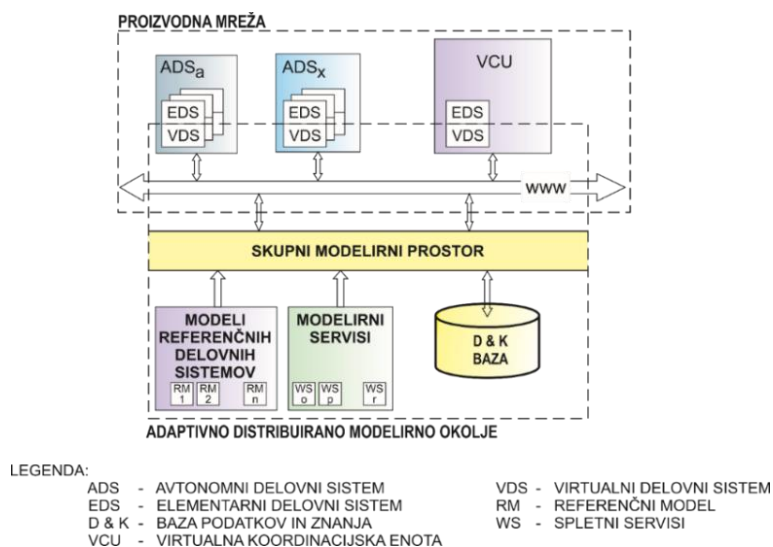
V literaturi zasledimo širok nabor modelirnih okvirjev, kot so Zachman [238], GERAM [239], ARIS, CIMOSA, PERA, ADMO ipd. V nadaljevanju so na kratko povzete osnovne značilnosti modelirnih okvirjev GERAM in ADMO, ki jih bomo potrebovali v nadaljevanju tega znanstvenega dela.

Modelirni okvir GERAM (ang. *Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology*) [239] vključuje metode, modele ter orodja, potrebna za izgradnjo in vzdrževanje proizvodnega sistema ali mrežnega proizvodnega sistema skozi njegovo celotno zgodovino. Najpomembnejšo komponento GERAM okvirja predstavlja GERA (ang. *Generalized Enterprise Reference Architecture*), ki identificira osnovne komponente, uporabljene v procesih inženiringa in integracije proizvodnih sistemov. Kot generična referenčna arhitektura definira: 1) tri osnovne kategorije konceptov: procesne, tehnološke in človeško orientirane koncepte in 2) tri dimenzije, namenjene kategorizaciji vsebine in obsega različnih modelov podjetja, kot so dimenzija življenjskega cikla, ki zagotavlja nadzorovan proces modeliranja v skladu z aktivnostmi življenjskega cikla; dimenzija generičnosti, ki zagotavlja kontrolirano delitev

modelov; in dimenzija pogleda, ki zagotavlja kontrolirano vizualizacijo specifičnega pogleda na entiteto. GERA definira šest tipov aktivnosti oz. faz, in sicer [240]: fazo identifikacije, konceptualno fazo, fazo definiranja zahtev, fazo načrtovanja, fazo delovanja (oz. operativno fazo) ter fazo razgradnje.

Adaptivni distribuirani modelirni okvir (ADMO) je celotno okolje za razvoj in podporo adaptivnih distribuiranih proizvodnih sistemov [237, 241]. Struktura ADMO je predstavljena na Sliki 4.1.

Slika 4.1. Struktura ADMO-okvirja [241]



Struktura ADMO je izgrajena iz dveh delov: 1) notranji del, ki je sestavljen iz skupnega modelirnega prostora, ki je namenjen kolaborativnemu načrtovanju proizvodnih sistemov, modelov parcialnih in referenčnih delovnih sistemov, različnih modelirnih servisov ter skupne baze podatkov in znanja, 2) zunanji del, ki ga sestavlja mreža proizvodnih sistemov oz. avtonomnih delovnih sistemov in koordinacijskih enot, ki so prek VDS [109] zastopani v adaptivnem distribuiranem modelirnem okolju, glej Sliko 4.1.

ADMO zagotavlja sistematične in metodološko vodene korake načrtovanja proizvodnih sistemov, ki vključujejo različne metode za identifikacijo, načrtovanje, simulacijo, analizo in krmiljenje [241].

Na temelju lastnosti naprednih proizvodnih sistemov, kot je porazdeljenost, izhaja potreba po modeliranju takšnih sistemov neodvisno od njihove lokacije in časovne

distance. Poleg tega je treba vedeti, da se model proizvodnega sistema s časom dinamično spreminja, zato je neizogibno treba vzdrževati doslednost modela med njegovim celotnim življenjskim ciklom.

V distribuiranem (porazdeljenem) okolju, kakršno je tudi skupni kolaborativni prostor, v konstruiranju modela sodeluje večje število strokovnjakov z različnih področij. Vzporedno s tem mora biti modelirno okolje neodvisno od modelirnih metodologij. Da bi se to doseglo, je treba oblikovati temeljne ontološke koncepte s pravili za njihovo razširitev, kar omogoča razvoj okolja, v katerem bi se model razvijal in bil vseskozi dosleden.

Izhajajoči iz dela [236] je v nadaljevanju predstavljen pristop, pri katerem formalne definicije modelirnega okolja omogočajo definiranje elementov modela naprednih proizvodnih sistemov. Takšen pristop je zasnovan na načelih temeljnih ontologij, ki omogočajo formulacijo specifične domene modeliranja.

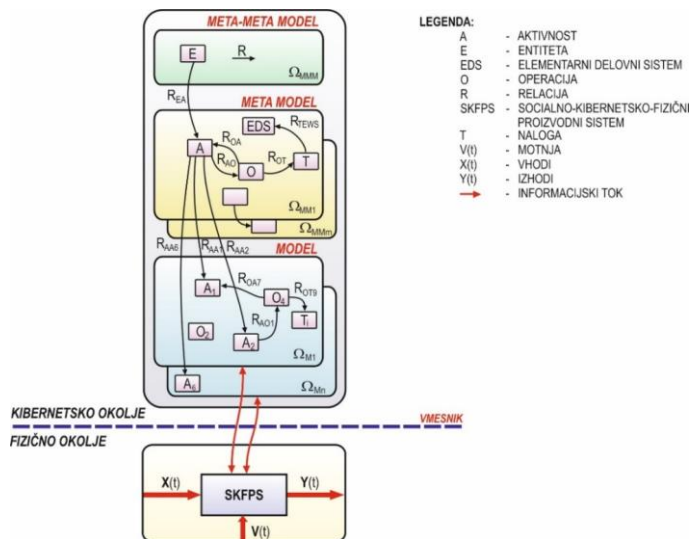
Napredni proizvodni sistemi predstavljajo kompleksne sisteme, ki se jih na splošno ne da matematično opisati. Takšno modeliranje je kreativni postopek, pri katerem model nastaja iz interakcije strokovnjakov z različnih področij.

Na temelju pregleda literature je razvidno, da je model proizvodnega sistema njegova abstraktna predstavitev. Namen modela je, da omogoči formalni opis modelirnega sistema, ki se lahko uporablja za iskanje odgovorov na zastavljena vprašanja o proizvodnem sistemu. Vendar pa model sam po sebi ni zadosten, da bi opisal sistem nedvoumno, ker gre za potrebo, da opiše samega sebe.

Na Sliki 4.2 je prikazan način povezovanja proizvodnega sistema iz fizičnega okolja s trinivojskim digitalnim okolju, v katerem obstajajo modeli, metamodeli in metametamodeli.

Če ontologija zagotavlja sredstva za opis modela, pomeni, da je takšna ontologija metamodel, model modela, ki opisuje model v višjih slojih. Pri tej implikaciji je govora, da je MM prav tako M, tako kot obstaja tudi rekurzivni odnos med sloji modeliranja. MM je opisan s strani MM in tako naprej. Ta pristop ni mogoč, ker dopušča neskončno število meta slojev. Z vidika prikazanega pristopa k modeliranju proizvodnih sistemov v doktorskem delu Zaletelja [241] in doktorskem delu Žapčevića [46] so dovolj trije sloji, to so: sloj modela, sloj metamodela in sloj metametamodela, kot je prikazano na Sliki 4.2.

Slika 4.2. Ontološki modelirni okvir za podporo modeliranju naprednih proizvodnih sistemov [241]



MMM zagotavlja sredstva za lastni opis, zato mora biti zasnovan na osnovi aksioma. V tem primeru temeljna ontologija predstavlja MMM oziroma ontologije, na podlagi katerih se lahko gradijo druge ontologije. Takšen pristop k modeliranju naprednih proizvodnih sistemov, zasnovan na temeljnih ontologijah, najde svojo oporo v delu [242] in Peklenikovi definiciji elementov proizvodnega sistema [36].

Model Ω_M je definiran kot trojček, enačba (4.1). Množica entitet in relacij modelov je predstavljena z φ_M , enačba (4.2). Entitete in relacije so osnovni gradivni bloki modelov. Medtem ko entitete opisujejo posamezne sestavne dele modeliranega sistema, relacije pa opisujejo veze med entitetami ali drugimi relacijami. Torej, element interkonekcije je implicitno definiran z relacijami. Funkcija μ_M entitet in relacij modelov je mapirana v enem izmed metamodelov, enačba (4.4).

Metamodel Ω_{MM} je podan za omogočanje podrobnega razumevanja modelov, enačba (4.3). Metamodel je sam model, saj podaja podrobnejše razumevanje modelov oziroma je to ontologija za svojevrstna področja modeliranja. Kodiran je na posebni jezik domene. MM je definiran rekurzivno, enačba (4.3), na enak način kot model v skladu z enačbo (4.5), enačbo (4.6) in enačbo (4.7) v Preglednici 4.1. Nudi sloj, kjer se lahko oblikujejo definicije ontologije iz specifičnega področja ali domene.

Preglednica 4.1: Definicije modela [241]

$\Omega_M = (\phi_M, \Omega_{MM}, \mu_M)$	(4.1)
$\phi_M = \{E_M, R_M\}$	(4.2)
$\Omega_{MM} = (\phi_{MM}, \Omega_{MMM}, \mu_{MM})$	(4.3)
$\mu_M: \phi_M \rightarrow \phi_{MM}$	(4.4)
$\phi_{MM} = \{E_{MM}, R_{MM}\}$	(4.5)
$\Omega_{MMM} = (\phi_{MMM}, \Omega_{MMM}, 1_{MMM})$	(4.6)
$\mu_{MM}: \phi_{MM} \rightarrow \phi_{MMM}$	(4.7)
$\phi_{MMM} = \{E_{MMM}, R_{MMM}\}$	(4.8)

Metametamodel Ω_{MM} , enačba (4.6), je hkrati metamodel obeh metamodelov in samega sebe. Drugi narekuje, da se funkcija identitet 1_{MMM} odraža na metametamodel entitet in njihov odnos, enačba (4.8). Interpretacija navedenega je, da elementi metametamodela, predstavljajo sami sebe. To je možno samo, če je njihov opis zasnovan na temeljnih aksiomih, kot je npr. matematika.

Na podlagi Slike 4.2 je razvidno, da je skupni modelirni prostor sestavljen iz treh nivojev, nivoja M, prek MM do MMM. Zadnji nivo predstavlja MMM nivo, ki opredeljuje temeljne koncepte in ontologijo modelnega prostora, v katerem predstavljamo entitete obravnavanega proizvodnega sistema. Model ne more popolnoma zajeti vseh podrobnosti pravega sistema, vseeno pa mora ostati v stanju, da nudi vpogled v obnašanje modeliranega sistema. Model bo predstavljal sistem, če bo obstajal število vprašanj o sistemu, na katera je model sposoben odgovoriti. Relacije med proizvodnimi sistemi in njihovimi modeli so definirani v Preglednici 4.2.

Po enačbi je (4.9) proizvodni sistem S množica elementov EL iz dejanskega sveta, glej Sliko 4.2. Element je lahko bodisi entiteta, bodisi odnos enačba (4.10). Odgovorna funkcija mapira množico entiteta, množico relacij, kot tudi set vprašanj Q , na množico odgovorov A , glej enačbo (4.11). Model Ω_M predstavlja sistem, zgolj če obstaja, princip zamenljivosti, enačba (4.12), ki pravi da za vsako vprašanje tega nabora model odgovarja z enakim odgovorom, kot bi ga podal sistem S ob enakem vprašanju. Trislojni pristop nudi več modelov in metamodelov istega sistema, kot je prikazano na Sliki 4.2.

Preglednica 4.2: Relacij proizvodni sistem–model [241]

$S = EL = \{el_1, el_2, \dots, el_n\} = E_S \cup R_S$	(4.9)
$el_i \in EL \rightarrow el_i \in E_S \vee el_i \in R_S$	(4.10)
$\alpha: (E \times R \times Quest) \rightarrow Ans$	(4.11)
$\Omega_M \text{represents } S$	(4.12)
$\rightarrow$	
$\leftrightarrow \exists Q: \exists \alpha_M(E_M, R_M, Quest)$	
$\wedge \exists \alpha_S(E_S, R_S, Quest)$	

Predhodno je rečeno, da so entitete in relacije osnovni gradivni bloki ontologij. Entitete zajemajo koncepte domen, medtem ko relacije opisujejo veze med njimi. Definicije entitet in relacij, definirane v doktorski disertaciji Zaletelja, so prikazane v Preglednici 4.3.

Preglednica 4.3: Definicije entitet in relacij [241]

$E = (ID, ST, Z^*, ME, LO)$	(4.13)
$ST = (\Omega_{STR}, X, U, V, Y, STD, t, VER)$	(4.14)
$STD_i = (STA_{STD}, TR_{STD})$	(4.15)
$VER = (ver, E_i)$	(4.16)
$ME = \{me_1, me_2, \dots, me_m\}$	(4.17)
$LO = (RU, CO)$	(4.18)
$R = (ID, (EL_i, EL_j), E_{DE}, C, R^{-1})$	(4.19)

Po enačbi (4.13) entitet E opisuje pet strukturnih elementov, kjer ID opredeljuje enolično identifikacijo gradnika znotraj skupnega kolaborativnega modelnega prostora. ST predstavlja informacijo o stanju sistemov, enačba (4.14), Z^* želene cilje, ME metode, enačba (4.17), in LO logiko, enačba (4.18), obnašanja gradnika. Stanje sistema, po enačbi (4.14), predstavljajo elementi: struktura gradnika, njegovi vhodi, izhodi, krmilni parametri, naključne motnje, diskretna prostorna stanja, enačba (4.15), časovna dimenzija in verzivnost.

Zaletelj v svojem doktorskem delu ugotavlja, da je ena izmed pomembnejših karakteristik modelov njihova nestacionarnost v času. Da bi nestacionarnosti gradnikov modela lahko beležili, jim moramo dodati časovno komponento t . Ta zagotavlja obvladovanje strukturnih in vrednostnih sprememb v modelu, ki so povzročene kot del procesa izgradnje oz. optimizacije modela. Tudi nestacionarnost obnašanja objekta krmiljenja se lahko pojavi, če neka naključna sprememba vpliva na obnašanje izbranega gradnika E . Nadalje, časovna

problematika je vezana na veljavnost gradnika modela, ki je lahko v določenih obdobjih zaradi razvoja oziroma zastarelosti začasno označen kot neaktivni element modela. V tak namen je uveden pojem verzivnosti VER , enačba (4.16). Pojem relacij med dvema elementoma grafa EL_i in EL_j je definiran skozi enačbo (4.19).

Opisana ontologija služi kot osnova za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov. Da bi bilo to mogoče, mora biti ontologija prisotna v modelirnem okolju, v katerem se lahko gradi tako model kot tudi metamodel oziroma ontologija s specifičnega področja, kot je proizvodnja. Glede na to, da se lahko model obravnava kot svojevrstni primer ontološkega koncepta, mora biti vzdrževanje modela mora obravnavano, ne zgolj z vidika modela, ampak tudi s strani metamodela in ontologije [241].

Vzdrževanje modela proizvodnega sistema zajema pet področij, in sicer: razširitev modela, identifikacija, upravljanje z življenjskim ciklom modela, verzivnost modela in ohranitev konsistentnosti (doslednosti) modela [241].

Razširitev modela se nanaša na ustvarjanje novih elementov, tako modela, kot tudi njegovega metamodela. Vse entitete in odnosi metamodela morajo biti v skladu z entitetami in relacijami metamodela, kot je opisano v enačbah (4.13) in (4.19). Kako se bo model razširil, odloča oblikovalec modela. Smisel in pravila za to razširitev morajo biti določena z relacijami med osnovnim in na novo oblikovanim elementom. Temeljna ontologija je torej za tovrstne razširitve modela odprta. Oblikovalec metamodela lahko izbere, na primer, ali bo uporabil objektno usmerjeno predstavitev razširitve ali bo definiral popolnoma drugačni razširitveni mehanizem [241].

Pri razširitvi osnovnih ontoloških elementov je potrebnih nekaj korakov: 1) navedene morajo biti meje opazovanega sistema elementov, 2) omogočeno definiranje strukture elementov (vhodi, izhodi in cilji), 3) mehanizem za razširjanje mora biti določen v obliki relacij med osnovno entiteto in enega razširjenega modela, 4) relacije proti obstoječim elementom morajo biti identificirane in navedene.

Pri razširitvi elementov od metamodela do modelirnega sloja gre običajno za instanco. Preostale relacije med elementi teh slojev so mogoče, vendar jih mora definirati oblikovalec modelov.

Identifikacija se nanaša na edinstveno identifikacijo (ID) elementov. Temeljna ontologija definira strukturne elemente ID , v enačbah (4.13) in (4.19), ki

edinstveno identificira element v obsegu modelirnega okvirja. Da bi se konsistentnost vzdrževala, mora *ID* ostati enak, ne zgolj med obstojem modela, ampak tudi med obstojem modelirnega okvirja. To preprečuje kakršne koli zaplete med elementi različnih modelov, ki se lahko pojavijo v okolju, v katerem je prisotnih več uporabnikov, kjer lahko oblikovalci potencialno uporabljajo isti naziv za različne stvari. Na primer definicije proizvodnih terminov, kot so operacije, naloge in aktivnosti, so različne v različnih poddomenah. Pri upravljanju s projekti je naloga aktivnost, nameščena v času. Pri proizvodnem planiranju je z druge strani naloga operacija nameščena v času in operacija je aktivnost z izrazito dolgo živostjo. Oblikovalci velikokrat želijo zadržati entitete tako, da definirajo te pojme v ločenih metamodelih, dokler jih v relacijah še nadalje povezujejo. Pri takšnem odnosu bi se lahko reklo, da je entiteta definirana v enem metamodelu ali pa delno definirana v drugem. Na osnovi tega je identifikacija zelo pomembna pri vzdrževanju konsistentnosti modela, kjer se na osnovi edinstvene identifikacije elementov znotraj modelirnega okolja zagotavlja nedvoumnost in skladnost med pomenom elementov različnih modelov [241].

Upravljanje z življenjskim ciklom se nanaša na uporabo modela in njegove elemente skozi njegov obstoj. Življenjski cikel modeliranih elementov je definiran kot del entitet v obliki diagrama spremembe stanja *STD*, enačba (4.15). Logika entitet *LO*, enačba (4.18), nato definira pravila in/ali omejitve v prehodih. Življenjski cikel mora biti definiran za vse elemente modela. Njegova definicija mora vključevati najmanj tri stanja: 1) pred-operativno stanje, 2) operativno stanje, in 3) pooperativno stanje [241].

Predoperativno stanje je lahko razdeljeno v identifikacijo, oblikovanje, simulacijo itd., vključujoč vsa predoperativna stanja. Med operativnim stanjem je element aktiven v interakciji z drugimi elementi modela. Po operaciji, kara je na primer element zamenjan z drugim elementom, ta preide v pooperativno stanje. V tem stanju je izključen, vendar ni izbrisan. Preostali diagrami prehodnega stanja entitet morajo biti definirani v odnosu do življenjskega cikla. To je zato, ker se elementi v različnih dobah življenjskega cikla različno obnašajo, npr. kadar modeliramo proizvodni stroj, je mogoče definirati stanja, kot so izključen, miruje in obratuje. Vendar pa ta stanja skozi zgodnje faze življenjskega cikla niso popolnoma funkcionalna, npr. med analizami zahtev. To kaže na to, da se lahko elementi skozi simulacijo drugače vedejo kot skozi potek dejanskega dela ali izvajanja svojih aktivnosti [241].

Verzivnost se nanaša na edinstvene identifikacije strukturnega stanja elementov, kot so spremembe v času. Je prisotna tako v modelih in metamodelih kot tudi entiteti in relacijah. Relacij so verzirane skozi njihove opisne entitete. Verzija *VER* je par, ki je sestavljen iz števila verzij *ver* in referentne vrednosti za instanco entitete E_i , enačba (4.16). Verzija je tesno povezana s časovno komponento t , ki je po enačbi (4.14) del stanja entitet. Na metamodelirnem nivoju se lahko nadzoruje spremembe v strukturi elementov, in sicer skozi vpogled v preteklost konceptualne dinamike, ki je ujeta v ontologiji. V nadaljevanju je na primeru prikazano načelo verzivnosti. Najprej je treba narediti metamodel elementa z njegovim številom verzij, ki pa niso tako zanesljive kot začetne verzije. Element je na modelirnem nivoju nekajkrat sprožen, ker se nekaj simulacij izvrši istočasno. Čeprav so vsi elementi v vezi z metamodelom elementov sproženi, ima vsak od njih svojo oznako verzije. Na ta način je omogočena izdelava samovoljnega števila različnih dobro seznanjenih elementov. Ko je narejena nova verzija metamodela elementov, se stara verzija ne izključuje. Ko postane z vidika uporabe v modelu zastarela, preide v pooperativno stanje življenjskega cikla. To pomeni, da lahko istočasno obstaja več verzij metamodela elementov. Model elementa, ki se nadalje, se nanaša na stari metamodel elementa, prehaja v predoperativno stanje ali se spremeni v novi metamodel elementa. Takšno načelo verzivnosti je drugačen od klasičnih verzivnih sistemov, v katerih je stara verzija sistema izključena iz modela, ter v večini primerov tudi izbrisana. V tem primeru so stare verzije še vedno žive, vendar so neaktivne. S tem se omogoča vzdrževanje konsistentnosti modela v času skozi implicitno vodenje kompatibilnosti [241].

Ohranitev konsistentnosti zahteva širši pristop skozi povezovanje predhodno opisanih elementov, potrebnih za dosleden pristop k vzdrževanju modela. Za ohranitev konsistentnosti je neizogibno kombiniranje razširitve modelov, identifikacije, upravljanja življenjskega cikla in verzivnosti v izogib medsebojnim zapletom. Takšen pristop je v kolaborativni okoljih, kjer je prisotnih več različnih udeležencev ali uporabnikov, izjemno pomemben. V nadaljevanju je predložen koncept k vzdrževanju konsistentnosti z vidika ontologije. O modelu konsistentnosti razpravljajo skozi primere oblikovanja novih elementov, oblikovanja verzij novih elementov in skozi zamenjavo elementa [241].

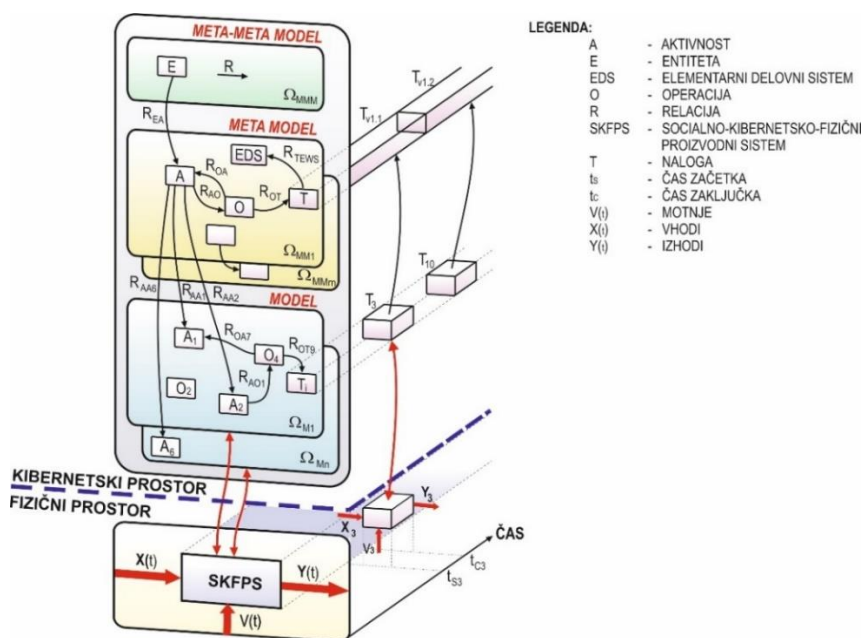
Pri ustvarjanju novega elementa na nivoju modeliranja element lahko podaljša entiteto metamodela ali drugih entitet meta nivoja modeliranja, upoštevajoči pravila za razširitev. Okvir za takšno modeliranje nudi za element edinstveno identifikacijo. Element začne svoj življenjski cikel v predoperativnem stanju. Tu se definirata njegova struktura in veze z drugimi elementi. Element se lahko kadar

koli med postopkom ohrani z naprednim številom verzije. Ko se ohrani, je oblikovalec dolžan urediti sleherne morebitne nedoslednosti, ki izhajajo iz nekorektne veze z drugimi elementi. Primeri elementov so lahko takrat vključeni v model tako, da je vsak izmed njih posamezno identificiran in vezan za metamodel elementa [241].

Pri ustvarjanju nove verzije elementa je kreirana kopija elementa in podano novo število verzije. Na novo ustvarjena kopija je onemogočena in se vstavlja v neoperativno stanje. Spremembe so izvedene na kopiji. Kadar je potreba ali želja po kopiji, se kopija lahko aktivira. Originalni element je lahko onemogočen ali pa lahko ostane aktiven, za voljo ohranitve konsistentnosti obstoječega modela, odvisno od vedenja originalnega elementa [241].

Na Sliki 4.3 je prikazana izmena verzije entitete T (naloge). Novi element T_{10} je ustvarjen z novo verzijo. Če je element treba zamenjati, mora element, ki ga zamenjuje proti ostalim elementom zagotoviti iste vmesnike. To pomeni, da zamenjava entitet ni pomembna, kot tudi, da morajo biti vse relacije, ki se nanašajo na entiteto, spremenjene ali zamenjane [241].

Slika 4.3. Ohranitev konsistentnosti v času [236]



4.2 Metodologije, metode in jeziki za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov

Modelirne metodologije, metode in jeziki omogočajo učinkovito in sistematično modeliranje proizvodnih sistemov. Bussman in sodelavci v članku [243] definirajo metodologijo kot »recept«, ki omogoča načrtovalcu najti rešitev za specifičen nabor problemov. Danes obstaja veliko število metodologij, metod in orodij, ki podpirajo razvoj modelov proizvodnih sistemov.

Hußmann v delu [244] definira metodologijo kot:

»... metodologija je vedno sestavljena iz naslednjih komponent:

- *definicije problemskega prostora, znotraj katerega je uporabljiva,*
- *nabor modelov, ki predstavljajo različne aspekte problemskega prostora ali pa so rešitve ob različnih fazah,*
- *nabor metod, ki transformirajo elemente enega modela v drugega,*
- *nabor proceduralnih navodil, ki opredeljujejo zaporedje za sistematično uporabo metodoloških korakov«.*

Za sistematično vodenje procesa modeliranja proizvodnih sistemov se uporabljajo modelirne metode. Te v slehernem koraku nudijo načrtovalcu odgovor na postavljena vprašanja in pri tem zagotavljajo kriterije za odločanje. Modelirni jeziki omogočajo sintaktično in korektno predstavitev konceptov, pravil in odnosov v izbrani domeni oz. metodologiji.

Pri pregledu literature lahko opazimo, da se v današnjem času v procesu modeliranja proizvodnih sistemov med drugimi najpogosteje uporabljajo metode modeliranja, kot so: Integrated DEFinition Method – IDEF [245], ARIS [246], Integrated Enterprise Modeling – IEM, Petrijeve mreže, METIS, Process Specification Language – PSL in različni jeziki za podporo delovnim tokovom WPD, BPM, BP, ebXML, Unified Modeling Language – UML [247].

UML je metodologija objektno-orientiranega načrtovanja, predstavljena v delu [248]. Razvita je bila z namenom predstaviti enotni modelirni jezik, na osnovi predhodnih konceptov OOAD (ang. *Object Oriented Analysis and Design*), OMT (ang. *Object Modeling Technique*) in OOSE (ang. *Object Oriented Software Engineering*). UML predstavlja splošno namenski vizualni jezik za opis modelov

in se pretežno uporablja za določitev, predstavitev, izgradnjo, nadzor in dokumentacijo informacijskih sistemov.

Dve pomembni metodi, ki se danes običajno uporabljata za proučevanje kompleksnih sistemov, sta modeliranje, zasnovano na agentih (ang. *Agent-Based Modeling* – ABM) in modeliranje, zasnovano na kompleksnih mrežah (ang. *Complex Networks*).

Niazi se je v svojem doktorskem delu [249] usmeril k potrebi povezovanja agentskih modelov in kompleksnih mrež ter predložil edinstven okvir za razvoj formalnih, mrežnih in agentskih modelov kompleksnih adaptivnih sistemov (ang. *Complex Adaptive Systems* – CAS).

Z rešitvami tehnologije objektno-orientiranega programiranja je prišlo do razvoja generičnega jezika za popis entitet [247], ki se zaradi svoje odprtosti postopoma širi tudi na področja modeliranja poslovnih sistemov. V delu Bussmanna in soavtorjev [243] je opisana metodologija krmiljenja proizvodnih sistemov s pomočjo agentskih sistemov.

Večina naštetih metod omogoča modeliranje, in sicer tako statičnih kot dinamičnih. Pri tem so najbolj pogosto v rabi pogledi na gradnike, funkcije, procese, podatke, odločitve, organizacijo, sekvence, aktivnosti, relacije in strukturo ter različne vrste analiz.

V delu [35] je Peklenik razvil metodologijo opisa proizvodnih sistemov kot kibernetских krmilnih struktur. Ta temelji na proizvodni kibernetiki, ki obsega področje strukturiranja in krmiljenja delovnih ter proizvodnih sistemov kot kompleksnih objektov. Od strukturiranja in umetnosti krmiljenja je odvisna učinkovitost vseh vrst delovnih in proizvodnih sistemov [33].

V nadaljevanju sta opisana in definirana strukturiranje in krmiljenje delovnih in proizvodnih sistemov v proizvodni kibernetiki.

Strukturiranje se razume kot ustvarjanje strukture sistema. Pri strukturiranju gre za določanje elementov in relacij ter povezav med elementi sistema, ki jih obdaja skupno okolje. V delu [33] Peklenik definira osem korakov za koncipiranje in realizacijo krmiljenja kompleksnih objektov, in sicer: 1) določitev ciljev krmiljenja, 2) določitev objekta krmiljenja, 3) strukturno sintezo modela, 4) identifikacijo parametrov modela objekta, 5) načrtovanje eksperimentov, 6) sintezo krmiljenja, 7) realizacija krmiljenja in 8) korekture.

Krmiljenje tehničnih sistemov obravnava kibernetska znanost, ki jo je v delu [250] definiral Wiener kot:

... znanost o krmiljenju in komunikaciji, pri živali in stroju.

Koncept razlike predstavlja novejši koncept v kibernetiki, ki definira, da sta dve količini različni, ali pa, da se vrednost neke količine spreminja v času. Koncept spremembe vrednosti neke količine v času popisuje transformacija, ki je množica prehodov [251].

Peklenik je v proizvodni kibernetiki [33] definiral krmiljenje kot proces, ki ga organiziramo na način, da deluje na *objekt* tako, da bo ta dosegal *zahtevano stanje* ali *cilje*. V tem kontekstu imamo pojme, kot so: *objekt, cilj, vpliv, stanje*, ki jih Peklenik definira in opisuje v delu [33].

Peklenik definira *objekt* krmiljenja kot [33]:

»... del univerzuma, katerega stanje želimo spoznati, ali pa smo zainteresirani in na katerega lahko vplivamo v določenem smislu, to pomeni, da ga krmilimo.«

Krmiljenje predstavlja namenski proces, katerega namen je doseganje določenega cilja, ki ga želimo doseči s krmiljenjem nekega procesa ali sistema [33]. Iz tega razloga Peklenik v delu [33] uvaja *subjekta*, ki je izvor ciljev, ki jih moramo doseči s krmiljenjem. Tudi ugotavlja, da je *subjekt* edini, ki dejansko potrebuje krmiljenje in ki bo imel od njega koristi.

Koncept transformacije je z vidika proizvodne kibernetike predstavljen na Sliki 4.4.

Slika 4.4. Transformacija vhodov v izhode



Na Sliki 4.4 je predstavljena prenosna funkcija G° kot osnovni element, ki specificira spreminjanje vhodov X v izhode Y . Prenosna funkcija zajema oba pogleda na pojem razlike, in sicer [251]: 1) da sta vhod X in izhod Y medsebojno različna, in 2) da je posamezen signal (vhod ali izhod) spremenljiv v času.

Prenosne funkcije so običajno v kibernetiki zapisane v frekvenčni domeni (zapisane v obliki, ki je dobljena z Laplaceovo transformacijo). V frekvenčni domeni je matematična manipulacija namreč pogosto bolj preprosta kot v časovni

[251]. V enačbi (4.20) je predstavljen matematični zapis za prenosno funkcijo s Slike 4.4.

$$Y(s) = G^\circ(s) \cdot X(s) \quad (4.20)$$

v kateri je:

- s kompleksna spremenljivka (Laplaceov operator) definirana kot $s = \sigma + j\omega^2$.

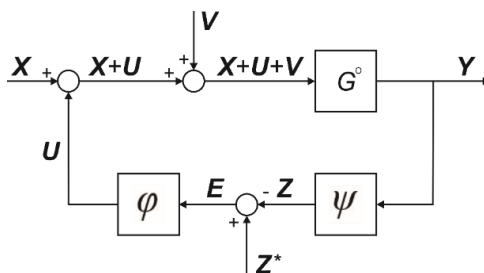
oziroma:

$$Y = G^\circ X \quad (4.21)$$

Osnovni faktorji vsakega krmiljenja so [33]: 1) cilj krmiljenja Z^* , 2) informacija o stanju objekta in medija I , 3) akcija, ki vpliva na objekt – to je krmilna akcija U in 4) krmilni algoritem φ .

Na Sliki 4.5 je predstavljen osnovni model krmiljenja v proizvodni kibernetiki.

Slika 4.5. Model krmiljenja v proizvodni kibernetiki



S Slike 4.5 je razvidno, da sta krmilni signal U in motilni signal V prišteta vvhodom X . Pridobljena vsota nato vstopa v objekt krmiljenja G° . Ta jo transformira v izhode Y . Izhodi Y pogosto niso v razumljivi obliki, zato jih moramo, da bi jih primerjali s cilji Z^* , v splošnem pretvoriti (prenosna funkcija pretvorbe ψ). Razlika med želenim in trenutnim stanjem Z je napaka E^* , na podlagi katere krmilni algoritem φ ustvari krmilni signal U [33, 251].

$$Y = G^\circ(X + U + V) \quad (4.22)$$

$$U = \varphi E^* \quad (4.23)$$

$$E^* = Z^* - \psi Y \quad (4.24)$$

Iz opisa predstavljenega modela krmiljenja v proizvodni kibernetiki sledi, da sta pri proizvodno-kibernetičnem modelu ključni dve dejstvi: 1) model vključuje motnje V , ki so pomembne z vidika kompleksnosti in 2) model vsebuje *subjekt*, ki oblikuje cilje Z^* , ki jih moramo doseči s pomočjo krmiljenja.

V nadaljevanju so na kratko opisane metode za modeliranje proizvodnih sistemov, ki so zasnovane na podlagi večagentskih sistemov. Predstavljen je tudi pregled dosežkov v domeni uporabe ontologije na področju modeliranja proizvodnih sistemov, ki je osredotočen na pomembno literaturo s področja temeljnih ontologij.

4.2.1 Modeliranje, zasnovano na večagentskih sistemih

Model, ki je zasnovan na agentih, je model, ki predstavlja množico posameznih agentov in njihovo vedenje. Elementi modela predstavljajo množico agentov in njihovih stanj, pravil, ki definirajo interakcije agentov in okolje, v katerem se agenti nahajajo [252]. Na podlagi interakcije z drugimi agenti agent izvaja določeno aktivnost na osnovi dodeljenih pravil in poznavanja lastnega stanja.

Agent je opisan kot metaforični način razmišljanja za modeliranje določenih elementov sistema. Z modeliranjem se ustvarja model za namen simulacije realnega fizičnega sistema, kjer agenti predstavljajo modele, ki se v opazovanem sistemu, samostojno odločajo. Takšno modeliranje proizvodnih sistemov omogoča simulacijo entitet kompleksnega sistema in njihove medsebojne interakcije ter na ta način omogoča naravno pojavljanje porajajočih se kompleksnih stanj proizvodnih sistemov.

Širši pregled možnosti, omejitev in težav v procesu modeliranja, zasnovanega na večagentskih sistemih, je opisan v delu [253]. Takšno modeliranje se je uspešno uporabljalo za empirične preiskave specifičnega pojavljanja porajajočega vedenja [254] in za odkrivanje novega načina vedenja v kompleksnih sistemih [255].

Danes obstaja veliko število dostopnih programskih orodij za modeliranje in simulacijo, utemeljenih na ABM. V članku [256] je prikazan podroben pregled programskih rešitev za modeliranje, zasnovano na ABM.

Nikolič je v svojem doktorskem delu¹³ opisal metodo, zasnovano na ABM, za ustvarjanje modela CAS v namen simulacije koevolucije socialno-tehničnih sistemov.

Za modeliranje in simulacijo kompleksnih in samoorganizirajočih sistemov v domeni senzorskih mrež avtorji dela [257], prav tako predlagajo uporabo metode za modeliranje, zasnovane na agentih.

Osnovne prednosti modeliranja proizvodnih sistemov na osnovi agentov so v odkrivanju porajajočih pojavov v proizvodnem sistemu in v nujenju primerne fleksibilnega načina njegovega opisa.

4.2.2 Modeliranje, zasnovano na kompleksnih mrežah

Teorija mrež dobiva na področju raziskave kompleksnih sistemov vse bolj vidno vlogo [258]. Cilj teorije mrež je v domeni kompleksnih proizvodnih sistemov razumeti njihovo nastajanje in njihove karakteristike, ki opisujejo raznovrstne kompleksne proizvodne sisteme. Mnoge mreže tehnoloških, društvenih in bioloških sistemov so okarakterizirane z netrivialnimi svojstvi svojih topologij.

V članku [259] avtorji delijo mreže kot:

- mreže majhnega sveta (ang. *Small world networks*),
- mreže brez merila (ang. *Scale-free networks*).

Za prve je značilna, da se razdalja med dvema naključno izbranimi vozliščema spreminja proporcionalno z logaritmom velikosti mreže, za druge pa je značilen zakon potenc.

Z vidika tematike disertacije je pomembno izpostaviti pomen mrež brez meril kot osnove za gradnjo mrežnega modela proizvodnje. V mrežah brez merila zakon potenc opisuje število povezav posameznega elementa (t. i. stopnjo vozlišča). To pomeni, da obstaja veliko število šibko povezanih elementov in majhno število močno povezanih elementov¹⁴.

Za mreže brez merila je značilen zakon potenc. Distribucije te oblike lahko najdemo pri velikem številu pojavov, ki obsegajo vse od velikosti mest, moči

¹³ *Co-evolutionary method for modelling large scale sociotechnical systems evolution*, I. Nikolič, Delft UT, doktorsko delo, 2009

¹⁴ *Krmiljenje avtonomnih obdelovalnih sistemov v proizvodnem okolju*, R. Vrabič, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, doktorsko delo, 2012

potresov, luninih kraterjev, sončnih izbruho, računalniških datotek, vojn, frekvence besed v katerem koli človeškem jeziku, številu citatov znanstvenih člankov itd. [260]. Stanje vozlišč v mreži se skozi čas običajno spreminja. To spreminjanje ni odvisno zgolj od dinamike vozlišča samega, temveč od jakosti njegove povezanosti z najbližjimi sosedi. Jakost povezanosti vozlišč povečuje kompleksnost skupnega obnašanja, kar vodi do potrebe po modeliranju, analizi in predvidevanju obnašanja številnih dinamičnih procesov na mrežah, kot so napake, napadi, kaskadni izpadi ali proces širitve [261].

V predhodnem desetletju je prišlo do številnih spoznanj o vplivu strukture topologije mreže na obnašanje dinamičnih procesov na statičnih mrežah v odnosu do dinamičnih procesov [262]. V zadnjem času se vse bolj pojavlja trend preučevanja mrež z časovno spremenljivo topologijo mreže [263]. Holme in Saramäki podajata pregled dosedanje literature o mrežah s spremenljivo topologijo. Pfitzner v članku [264] ugotavlja, da bi razširitev analize mreže na dinamično topologijo moglo imeti konkretni vpliv na društveno-tehnične sisteme, od ad-hoc mrežnega povezovanja do oblikovanja distribuiranih mrežnih sistemov.

4.3 Modelirna orodja

Orodja za modeliranje proizvodnih sistemov predstavljajo pripomočke, ki omogočajo sistematično izvedbo modeliranja. Te pa podpirajo omenjene metodologije.

V delu [241] avtor definira modelirna orodja kot informacijski sistem, ki podpira aktivnosti modeliranja s skupnim modelirnim prostorom, sistematično vodenja, preverjanjem sintaktičnih pravil, urejeno hrambo podatkov o modelih in uporabnikih, avtomatiziranim izluščevanjem informacij in pripravo analiz ter pripravo različnih pogledov na sistem. Množica različnih pogledov na sistem obravnave zahteva izgradnjo posameznih modulov, ki morajo navzven predstavljati enoten sistem.

Generalno, orodja za modeliranje so različni računalniški programi, ki se lahko realizirajo samostojno in neodvisno v obliki modulov. Ti moduli zagotavljajo izvedbo posameznih akcij, kot so: izvedbene (operativne), analizne, modelirne, simulacijske ipd., z zunanjim svetom pa se povezujejo prek različnih vmesnikov.

Primeri modelirnih orodij v obliki programskih modulov so: xIDEF0 modul načrtovanja aktivnostnih diagramov, EDS modul načrtovanja delovnega sistema

in kibernetskega krmiljenja, modul strukturiranja proizvodnega sistema, različni simulacijski moduli (Petrijeve mreže, agentski sistemi) itd. [241]. Poleg omenjenih obstajajo tudi druga orodja, kot so: IDEF0 modelirna orodja za funkcijsko modeliranje (npr. *AI0 Win*, *KBSI tools*), IDEF3 modelirna orodja za modeliranje procesov (npr. *ProSim*, *KBSI tools*), modelirna orodja za razvoj storitev (*Service Explorer*) ipd. Primer orodja za modeliranje storitev je predstavljen v delu [265].

4.4 Modeli znanja v naprednih proizvodnih sistemih

V predhodnem poglavju je povzeto, da znanje v naprednih proizvodnih sistemih predstavlja ključni faktor. Znanje v osnovi predstavlja rezultat nekega učenja.

Poggio¹⁵ ugotavlja, da je učenje najpomembnejša sposobnost človeka, ki se s pomočjo umetne inteligence lahko prenese v domeno strojev. Pri tem gre za uporabo napredne programske opreme, v katero so zakodirani ustrezni algoritmi. Za razliko od človeških procesov učenja, pri katerih se učinkovitost učenja zmanjšuje z rastjo volumna podatkov, razvijejo sistemi umetne inteligence svoj dejanski potencial šele na določenem nivoju kompleksnosti.

Poggio, v delu [266], ugotavlja:

»stroji, ki se učijo, so idealna rešitev za obdelavo vseh zbranih podatkov in prepoznavanje rešitev optimizacije.«

Žapčević v svojem doktorskem delu¹⁶ izpostavlja potrebo po razvoju sistema za upravljanje z znanjem, upošteva, da je v proizvodnih sistemih učenje potrebno na vseh nivojih poslovanja, od razvoja proizvoda in načrtovanja procesov, do vodenja proizvodnje in distribucije proizvodov. Avtor poudarja, da je področje upravljanja z znanjem primarno osredotočeno na formalizacijo, shranjevanje, delitev in prenos ter koordinacijo obstoječega znanja kot premoženja podjetja skozi organizacijo, razvoj in izkoriščanje ključnih kompetenc, ki zagotavljajo vrhunsko performanco.

¹⁵ Tomaso Poggio, profesor za nevrološke in kognitivne znanosti na Laboratoriju za umetno inteligenco na Massachusetts Institute of Technology (MIT).

¹⁶ Žapčević, S. Model samoučnega proizvodnega delovnega sistema, doktorsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2013

Danes obstaja veliko število različnih percepcij in definicij znanja ter upravljanja znanja. V delu [267] avtorja predlagata naslednji definiciji:

»Znanje je sklop intuicij, razumevanj, razsojanj, pogledov in izkušenj, povezanih s kupci, proizvodi, procesi, tržišči, konkurenco itd., ki omogoča učinkovito delovanje.«

»Upravljanje znanja je sistematično, organizirano, eksplicitno in domišljano med procesom zajemanja, širjenja, uporabe, obnove in ažuriranja znanja za doseganje ciljev organizacije.«

V delu [268], Nonaka in Takeuchi označujeta tok pretvarjanja informacij v znanje kot *»življenjski cikel znanja«* in definirata eksplicitno in skrito znanje. Eksplicitno znanje predstavlja formalno, strukturno znanje, ki je zajeto v spomin podjetja. Skrito znanje predstavlja praktično, osebno znanje, ki ga je težko formulirati, in vrednosti, ampak to znanje ima pomembno kognitivno dimenzijo, ki je sestavljena iz mentalnih modelov, zaupanja in perspektiv.

V sodobni proizvodni industriji se s pomočjo IKT zajemajo velike količine podatkov iz skorajda vseh procesov proizvodnega podjetja, kot so načrtovanje proizvodov in procesov, planiranje in upravljanje z materiali, procesa montaže, logistike in podobno, ter se shranjujejo v različne baze podatkov. Takšne baze podatkov predstavljajo velik potencial za nastajanje novega znanja na temelju zbranih podatkov. Novo znanje, zgrajeno na podlagi zbranih podatkov, predstavlja nov model znanja.

Zaradi velike količine podatkov, zbranih v bazi podatkov, tradicionalne statistične metode in orodja za upravljanje podatkov ne morejo hitro in ustrezno obdelati in analizirati. Za to so razvite nove metode za reševanje problemov z večjo količino podatkov. Te metode vključujejo postopke za odkrivanje znanja [269] in postopke za rudarjenje podatkov [270].

4.4.1 Odkrivanje znanja

Odkrivanje znanja v bazah podatkov je pristop, ki ga v delu [269] avtorji definirajo kot netrivialni proces identifikacije veljavnih, novih, potencialno koristnih in ne nazadnje razumljivih vzorcev v podatkih. Proces generalizira vire podatkov in se ne omejuje zgolj na baze podatkov, čeprav so izpostavljene kot primarni vir.

Proces odkrivanja znanja v podatkih (ang. *Knowledge Discovery in Data* – KDD) je sestavljen iz več korakov. Procedure izvajanja procesa odkrivanja znanja v

bazah podatkov so definirane z modeli. Danes obstaja širok nabor modelov za izvajanje procesa odkrivanja znanja v bazah podatkov.

Fayyad in sodelavci v članku [271] predlagajo model, zasnovan na devetih korakih. V članku [270], Cios in sodelavci so predstavili model zasnovan na šestih korakih, kot so: 1) razumevanje področja problema, 2) razumevanje podatkov, 3) priprava podatkov, 4) rudarjenje podatkov, 5) ocena odkritega znanja, in 6) uporaba odkritega znanja.

Opis procesa odkrivanja znanja in modele za izvajanje procesa odkrivanja znanja je mogoče najti v delih [272, 273]. V procesu odkrivanja znanja v bazah podatkov je rudarjenje podatkov ključni korak, ki vodi k odkritju novega znanja.

4.4.2 Rudarjenje podatkov

Rudarjenje podatkov (ang. *Data Mining* – DM) je v članku [270] definirano s pripravo podatkov, in sicer kot drugi ključni korak v procesu odkrivanja znanja. Ta korak obsega uporabo izbranih orodij za rudarjenje podatkov. Orodja za rudarjenje podatkov vključujejo različne tipe algoritmov, kot so klasificiranje, Bayesove metode, evolucijsko računanje, strojno učenje, nevronske mreže, gručanje podatkov in tehnike predobdelave.

Avtorji v članku [271] definirajo rudarjenje podatkov kot korak v procesu odkrivanja znanja v bazah podatkov, ki je sestavljen iz analize podatkov in uporabe algoritmov za odkrivanje, ki pod sprejemljivimi omejitvami računalniške učinkovitosti generirajo določene modele v podatkih.

V delih [269, 274, 275] so predstavljene različne metode, ki se uporabljajo za izvajanje funkcij rudarjenja podatkov. Na podlagi navedene literature je mogoče metode rudarjenja podatkov razdeliti v dve skupini: 1) metode rudarjenja podatkov za opisovanje in 2) metode rudarjenja podatkov za napovedovanje.

Metode rudarjenja podatkov za opisovanje so namenjene interpretaciji podatkov za lažje razumevanje odnosa med njimi. Rezultat takšne metode rudarjenja podatkov je ponazoritev vzorcev v podatkih v vizualni obliki. V delu [276] avtorji metode rudarjenja podatkov za opisovanje delijo v dve kategoriji: 1) metode za identifikacijo (odkrivanje) vzorcev v skupinah podatkov in 2) metode za združevanje podatkov v značilne skupine.

Cilj prve, predhodno navedene, opisne metode je identifikacija stanja. Za odkrivanje vzorcev v skupinah podatkov danes obstaja veliko število različnih

algoritmov, kot so: algoritem »FP-growth« [277], algoritem »LPMiner«, algoritem »Apriori«, »Eclat«, »Relim« in številni drugi manj znani algoritmi.

Druga opisna metoda rudarjenja podatkov po [276] je gručenje podatkov. Gručenje podatkov predstavlja nenadzorovano klasifikacijo vzorcev v gručice [275]. V delu [278] so metode gručenja klasificirane v šest kategorij, kot so: 1) hierarhične metode gručenja podatkov, 2) metode za razdeljevanje, 3) metode ki bazirajo na gostoti, 4) gručenje ki bazira na modelu, 5) metode ki bazirajo na mreži in 6) mehko računanje.

Za metode razdeljevanja Jain in sodelavci v članku [275] predlagajo algoritem za gručenje z razdeljevanjem »*k-means*« kot najbolj reprezentativen algoritem za gručenje podatkov z razdeljevanjem.

Metode rudarjenja podatkov za napovedovanje Bharatheesh in Iyenger v članku [279] definirata kot proces samodejnega ustvarjanja modela za klasifikacijo iz množice primerov, imenovane množice za učenje, ki pripadajo različnim skupinam razredov. Metode rudarjenja podatkov za napovedovanje se lahko uporabljajo za klasifikacijo, napovedovanje vrednosti, opisna pravila in podobno. Na splošno metode za napovedovanje vključujejo statistične metode, odločitvena drevesa, algoritme za učenje pravil [280] in njihove hibride, umetne nevronske mreže in mehanizme podpornih vektorjev. Statistične metode za klasifikacijo in napovedovanje [116] vključujejo Bayesove metode in regresivne modele [269]. Bayesov pristop temelji na obdelavi informacije verjetnosti, predstavljene v obliki predhodne in pogojne verjetnosti [281]. V delu [269] avtorji opisujejo algoritme za učenje pravil med ostalimi algoritmi *M5Rules*. Algoritem *M5Rules* [281] omogoča izpeljavo regresijskih pravil iz drevesa modelov, ki so zgrajeni z uporabo algoritma *M5'*.

4.5 Simulacija modela

Na podlagi pregleda relevantne literature ugotavljamo, da številni avtorji različno definirajo pojem simulacije [282-284].

Karba in soavtorji v knjigi [282] definirajo simulacijo kot:

»interativno metodo, s pomočjo katere proučujemo funkcionalne lastnosti sistemov z eksperimentiranjem na ustreznem modelu realnega objekta oz. sistema«.

V delih [285, 286] avtorji definirajo pojem simulacije v domeni proizvodnih sistemov kot:

»... uporabo programske opreme za izdelavo računalniških modelov proizvodnih sistemov, da bi jih analizirali in s tem pridobili pomembne informacije.«

Benedettini in Tjahjono v delu [287] izpostavljata, da simulacijo lahko uporabimo za napovedovanje učinkovitosti obstoječega kot tudi na novo načrtovanega sistema in za primerjavo alternativnih rešitev za določeni projektni problem.

Rezultati pregleda literature na področju aplikacij za simulacijo s ciljem, da se zagotovi slika vloge simulacijskih tehnik v proizvodnji in poslovanju ter izpostavi najbolj uporabne metode za simulacijo v proizvodnih domeni, kot so: simulacija diskretnih dogodkov (ang. *discrete-event simulation* – DES), simulacijske metode, ki temeljijo na osnovi agentskih struktur (ang. *agent-based model* – ABM), metode umetne inteligence (nevronske mreže, genetski algoritmi), ki nadgrajujejo agentske sisteme in odpirajo nove poti k simulaciji proizvodnih sistemov, metodologija s formalnim matematičnim ozadjem t. i. Petrijeve mreže (PN), metoda Monte Carlo, virtualne metode simulacije in hibridne, ki integrirajo različne simulacijske metode so predstavljeni v delu [288].

V nadaljevanju tega poglavja so izpostavljene teoretične osnove in širši opis diskretne simulacije [289, 290]. Diskretna simulacija obravnava dogodke le v tistih časovnih točkah, v katerih se spremenijo lastnosti opazovanih predmetov in procesov, kar omogoča simulacijo daljšega časovnega obdobja v zelo kratkem času.

Na splošno obstajajo tri različne vrste simulacij diskretnih dogodkov, in sicer: 1) nepovezana simulacija (ang. *Off-line simulation*), 2) simulacija v realnem času (ang. *Real-time simulation*) in 3) povezana simulacija (ang. *On-line simulation*).

Nepovezana simulacija temelji na t. i. *nepovezanih modelih* (ang. *throw away models*) [291], ki predstavljajo simulacijske modele, ločene od dejanskih procesov in sistemov. Danes je nepovezana simulacija precej razširjena v predelovalni industriji in v številnih aplikacijah, ki se nanašajo na optimiziranje proizvodnih hal. Slabost ali pomanjkljivosti nepovezane simulacije je v tem, da nima stalne povezave z dejanskim procesom in sistemom [292].

Simulacija v realnem času omogoča simulacijskemu modelu nenehno povezavo z realnim procesom in sistemom, tem pa zbiranje ogromne količine podatkov, ki so potrebni za določitev trenutnega stanja sistema. Tok simulacije v realnem času

vkjučuje [293]: 1) validacijo, 2) verifikacijo, 3) izvajanje simulacije in 4) analizo izhodnih podatkov. Širši opis simulacije v realnem času je podan v delih [292-294].

V delu [295] avtorja definirata povezano simulacijo kot:

»... računalniški sistem, ki je sposoben opravljati deterministično in stohastično simulacijo v realnem času, ali kvazi realnem času, za spremljanje, nadzorovanje in razporejanje urnika dela in sredstev v proizvodnem procesu z diskretnimi dogodki.«

Povezana simulacija omogoča, da simulacijski modeli bolj ustrezajo realnemu stanju in nudijo bolj verodostojne rezultate simulacije [292]. Pri povezani simulaciji je simulacijski model v stalni in neposredni povezavi z realnim sistemom, obenem pa sprejema odločitve glede realnega procesa in sistema [296]. Generalno predstavlja povezana simulacija nadgradnjo simulacije v realnem času.

Pri vsaki simulaciji diskretnih dogodkov zmodeliramo reali (fizični) sistem oz. proces v digitalno (kibernetško) okolje in postavimo simulacijski model realnega sistema oz. procesa. V primeru, ko je simulacijski model povezan s povratno zanko z realnim sistemom, lahko takšen model imenujemo *digitalni dvojček*.

Grieves in Vickers sta v delu [297] definirala digitalni dvojček (ang. *Digital Twin*) kot niz »virtualnih informacijskih konstrukcij« (modelov), ki v celoti opisujejo potencialni ali dejanski fizično proizvedeni proizvod od mikro do makro geometrijskega nivoja. V delu [297] digitalni dvojček vsebuje tri glavne dele: a) fizični element v realnem (fizičnem) prostoru, b) virtualno repliko fizičnega elementa v digitalnem (kibernetškem) prostoru in 3) podatkovne in informacijske povezave med fizičnim in kibernetškim prostorom.

Danes obstajajo različne vizije digitalnega dvojčka. Nanašajo se lahko na celovit fizični in funkcionalni opis polprodukta, produkta ali sistema z vključenimi informacijami, ki so uporabne v vseh fazah življenjskega cikla [298]. V tem kontekstu je bilo v delu Rosena in soavtorjev [299] ugotovljeno, da je s simulacijskega vidika digitalni dvojček naslednji razvojni korak v tehnologiji modeliranja, simulacije in optimizacije.

V delu [300] avtorji definirajo digitalni dvojček kot digitalni prikaz fizičnih izdelkov ali sistemov, ki so sestavljeni iz več parcialnih modelov iz različnih domen. Integracija parcialnih modelov omogoča vrednotenje novih scenarijev simulacije. Pristop predlaga skupen modelirni prostor, ki vključuje model učenja, ki vodi simulacijo pri raziskovanju in vrednotenju scenarijev.

Digitalni dvojček opisuje trenutno stanje fizičnega elementa iz fizičnega okolja na podlagi informacij, pridobljenih iz zajetih podatkov, simulacija pa na podlagi modela predvideva obnašanje fizičnega elementa v prihodnosti, če se spreminja njegovo okolje. Tako je digitalni dvojček izhodišče za simulacijski model fizičnega elementa.

Napredni proizvodni sistemi so v splošnem preveč nelinearni, da bi jih bilo mogoče opisati. To pomeni, da eksplicitni, analitični modeli takšnih sistemov niso mogoči. Suh v delu [301] predlaga uporabo preizkušenih in potrjenih modelirnih aksiomov za opis naprednih proizvodnih sistemov, ki zagotavljajo zmanjševanje ravni kompleksnosti. Po drugi strani obstajajo metode, ki temeljijo na simulaciji računalniških modelov. Te omogočajo načrtovalcem eksperimentiranje z modelom namesto z realnim sistemom.

S pojavom naprednih proizvodnih sistemov se povečuje obseg modelov, ki zahtevajo bolj učinkovite simulacijske strategije in metode. Danes obstaja veliko simulacijskih metod, ki podpirajo simulacijo in analizo naprednih proizvodnih sistemov. Največkrat se osredotočajo na spremenljivke, kot so: količine, čas, stroški ter kakovost elementov proizvodnega sistema s ciljem preverjanja odločitvenih mehanizmov, razporejanja nalog, pretoka materiala, informacij in energije. Kljub širokemu spektru metod je premalo pozornosti, posvečene modeliranju krmilnih struktur, odgovornih za planiranje in kontrolo [243, 302].

Za izvedbo simulacij so na voljo različni splošni programski jeziki, kot so: C, Java, NET, MATLAB, Python itd., ali namenski simulacijski jeziki, kot so: SIMAN, Visual SLAM, Modelica ipd.

4.6 Ocenjevanje modela

Proces načrtovanja modela ne more biti učinkovit brez izvajanja procesa validacije oz. ocenjevanja modela [241]. Proces ocenjevanja načrtovanega modela se lahko izvaja s pomočjo različnih metod za ocenjevanje modela. V pregledu literature lahko ugotovimo, da danes obstaja širok nabor metod in orodij za ocenjevanje načrtovanega modela.

Sistematičen okvir za spremljanje in ocenjevanje modela proizvodnega sistema prek metrik (kot so čas, stroški, kakovost fleksibilnost, produktivnost) na različnih nivojih od nivoja posameznega EDS do mreže proizvodnih sistemov je predstavljen v delu [2]. Hon v delu [2] opisuje časovno metriko s pomočjo

naslednjih kriterijev povprečen čas procesiranja, povprečen čas čakanja, čas menjave, čas cikla, čas neaktivnosti, pretočni čas, čas dobave, nastavitveni čas in čas takta. Nato značilnosti proizvodnega in poslovnega sveta poveže na skupno osnovo ter opredeli značilnosti posameznih vrst proizvodnih sistemov. Metoda temelji na analizi podatkov o proizvodnem sistemu, ki jih v časih ni lahko pridobiti oz. jih lahko pridobimo samo s pomočjo metod simulacije.

5 PAMETNI PROIZVODNI SISTEMI – PROIZVODNA PARADIGMA ZA INDUSTRIJO 4.0

*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) [303].

Izhodišča za utemeljitev in uresničitev novih, naprednih sistemov, t. i. »*pametnih proizvodnih sistemov*«, ki bodo dali odgovore na predhodno izpostavljen dejstva o problemih in izzivih v proizvodnji z vidika informacijskih sistemov, so opisana v delu Marc Weiser [304].

V knjigi »*Smart Factory*« [55] 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 [56].

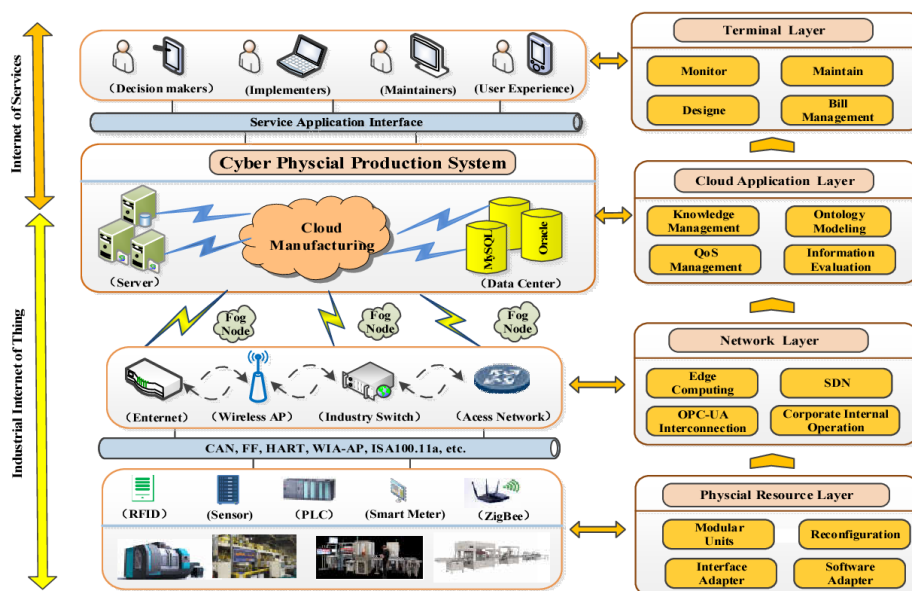
Radziwon in soavtorji v delu [70] predlagajo definicijo, ki je v znanstvenih krogih največkrat citirana:

»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 se 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 morale doseči

optimizacijo proizvodnje, kar pa posledično izzove zmanjšanje nepotrebnega dela in izgube virov; po drugi strani, je to mogoče opaziti v perspektivi sodelovanja med različnimi industrijskimi in neindustrijskimi partnerji, kjer uspešnost prihaja iz oblikovanja dinamičnih organizacij.»

Hierarhična arhitektura pametne tovarne je prikazana na Sliki 5.1.

Slika 5.1. Hierarhična arhitektura pametne tovarne [305]



Globalno, distribuirana proizvodnja je, ob razvoju IKT, omogočila naglo širitev digitalnih in virtualnih podjetij, ravno tako pa je tudi pripomogla 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 [306], tovarna stvari [55], tovarna v realnem času [303], inteligentna tovarna prihodnosti [307].

5.1. Koncepti in modeli pametnih proizvodnih sistemov

Na podlagi navedenih pristopov za prihodnji razvoj konceptov, paradigem in vizij proizvodnih sistemov (pametna proizvodnja, socialna proizvodnja, proizvodnja, ki temelji na oblaku, proizvodnja, ki temelji na znanju, proizvodnja, ki temelji na reciklaži, proizvodnja, ki temelji na kibernetsko-fizičnih sistemih) v nadaljevanju je prikazan opis najpogostejše predlaganih pristopov k novi viziji industrijske proizvodnje v času Industrije 4.0, kot so: proizvodnja, ki temelji na oblaku [308], vsepovsodna proizvodnja [309], kibernetsko-fizični proizvodni sistemi [9, 11, 15, 310].

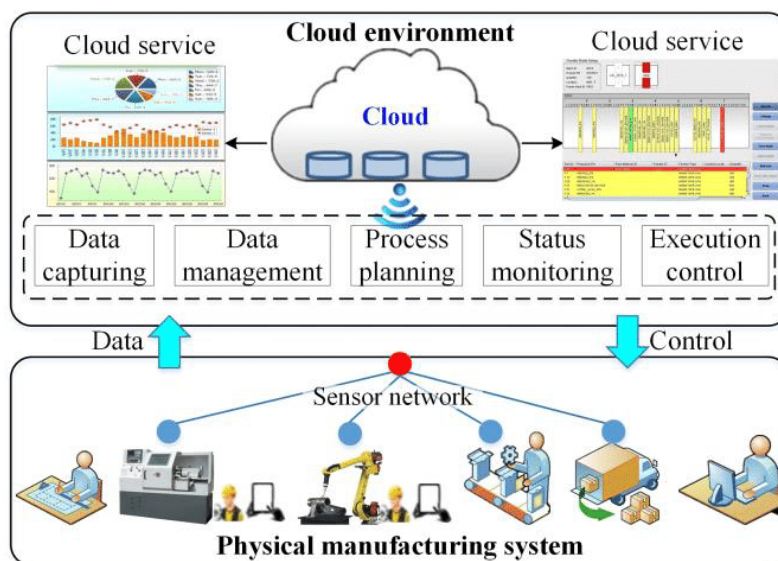
5.1.1 Proizvodnja zasnovana na oblaku

Računalniški oblak je nova tehnologija, ki je konceptualno že davno zamišljena, vendar šele zadnjih nekaj let prihaja v širši uporabi [185]. Internet stvari, kolaboracija in »računalniški oblak« so pri avtorjih [186] spoznani kot ključni členi, ki bodo omogočili razvoj novih oblik podjetij in njihovih proizvodnih sistemov.

Računalniški oblak pri industrijski proizvodnji v uporabi najdemo v delih številnih avtorjev, med drugim v [161, 190, 308]. Proizvodnja v oblaku je na prvi pogled mrežni koncept proizvodnje, pogosto identificiran s proizvodnjo, ki temelji na internetu ali distribuirani proizvodnji. Prav tako se proizvodnja v oblaku smatra za novo multidisciplinarno domeno, ki zajema omreženo proizvodnjo, proizvodne mreže, virtualno proizvodnjo, proizvodnjo, ki temelji 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 ustvari začasne proizvodne linije z možnostjo spreminjanja, ki imajo višji izkoristek, zmanjšan strošek obstoja izdelka in omogočajo optimalno razpolaganje s sredstvi glede na spreminjajoče se zahteve naročnikov [189]. Arhitektura proizvodnega sistema, zasnovana na proizvodnji v oblaku, je predstavljena na Sliki 5.2.

Slika 5.2. Arhitektura proizvodnega sistema, zasnovanega na oblaku [311]



Sistemi proizvodnje, zasnovani na oblaku, vršijo trije ključni akterji: ponudnik storitev, operater oblaka in uporabnik storitve, kot je opisano v delu [312]. Po [12] je proizvodnja, zasnovana na oblaku nova proizvodna paradigma, ki temelji na računalniških mrežah. 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 preprost način, da bi se zagotovila optimalna delitev proizvodnih virov in proizvodnih sposobnosti.

Referenčna arhitektura računalniškega oblaka in proizvodnega sistema, temelječega na proizvodnji v oblaku, je prikazana v delu [161], decentralizirane mrežne arhitekture za proizvodnjo, zasnovano na oblaku [190], medtem ko so možnosti uporabe obravnavane med ostalim v delih [191, 192].

5.1.2 Vsepovsodna proizvodnja

Termin »vsepovsodna proizvodnja« (ang. *Ubiquitous Manufacturing*) izhaja iz termina »vsepovsodnega računalništva« (ang. *Ubiquitous Computing*), ki ga v svojem delu definira Mark Wiser [304], 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 utemeljevala

zgolj na ideji komunikacije in prenosa informacij, temveč tudi v avtonomni obdelavi podatkov, pri čemer se, v takšnih sistemih, ustvarja določen nivo inteligence.

Diegel in ostali avtorji v delu [313] 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. V delu [314] 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 vse večji pomen.

Avtorji v delu [315] vsepovsodno računalništvo definirajo kot most, ki povezuje virtualni, digitalni svet (digitalni podatki, shranjeni na internetu in podobno) in dejanski fizični svet.

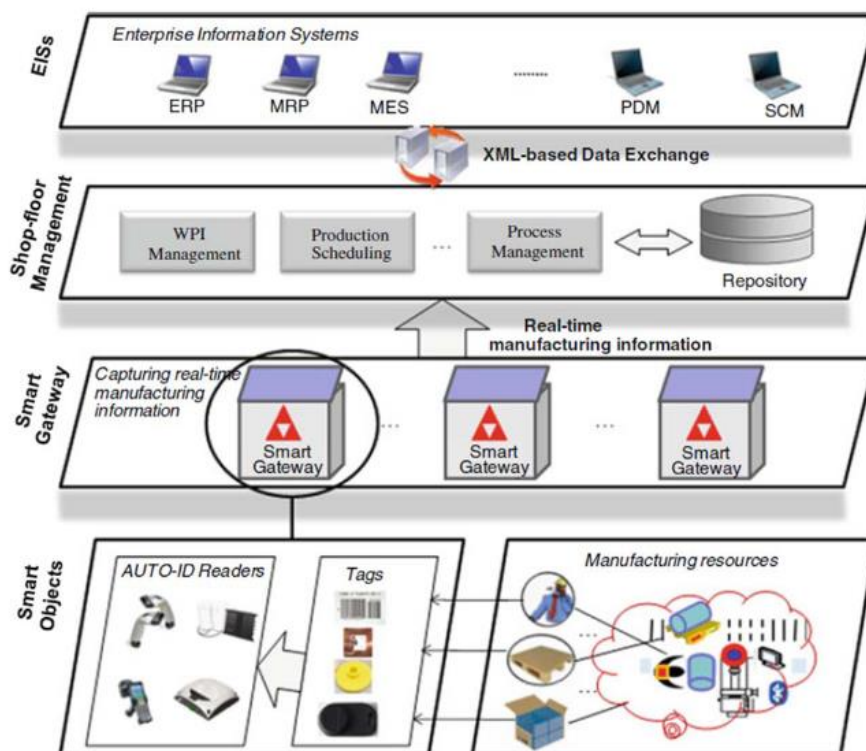
V domeni industrijske proizvodnje v zadnjih nekaj letih obstaja termin »vsepovsodna proizvodnja«, ki si mnogi avtorji prizadevajo definirati. Tako koncept vsepovsodne proizvodnje definirajo Suh in soavtorji v delu [316], kot koncept, ki se osredotoča na zbiranje informacij skozi celotni življenjski cikel proizvodov, uporabljajoč jih za načrtovanje in proizvodnjo proizvodov.

Putnik in ostali v delu [317] 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 [309] razpravlja o tem ali vsepovsodno računalništvo pomeni vsepovsodno dostopnost proizvedenega blaga ali le vsepovsodno dostopnost proizvodnih procesov. V delu [309] avtor predlaga arhitekturo, ki lahko vsebuje implementacijo in eksploatacijo vsepovsodne proizvodnje in proizvodnje, zasnovane na oblaku, skozi neformalno in konceptualno predstavitev.

Referenčna infrastruktura za uresničitev vsepovsodne proizvodnje je predstavljena na Sliki 5.3.

Skozi pregled literature so opažena različna področja preučevanja vsepovsodne proizvodnje tako, kot so v domeni vsepovsodni mrežni proizvodni sistemi [318], vsepovsodni proizvodni sistemi, zasnovani na oblaku v domeni robotskih aplikacij [13], konceptualni okvirji za vsepovsodne tovarne [306], konceptualni okvirji za vsepovsodne avtonomne delovne sisteme [319], v domeni uporabe IKT za implementacijo koncepta vsepovsodnih proizvodnih sistemov [320], medtem ko je referenčna infrastruktura za uresničitev vsepovsodne proizvodnje prikazana v članku [321].

Slika 5.3. Referenčna infrastruktura za uresničitev vsepovsodne proizvodnje [321]



5.1.3 Kibernetско-fizični sistemi

Pred samim definiranjem besedne zveze »kibernetско-fizični« je treba 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« [250].

Leta 1982 William Gibson na temeljih kibernetске znanosti v delu [322] 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 in ki ga omogočajo napredne tehnološke aplikacije, ki lahko

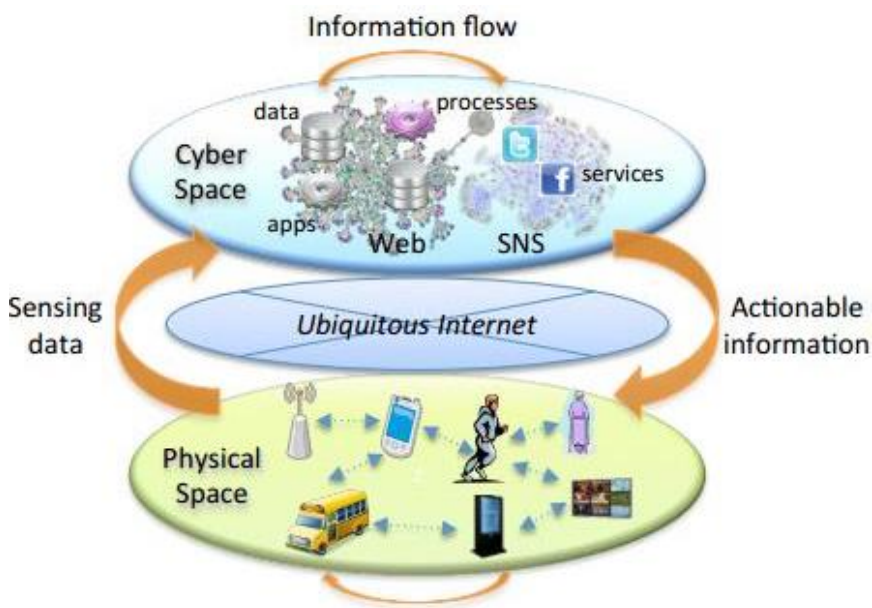
delijo in izmenjujejo podatke, informacije in znanja z drugimi sodelujočimi v kibernetskem prostoru. Zadnjih 20 let je bilo razvitih veliko različnih definicij kibernetskega prostora. Benedikt v članku [323] definira kibernetski prostor kot neskončni umetni svet, kjer se ljudje gibljejo v informacijski bazi prostora.

Michael Heim v [324] opredeli kibernetski 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 kibernetski prostor skupek orientacijskih točk, s pomočjo katerih lažje iščemo znotraj podatkovne baze.«

Kibernetsko-fizični sistemi (ang. *Cyber-Physical Systems – CPS*) so v bistvu nova generacija sistemov, ki integrirajo računalniške in fizične sposobnosti [325, 326], Slika 5.4.

Slika 5.4. Kibernetsko-fizični sistemi [327]



Kompleksno definicijo KFS so podali avtorji v [328]:

Kibernetsko-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.

Kibernetsko-fizični sistemi omogočajo številne možnosti v različnih domenah človekovega življenja [329-331], 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 kibernetsko-fizičnih sistemov postalo predmet zanimanja mnogih raziskovalcev in znanstvenih skupnosti. Od leta 2012 je zaznana povečana porast števila objavljenih znanstvenih del, ki se ukvarjajo s tematiko kibernetsko-fizičnih sistemov v različnih domenah [310].

KFS ustvarjajo osnovo za strukturiranje novih proizvodnih sistemov [11], ki se lahko odzovejo na skorajda vsako spremembo na trgu v realnem času in prav tako z visoko fleksibilnostjo znotraj in zunaj meja samega podjetja. To ne dela proizvodnje samo hitrejšo in skladnejšo s posameznimi zahtevami kupcev, temveč 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.

Kibernetsko-fizični proizvodni sistemi igrajo pomembno vlogo v razvoju industrijske proizvodnje v razvitih evropskih državah in Severni Ameriki [332-334] in predstavljajo temeljno možnost za uresničenje nove proizvodne filozofije oziroma strategije Industrije 4.0 [53].

Kibernetsko-fizične proizvodne sisteme (KFPS) definira Monostori v svojem članku [11] kot:

»... utemeljeni na kibernetsko-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 kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov omogoča realizacijo palete osnovnih aplikativno orientiranih nalog, predvsem pa nadzora sistema na kateremkoli nivoju v realnem času.«

V članku [310] 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 KFPS v domeni proizvodnih mrež opisujejo Morosini in soavtorji v članku [14]. Pregled evolucijskega razvoja prihodnjih sistemov ob prikazu novih proizvodnih paradigem in novih proizvodnih konceptov je podan v članku [335], v katerem avtorji obravnavajo tudi sociološke aspekte prihodnjih proizvodnih sistemov.

Uresničenje kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov po načelih povezovanja holonov, agentskih struktur in funkcijskih blokov, je tematika članka [336]. Avtorji utemeljujejo koncept kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov na osnovnih načelih holonskih proizvodnih sistemih. Prototipna implementacija industrijske avtomatizacije, ki temelji na tehnologijah kibernetско-fizičnih sistemov, kot so SOA, agenti in oblak, opisujejo Leitão in ostali avtorji v članku [213].

Prehod na nove proizvodne strukture, ki bodo temeljile na kibernetско-fizičnih konceptih, zahteva razvoj novih modelov proizvodnih sistemov na vseh nivojih. Ti morajo omogočiti: 1) ustrezno umestitev *subjekta* v sistem, katerega vloga se v kibernetско-fizičnih sistemih bistveno spreminja; 2) digitalizacijo in kibernetizacijo obstoječih delovnih procesov; 3) razvoj in uresničitev 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 [1].

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-kibernetско-fizične sisteme.

Kibernetско-fizični proizvodni sistemi [9, 15, 337] 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 KFPS predstavljajo sisteme, ki temeljijo na principih predvidene nove industrijske revolucije, *Industrije 4.0*, in omogočajo delovanje na globalnem tržišču pod konkurenčnimi pogoji [1].

5.2 Kibernetско-fizični proizvodni sistemi kot gradniki pametnih proizvodnih sistemov

Vsi proizvodni sistemi imajo karakter socialno-tehničnih sistemov¹⁷ 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 [338].

Socialni sistem je organizacijska entiteta (npr. podjetje, oddelek, laboratorij ipd.), znotraj katere veljajo določene specifične relacije in pravila. Karakterizirajo jih socialni procesi, ki se odvijajo znotraj in/ali zunaj sistema [339]. 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 nov prostor, t. i. kibernetски prostor.

Socialno-tehnični vidiki niso pomembni samo pri načrtovanju in operiranju proizvodnega sistema, temveč so enako pomembni tudi pri ustvarjanju 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 [1].

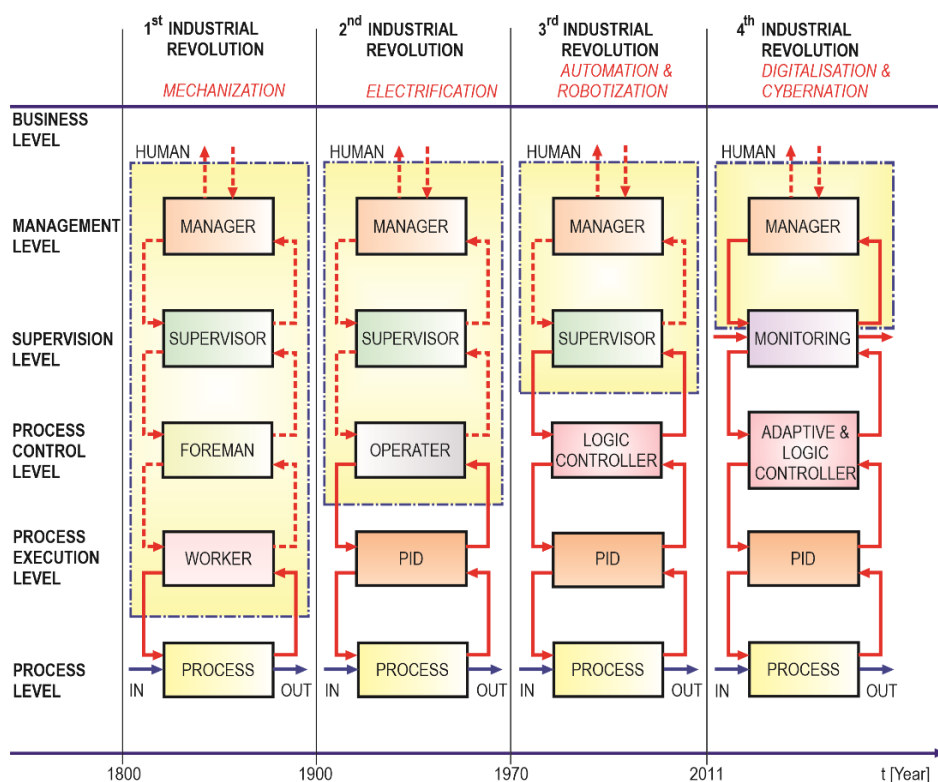
V konceptu KFPS, ki je predstavljen v [1, 9, 15], prihaja do spremembe vloge *subjekta* (posameznikov, skupin in/ali celotnega kolektiva), s čimer se s perspektive sodobnih dosežkov znatno spreminjajo načela strukturiranja socialno-tehničnih sistemov. Vloga *subjekta* se oblikuje predvsem v dveh smereh: 1) v smer

¹⁷ 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.

generiranja novih idej in inovacij ob intenzivni rabi eksplcitnega znanja, socialnih tehnologij, kreativnosti in intuicij (*subjekt kot nosilec znanja – knowledge worker*) ter 2) v smer upravljanja SKFPS v realnem času na osnovi *on-line* informacij, diagnostike, prognostike in odločitvenih modelov (*subjekt kot nosilec odločitev*).

Pri opazovanju (r)evolucijskega razvoja proizvodnje in proizvodnih sistemov skozi industrijske revolucije lahko ugotovimo, da se je ob tem vloga človeka znatno spreminjala. Ta evolucija človeške vloge v proizvodnem sistemu je predstavljena na Sliki 5.5, ki prikazuje funkcijske nivoje, na katerih je bila utemeljena vloga človeka v proizvodnem sistemu skozi čas.

Slika 5.5. Evolucija vloge človeka v proizvodnih sistemih skozi čas [1]



V času začetkov industrijske proizvodnje, je bila vloga človeka tesno povezana s samim procesom, to je na implementacijskem nivoju. Človek-*subjekt* je bil tisti, ki je proces izvajal, ga krmilil ter hkrati izvajal nadzor nad njim. Človek je bil vir moči. Takšna vloga človeka je zahtevala naporno fizično delo in je obenem omejevala njegovo ustvarjalnost. Iz tega časa izhaja tudi pojem *delovna sila*, ki

označuje osnovno vlogo človeka v proizvodnem sistemu. Zahvaljujoč tehnološkemu napredku na področju mehanizacije dela so izvajanje procesa prevzeli stroji in naprave, *subjekt* pa se je distanciral od samega izvajanja procesa na nivo operiranja oz. krmiljenja naprave.

Druga industrijska revolucija je tudi prinesla korenite spremembe v proizvodnji. Sistem upravljanja dela in operacij v proizvodnji je utemeljen po principih znanstvenega upravljanja, ki jih je osnoval F. W. Taylor [31]. Človek je bil razbremenjen težjega fizičnega dela, saj so ga prevzeli stroji. Njegove aktivnosti pa so bile omejene na izvajanje ene operacije, natančno določene in normirane. To je privedlo do velikega povečanja učinkovitosti in produktivnosti v pogojih masovne proizvodnje, hkrati pa do reduciranja kreativnosti in izkoriščenosti miselnega potenciala človeka na minimum. Pojem *delovna sila* se je ohranil.

Razvoj NC-tehnologije in fleksibilna avtomatizacija delovnih naprav na osnovi računalniškega krmiljenja pa sta privedli do tretje industrijske revolucije. Funkcijo krmiljenja strojev in naprav so prevzeli NC-, CNC- in PLC-krmilniki. Z računalniškim krmiljenjem se je uvedla fleksibilnost proizvodnje, saj se je s spremembo krmilnega programa spremenil tudi proces. *Subjekt* se je s tem še nekoliko odmaknil od neposrednega procesa in se je lahko osredotočil na upravljanje in nadzor sistemov, kjer so se pa tudi že začele razvijati rešitve za računalniško podporo teh aktivnosti (kot npr. sistemi za planiranje in razporejanje, CAD/CAM-sistemi, računalniške baze podatkov ipd.), kar je še povečalo fleksibilnost proizvodnje ob hkratnem zagotavljanju učinkovitosti kljub zmanjšanju serij. Pojem *delovna sila* za označevanje človeških virov je v kontekstu fleksibilne proizvodnje začel izgubljati pomen.

Danes v okviru četrte industrijske revolucije in nove industrijske revolucije, ki je že na obzorju, pričakujemo, da bo zaradi intenzivne digitalizacije in kibernetizacije dela večina rutinskih procesov avtomatiziranih tako, da bo *subjekt* opravljal predvsem kreativne razvojne (inženirske) procese na osnovi znanja (*subjekt* kot nosilec znanja – *knowledge worker*) in procese upravljanja in odločanja, 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.

Širši pomen človeka v konceptu prihodnje industrijske revolucije, t. i. *Industrije 5.0*, je predstavljen v šestem poglavju tega znanstvenega dela.

5.2.1 Digitalizacija in kibernetizacija delovnih procesov

Na podlagi izpostavljenega v pregledu literature (glej Poglavje 2) lahko sklepamo, da je digitalizacija oz. digitalna transformacija ena od ključnih preobrazb v današnjem sodobnem svetu.

Brennen in Kreiss v delu [340] definirata, da se digitalizacija nanaša na uvajanje ali povečanje rabe digitalne oz. računalniške tehnologije s strani podjetij, industrije, države itd.

Henriette in ostali soavtorji [341] 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 kakovosti 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 [342].

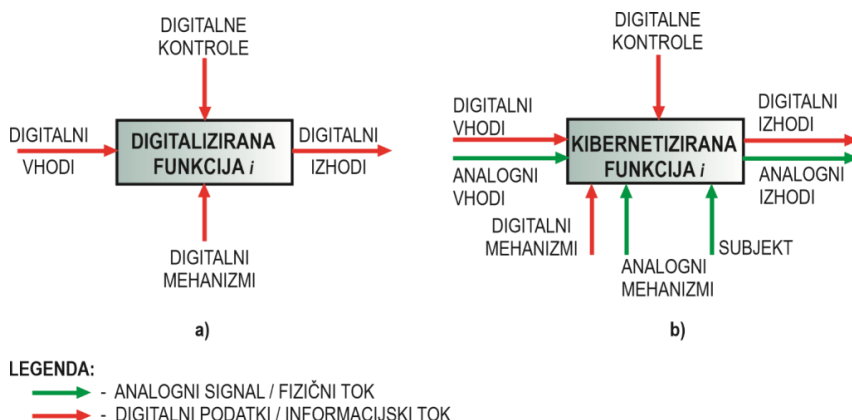
Na te osnovi je v delih [1, 51] definirana digitalizacija z naslednjo definicijo:

Digitalizacija je prenos procesov v digitalno okolje in njihovo izvajanje s pomočjo digitalnih mehanizmov.

Funkcije¹⁸, ki se izvajajo v digitaliziranih procesih, predstavljajo digitalizirane funkcije, kot je prikazano na Sliki 5.6a. Digitalizirane funkcije se izvajajo popolnoma samodejno. 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.

¹⁸ Funkcija predstavlja strukturni element aktivnosti, kot je definirano v delu [236].

Slika 5.6. Digitalizirana in kibernetizirana funkcija [1, 51]



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 tako fizični elementi (kot so stroji in naprave, aktuatorji, senzorji, kot tudi ljudje ipd.) kot tudi računalniški elementi (logični krmilniki, digitalni procesorji, krmilni programi, podatkovne baze ipd.).

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 vse 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*.

Pojem »kibernetizacija« je definiran v Slovarju slovenskega knjižnega jezika (SSKJ) kot *računalniško avtomatizirani nadzor nad proizvodnjo*.

Zaradi pomembnosti kibernetizacije v domeni današnjih naprednih proizvodnih sistemov je v delu [1] predstavljena definicija kibernetizacije, ki izhaja iz definicije pojma kibernetizacije ter temelji na Wienerovi definiciji kibernetike znanosti [250] ter Peklenikovi teoriji proizvodne kibernetike [35], in sicer:

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 5.6b. 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.). Prisotnost *subjekta* kot upravitelja v izvajanju kibernetiziranih funkcij je še vedno pomembna, kot je opisano v predhodnem poglavju. Digitalne kontrole, podobno kot pri izvajanju digitaliziranih funkcij, predstavljajo digitalno obliko kontrolnih mehanizmov v obliki pravil, navodil 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.).

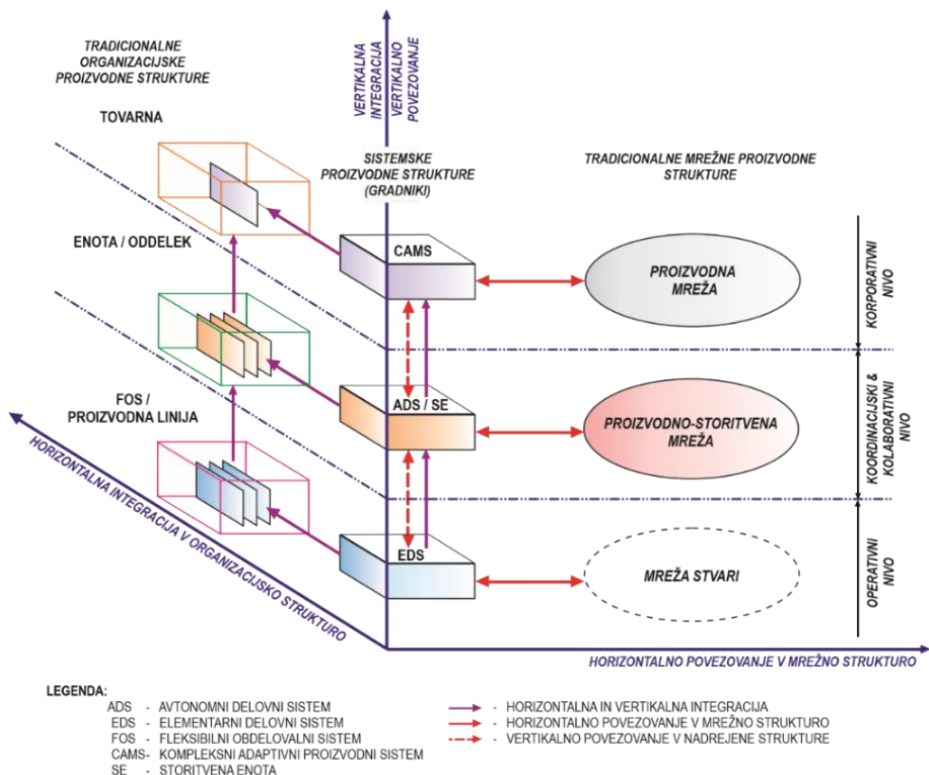
Na podlagi predhodne definicije kibernetizacije lahko zaključimo, da je za takšno preobrazbo potrebno vertikalno in horizontalno povezovanje različnih okolij, kot so: digitalno (kibernetično okolje), v katerem so prisotni digitalni elementi, in fizično okolje, v katerih obstajajo različni stroji in naprave, ter socialno okolje, v katerem eksistirajo socialni elementi (*subjekt*). Ta vizija konvergence socialnih, kibernetičnih in fizičnih elementov v proizvodnih sistemih je narekovala razvoj konceptov in modelov proizvodnih sistemov, ki omogočajo razvoj novih struktur in novih funkcionalnosti, potrebnih za realizacijo proizvodne paradigme pametnih proizvodnih sistemov.

5.2.2 Konceptualni model povezovanja socialnega, kibernetskega in fizičnega prostora v proizvodni domeni

Za razumevanje koncepta naprednih proizvodnih sistemov, ki temelji na povezovanju socialnega, kibernetskega in fizičnega prostora proizvodnega sistema, je treba definirati osnovne sistemske proizvodne strukture oz. gradnike, ki so prisotni v tradicionalnih podjetjih. Takšne sistemske proizvodne strukture predstavljajo elementarni delovni sistem (EDS), avtonomni delovni sistem (ADS) in kompleksni adaptivni proizvodni sistem (CAMS).

Na Sliki 5.7 so prikazane tradicionalne proizvodne strukture EDS, ADS in CAMS ter njihove povezave v organizacijske in mrežne proizvodne strukture.

Slika 5.7. Horizontalne in vertikalne integracije ter povezave v tradicionalnih podjetjih [1]



EDS je horizontalno integriran v tradicionalno organizacijsko strukturo, kot sta fleksibilni obdelovalni sistem in proizvodna linija, ter horizontalno povezan v mrežno proizvodno strukturo (mrežo stvari). Vertikalno povezovanje operativnega in kibernetkega nivoja tradicionalnega proizvodnega podjetja je omogočeno čez komunikacijsko povezovanje sistemskih proizvodnih struktur (ADS in EDS). Vertikalna integracija organizacijskih proizvodnih struktur operativnega nivoja v višje organizacijske forme koordinacijskega in kolaborativnega nivoja je zagotovljeno čez integracijo FOS in proizvodnih linij v enote in oddelke.

ADS predstavlja sistemsko proizvodno strukturo osrednjega dela proizvodnega podjetja oz. koordinacijskega in kolaborativnega nivoja. Omogoča vertikalno povezovanje EDS v višje sistemske proizvodne strukture (proizvodni sistem) ali mrežne proizvodne sisteme, kot sta proizvodno-storitvena mreža in proizvodna mreža. ADS je horizontalno integriran v enoto/oddelek ter horizontalno povezan v mrežno proizvodno strukturo (ADMS), ki je v konceptu [126] definirana kot proizvodno-orientirana storitvena mreža.

Sistemska proizvodna struktura tradicionalnega podjetja, ki predstavlja nadrejeno strukturo ADS (in njihovih EDS), je CAMS. Peklenik je definiral tovarno kot zapleten adaptivni proizvodni sistem [35]. CAMS omogoča horizontalno integracijo tradicionalnega proizvodnega podjetja v organizacijsko proizvodno strukturo, imenovano tovarna, ter horizontalno povezovanje podjetja v mrežno proizvodno strukturo – proizvodno mrežo (PM).

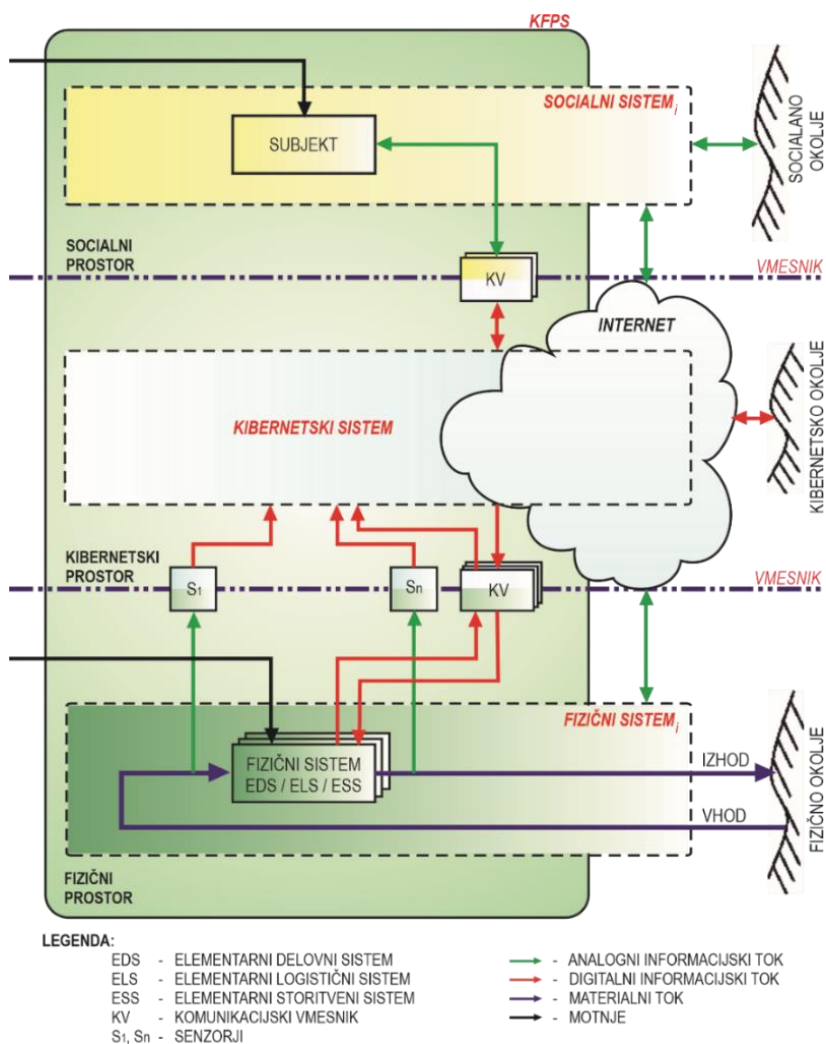
Prestrukturiranje sistemskih proizvodnih struktur na različnih nivojih, kot je bilo že omenjeno, temelji na integraciji socialnega, kibernetkega in fizičnega proizvodnega okolja. To prestrukturiranje je izvedeno na osnovi jasne identifikacije socialnega, kibernetkega in fizičnega prostora znotraj posameznih proizvodnih struktur. Generični model povezovanja socialnih, kibernetkih in fizičnih prostorov ter njihovih sistemov v sistemske proizvodne strukture je prikazan na Slika 5.8 v obliki konceptualnega modela KFPS.

V konceptu KFPS [9] je definirana nova vloga *subjekta*, ki je postavljen v socialni prostor, v katerem je povezan z ostalimi socialnimi sistemi ter tudi s kibernetkim prostorom, Slika 5.8. V socialnem prostoru obstajajo socialne mreže in socialni sistemi s *subjektom* kot osnovnim elementom takšnih mrež in sistemov [1].

Napredna IKT omogoča komunikacijo med deležniki v kibernetkem 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 [1].

Slika 5.8. Konceptualni model povezovanja socialnega, kibernetskega in fizičnega prostora [1, 9]



Komunikacija *subjekta* z elementi kibernetskega sistema je omogočena prek komunikacijskega vmesnika, ki se razlikuje od komunikacijskega vmesnika med kibernetskim 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 kibernetskega prostora čez različne vhode komunikacijskega vmesnika (tipkovnico, miško, računalniško palico, zvok, mimiko, elektroencefalografijo ipd.). Komunikacija od komunikacijskega vmesnika k *subjektu* se ustvarja prek izhodov komunikacijskega vmesnika (kot so tekst, grafika, audio, video, haptika, virtualna resničnost, obogatena resničnost ipd.) [1].

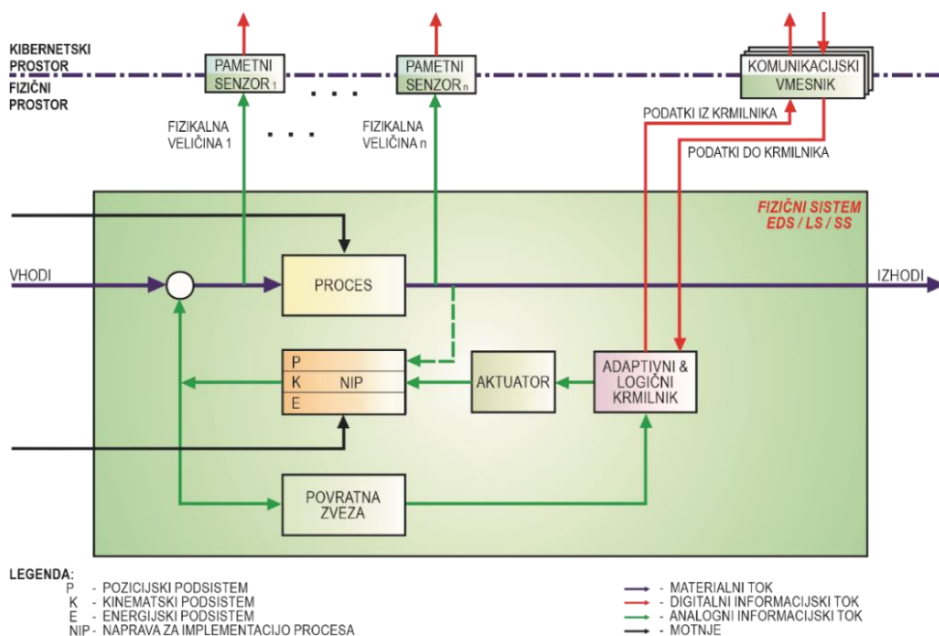
V fizičnem prostoru obstaja fizični sistem KFPS. Fizični sistem KFPS vsebuje systemske strukture, kot so fizični sistem EDS, fizični sistem elementarnega logističnega sistema (ELS), fizični sistem elementarnega storitvenega sistema (ESS) ipd. ELS omogočajo odvijanje logističnih procesov znotraj fizičnega 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 [15].

Povezovanje fizičnega prostora s kibernetskim prostorom je omogočeno s sensoriranjem, procesiranjem in zajemanjem podatkov ter prenosom v kibernetski prostor prek komunikacijskih vmesnikov in pametnih senzorjev. Pametni senzorji ($S_1 \dots, S_n$) zajemajo analogne vrednosti fizikalnih veličin, ki jih digitalizirajo ter jih prenašajo v digitalni obliki v kibernetski prostor (senzoriranje sile, tlaka, temperature ipd.) [1].

Komunikacijski vmesnik (KV) ima vlogo zagotoviti dvosmerno komunikacijo elementov kibernetskega 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 kibernetskem prostoru (glede na stanje naprave, vrednosti doseženih procesnih parametrov ipd.) ter prenos podatkov iz kibernetskega prostora in nastavitev na adaptivni & logični krmilnik fizičnega sistema (kot npr. nastavitve procesnih parametrov, prenos NC-kode ipd.) [1].

Fizični sistem EDS v konceptu KFPS vsebuje podobne elemente, definirane v konceptu Peklenikovega EDS [35] z določenimi modifikacijami. Peklenik je v svojem delu [35] definiriral 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 5.9.

Slika 5.9. Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu KFPS [1, 9]

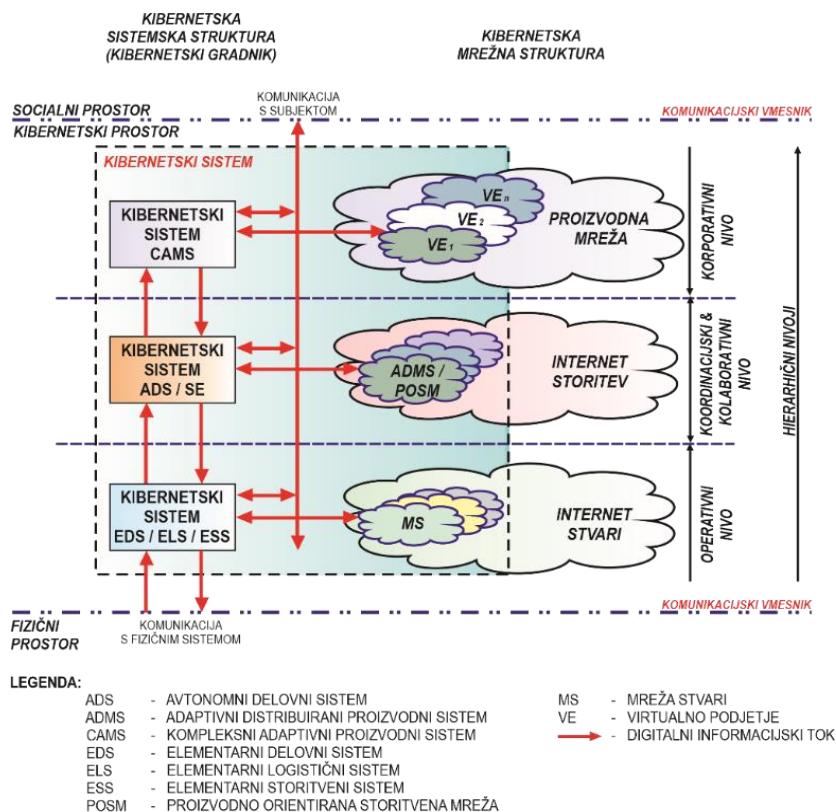


Proces ima vlogo transformacije vhodov v izhode, ki so opredeljeni s setom lastnosti. Naprava za implementacijo procesa je s procesom v povratni zvezi in jo razumemo kot vse, kar je potrebno za fizično izvedbo procesa. Ta zagotavlja ustrezne pozicijske, kinematične in energijske impulze vhodnim elementom procesa. Povratna zveza kontinuirano spremlja stanje parametrov NIP in jih posreduje adaptivnemu logičnemu krmilniku. Ta primerja informacije, pridobljene iz povratne zveze z referenco, in če nastopi razlika, prek krmilnih signalov aktivira aktuatorje za izvedbo korekcij. Adaptivni logični krmilnik je prek 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 [1].

Kibernetiski prostor, prikazan na Sliki 5.8, 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 [9].

Kibernetški sistem je bistveni del kibernetkega prostora, ki omogoča realizacijo vrste proizvodnih funkcij, kot so upravljanje s podatki in z znanjem, učenje, simulacija, 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 nivo. Struktura kibernetkega sistema KFPS je prikazana na Sliki 5.10.

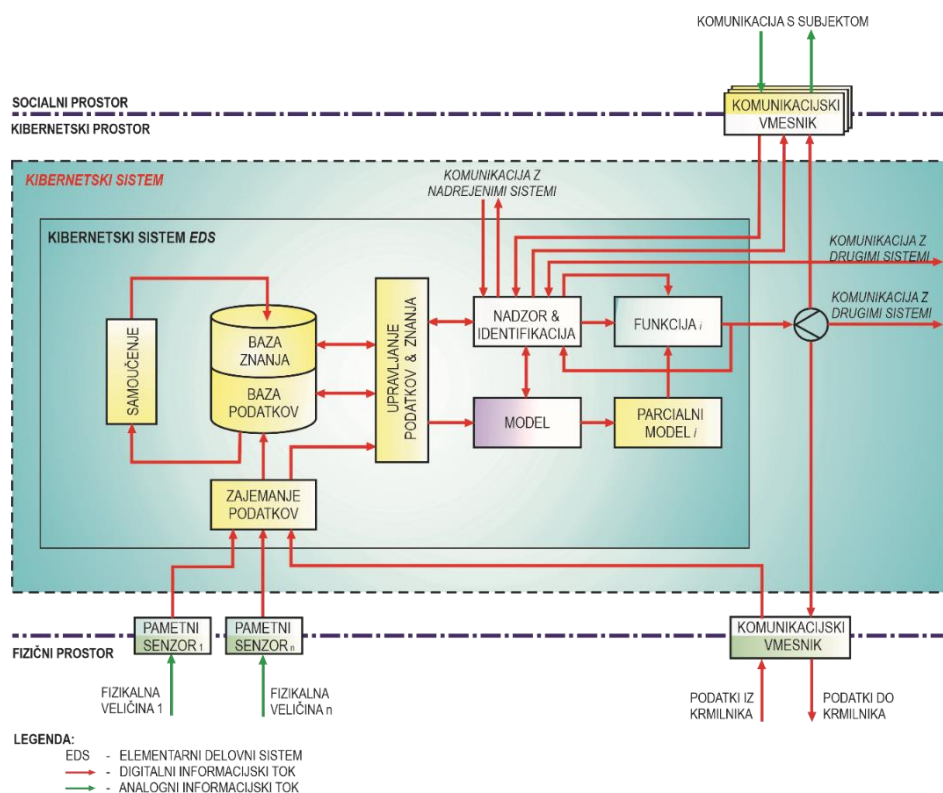
Slika 5.10. Struktura fizičnega sistema EDS v konceptu KFPS [1, 9]



Operativni nivo kibernetkega sistema vsebuje kibernetke sistemske strukture v obliki kibernetkega sistema EDS, kibernetkega sistema ELS ter kibernetkega sistema ESS. Takšni gradniki so horizontalno povezani v mreže stvari (MS), ki so del globalnega IoT. Vertikalno povezovanje s koordinacijsko-kolaborativnim nivojem kibernetkega sistema omogoča povezovanje EDS, ELS ter ESS z nadrejenimi strukturami [1].

Kibernetiski sistem EDS, Slika 5.11, 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 kibernetiski sistem EDS.

Slika 5.11. Struktura kibernetskega sistema EDS v konceptu KFPS [1, 9]

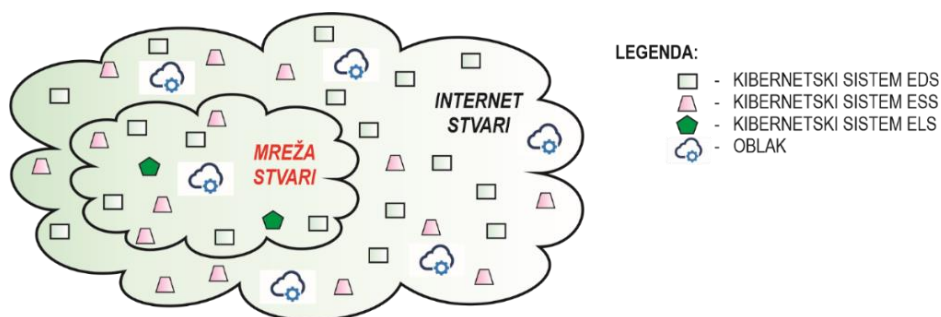


Vertikalno povezovanje prestrukturiranega EDS v integrirane delovne strukture temelji na komunikaciji kibernetskega sistema EDS z nadrejenimi sistemi, ki omogoča prenos podatkov o procesih, virih, kakovosti, operacijah in okolju do koordinacijsko-kolaborativnega nivoja ter korporativnega nivoja kibernetskega sistema. Prek komunikacije z nadrejenimi sistemi pridobiva kibernetiski sistem EDS podatke in nastavitve iz kibernetskega sistema SKFPS, kot so npr. procesni

parametri, NC-kode, različna navodila, vzdrževalni ukrepi (npr. na podlagi komunikacije s proizvajalcem opreme) ipd. [1].

Kibernetiski sistem EDS, kot je definirano v konceptualnem modelu KFPS [9], je gradnik mreže stvari (MS) (glej Sliko 5.12). 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.

Slika 5.12. Model mreže stvari [1, 9]



Horizontalno povezovanje kibernetkega sistema EDS v MS odpira možnosti komunikacije z drugimi sistemi v kibernetnem sistemu, kot so kibernetiski sistemi drugih EDS, kibernetiski sistemi ELS in kibernetiski 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 kibernetnem 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 [1].

Koordinacijsko-kolaborativni nivo je »vmesnik« med operativnim in korporativnim nivojem kibernetkega sistema, Slika 5.10. Omogoča eksistenco kibernetkih gradnikov ADS in SE ter njihovo vključevanje v različne mrežne strukture, kot sta ADMS in POSM, ki sta del globalne mreže IoS.

Na koordinacijsko-kolaborativnem nivoju v kibernetnem sistemu so prisotni kolaborativni odnosi med ljudmi in sistemom ter tudi kolaboracija med samimi sistemi. Vloga *subjekta* na tem nivoju kibernetkega sistema je bolj upravljalna. To pomeni, da *subjekt* izpostavlja končno odločanje (če pride do konflikta v

odločanju kibernetskih elementov, ki realizirajo funkcije v kibernetskem sistemu), da definira algoritme obnašanja kibernetskih elementov (npr. agentov), zastavlja cilje in opazuje, analizira in ukrepa glede na stanje celotnega ADS.

Kibernetski sistem ADS (glej Sliko 5.10) predstavlja element kibernetskega sistema KFPS, 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 [1].

Vključevanje prestrukturiranega ADS v PM je posredno oz. se izvaja prek nadrejenega sistema CAMS.

Povezovanje prestrukturiranega ADS in njegovega kibernetskega sistema v mrežne strukture ADMS na koordinacijskem in kolaborativnem nivoju poteka dinamično. Mrežno strukturo ADMS gradijo proizvajalci, dobavitelji, odjemalci in konkurenca. Pri tem je, kot je definirano v konceptu [110], uporabljen tržni mehanizem, ki stimulira gradnjo strukture ADMS glede na trenutne cilje in omejitve okolja.

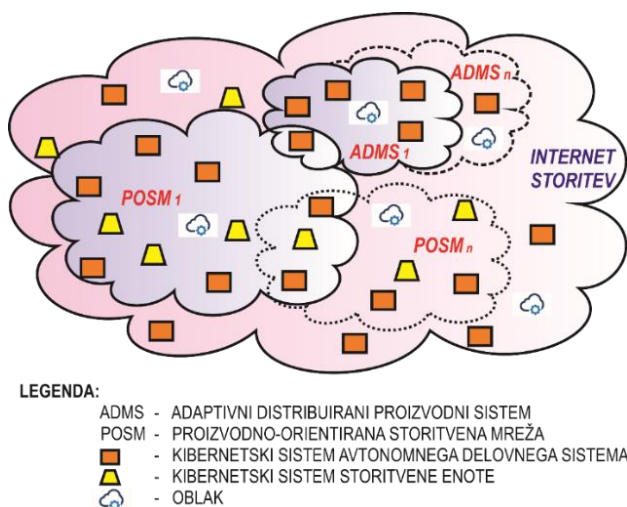
Vključevanje kibernetskega sistema ADS v mrežne strukture se ustvarja tudi s ciljem pridobivanja storitvenih podpor oz. funkcionalnosti (kot so npr. vzdrževanje strojev, interna logistika in transport, kontrola kakovosti, upravljanje z orodji ipd.), ki jih prestrukturirani ADS potrebuje za ustrezen potek proizvodnih operacij. Za takšno sodelovanje je v konceptu [126] definirana SE, ki ima vlogo izvajanja storitvene podpore po vzoru spletnih storitev. Na tej osnovi koncept KFPS gradi mrežno strukturo POSM kot mrežo, ki jo sestavljajo kibernetski sistemi SE in kibernetski sistemi ADS. Tako posamezen ADS kot tudi posamezna SE sta lahko hkrati prek svojih kibernetskih sistemov vključena v različne mrežne strukture, glej Sliko 5.13.

Na Sliki 5.13 so predstavljene mrežne strukture, ki se gradijo na koordinacijskem in kolaborativnem nivoju kibernetskega sistema KFPS in so del širšega koncepta IoS.

Poleg kibernetskih sistemov ADS in kibernetskih sistemov SE vsaka mrežna struktura vsebuje tudi informacijsko infrastrukturo za povezovanje v mrežo v

obliki oblaka. Infrastruktura oblaka omogoča realizacijo virtualnega kompetenčnega centra (VKC) ter storitvenih vmesnikov, prek katerih uporabnik storitve specificira zahteve glede omejenosti storitve. VKC ima nalogo omogočiti kooperacijo in koordinacijo med ADS [114] ter dostop do registra storitev, ponujati informacije o kakovosti storitve kot tudi zagotavljati pravila in dogovore v mreži [126].

Slika 5.13. Model mrežne strukture koordinacijsko-kolaborativnega nivoja kibernetkega sistema [1, 9]



Sistemska struktura, ki se vzpostavlja znotraj posamezne mrežne strukture ADMS, je mrežni proizvodni sistem MPS_{ADMS} . Posamezna mrežna struktura POSM pa omogoča vzpostavitev sistemske strukture mrežnega proizvodno-storitvenega sistema $MPSS_{POSM}$.

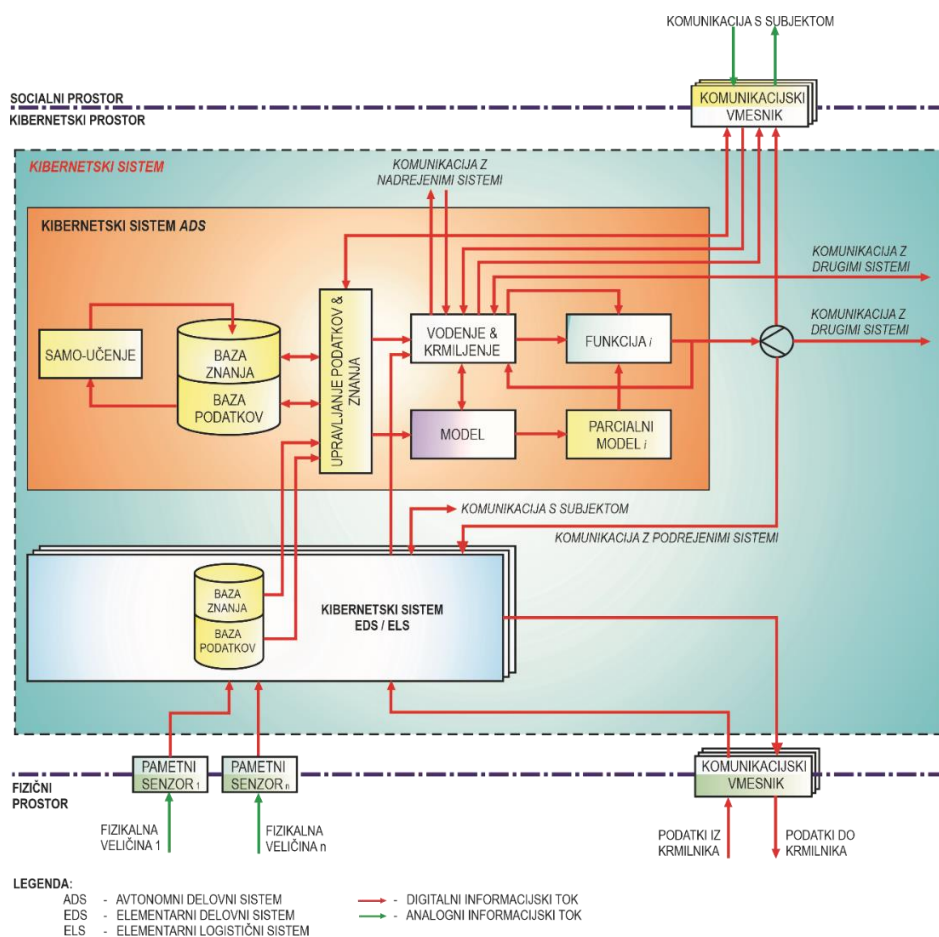
Referenčni konceptualni model prestrukturiranega ADS je sestavljen iz enega ali več prestrukturiranih EDS (njihovih fizičnih in kibernetkih sistemov) ter kibernetkega sistema ADS, ki vključuje funkcionalnosti za potrebe upravljanja in krmiljenja, kar ADS omogoča avtonomijo in ključno prednost pred konkurenco.

Kibernetki sistem ADS v konceptu KFPS je predstavljen na Sliki 5.14 v obliki parcialnega referenčnega modela ($M_{pr,CS_{ADS}}$).

Kibernetki sistem prestrukturiranega ADS vsebuje bazo podatkov in znanja, glej Sliko 5.14. V njej so shranjeni podatki o izdelkih, podatki o projektih in

aktivnostih projektov ter podatki, ki se nanašajo na delovne procese, za katere je ADS v konceptu KFPS kompetenten. Ta baza je lokalna in ADS omogoča avtonomno delovanje ter neodvisno povezovanje v različne mrežne strukture po konceptu ADMS. Njena temeljna naloga je podpora upravljanju podatkov in znanja. Upravljanje podatkov in znanja je primarno osredotočeno na formalizacijo, shranjevanje, deljenje in prenos ter koordinacijo obstoječega znanja [46].

Slika 5.14. Struktura kibernetičnega sistema ADS v konceptu KFPS [1, 9]



Osrednji del strukture parcialnega referenčnega modela kibernetičnega sistema prestrukturiranega ADS predstavlja funkcija vodenja in krmljenja (glej Sliko 5.14). Prek funkcije vodenja in krmljenja je ADS v konceptu KFPS, povezan po

eni strani s podrejenimi sistemi (s kibernetскими sistemi EDS, ELS, ESS), po drugi pa z nadrejenimi sistemi (s kibernetским sistemom CAMS, PM ipd.).

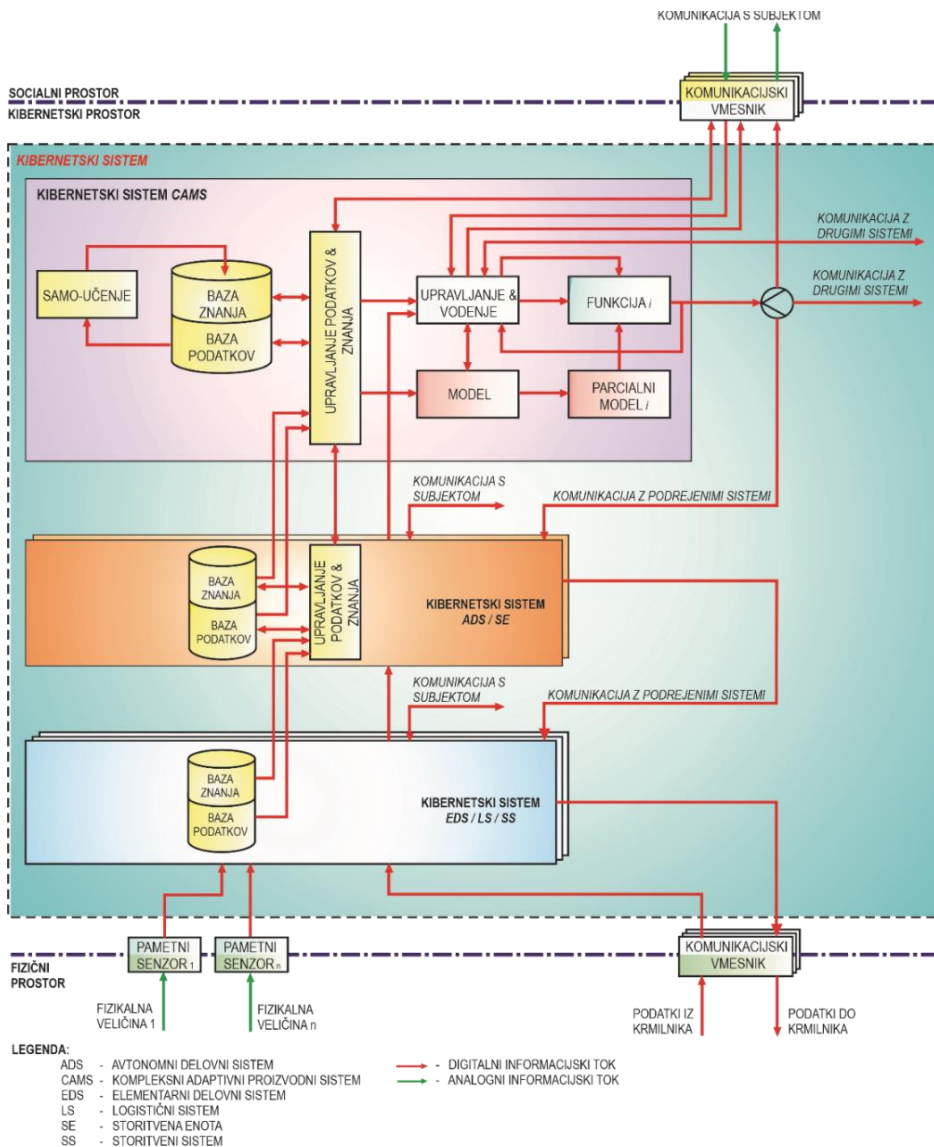
Funkcija vodenja in krmiljenja ADS v konceptu KFPS omogoča sprožanje različnih digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij, ki omogočajo ustrezen potek operacij v ADS. Funkcioniranje ADS v konceptu KFPS se lahko obravnava z različnih vidikov, in sicer z vidika: 1) procesa, 2) virov, 3) nalog, 4) kakovosti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

Iz takšne obravnave izhajajo funkcije ADS v konceptu KSPS, ki so v konceptih [46, 110], 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. [1].

Korporativni nivo je del kibernetškega sistema, v katerem je vzpostavljen kibernetški gradnik v obliki kibernetškega sistema CAMS, ki je zastopnik kompleksnega adaptivnega proizvodnega sistema oz. tovarne v kibernetškem okolju. Horizontalno povezovanje kibernetškega sistema CAMS v kibernetškem sistemu odpira možnost vključevanja podjetja v PM ter vzpostavitev različnih VE znotraj takšne mrežne strukture, glej Sliko 5.10.

Element korporativnega nivoja kibernetškega sistema KFPS [1, 9], 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 in tudi sodelovanje KFPS v mrežnih sistemih, predstavlja kibernetški sistem CAMS. Struktura kibernetškega sistema CAMS v konceptu KFPS je predstavljena na Sliki 5.15.

Slika 5.15. Struktura kibernetičkega sistema CAMS v konceptu KFPS [1, 9]



Prek funkcije upravljanja in vodenja ter podatkovnega informacijskega sistema baze podatkov in znanja je kibernetički sistem CAMS vertikalno povezan s kibernetičkim sistemom ADS/SE oz. kibernetičkim sistemom EDS/ELS/ESS. Takšna komunikacijska povezava omogoča kibernetičskemu sistemu CAMS pridobivanje podatkov in informacij iz podrejenih sistemov in pošiljanje

upraviteljskih informacij do podrejenih sistemov (npr. delovnih nalog, proizvodnih planov ipd.).

Funkcija upravljanja podatkov in znanja v kibernetnem sistemu CAMS skrbi za spremljanje, obdelovanje in shranjevanje podatkov iz nižjih nivojev kibernetnega sistema. Obdelani podatki se shranjujejo v integrativno bazo podatkov in znanja kibernetnega sistema CAMS. Ustvarjanje novega znanja iz proizvodnih podatkov je omogočeno prek izvajanja funkcije samoučenja v kibernetnem sistemu CAMS (glej Sliko 5.15).

V kibernetnem sistemu CAMS je prisotnost *subjekta* bolj izražena skozi funkcijo upravljanja in vodenja. Na tem nivoju je *subjekt* izdatno podprt s funkcijami iz nižjih kibernetnih podsistemov (kibernetnega sistema EDS, kibernetnega sistema ADS), ki mu omogočajo upravljanje s sistemom v realnem času in od koderkoli. Skozi takšno vlogo *subjekt* definira cilje proizvodnega sistema, spremlja in opazuje obnašanje sistema prek analitičnih, diagnostičnih, napovednih in vizualizacijskih sistemov in sistemsko spremlja kazalnike uspeha proizvodnega sistema v celoti. To mu omogoča visok nivo odločanja v realnem času in komunikacijo, sodelovanje in koordinacijo z drugimi elementi proizvodnega sistema.

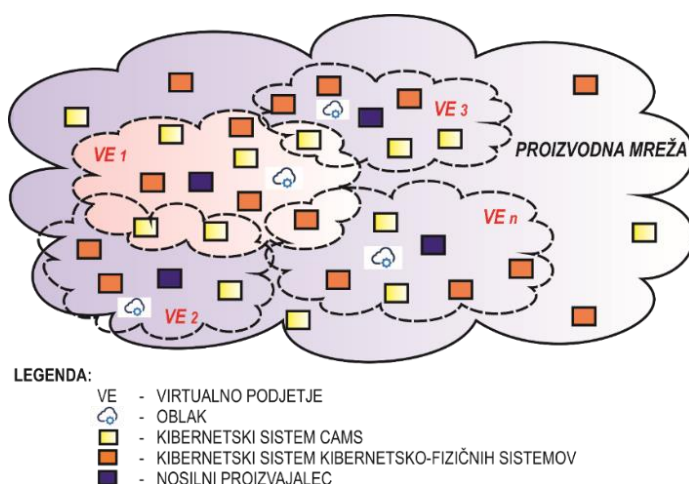
Na korporativnem nivoju kibernetnega sistema KFPS potekajo različni procesi, kot so odločitveni procesi (operativni menedžment, projektni menedžment, upravljanje s sredstvi, upravljanje s človeški viri ipd.), transakcijski procesi (nabava, plačila ipd.), ustvarjalni procesi (raziskave, projektiranje 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 zadovoljevanju 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.) [1].

Kibernetni sistem CAMS je, kot je definirano v konceptualnem modelu KFPS [1, 9], gradnik mrežnih struktur, ki so del širše strukture PM (glej Sliko 5.16). Čez povezovanje in vključevanje v PM kibernetni sistem CAMS v PM prispeva kompetence KFPS, hkrati pa sprejema skupno politiko, načela, cilje in omejitve.

Osnovna ideja PM, ki izhaja iz pregleda literature, je mišljena kot kooperativna razdelitev aktivnosti, izmenjevanje informacij in tudi kot kolaboracijska delitev človekovih, finančnih in tehničnih virov, da bi dosegli skupni cilj in dodano vrednost.

Z mrežnim povezovanjem kibernetskega sistema CAMS z drugimi deležniki PM je omogočeno vzpostavljanje mrežnih struktur, kot so virtualni poslovni sistemi ali virtualna podjetja (VE). Udeleženci takšnih mrežnih struktur se zbirajo okoli glavnih nosilcev mreže (NM) (ang. *Original Equipment Manufacturer – OEM*). Primer mrežnih struktur znotraj PM je predstavljen na Sliki 5.16.

Slika 5.16. Model proizvodne mreže v konceptu KFPS [1, 9]



Zahtevani nivo kompetenc je temeljni pogoj za vstopanje KFPS oz. kibernetskega sistema CAMS v VE. Ta pogoj definirajo pravila vključevanja v PM. Za sodelovanje v PM morajo deležniki vsebovati funkcionalne kompetence (znanja in izkušnje, tehnološko opremljenost ipd.) in kompetence povezovanja, kot je definirano v pregledu literature.

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

5.3 Povzetek

V tem poglavju je na sistematičen način predstavljen koncept četrte industrijske revolucije in proizvodne paradigme pametnih proizvodnih sistemov ter koncept kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov kot osnovnih gradnikov pametnih proizvodnih sistemov. Ta je podal osnove za transformacijo tradicionalnih proizvodnih podjetij in njihovih proizvodnih ter poslovnih sistemov v pametne proizvodne sisteme in pametne tovarne. Značilen poudarek je podan precej na koncept kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov in njihove gradnike. Takšni proizvodni sistemi so temelj za nadaljnje evolucije proizvodnih sistemov in njihovih gradnikov na poti k novi industrijski revoluciji.

6 ADAPTIVNI KOGNITIVNI PROIZVODNI SISTEMI – PROIZVODNA PARADIGMA ZA 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

V zadnjem desetletju 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 [7].

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., [7] 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 [1, 9], tako imenovanih pametnih proizvodnih sistemov.

Inovacije in transformacijske 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 [30].

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 [23]. V članku [23], 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 predstavljeni novi koncepti *Industrije 5.0*, ključne omogočitvene tehnologije za razvoj novih konceptov proizvodnih sistemov po načelih *Industrije 5.0* in nekateri na novo razviti koncepti naprednih proizvodnih sistemov, ki se že razvijajo v duhu nove industrijske revolucije.

6.1 Industrija 5.0

Industrija je ključno gonilo gospodarskega razvoja [343], še posebej v času nepričakovanih kriznih situacijah, kot je bila pandemija koronavirusa SARS-CoV-2. Evropska komisija v dokumentu »*Industrija 5.0 – Na poti k trajnostni, na človeka osredotočeni in odporni evropski industriji*« [27] 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 [344] velja *Industrija 5.0* za naslednji industrijski razvoj.

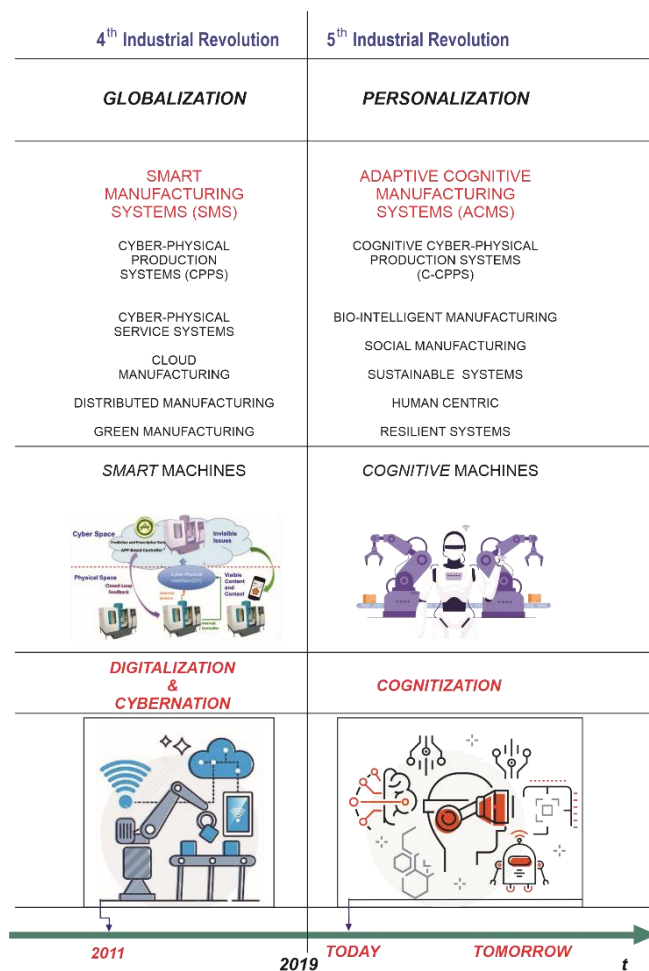
»*Industrija 5.0 vrne človeško delovno silo v tovarno, kjer sta človek in stroj povezana za povečanje učinkovitosti procesa z uporabo človeške možganske moči in ustvarjalnosti prek integracije delovnih tokov z inteligentnimi sistemi.*« [345].

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 [27] 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 [27]. Koncept *Industrije 5.0* je Evropska komisija [27] 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.«

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 [346]. Transformacija iz Industrije 4.0 v Industrio 5.0 je prikazana na Sliki 6.1.

Slika 6.1. Evolucija iz Industrije 4.0 v Industrio 5.0 [51]



Na podlagi pregleda literature [18, 23, 25, 343, 347-352] in dokumentov Evropske komisije [27] izstopajo trije ključni dejavniki *Industrije 5.0: osredotočen na človeka, trajnosten in odporen*. Ti trije ključni dejavniki *Industrije 5.0* so predstavljeni v prispevku [343].

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 ter ohranjanje konkurenčne prednosti pred konkurenti [350].

V članku [349] so avtorji identificirali okvir koncepta *Industrije 5.0*. Okvir koncepta *Industrije 5.0* temelji na simbiozi treh segmentov tehnološkem, socialnem in ekološkem, ki tvorijo bistvo *Industrije 5.0* [349].

Avtorji so v članku [349] predstavili zbirko znanstvenih študij, ki poudarjajo nujnost simbioze človeka z novimi tehnologijami. V prispevku [348] je predstavljena simbioza človeka s tehnologijo. Podobno sta Bernar in Welh v dokumentu [353] opisala prakse »pametnega dela«.

6.2 Ključne tehnologije za Industrijo 5.0

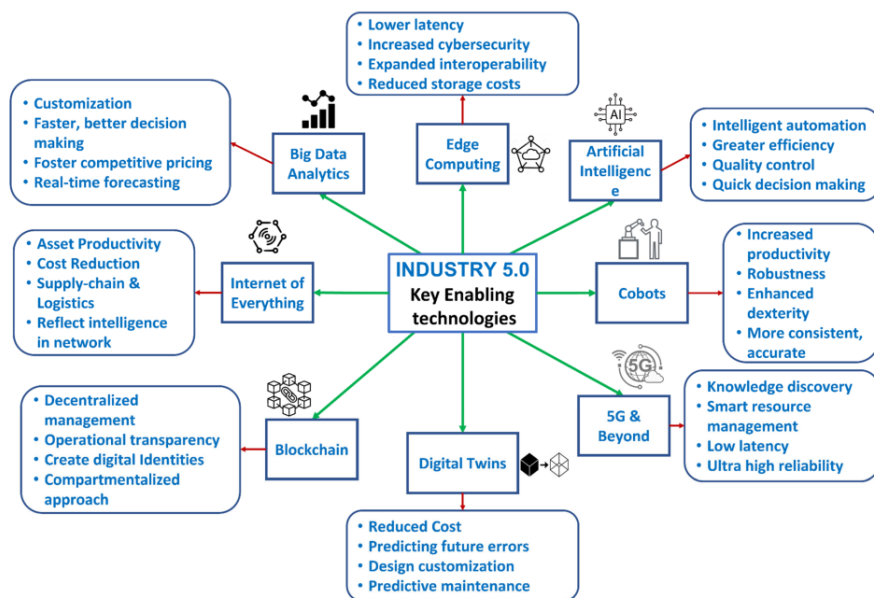
Na podlagi dokumenta Evropske komisije [28] so avtorji v prispevku [351] identificirajo naslednje omogočitvene tehnologije za prehod iz Industrije 4.0 na koncept *Industrije 5.0*:

- individualizira tehnologije interakcije človek–stroj, ki med seboj povezujejo in združujejo prednosti ljudi in strojev,
- bionavdihnjene 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 omogočevalne tehnologije koncepta *Industrije 5.0*, kot so robno računalništvo (ang. *Edge Computing*), analitika velepodatkov (ang. *Big Data Analytics*), internet vsega (ang. *Internet of Everything*), tehnologija veriženja podatkovnih blokov (ang. *Blockchain*), digitalni dvojčki (ang. *Digital Twin*), oblachne tehnologije in shranjevanje podatkov (ang. *5g & Beyond*), kolaborativni roboti (ang. *Cobots*) in umetna inteligenca (ang. *Artificial Intelligence*), so opisane v delu [354]. Tehnologije, ki omogočajo koncept *Industrije 5.0*, so prikazane na Sliki 6.2.

Slika 6.2. Ključne omogočevalne tehnologije *Industrije 5.0* [354]



6.3 Adaptivni- kognitivni proizvodni sistemi

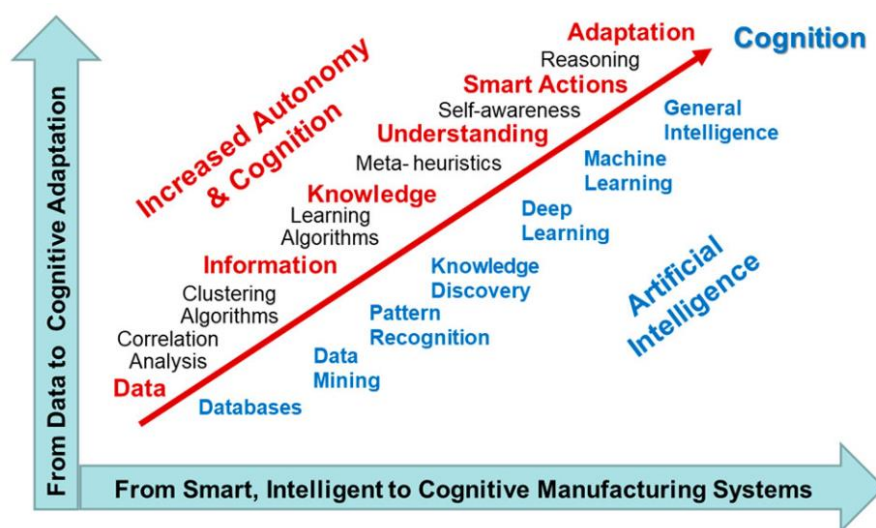
Današnji izzivi na področju proizvodjanja so osredotočeni na reševanje problematike nepredvidljivosti proizvodnega okolja z namenom povečanja adaptivnosti proizvodnih sistemov, usmerjenih v personalizirano proizvodnjo. Spremembe okolja imajo danes velik vpliv na delovanje proizvodnih sistemov in posledično na okolje, v katerem delujejo. Večja sposobnost adaptiranja

proizvodnih sistemov izboljšuje zanesljivost doseganja njihovih ekonomskih in poslovnih ciljev [98].

V članku [23] avtorji uvajajo novo klasifikacijo prilagodljivosti proizvodnih sistemov, in sicer statično, dinamično, kognitivno in ekstremno prilagodljivost.

Na Sliki 6.3 je prikazana tranzicijska pot od podatka do kognicije v razvoju proizvodnih sistemov na poti do adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov.

Slika 6.3. Tranzicija na poti iz podatkov do kognicije [30]

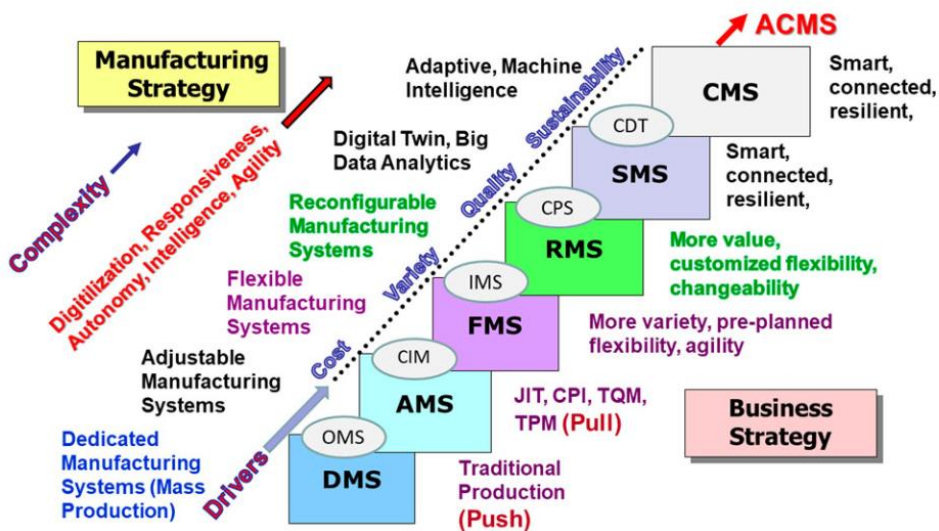


Adaptivni-kognitivni proizvodni sistemi (ang. *Adaptive Cognitive Manufacturing Systems* – ACMS) [23, 30] so sistemi proizvodne paradigme kognitivnih sistemov, ki izkoriščajo dosežke in »moč« Industrije 4.0 in jih razširjajo z novimi tehnologijami, in sicer največ s tehnologijo umetne inteligence, da bi dosegli bolj odzivne, prilagodljive in razmišljajoče proizvodne sisteme, v katerih bo vloga človeka spremenjena. Vlogo človeka in njegove odločitve bodo v takšnih sistemih podpirali in dopolnjevali inteligentni kognitivni sistemi ter aplikacije.

Adaptivni 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 resničnem svetu v spreminjajočem se okolju [30].

Ilustrativni prikaz evalvacije proizvodnih sistemov od proizvodne linije do adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov je prikazan na Sliki 6.4.

Slika 6.4. Evolucija proizvodnih sistemov [30]

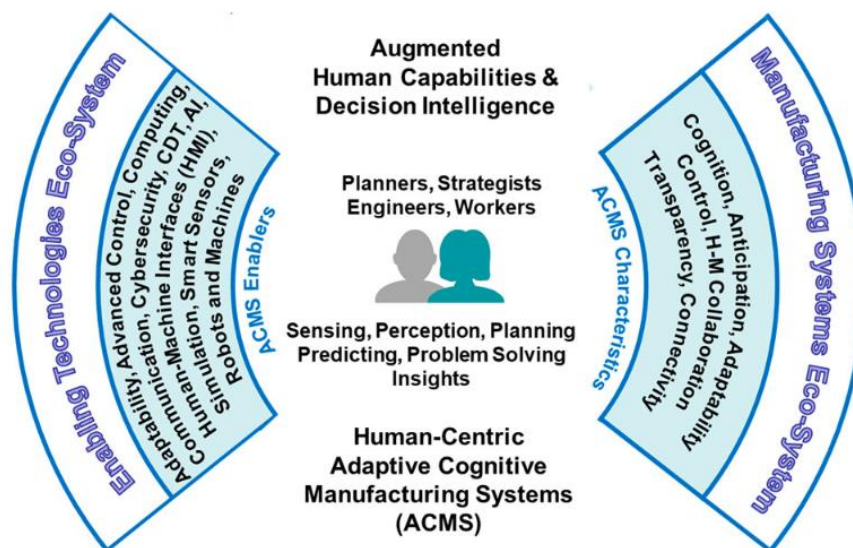


ACMS predstavljajo na človeka osredotočene proizvodne sisteme, v katerih biološka in umetna inteligenca izvajata delo v tandemu in na ta način proizvodni sistemi postajajo bolj prožni, odzivni, prilagodljivi in trajnostni. To pomeni, da bodo prihodnji ACMS omogočali skupno sodelovanje med človekom in 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.

Kognitivne tehnologije (kognitivno računalništvo, industrijski internet stvari, napredna analitika ipd.) bodo omogočile 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 izkušenj človeka in umetne inteligence bo močno vplivala na kolaborativne procese v novih proizvodnih sistemih.

Na Sliki 6.5 je prikazana kolaboracija človeka (*subjekta*) in kognitivne tehnologije v kontekstu ACMS.

Slika 6.5. Na človeka osredotočeni adaptivni kognitivni proizvodni sistemi [30]



Veliko faktorjev bo v prihodnosti 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.

6.4 Prihodnji koncepti proizvodnih sistemov za Industrijo 5.0

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 [355].

Prihodnji proizvodni sistemi, sistemi nove industrijske revolucije – *Industrije 5.0*, kot so na človeka osredotočena prilagodljiva proizvodnja, živi proizvodni sistemi, socialno-kibernetko-fizični proizvodni sistemi, prožni proizvodni sistemi, kibernetko-fizični kognitivni proizvodni sistemi »bodo v prihodnosti

maksimalno prilagodljivi, fizično in logično razširljivi in agilni; uporabljeno bo več statičnih, dinamičnih in kognitivnih dejavnikov, boljša bo prilagodljivost za izboljšanje produktivnosti in poudarjeni bodo vsi trije vidiki trajnosti; prišlo bo do povečanega skupnega sodelovanja med človekom in strojem ter sprejemanja odločitev, nadomestitve implicitne interakcije z eksplicitno delitvijo nalog in užitka v večji prepoznavnosti vseskozi.

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 kibernetske varnosti bo običajna« [23].

V okvirju nove proizvodne paradigme, t. i. proizvodne paradigme adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov [23], so se začeli razvijati novi koncepti naprednih proizvodnih sistemov, kot so: odporni proizvodni sistemi, trajnostna proizvodnja, biointeligentni proizvodni sistemi, na človeka osredotočena proizvodnja, kognitivni kibernetsko-fizični proizvodni sistemi ipd. V nadaljevanju sta predstavljena 1) koncept odpornih proizvodnih sistemov in 2) koncept kognitivnih kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov.

6.4.1 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 Sliko 6.6.

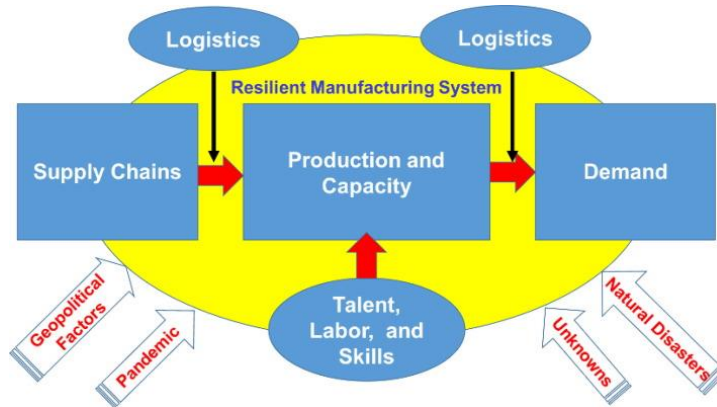
Odpornost proizvodnega sistema ReMS je sposobnost uspešne povrnitve proizvodne zmogljivosti po njenem zmanjšanju zaradi zunanje motnje [98].

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 [356]. Krajši, kot je čas do popolne obnovitve zmogljivosti sistema relativno glede na jakost motnje, večja je odpornost sistema [98].

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 [357]. 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 [356].

Slika 6.6. Odporni proizvodni sistem [358]



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 [359].

Upravljanje proizvodnje s strani neposredno udeleženih uporabnikov proizvodnih procesov omogoča, da sta robustnost in agilnost proizvodnega sistema v prilagodljivem ravnotežju in s se tem uresničuje koncept odpornosti. Primeri proizvodnih sistemov, ki so privzeli pristop odpornosti, izkazujejo zmanjšane pripravljalne čase in povečano stabilnost proizvodnih procesov [360].

6.4.2 Kognitivni kibernetiko-fizični proizvodni sistemi

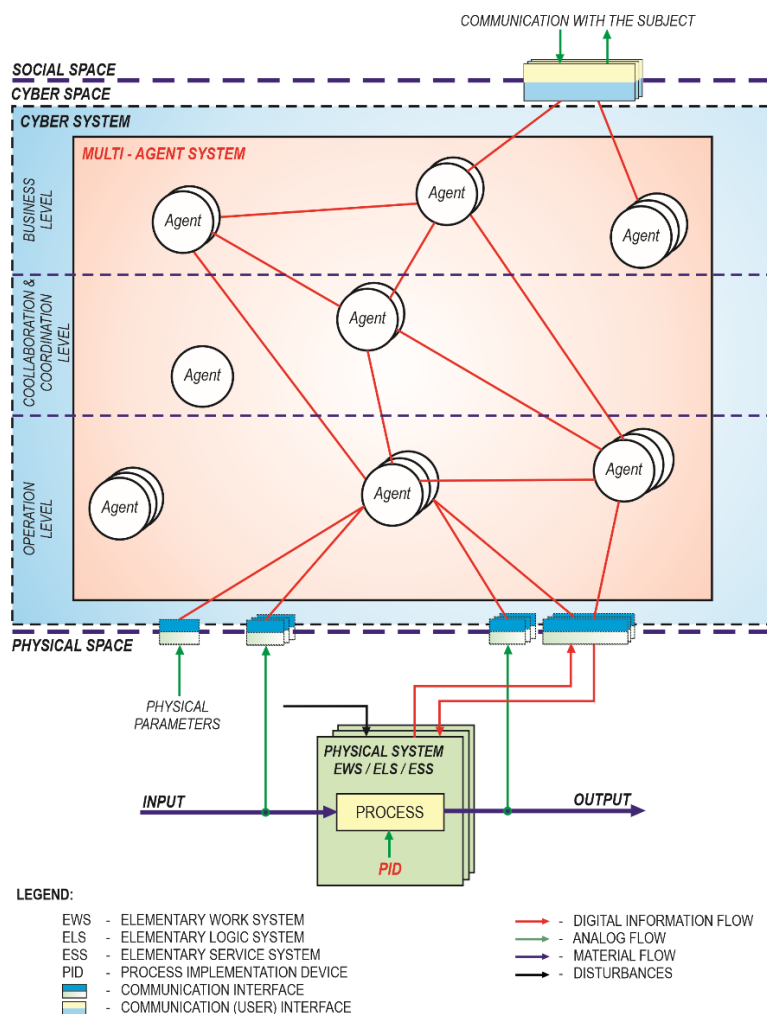
Koncept kognitivnih kibernetiko-fizičnih proizvodnih sistemov (K-KFPS) [51] izhaja iz dela [9], v katerem je kibernetiko-fizični EDS uveden in definiran kot osnovni gradnik KFPS.

Koncept K-KFPS uvaja umetno inteligenco in kognitivne tehnologije v kibernetiki sistem KFPS kot digitalne mehanizme za implementacijo digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij v proizvodnem sistemu.

Osnova za strukturiranje modela kibernetskega sistema v konceptu K-KFPS je konceptualni model trinivojske večagentske arhitekture za distribuirano krmiljenje proizvodnih sistemov, ki je bil opisan v delu [320]. Model K-KFPS je predstavljen na Sliki 6.7.

Fizični elementi, kot so fizični delovni sistemi, so predstavljeni v fizičnem prostoru, glej Sliko 6.7. Krmiljenje teh fizičnih elementov proizvodnega sistema je omogočeno prek adaptivnega logičnega krmilnika (ang. *Adaptive Logic Controller* – ALC).

Slika 6.7 Model kognitivnih kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov [1, 51]



Fizični elementi K-KFPS so v kibernetskem sistemu K-KFPS predstavljeni s pomočjo agentskih struktur. Povezavo med fizičnim in kibernetskim svetom omogoča komunikacijski vmesnik.

Komunikacijski vmesnik med socialnim in kibernetskim sistemom v konceptu K-KFPS temelji na vmesniku človek–stroj (ang. *Human-machine interface* – HMI). Koncept K-KFPS povzame temeljne integracijske principe za kibernetsko-fizične proizvodne sisteme, opisane v delu [361].

Sposobnost komunikacije in interakcije v kibernetskem prostoru temelji na digitalnem procesiranju informacij, uporabi komunikacijskih tehnologij in nadzornih mehanizmov, ki omogočajo sklenjeno zanko med kibernetskim in fizičnim sistemom kot tudi med kibernetskim in socialnim sistemom. Iz tega temelja izhaja naravna pot k implementaciji KFPS in K-KFPS na ideji, izpostavljeni v delu [362], da elementom socialnega, fizičnega ali kibernetskega sistema pridružimo programske entitete – agente, ki bodo elemente zastopale v kibernetskem sistemu.

Prve implementacije agentskih tehnologij v proizvodni domeni, kot je opisano v pregledu literature, segajo v 80. leta prejšnjega stoletja. Te implementacije demonstrirajo specifične lastnosti, ki jih omogočajo agenti in večagentski sistemi, kot so: avtonomnost, reaktivnost, proaktivnost, kooperativnost, adaptivnost in mobilnost. Shen in sodelavci podajajo v delu [209] pregled stanja s področja rabe agentskih tehnologij za distribuirano planiranje procesov in razporejanje v proizvodni domeni. Predstavljeni agentski pristop k implementaciji in validaciji konceptov KFPS in K-KFPS, ki je prikazan v tem poglavju, temelji na delih [109, 214, 320].

V delu [320] avtorji definirajo fizične elemente proizvodnega sistema, kot so *subjekti*, obdelovalni sistemi, obdelovanci, izdelki ipd. in logične/programske elemente proizvodnega sistema, kot so npr. delovni nalogi, NC-programi ipd. Za opravljanje dela je potrebno, da so elementi proizvodnega sistema medsebojno povezani. V ta namen je vsakemu elementu proizvodnega sistema dodan agent, ki ga zastopa.

Po definiciji, podani v pregledu literature, predstavlja agent programski sistem, ki skozi komunikacijo in kolaboracijo z drugimi programskimi sistemi rešuje kompleksne probleme [363]. To pomeni, da delujejo agenti kot skupnost interaktivnih agentov oz. kot večagentski sistem (MAS). Agenti v MAS medsebojno komunicirajo prek komunikacijskih protokolov in se odzivajo na stanje svojega okolja. Različni agenti imajo različne vloge in sfere vplivov na

posamezne elemente v KFPS in K-KFPS. To pomeni, da različni agenti v MAS izvajajo različna dejanja glede stanja svojega okolja in interakcije (vzajemnega delovanja) z ostalimi agenti.

V kibernetnem sistemu K-KFPS agentske strukture v formi večagentskih sistemov (MAS) medsebojno komunicirajo in imajo vlogo digitalnih mehanizmov za implementacijo digitaliziranih funkcij. Agenti v MAS medsebojno komunicirajo prek komunikacijskih protokolov in odgovarjajo na pobude svojega okolja. Različni agenti imajo različne vloge in predstavljajo različne fizične elemente v kibernetnem okolju K-KFPS.

Kibernetna struktura EDS v konceptu K-KFPS temelji na strukturi virtualnega delovnega sistema (VDS) [109]. Struktura kibernetnega sistema EDS v konceptu K-KFPS je predstavljena na Sliki 6.8.

Ontološka definicija agenta v konceptu K-KFPS je prikazana v enačbi (6.1). Agent je definiran z identifikacijsko kodo ID , strukturo agenta Ω_{Agent} , ciljno funkcijo **Role**, akcijami **Act**, interakcijami **Interact**, obnašanjem *Behaviour*, jezikom *Ling* in tipom agenta $Type_{Agent}$.

$$\mathbf{Agent} = (ID_{Agent}, \Omega_{Agent}, \mathbf{Role}, \mathbf{Act}, \mathbf{Interact}, \mathbf{Behaviour}, \mathbf{Ling}, Type_{Agent}) \quad (6.1)$$

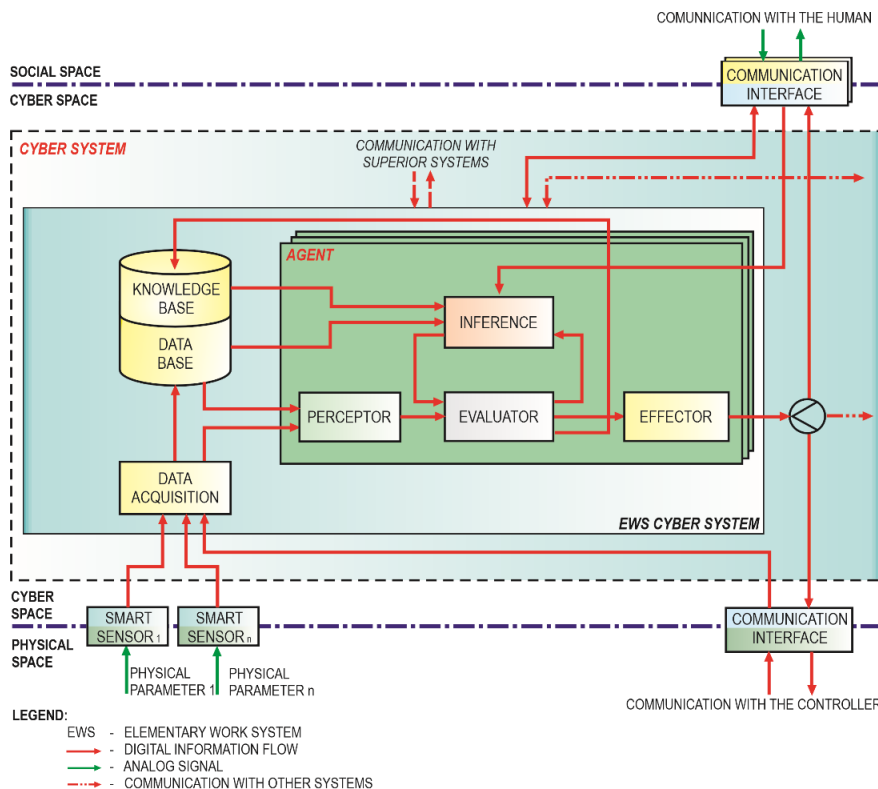
Identifikacijska koda agenta ID_{Agent} je oznaka agenta v večagentnem sistemu. Različni agenti imajo različno identifikacijsko kodo.

Struktura agenta Ω_{Agent} v enačbi (6.2) je podobna definiciji, podani v delih [199] in [109], ter je definirana s štirimi strukturnimi elementi: perceptor *Perception*, efektor *Efeotor*, mehanizem sklepanja $Mech_{Agent}$, in evaluator *Evaluator*.

$$\Omega_{Agent} = (Perception, Efeotor, Mech_{Agent}, Evaluator) \quad (6.2)$$

Perceptor *Perception* ima vlogo: 1) opazovanja stanja okolja agenta, da prepozna informacijo, relevantno za agenta; 2) oblikuje vhode iz takšne informacije; 3) sproža postopek evaluacije. Mehanizem sklepanja $Mech_{Agent}$ nadzoruje evaluator *Evaluator* prek procesa sklepanja, ki je zasnovan na obstoječih podatkih in znanju ter se implementira z določeno množico algoritmov [109].

Slika 6.8. Kibernetски sistem EDS v konceptu kognitivnih kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov [51]



Danes obstaja veliko število razvitih algoritmov, ki jih lahko ločimo v dve skupini eksaktne matematično-analitične in hevristične algoritme. Matematično-analitični algoritmi niso primerni za reševanje kompleksnih kombinatoričnih problemov (kot je npr. razporejanje). Za reševanje takšnih problemov bi potrebovali (v najslabšem primeru) eksponentno dolgo časa, ker je z vidika odločanja v realnem času nesprejemljivo. Hevristični algoritmi ponujajo relativno dobro rešitev oz. skoraj optimalno rešitev v krajšem času.

Funkcija **Role** predstavlja funkcijo, ki jo posamezni agent izvaja.

Akcija **Act** predstavlja množico akcij, ki jih posamezni agent lahko izvaja s ciljem uresničevanja določenih funkcij v obliki:

$$Act = (Act_1, Act_2, \dots, Act_{n_5}), \quad (n_5 = 1, 2, \dots, P_5; P_5 \in N), \quad (6.3)$$

V **Act** je definirana tudi komunikacija med agentom in njegovo okolico.

Interakcija *Interact* definira komunikacijo med agenti.

Da bi bil lahko agent hkrati angažiran pri opravljanju več različnih funkcij oz. nalog, je treba omogočiti sočasno izvajanje aktivnosti v okviru samega agenta. Ta njegova lastnost je zagotovljena z mehanizmom obnašanja posameznega agenta *Behaviour*.

Ling je agentski komunikacijski jezik. Različni agenti lahko komunicirajo prek različnih komunikacijskih jezikov.

Osnova pri izmenjavi sporočila med agenti je pošiljanje objekta razreda *ACLMessage*. Sporočila *ACLMessage*, ki se pošiljajo od agenta do agenta, imajo lahko naslednje oblike: *INFORM* – prenašanje informacij, *REQUEST* – prenašanje zahtev za opravljanje določenih agentskih aktivnosti v sistemu, *QUERY* – prenašanje vprašanja in *PROPOSE* – prenašanje predloga za izvedbo določenih nalog. Kot odgovor na sporočili *QUERY* in *REQUEST* agent prejemnik odgovarja s sporočilom *REPLY*, medtem ko na prejeto sporočilo *PROPOSE* odgovarja s sporočilom *AGREE* ali *REFUSE*.

Splošna programska koda za sporočilo, ki ga agent pošilja, je:

```
ACLMessage = newACLMessage(ALCMessage.INFORM);  
msg.addReceiver(newAID("Agent stroja",AID.ISLOCALNAME));  
msg.setLanguage("English");  
msg.setOntology("Planning – control – ontology");  
msg.setContent("Planned_start_time,Shedulin_start_time,...");  
send(msg);
```

Poenostavljena struktura programske kode za sporočilo, ki si ga agenti izmenjujejo, je usklajena z ACL-jezikom [364] in je prikazana v spodnjem zapisu.

```
ACLMessage  
Head{MessageID,ConsignerID,{AdresseeID}},  
MessageContent{  
}>
```

Za ustrezno medagentsko komunikacijo mora biti definirana ustrezna ontologija, ki bo agentom omogočila medsebojno razumevanje in povezovanje z agenti drugih večagentnih platform. Ontologija, kot je definirano v poglavju pregleda literature, definira entitete, ki se lahko uporabljajo kot vsebina agentskih sporočil, kar pomeni, da se dejanski pomen vsebine sporočil nahaja v ontološkem zapisu.

V konceptu K-KFPS je za medagentsko komunikacijo uporabljena ontologija, razvita v delu [236] in razširjena prek entitet, definiranih v delih [1, 9, 365].

Tip agenta $Type_{Agent}$ definira generalno tri tipe agentov: 1) agenti, ki predstavljajo fizične elemente v kibernetskem sistemu 2) agenti, ki zastopajo digitalne (kibernetske) elemente v kibernetskem sistemu in 3) agenti, ki zastopajo *subjekt* v kibernetskem sistemu.

6.5 Transformacija vloge človeka v proizvodnih sistemih Industrije 5.0

Vloga človeka se bo bistveno spremenila v naslednji generaciji proizvodnih sistemov. Zaradi digitalizacije in kibernetizacije je neposredna človeška delovna aktivnost v nekaterih procesih že popolnoma odveč. Zaradi tega se izpostavlja vprašanje – Kakšno vlogo bo imel človek v prihodnjih proizvodnih sistemih. Pri tem moramo izhajati iz dejstva, ki ga je definiral še Peklenik v delu [35], da ima samo človek motiv in korist od operativnega delovanja proizvodnih sistemov.

Razvoj novih konceptov KFS na področju proizvodnje predstavlja pomemben korak v evoluciji organizacijskih in sistemskih oblik proizvodnih struktur ter njihovem prehodu iz socialno-tehničnih v kognitivne socialno-kibernetiko-fizične sisteme.

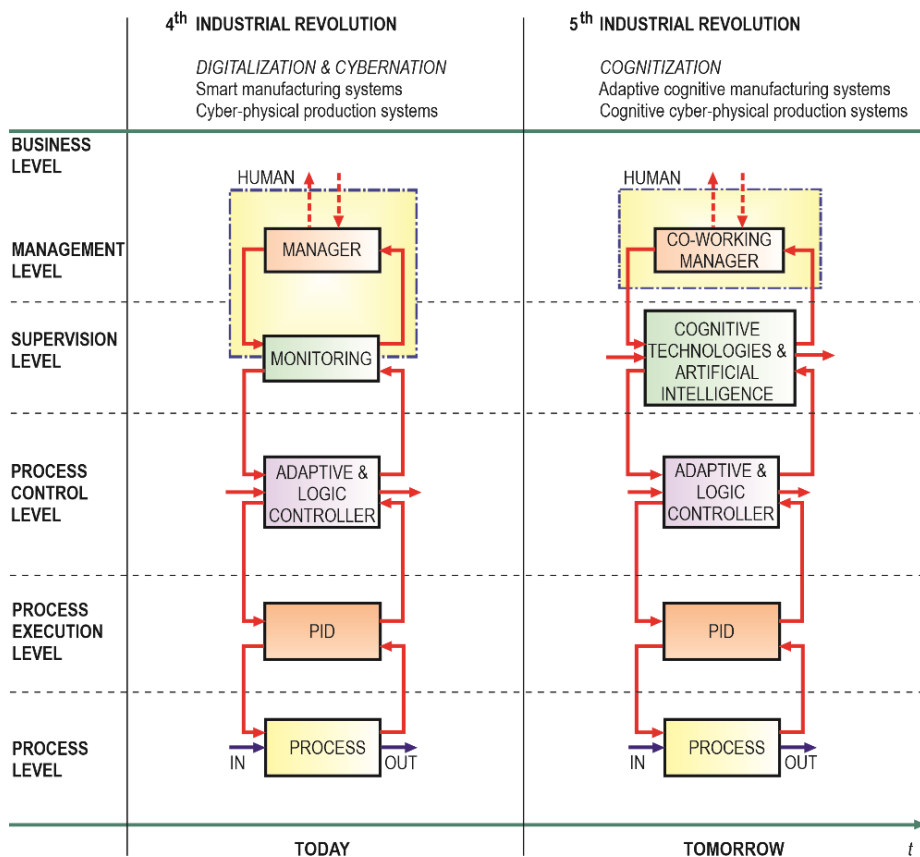
Prestrukturirani obstoječi napredni proizvodni sistemi postajajo sistemi z določeno stopnjo kognicije oz. postanejo t. i. kognitivni sistemi, ki omogočajo veliko večjo agilnost in prilagodljivost elementov proizvodnih podjetij potrebam sodobnega trga in družbe.

V konceptu K-KFPS se radikalno spreminja vloga človeka – *subjekta* (s tem mislimo na posameznike, skupine in/ali celoten kolektiv). To bistveno spreminja principe strukturiranja socialno-tehničnih sistemov z vidika sodobnih dosežkov.

Vloga človeka se oblikuje predvsem v smeri oblikovanja novih idej in inovacij z intenzivno uporabo eksplicitnega znanja, družbenih tehnologij, ustvarjalnosti in

intuicije ter v smeri upravljanja K-KFPS v realnem času na podlagi on-line informacij, diagnostike, prognostike in modelov odločanja (*človek kot odločevalec*), glej Sliko 6.9.

Slika 6.9. Evolucija vloge človeka iz Industrije 4.0 v Industrijo 5.0 [51]



Kot je prikazano na Sliki 6.9., lahko zaključimo, da ima človek samo še funkcijo na najvišji ravni, to je ravni upravljanja. Na tej ravni bo človek opremljen z digitaliziranimi in kibernetiziranimi funkcijami (kot so funkcija samoučenja, funkcija napovedovanja, funkcija samodiagnostike, samoorganizacije ipd.) in podpornimi sistemi (kognitivne tehnologije in umetna inteligenca), ki mu bo omogočil upravljanje sistema v realnem času. To mu bo omogočilo visoko stopnjo odločanja ter komunikacije, sodelovanja in koordinacije (ang. *co-working*) z ostalimi elementi proizvodnega sistema. Vsa ostala dela in procese krmiljenja,

nadzorovanja in vodenja procesov bodo prevzeli in opravili elementi fizičnega in kibernetičnega sistema.

Upravljanje sodobnih proizvodnih sistemov je zaradi vse večje kompleksnosti zelo zahtevna naloga. To vpliva na vse akterje v proizvodnih sistemih kot tudi na delovanje samih proizvodnih sistemov. Zato uporaba koncepta digitalizacije in kibernetizacije funkcij v K-KFPS ter uporaba umetne inteligence in kognitivnih tehnologij v realnih proizvodnih sistemih prinaša bistvene izboljšave z različnih vzornih kotov. Implementacija digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij v K-KFPS, kot so planiranje, razporejanje in samoorganizacija, bo omogočila rešitev problema planiranja in vodenja proizvodnje. V tem primeru bosta vlogo človeka prevzela umetna inteligenca in kognitivne tehnologije. Širša predstavitev opisanega je predstavljena v naslednjem poglavju tega znanstvenega dela.

7 UPRAVLJANJE, VODENJE IN KRMILJENJE PAMETNIH IN ADAPTIVNIH KOGNITIVNIH PROIZVODNIH SISTEMOV

Mi pravzaprav vemo, če malo vemo. Z znanjem narašča sum.

Johann Wolfgang Goethe

Upravljanje naprednih proizvodnih sistemov, kot so pametni in adaptivni kognitivni proizvodni sistemi in njihovih gradnikov kibernetiko-fizičnih proizvodnih sistemov (KFPS) in kognitivnih kibernetiko-fizičnih proizvodnih sistemov (K-KFPS), je zaradi njihove vse večje kompleksnosti zelo zahtevna funkcija, ki vpliva na vse deležnike v proizvodnih sistemih kot tudi na performanco samih proizvodnih sistemov. Zaradi tega prinaša aplikacija koncepta digitalizacije in kibernetizacije funkcij v proizvodne sisteme pomembne izboljšave z različnih aspektov v realnih proizvodnih sistemih [9] kot tudi njihovo izvajanje s pomočjo digitalnih mehanizmov, kot so umetna inteligenca in kognitivne tehnologije [51].

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 [366, 367], 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 KFPS [9] in konceptov K-KFPS [51].

V delu [368] je Wiendahl funkcijo planiranja proizvodnje definiriral 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 [1].

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 [369, 370].

V nadaljevanju tega znanstvenega 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.

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 vodi k zamudam, prekomernim obremenitvam posameznih delovnih sistemov, izpadu proizvodnje ipd. Gre za kompleksen problem, pri katerem klasični pristopi ne dajejo ustreznih rezultatov [1].

Temeljno vprašanje, ki se postavlja pred planiranje in krmiljenje proizvodnje, je [1]:

Kako zagotoviti pravočasno dobavo produktov in storitev na podlagi naročila kupcev z razpoložljivimi viri in v okviru napovedovanih stroškov ter kako pri tem dosegati enakomerno obremenitev virov?

Odgovor na takšno vprašanje je v tem znanstvenem delu ponujen z digitalizacijo in kibernetizacijo funkcij PPC in njihovo implementacijo s pomočjo umetne inteligence in kognitivnih tehnologij.

7.1 Digitalizacija in kibernetizacija funkcij PPC

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 [1], glej Sliko 7.1. Pridobivanje takšnih podatkov in informacij v realnem času je zagotovljeno prek horizontalne komunikacije v kibernetnem sistemu CAMS.

Slika 7.1. Digitalizirana funkcija planiranja proizvodnje v konceptu KFPS [1]



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) [1].

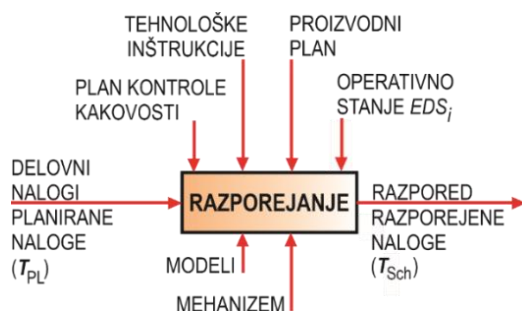
Izhodno vrednost iz digitalizirane funkcije operativnega planiranja proizvodnje predstavljajo operativni proizvodni plan in delovni nalogi (ang. *Work Order*) s pripadajočimi nalogami (ang. *Task*), glej Sliko 7.1.

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 prek sprejetih naročil. V tem primeru je planirana izvedba operativnega proizvodnega plana z vidika razpoložljivih zmogljivosti, nabavnih in proizvodnih časov [1].

Koncept digitalizacije funkcije planiranja proizvodnje v KFPS 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.) [1].

Funkcija razporejanja (ang. *Scheduling*) v proizvodnji ima vlogo finega razporejanja posameznih nalog z delovnega naloga po ustreznih, razpoložljivih EDS in vlogo določanja 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 (kibernetkega sistema CAMS ali PM), glej Sliko 7.2.

Slika 7.2. Digitalizirana funkcija razporejanja nalog v kibernetnem sistemu ADS [1]



Vhodne vrednosti v funkcijo razporejanja predstavljajo delovni nalogi s pripadajočimi planiranimi nalogami, glej Sliko 7.2. 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 hkrati prisotni naprava za implementacijo procesa, *subjekt*, material, viri ipd., kar predstavlja zahteven proces usklajevanja, ki ima namen zagotavljati red v proizvodnji. Koncept KFPS 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 kibernetnem sistemu KFPS (npr. funkcija planiranja proizvodnje, nabava, prodaja, kadri ipd.) in med funkcijami na operativnem nivoju kibernetkega

sistema KFPS (funkcija nadzora in identifikacije, funkcija samoorganizacije ipd.) [1].

Razporejanje je kompleksen kombinatorični problem [371]. To pomeni, da za opis takšnih problemov ne obstajajo polinomski algoritmi. Vrabič v delu [251] navaja primer in zaključuje, da je optimalno razporejanje velikih problemov časovno potratno ter izpostavlja, da so razporedi v trenutku, ko so izračunani, že zastareli.

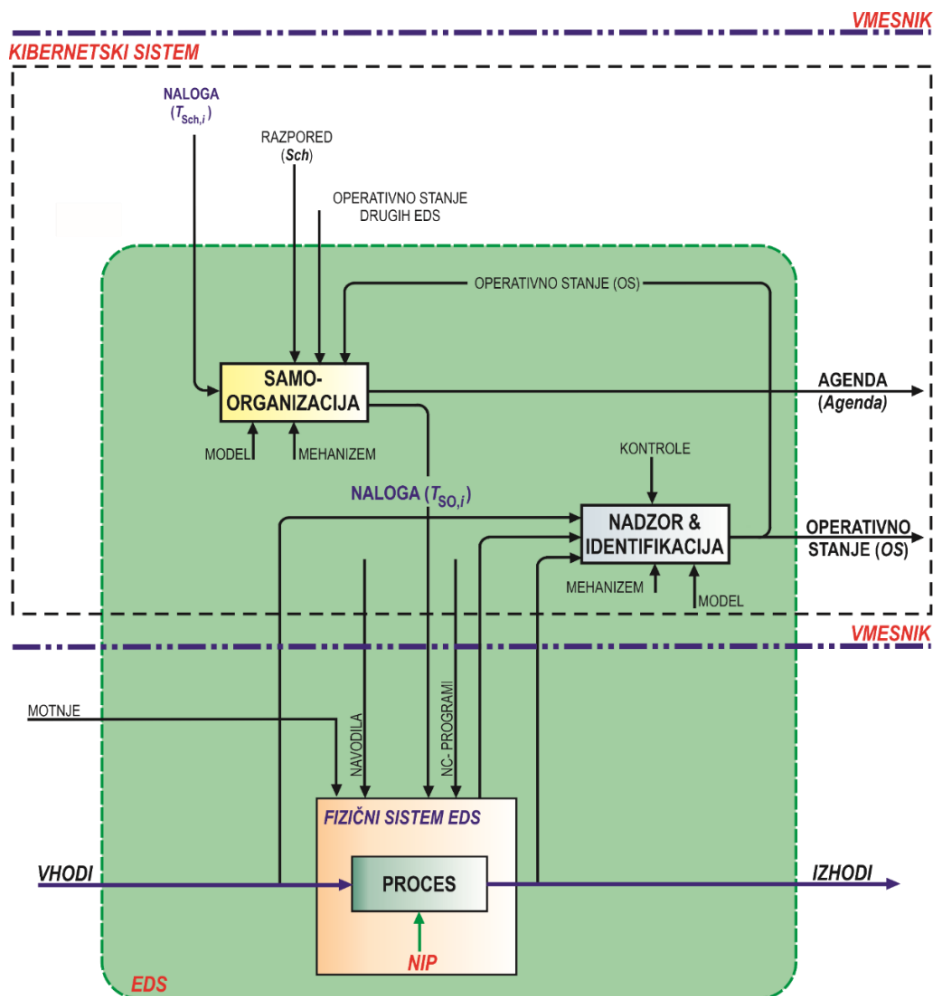
Koncept KFPS omogoča dinamični pristop razporejanja, temelječ na generiranju razporeda vzporedno z obratovanjem EDS. Takšen pristop omogoča odzivnost na spremembe v KFPS, kot so npr. nove naloge, izpadi, alarmi ipd. Za izvajanje dinamičnega pristopa k razporejanju so na voljo različna preprosta hevristična pravila, pri katerih sicer žrtvujemo zagotovilo, da bomo našli optimalno rešitev, ter raba večagentne tehnologije [1].

Koncept KFPS [1] omogoča EDS samostojno delovanje znotraj KFPS 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 [9] je to sistemsko urejanje aktivnosti posameznega EDS, omogočeno skozi funkcijo samoorganizacije.

Kibernetizirana funkcija samoorganizacije v konceptu KFPS [9] ima nalogo zagotavljanja pravočasne dobave produktov in storitev na podlagi zahtev, ki prihajajo iz nadrejenega kibernetkega sistema ADS, in omogočati EDS, da se samostojno odloča o svojih aktivnosti, pri čemer upošteva navodila in omejitve iz nadrejenih organizacijskih ter sistemskih struktur. Ta cilj zagotavljajo funkcija samoorganizacije in funkcija nadzora ter identifikacije v kibernetnem sistemu EDS, funkcija nadzora in identifikacije drugih EDS v kibernetnem sistemu KFPS ter analogni procesi materialne transformacije v fizičnem sistemu EDS, glej Sliko 7.3.

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

Slika 7.3. Kibernetizirana funkcija samoorganizacije v kibernetickem sistemu EDS [1]



Izvajanje funkcije samoorganizacije v kibernetickem sistemu EDS je podprto z izvajanjem funkcije nadzora in identifikacije, z informacijami, ki v kiberneticki sistem EDS pridejo iz koordinacijsko-kolaborativnega nivoja kibernetickega sistema KFPS (razpored, naloga) ter informacijami, ki so rezultat horizontalnega povezovanja in komunikacije na operativnem nivoju v kibernetickem sistemu KFPS (operativno stanje drugih EDS), glej Sliko 7.3.

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 prestrukturiranem 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 [1].

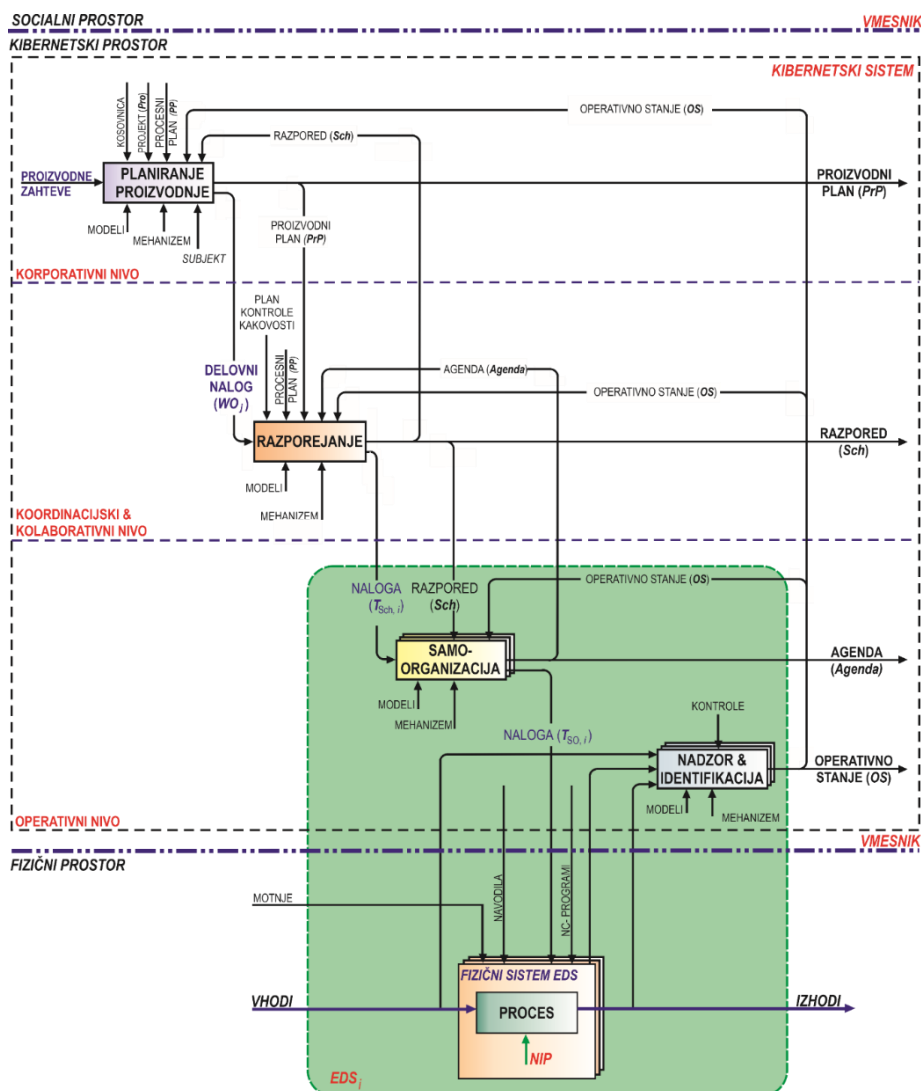
Kibernetizirana funkcija samoorganizacije prestrukturiranega EDS zagotavlja določeno avtonomnost prestrukturiranemu EDS. To pomeni, da ima posamezni EDS zmožnost, da avtonomno sprejema neprisiljene odločitve, ampak s svojim odločanjem temelji na komunikaciji, ki izhaja iz vertikalnega povezovanja z nadrejenimi sistemi, kot tudi na komunikaciji, ki izhaja iz horizontalnega povezovanja v mrežo stvari. Širši opis kibernetizirane funkcije samoorganizacije je predstavljen v delu [9].

7.2 Ontološki pristop k upravljanju in krmiljenju naprednih proizvodnih sistemov

Na Sliki 7.4 je predstavljen parcialni referenčni model CAMS za PPC v konceptu KFPS. Ta obsega funkcije, ki se izvajajo na različnih nivojih v proizvodnem sistemu – od korporativnega nivoja v kibernetskem sistemu do izvršnega nivoja (fizičnega sistema EDS) v fizičnem sistemu. Takšen pristop povezovanja različnih nivojev in različnih prostorov v proizvodnem sistemu predstavlja potencial za utemeljitev konceptov in modelov KFPS, ki so bili razviti v delu [1, 9], in potencialno implementacijo razvitih konceptov prek povezovanja funkcij z različnih nivojev v kibernetskem sistemu, kot tudi prek povezovanja kibernetskega in fizičnega sistema.

Osrednji del sistema PPC v konceptu KFPS je postavljen v kibernetskem sistemu KFPS, kot je prikazano na Sliki 7.4. Kibernetški sistem 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 kibernetskega sistema prisotna funkcija samoorganizacije, ki je širše opisana v delih [1, 9].

Slika 7.4. Parcialni referenčni model CAMS za PPC v konceptu KFPS [1, 9]



Komunikacijska povezanost funkcij samoorganizacije različnih EDS na operativnem nivoju kibernetkega sistema kot tudi komunikacija s funkcijo razporejanja na koordinacijsko-kolaborativnem nivoju kibernetkega sistema KFPS omogoča konvergenco časa zaključka posameznega delovnega naloga proti ciljnim vrednostim, tj. proti času zaključka planiranega delovnega naloga (proti planiranemu terminu dobave). Na ta način izvajanje digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij PPC v konceptu KFPS zagotavlja večjo točnost dobave

ob zmanjševanju odstopanja časa zaključka opazovanega delovnega naloga od časa zaključka planiranega delovnega naloga oz. planiranega termina dobave (skrajšanje odstopanja od planiranega ali zahtevanega termina dobave) [1].

Podporo za izvajanje digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij v kibernetnem sistemu, prikazanem na Sliki 7.4, predstavlja funkcija nadzora in identifikacije. Vhod v funkcijo nadzora in identifikacije z vidika PPC je aktualno stanje elementov fizičnega sistema EDS ter stanje aktualnih nalog, ki čakajo na izvajanje v listi samoorganiziranih nalog. Izvajanje funkcije nadzora in identifikacije z vidika PPC je periodično (npr. vsako minuto, uro ipd.), ali pa se aktivira, ko pride do novega dogodka v sistemu (npr. pride nova naloga, se sproži alarm itd.). Izhod iz funkcije nadzora in identifikacije z vidika PPC predstavlja operativno stanje EDS.

Digitalizirane in kibernetizirane funkcije PPC, ki so prikazane na Sliki 7.4, izvajajo različni digitalni mehanizmi oz. programska oprema (kot so agenti, algoritmi, spletne storitve ipd.) in analogni mehanizmi, kot so fizični elementi v fizičnem sistemu EDS in *subjekt*. Raznolikost mehanizmov pri izvajanju digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij PPC v konceptu KFPS zahteva čim boljše zmanjševanje nedoločenosti in povečanje razumevanja in natančnosti v medsebojni komunikaciji. Takšne zahteve zagotavlja ustrezna ontologija.

Ontologija zagotavlja pomensko jasnost (semantiko) ter definira opisne jezike (sintakso), ki bodo v največji možni meri zmanjšali nedoločenost in povečali razumevanje ter natančnost v komunikaciji (glej Podpoglavje 4.1). V nadaljevanju tega znanstvenega dela prevzamemo ontološki pristop k modeliranju naprednih proizvodnih sistemov, ki je razvit v delu [236] (glej Preglednico 7.1) in razširjen z ontološkim pristopom k upravljanju in krmljenju KFPS za področje PPC (glej Preglednico 7.2), v delih [1, 9].

Za obravnavanje funkcij PPC v konceptu kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov so prevzete entitete, kot so aktivnost **A**, operacija **O**, naloga **T**, procesni plan **PP**, delovni nalog **WO** in entiteta elementarnega delovnega sistema **EWS**¹⁹. Prikaz posameznih entitet in njihovih časov je predstavljen na Sliki 7.5.

Na podlagi izpostavljenih osnovnih definicij entitet, ki so pomembne za obravnavo domene PPC, so v nadaljevanju prevzete entitete, ki izhajajo iz

¹⁹ Simbol **EWS** je v tem poglavju uporabljen za označevanje ontološke entitete elementarnega delovnega sistema (ang. *Elementary Work System* – EWS).

digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij PPC v konceptu KFPS, kot so proizvodni plan **PrP**, lista delovnih nalogov **WOL**, projekt **Pro**, lista komponent projekta **WBSL**, komponenta projekta **WBS**, razpored **Sch**, lista razporejenih nalog **TL_{Sch}**, razporejena naloga **T_{Sch}**, agenda **Agenda_{EWS}**, samoorganizirana naloga **T_{SO}**, operativno stanje sistema **OS**, stanje aktualne naloge **S_{TAC}**, lista aktualnih nalog **TL_{AC}**, aktualna naloga **T_{AC}**, kapaciteta elementarnega delovnega sistema **Cap_{EWS}**, razpoložljivost elementarnega delovnega sistema **Ava_{EWS}**, glej Preglednico 7.2.

Preglednica 7.1: Osnovni termini in definicije elementov v proizvodni domeni [236]

$$\mathbf{A} = (ID_A, \mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{Y} = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{V}), Mech, Type_A) \quad (7.1)$$

$$\mathbf{O} = (ID_O, \mathbf{A}, Q_{UNIT}, t_{PO}^*, t_{EO}^*, t_{FO}^*) \quad (7.2)$$

$$\mathbf{PP} = (ID_{PP}, \mathbf{OL}), \quad (7.3)$$

$$\mathbf{OL} = (\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \dots, \mathbf{O}_N) \quad (n = 1, 2, \dots, N; N \in \mathbb{N}) \quad (7.4)$$

$$\mathbf{T} = (ID_T, \mathbf{O}, t_{ST}, t_{FT}, Q) \quad (7.5)$$

$$\mathbf{WO} = (ID_{WO}, WBS_{code}, \mathbf{TL}, \mathbf{PP}, t_{SWO}, t_{FWO}, Q) \quad (7.6)$$

$$\mathbf{TL} = (\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_M), \quad (m = 1, 2, \dots, M; M \in \mathbb{N}) \quad (7.7)$$

$$\mathbf{EWS} = (ID_{EWS}, F^*, \Omega_{STR}, \mathbf{Cap}_{EWS}, \mathbf{Agenda}_{EWS}) \quad (7.8)$$

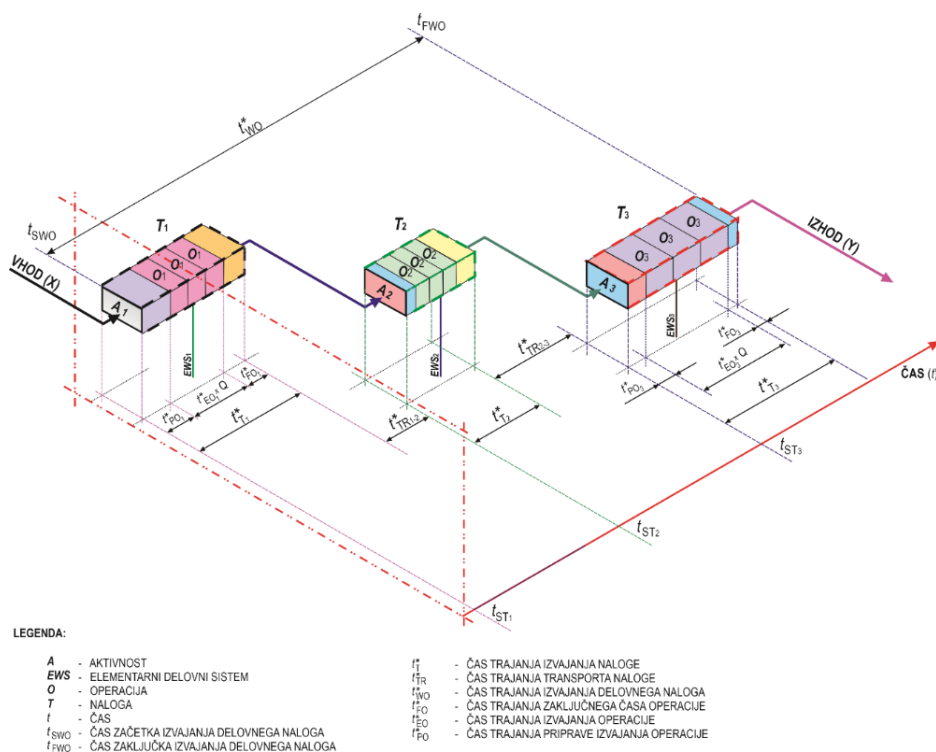
Primeri vseh opredeljenih časov začetka in zaključka izvajanja za eno opazovano nalogo so predstavljeni na Sliki 7.6,²⁰ ki prikazuje spremembo časov začetka in zaključka izvajanja na različnih nivojih v kibernetnem sistemu za opazovano nalogo. Za opazovano nalogo je izbrana planirana naloga **T_{PL,2}** z delovnega naloge **WO_j**, ki je definirana s časom začetka izvajanja opazovane planirane naloge **t_{ST_{PL}}** in časom zaključka izvajanja opazovane planirane naloge **t_{FT_{PL}}**. Identifikacijska koda **ID_T** opazovane naloge se ne spreminja v nivojih upravljanja.

Opazovana planirana naloga **T_{PL,2}** je prek aktivnosti razporejanja na elementarni delovni sistem **EWS_{r-1}**. V razporedu za opazovani elementarni delovni sistem postane planirana naloga **T_{PL,2}** razporejena naloga **T_{Sch,2}**, ki ima enako

²⁰ Opazovana naloga je na Sliki 7.6 označena s okvirjem, ki ima polno črto.

identifikacijsko kodo ID_T (dejansko identifikacijsko kodo planirane naloge $ID_{T_{PL}}$), novo pozicijo v zaporedju – pozicijo dve ter novi čas začetka izvajanja $t_{ST_{Sch,2}}$ kot tudi nov čas zaključka izvajanja $t_{FT_{Sch,2}}$.

Slika 7.5. Prikaz entitet aktivnost, operacija in naloga ter njihovih časov [1]



Preglednica 7.2: Ontološke definicije entitet za PPC [1]

$$PrP = (WOL, t_{SPPr}, t_{FPrP}) \quad (7.9)$$

$$WOL = (WO_1, WO_2, \dots, WO_J), \quad (j = 1, 2, \dots, J; J \in N) \quad (7.10)$$

$$Pro = (ID_{Pro}, WBSL, t_{SPro}, t_{FPro}) \quad (7.11)$$

$$WBSL = (WBS_1, WBS_2, \dots, WBS_{n_4}), (n_4 = 1, 2, \dots, P_4; P_4 \in N) \quad (7.12)$$

$$WBS = (WBS_{code}, WO, t_{DDWO}) \quad (7.13)$$

$$Sch = ((EWS_1, TL_{Sch,1}), (EWS_2, TL_{Sch,2}), \dots, (EWS_R, TL_{Sch,R})) \quad (7.14)$$

$$TL_{Sch} = (T_{Sch,1}, T_{Sch,2}, \dots, T_{Sch,K}) \quad (7.15)$$

$$T_{Sch} = (ID_T, O, t_{ST_{Sch}}, t_{FT_{Sch}}, Q) \quad (7.16)$$

$$Agenda_{EWS} = (T_{SO,1}, T_{SO,2}, \dots, T_{SO,L}), \quad (l = 1, 2, \dots, L; L \in N) \quad (7.17)$$

$$T_{SO} = (ID_T, t_{ST_{SO}}, t_{FT_{SO}}, Q) \quad (7.18)$$

$$OS = (S_{T_{AC}}, S_{Mech}) \quad (7.19)$$

$$S_{T_{AC}} = TL_{AC} = (T_{AC,1}, T_{AC,2}, \dots, T_{AC,H1}), \quad (7.20)$$

$$T_{AC} = (ID_T, t_{ST_{AC}}, t_{FT_{AC}}, Q) \quad (7.21)$$

$$Cap_{EWS} = (EWS_r, (Ava_{EWS_r,1}, Ava_{EWS_r,2}, \dots, Ava_{EWS_r,p})), \quad (7.22)$$

$$Ava_{EWS} = (t_{SAva}, t_{FAva}) \quad (7.23)$$

Prek funkcije samoorganizacije v kibernetickem sistemu EWS_{r-1} je opazovana razporejena naloga $T_{Sch,2}$ prestavljena na novo pozicijo (pozicijo ena v agendi $Agenda_{EWS_{r-1}}$) z enako identifikacijsko kodo ID_T .

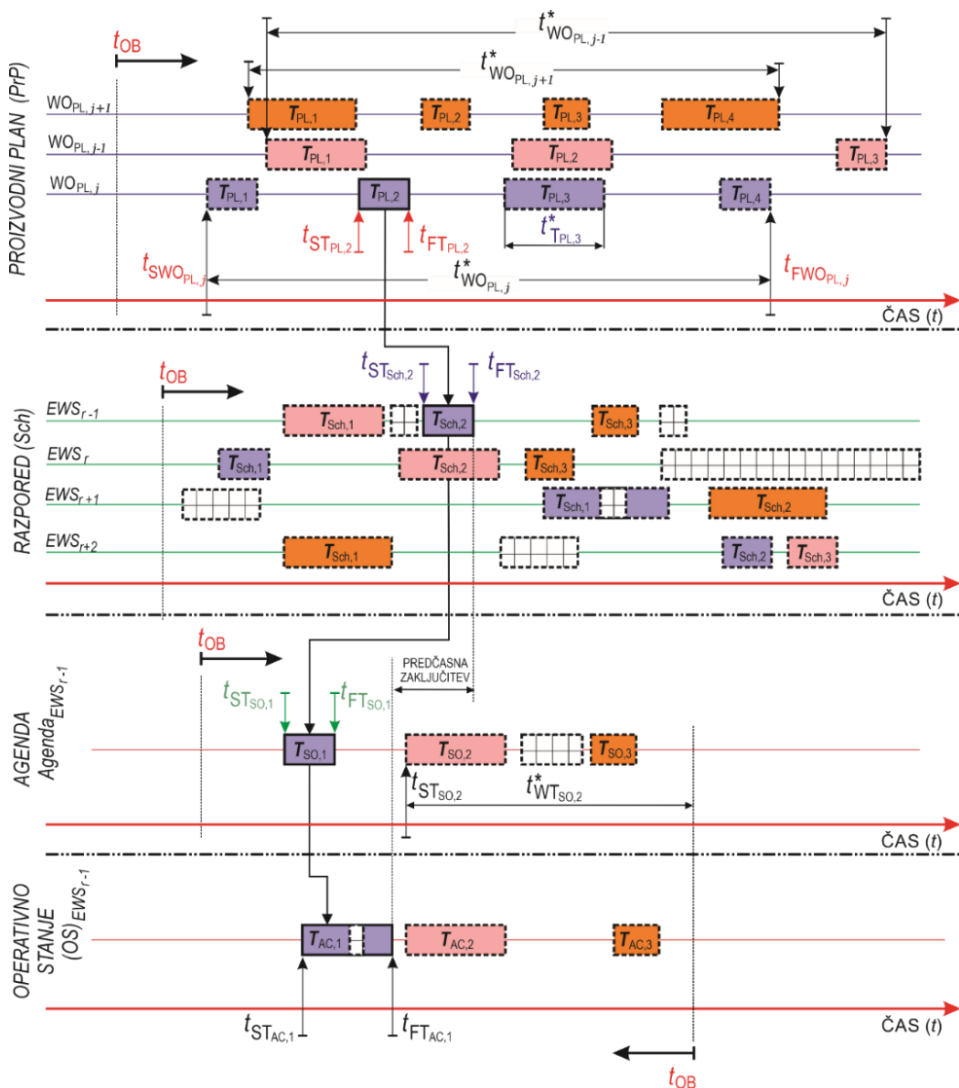
V agendi $Agenda_{EWS_{r-1}}$ postane opazovana naloga prestavljena oz. samoorganizirana naloga s pozicijo ena ($T_{SO,1}$) in ima nov čas začetka in zaključka izvajanja v obliki časa začetka izvajanja opazovane samoorganizirane naloge $t_{ST_{SO,1}}$ ter časa zaključka izvajanja opazovane samoorganizirane naloge $t_{FT_{SO,1}}$.

Na podlagi podatkov iz fizičnega sistema EDS se pri izvajanju funkcije nadzora in identifikacije v kibernetickem sistemu EDS generira informacija o aktualni nalogi T_{AC} , ki čaka na izvajanje v opazovanem EDS. Na Sliki 7.6 je prikazana opazovana aktualna naloga $T_{AC,1}$. Opazovana aktualna naloga $T_{AC,1}$ na Sliki 7.6 je definirana s časom začetka izvajanja opazovane aktualne naloge $t_{ST_{AC,1}}$ in časom zaključka izvajanja opazovane aktualne naloge $t_{FT_{AC,1}}$.

Operativno stanje elementarnega delovnega sistema EWS_{r-1} je opazovano v času t_{OB} .

Dinamično proizvodno okolje, v katerem deluje fizični delovni sistem, vpliva na agendo posameznega EDS, kar zahteva njeno neprestano osveževanje v realnem času s ciljem zagotavljanja točnosti terminov (rokov) dobave. Koncept KFPS in ontološki pristop k upravljanju in krmiljenju KFPS oziroma K-KFPS omogočata, da se agenda elementarnega delovnega sistema $Agenda_{EWS}$ dinamično prilagaja situaciji v proizvodnem sistemu, s čimer je omogočeno adaptivno upravljanje in krmiljenje celotnega KFPS oziroma K-KFPS.

Slika 7.6. Tok opazovane naloge v KFPS [1].



Predstavljene ontološke definicije entitet PPC prispevajo k zmanjševanju nedoločenosti in boljši (bolj natančni) komunikaciji med elementih v kibernetskem sistemu, ki omogočajo realizacijo digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij PPC.

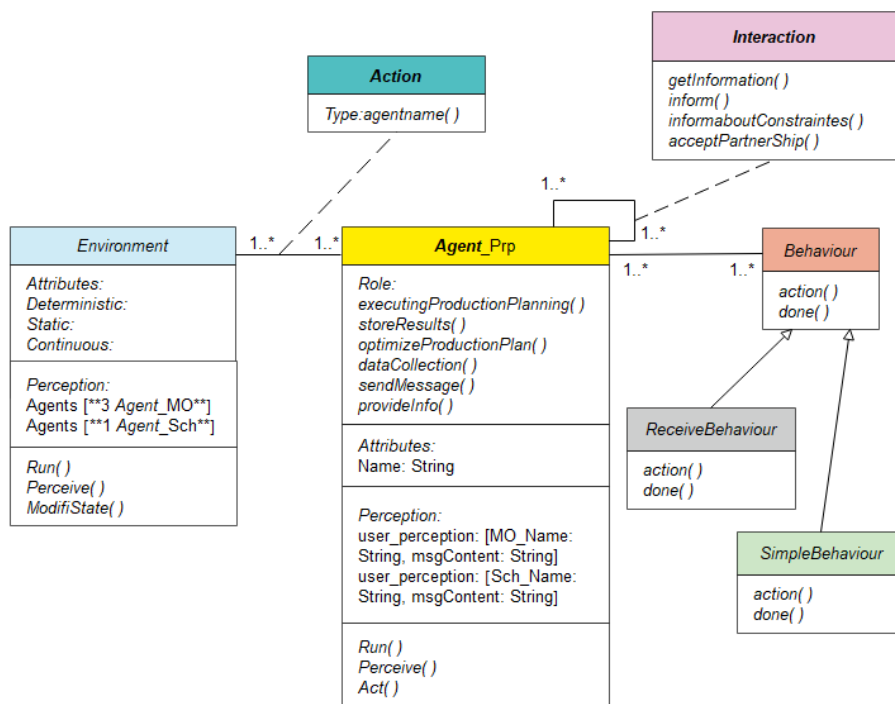
7.3 Agentske strukture za implementacijo funkcij PPC v konceptu KFPS

Osnovni tipi agentskih struktur $Type_{Agent}$, ki omogočajo realizacijo funkcij PPC, so 1) agent, ki realizira funkcijo planiranja proizvodnje ***Agent_{PrP}***, 2) agent, zadolžen za realizacijo funkcije razporejanja v kibernetskem sistemu ***Agent_{Sch}***, 3) agenti samoorganizacije ***Agent_{SO}***, ki realizirajo funkcijo samoorganizacije v posameznih elementarnih delovnih sistemih in 4) agenti monitoringa ***Agent_{MO}***, ki imajo vlogo realizacije monitoringa stanja posameznih elementarnih delovnih sistemov ter 5) virtualni reprezentacijski agenti ***Agent_{VR}***, ki omogočajo povezovanje subjekta s kibernetskim sistemom [1].

Agent planiranja proizvodnje ***Agent_{PrP}*** ima vlogo na strateškem nivoju kibernetskega sistema, da inicira realizacijo kibernetiziranih funkcij PPC oz. realizira funkcijo proizvodnega planiranja (*executingProductionPlanning()*), optimizira proizvodni plan (*optimizeProductionPlan()*), shranjuje izhode funkcije proizvodnega planiranja (*storeResults()*), zbira podatke (*dataCollection()*) ter ponuja informacije (*provideInform()*) in pošilja sporočila (*sendMessage()*) do drugih agentov v kibernetskem sistemu, glej Sliko 7.7.

Pri generiranju proizvodnega plana ***PrP*** agent planiranja proizvodnje ***Agent_{PrP}*** definira delovne naloge ***WO_j***, planirane naloge znotraj posameznega delovnega naloga ***T_{PL,i}*** in določa rok zaključka oz. termin dobave vsakega posameznega planiranega delovnega naloga $t_{DDWO_{PL}}$. Ta čas predstavlja ciljno funkcijo za vse ostale agente v večagentnem sistemu za realizacijo digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij PPC.

Slika 7.7. UML-diagram za agenta planiranja



V obliki sporočila *ACLMMessage_Agent_PrP(2)* agent planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}** prenaša informacije o delovnih nalogih **WO_j** in podatke o planiranih nalogah **T_{PL,i}** znotraj pripadajočega delovnega naloga do agenta razporejanja **Agent_{Sch}**, ki skrbi za realizacijo funkcije razporejanja.

Struktura oz. vsebina sporočila, ki ga pošilja agent planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}** do agenta razporejanja **Agent_{Sch}**, je prikazana v nadaljevanju.

```

ACLMMessage_Agent_PrP(2) ==
< Head {Message_ID, Consigner_ID, {Adressee_ID}},
  Message_specification
    {Planned_time_data {t_SWO_PL, t_FWO_PL, t_ST_PL, t_FT_]
    t*_WO, t_DD_WO_PL},
  Task_specification {Operation_Type, Input
    /Output_specifications {Dimensions,
    Material, Tolerance_Specification}, Quantity},
  Attachements {Documentation} >
  
```

Pomembna informacija, ki jo pošilja agent planiranja **Agent_{PrP}**, je zapisana v specifikaciji sporočila, in sicer: čas začetka izvajanja planiranega delovnega naloga $t_{SWO_{PL}}$, čas zaključka izvajanja planiranega delovnega naloga $t_{FWO_{PL}}$, čas začetka izvajanja planirane naloge $t_{ST_{PL}}$, čas zaključka izvajanja planirane naloge $t_{FT_{PL}}$, čas trajanja izvajanja delovnega naloga t_{WO}^* in planiranega termina dobave posameznega delovnega naloga $t_{DDWO_{PL}}$ [1].

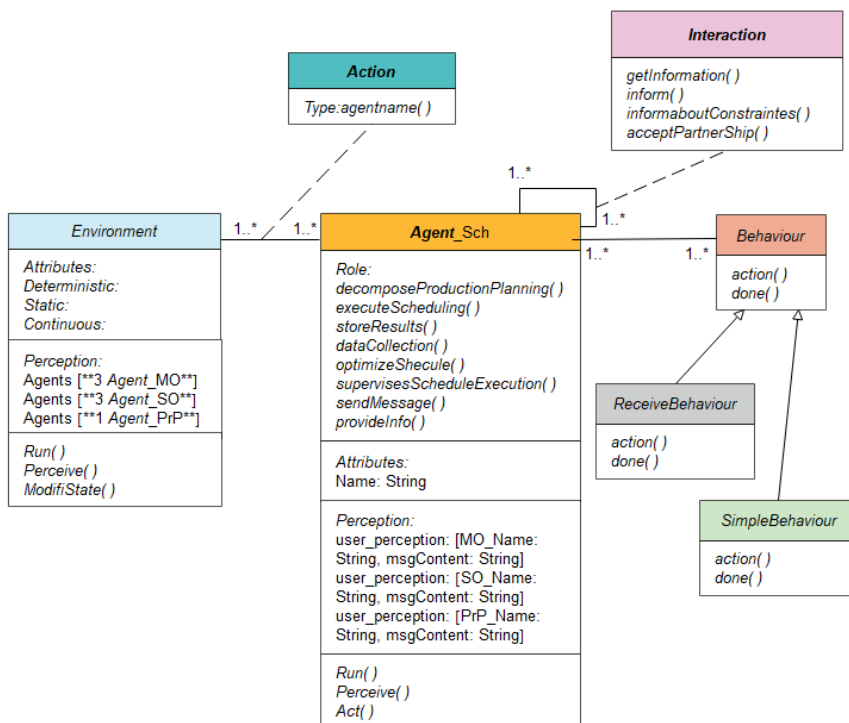
Agent razporejanja nalog, torej **Agent_{Sch}**, je agent koordinacijsko-kolaborativnega nivoja kibernetkega sistema, zadolžen za sprejemanje informacij od agenta korporativnega nivoja kibernetkega sistema (agenta planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}**), dekompozicijo proizvodnega plana (*decomposeProductionPlaning()*), razporejanje nalog v podatkovno strukturo razpored **Sch** v izvajanju funkcije razporejanja (*executeScheduling()*), optimizacijo razporeda (*optimizeSchedule()*), shranjevanje razporeda (*storeResults()*), zbiranje podatkov (*dataCollection()*), nadzorovanje nad izvajanjem razporeda (*supervisesScheduleExecution()*), ponujanje informacij (*provideInf()*) in pošiljanje sporočil do drugih agentov v kibernetnem sistemu (*sendMessage()*) [1].

UML-diagram razredov za agenta razporejanja **Agent_{Sch}** je prikazan na Sliki 7.8.

Agent razporejanja **Agent_{Sch}** začenja koordinacijski proces po pridobivanju nalog od agenta planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}**. V prvem koraku agent razporejanja **Agent_{Sch}** generira razpored **Sch** skozi razporejanje planiranih nalog $T_{PL,i}$ na razpoložljive in ustrezne vire oz. EDS. Za takšno aktivnost agent razporejanja **Agent_{Sch}** potrebuje informacije o aktualnem stanju EDS oz. intervalu razpoložljivosti EDS. To informacijo zagotavljajo agenti nadzora in identifikacije posameznih elementarnih delovnih sistemov **Agent_{MO,i}**. Informacije, ki jih agent razporejanja **Agent_{Sch}** pridobiva od agentov nadzora in identifikacije posameznih elementarnih delovnih sistemov **Agent_{MO,i}**, so zapisane v sporočilu *ACLMessage_Agent_MO_(1)* [1].

Način generiranja razporeda **Sch** na koordinacijsko-kolaborativnem nivoju kibernetkega sistema presega obseg tega doktorskega dela in zaradi tega ni obširneje opisan. Primarni cilj je prikazati uporabnost nove funkcije, ki je uvedena v konceptu KFPS – funkcijo samoorganizacije v EDS.

Slika 7.8. UML-diagram za agenta razporejanja



Prek generiranja razporeda agent razporejanja **Agent_{Sch}** spreminja čas začetka in zaključka izvajanja za opazovano planirano nalogo ($t_{ST_{PL}}, t_{FT_{PL}}$) v čas začetka in zaključka izvajanja za opazovano razporejeno nalogo ($t_{ST_{Sch}}, t_{FT_{Sch}}$). Agent razporejanja **Agent_{Sch}** poskuša razporediti naloge znotraj časovnega intervala oz. časa trajanja izvajanja delovnega naloga t_{WO}^* , ki mu ga sporoča agent planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}**. Če to ni izvedljivo, agent razporejanja **Agent_{Sch}** komunicira z agentom planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}** s ciljem najti ustrezen rešitev. Temeljno pri tem je, da agent razporejanja **Agent_{Sch}** pošilja informacijo do agenta planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}** v obliki sporočila *ACLMMessage_Agent_Sch*(3) [1].

```

ACLMMessage_Agent_Sch(3) ==
< Head {Message_ID, Consigner_ID, {Adressee_ID}},
  Message_specification {Scheduled_time_data {t_ST_Sch, t_FT_Sch}},
  Attachements {Documentation} >

```

V specifikaciji sporočila *ACLMessage_Agent_Sch*(3) agent razporejanja **Agent_{Sch}** sporoča agentu planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}** čas začetka izvajanja za opazovano razporejeno nalogo $t_{ST_{Sch}}$ in čas zaključka izvajanja za opazovano razporejeno nalogo $t_{FT_{Sch}}$ [1].

V drugem koraku, po uskladitvi razporeda z agentom planiranja proizvodnje **Agent_{PrP}**, zadolžen za izvajanje funkcije razporejanja **Agent_{Sch}**, pošlje informacijo do agenta samoorganizacije **Agent_{SO}**, ki je zadolžen za izvajanje aktivnosti samoorganizacije v obliki sporočila *ACLMessage_Agent_Sch*(4) [1].

Struktura sporočila, ki ga agent razporejanja **Agent_{Sch}** pošilja do agenta samoorganizacije **Agent_{SO}**, je prikazana v zapisu v nadaljevanju.

```

ACLMessage_Agent_Sch(4) ==
< Head {Message_ID, Consigner_ID, {Adressee_ID}},
  Message_specification {Scheduled_time_data { $t_{ST_{Sch}}$ ,  $t_{FT_{Sch}}$ },  $t^*_{T}$ .
  Task_specification {Operation_Type, Input/Output_specifications
    {Dimensions, Material, Tolerance_Specification}, Quantity}
  Attachements {Documentation} >

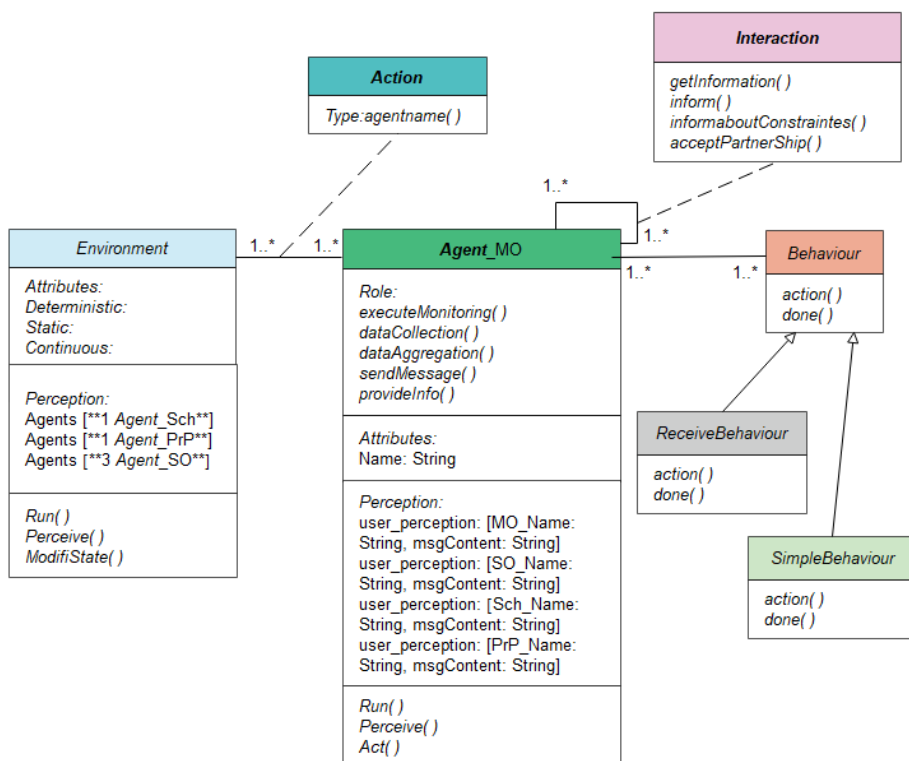
```

V sporočilu *ACLMessage_Agent_Sch*(4) agent razporejanja **Agent_{Sch}** specificira informacije, ki se nanašajo na čase začetka in zaključka izvajanja opazovane razporejene naloge ($t_{ST_{Sch}}$, $t_{FT_{Sch}}$) in čas trajanja opazovane razporejene naloge $t^*_{T_{Sch}}$ [1].

Temeljna vloga agenta nadzora in identifikacije **Agent_{MO}** je realizacija funkcije nadzora in identifikacije (*executeMonitoring()*), zbiranje podatkov iz fizičnega delovnega sistema EDS (*dataCollection()*), združevanje podatkov (*dataAggregation()*), ponujanje informacij o elementih fizičnega delovnega sistema (*provideInf()*) ter pošiljanje sporočil do ostalih agentov v večagentnem sistemu (*sendMessage()*). UML-model agenta monitoringa **Agent_{MO}** je prikazan na Sliki 7.9.

Komunikacija agenta nadzora in identifikacije **Agent_{MO}** obsega komunikacijo znotraj pripadajočega EDS, komunikacijo z agenti višjih nivojev v kibernetskem sistemu KFPS in tudi komunikacijo z ostalimi agenti nadzora in identifikacije **Agent_{MO,i}** na operativnem nivoju kibernetskega sistema KFPS [1].

Slika 7.9. UML-diagram za agenta nadzora in identifikacije



Na podlagi komunikacije z ostalimi agenti nadzora in identifikacije **Agent_{MO,i}** agent nadzora in identifikacije pripadajočega elementarnega delovnega sistema **Agent_{MO}** deli informacijo o stanju pripadajočega EDS z drugimi agenti operativnega nivoja kibernetnega sistema KFPS, kot tudi pridobiva informacijo o stanju drugih EDS [1].

S komunikacijo z agenti višjih nivojev v kibernetnem sistemu in komunikacijo z agenti znotraj pripadajočega EDS pošilja agent nadzora in identifikacije **Agent_{MO}** informacije o operativnem stanju pripadajočega EDS v obliki sporočila *ACLMessage_Agent_MO(1)*.

Struktura sporočila *ACLMessage_Agent_MO(1)* je prikazana v naslednjem zapisu:

```

ACLMessage_Agent_MO(1) ==
< Head {Message_ID, Consigner_ID, {Adressee_ID}},
  Message_specification {Actual_time_data {t_ST_AC, t_FT_AC },
    Cap_EWS{Ava_EWS(t_SAva_AC, t_FAva_AC)}},
  Attachements {Documentation} >

```

Pomembne informacije, ki jih agent nadzora in identifikacije **Agent_{MO}** specificira v sporočilu, so čas začetka izvajanja aktualne naloge t_{ST_AC} in čas zaključka izvajanja aktualne naloge t_{FT_AC} ter čas začetka in zaključka intervala razpoložljivosti pripadajočega elementarnega delovnega sistema (t_{SAva_AC} , t_{FAva_AC}) [1].

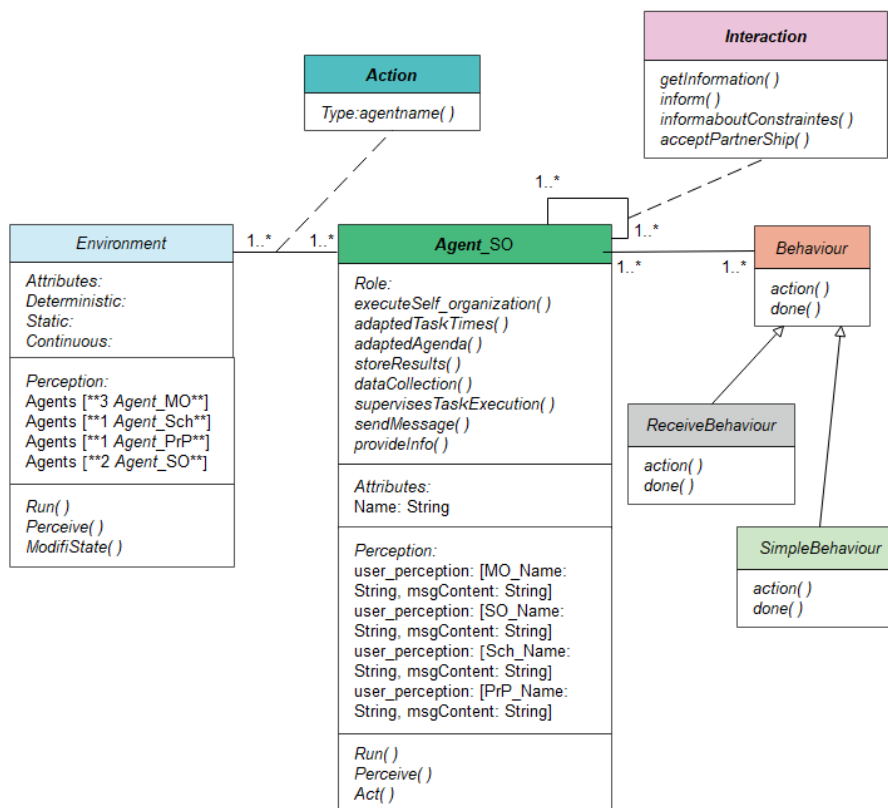
Agent samoorganizacije **Agent_{SO}** ima vlogo, da po prejemu informacij od agenta koordinacijsko-kolaborativnega nivoja kibernetkega sistema (agenta razporejanja **Agent_{Sch}**) in v komunikaciji z drugimi agenti operativnega nivoja kibernetkega sistema izvaja funkcijo samoorganizacije pripadajočega EDS (*executeSelforganization()*), spreminja čase začetka in zaključka izvajanja opazovane naloge (*adaptedTaskTimes()*), ureja agendo pripadajočega EDS (*adaptedAgenda()*), nadzoruje izvajanje nalog (*supervisesAgendaExecution()*), shranjuje agende (*storeResults()*), zbira podatke (*dataCollection()*), ponuja informacije (*provideInf()*) in pošilja sporočila (*sendMessage()*) do ostalih agentov v večagentnem sistemu in adaptivnega logičnega kontrolerja EDS v fizičnem okolju čez agentski vmesnik [1].

Primarna naloga agenta samoorganizacije **Agent_{SO}** je realizacija lokalnih zahtev. Odločanje o časih začetka in zaključka izvajanja opazovane naloge pri agentu samoorganizacije temelji na algoritmih odločanja. Agent razporejanja **Agent_{Sch}** želi zadovoljiti globalne zahteve, ki se izpostavljajo na njegovem nivoju opazovanja. Na ta način pride do konfliktov med agenti samoorganizacije **Agent_{SO,i}** in agentom razporejanja **Agent_{Sch}**. Ta konflikt se rešuje z upoštevanjem določenih omejitev s strani agentov samoorganizacije **Agent_{SO,i}**, ki jih pridobivajo s strani agenta razporejanja **Agent_{Sch}** oz. agentov z višjih organizacijskih in sistemskih struktur v kibernetnem sistemu. V tem primeru, ko je treba upoštevati določene omejitve, ima agent samoorganizacije **Agent_{SO}** možnost ureditve svoje lokalne agende čez 1) upoštevanje omejitev (npr. da čas zaključka za opazovano samoorganizirano nalogo t_{FT_SO} ne more biti daljši od časa

začetka izvajanja opazovane razporejene naloge $t_{ST_{Sch}}$), 2) povečanje kapacitete, 3) vključevanje v komunikacijo z ostalimi agenti samoorganizacije **Agent**_{SO,i} s ciljem pošiljanja opazovane naloge drugemu EDS, 4) sprejemanje določene kazni s ciljem doseganja globalnih ciljev itd. [1].

UML-diagram razredov agenta samoorganizacije je prikazan na Sliki 7.10.

Slika 7.10. UML-diagram za agenta samoorganizacije



Agent samoorganizacije **Agent**_{SO} komunicira z agentom koordinacijsko-kolaborativnega nivoja kibernetskega sistema (agentom razporejanja **Agent**_{Sch}) in z ostalimi agenti operativnega nivoja kibernetskega sistema (agenti nadzora in identifikacije elementarnih delovnih sistemov **Agent**_{MO,i} in ostalimi agenti samoorganizacije **Agent**_{SO,i}) ter se na podlagi takšnih komunikacij odloča o ureditvi agende pripadajočega EDS [1].

Odločanje agenta samoorganizacije **Agent**_{SO} je popolnoma avtonomno, vendar pa mora v določenih situacijah upoštevati odločanja agentov višjih nivojev v kibernetskem sistemu. S svojim odločanjem mora agent samoorganizacije **Agent**_{SO} zagotoviti doseganje ciljne funkcije. V sodobnih proizvodnih sistemih ciljno funkcijo predstavlja doseganje točnosti terminov dobave [1].

Agent samoorganizacije **Agent**_{SO} s komunikacijo z agentom razporejanja **Agent**_{Sch} pridobi informacijo o razporeditvenem terminu dobave opazovane razporejene naloge $t_{DDT_{Sch}}$ in svoje odločanje prilagaja temu. Razporeditveni termin dobave opazovane razporejene naloge $t_{DDT_{Sch}}$ predstavlja dejanski čas zaključka izvajanja razporejene naloge $t_{FT_{Sch}}$ [1].

Na podlagi informacij, vključenih v sporočilo *ACLMessage_Agent_Sch*(4), ki ga pridobi od agenta razporejanja **Agent**_{Sch}, agent samoorganizacije **Agent**_{SO} začne komunikacijo z agenti operativnega nivoja kibernetskega sistema, in sicer z agentom nadzora in identifikacije pripadajočega (opazovanega) elementarnega delovnega sistema **Agent**_{MO} in z ostalimi agenti samoorganizacije **Agent**_{SO,i} [1].

Komunikacija agenta samoorganizacije **Agent**_{SO} z ostalimi agenti samoorganizacije **Agent**_{SO,i} v kibernetskem sistemu omogoča EDS pošiljanje opazovane naloge drugemu EDS, ki bi jo lahko obdelal (npr. če pride do izpadov fizičnih elementov opazovanega EDS, bi se lahko naloga poslala tistim, ki imajo možnost procesiranja opazovane naloge) [1].

Komunikacija z agentom nadzora in identifikacije pripadajočega elementarnega delovnega sistema **Agent**_{MO} omogoča agentu samoorganizacije **Agent**_{SO} pridobivanje informacij o aktualnem stanju pripadajočega EDS v obliki sporočila *ACLMessage_Agent_MO*(1). Informacije agenta nadzora in identifikacije pripadajočega EDS se nanašajo na čase začetka in zaključka izvajanja aktualnih nalog, ki čakajo na procesiranje v opazovanem EDS ($t_{ST_{AC}}$, $t_{FT_{AC}}$), in kapaciteto opazovanega EDS oz. interval njegove razpoložljivosti **Ava**_{EWS} (t_{SAva} , t_{FAva}) [1].

Za podporo odločanja agenta samoorganizacije **Agent**_{SO} so v tem delu uporabljeni hevristični algoritmi kot mehanizmi odločanja agenta, ki se lahko uresničijo v obliki spletnih storitev, in sicer FIFO-hevristični algoritem odločanja, EPT-hevristični algoritem odločanja in EPT & WSO-algoritem odločanja, ki je bil razvit v delu [9].

FIFO-hevristični algoritem (ang. *First-In-First-Out* – FIFO) omogoča agentu samoorganizacije **Agent**_{SO}, da se samodejno odloča na podlagi kriterija, da bo čakajoča naloga na pripadajočem EDS, ki ima najdaljši čas čakanja, prva obdelana.

Odločanje agenta samoorganizacije **Agent**_{SO} na podlagi FIFO-hevrističnega algoritma je prvi korak, ki ga agent samoorganizacije **Agent**_{SO} naredi v trenutku oz. času opazovanja t_{OB} ali v času pojava novega dogodka t_{NE} . V času opazovanja ali pojava novega dogodka agent samoorganizacije **Agent**_{SO} začne komunikacijo z agentom nadzora in identifikacije **Agent**_{MO} opazovanega EDS, z agentom razporejanja **Agent**_{Sch} in s spletno storitvijo **WS**_{FIFO}, ki temelji na FIFO-hevrističnem algoritmu [1].

Agent nadzora in identifikacije **Agent**_{MO} sporoča agentu samoorganizacije **Agent**_{SO} informacijo o aktualnem stanju opazovanega EDS oz. informacijo o času začetka in času zaključka aktualne naloge (t_{STAC} , t_{FTAC}), ki v tem trenutku (času opazovanja) čaka na procesiranje v opazovanem EDS [1].

Na temelju podatkov o času začetka in zaključka izvajanja za opazovano razporejeno nalogo **T**_{Sch} (t_{STSch} , t_{FTSch}) pridobljenih od agenta razporejanja **Agent**_{Sch}, podatkov o času začetka in času zaključka aktualne naloge, ki čaka na procesiranje v opazovanem EDS (t_{STAC} , t_{FTAC}), pridobljenih od agenta nadzora in identifikacije opazovanega elementarnega delovnega sistema **Agent**_{MO} in informacije o času trajanja čakanja posamezne aktualne naloge (t_{WTAC}^*), ki jih za agenta samoorganizacije **Agent**_{SO} izračuna spletna storitev **WS**_{FIFO} (ki temelji na FIFO-hevrističnem algoritmu), agent samoorganizacije **Agent**_{SO} preračunava nove čase začetka in zaključka izvajanja za opazovano razporejeno nalogo **T**_{Sch} in jih opredeljuje v obliki časov začetka in zaključka izvajanja opazovane samoorganizirane naloge (t_{STSO} , t_{FTSO}) znotraj pripadajoče agende. Referenčno vrednost za izračun časa začetka in zaključka izvajanja posamezne samoorganizirane naloge **T**_{SO} predstavlja čas trajanja čakanja posamezne aktualne naloge t_{WTAC}^* [1].

Agent samoorganizacije **Agent**_{SO} primerja izračunane čase začetka in zaključka izvajanja opazovan samoorganizirane naloge (t_{STSO} , t_{FTSO}), s ciljno funkcijo doseganja točnosti razporeditvenega termina dobave opazovane razporejen naloge $t_{DDT_{Sch}}$ in se odloča o nadaljnji ureditvi agende pripadajočega elementarnega delovnega sistema **Agenda**_{EWS}[1].

Novo urejena agenda pripadajočega EDS, ki temelji na podlagi uporabe FIFO hevrističnega algoritma za odločanje agenta samoorganizacije **Agent_{SO}** je dejansko enaka aktualnem zaporedju v množici aktualnih nalog, ki čakajo na procesiranje v opazovanem EDS. To pomeni, da bo aktualne naloge **T_{AC,i}**, ki čakajo na procesiranje opazovanem EDS procesirane v zaporedju, kot so prihajale oz. kot stojijo v čakalni vrsti v pripadajočem EDS. Ta način procesiranja aktualnih nalog **T_{AC,i}** je primer izvajanja nalog v tradicionalnem pristopu k upravljanju in krmiljenju proizvodnih sistemov ter ne omogoča zmanjšanje odstopanja od planiranih terminov dobave.

Struktura sporočila, ki ga pošilja agent samoorganizacije **Agent_{SO}** do agenta razporejanja **Agent_{Sch}**, je prikazana v obliki spodnjega zapisa:

```

ACLMessage_Agent_SO_(5) ==
< Head {Message_ID, Consigner_ID, {Adressee_ID}},
  Message_specification {Self_organized_time_data{ t_ST_SO, t_FT_SO }
  Attachments {Documentation} >

```

Agent samoorganizacije **Agent_{SO}** pošlje informacijo o času začetka in zaključka izvajanja samoorganizirane naloge (**t_{ST_{SO}}**, **t_{FT_{SO}}**) do agentskega (komunikacijskega) vmesnika med kibernetiskim in fizičnim prostorom v obliki sporočila **Message_Agent_SO_(6)**. Struktura tega sporočila je prikazana v nadaljevanju [1].

```

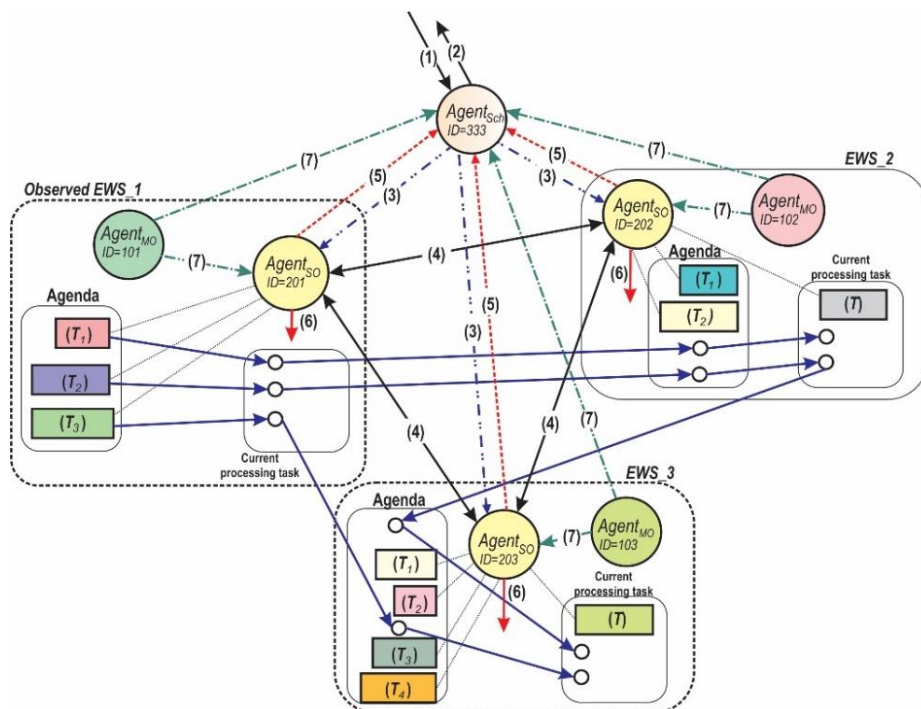
ACLMessage_Agent_SO_(6) ==
< Head {Message_ID, Consigner_ID, {Adressee_ID}},
  Message_specification {Self_organized_time_data{ t_ST_SO, t_FT_SO }
  Task_specification {Operation_Type, Input/Output_specifications
    {Dimensions, Material, Tolerance_Specification}, Quantity},
  Attachments {Documentation} >

```

Z medsebojno interakcijo agenti pridejo do ustrezne rešitve za določeno situacijo. V primeru, da agenti samostojno ne ponujajo ustrezne rešitve, ki ustreza zadovoljevanju lokalnih in globalnih ciljev, je končna odločitev na strani *subjekta* kot upravitelja celotnega proizvodnega sistema.

Primer medagentske komunikacija v izvajanju funkcij PPC je predstavljena na Sliki 7.11.

Slika 7.11. Medagentska komunikacija v izvajanju funkcij PPC



LEGEND:

- Agent_{MO} - MONITORING AGENT
- Agent_{SO} - SELF-ORGANIZATION AGENT
- Agent_{Sch} - SCHEDULING AGENT
- EWS - ELEMENTARY WORK SYSTEM
- T - TASK
- (1) - COMMUNICATION Agent_{prp} to Agent_{Sch}
- (2) - COMMUNICATION Agent_{Sch} to Agent_{prp}
- (3) - COMMUNICATION Agent_{Sch} to Agent_{SO}
- (4) - COMMUNICATION Agent_{SO} to Agent_{SO}
- (5) - COMMUNICATION Agent_{SO} to Agent_{Sch}
- (6) - COMMUNICATION Agent_{SO} to controller
- (7) - COMMUNICATION Agent_{MO} to other agent
- - SCENARIO S1
- ... - SCENARIO S2
- - SCENARIO S3
- - TASK FLOW
- - OPERATION STATE

7.4 Simulacija izvajanja funkcij PPC v konceptih naprednih proizvodnih sistemov

7.4.1 Izhodišča

Z vidika te znanstvene monografije je v tem podpoglavju podan fokus na sklepanje in avtonomno odločanje agenta samoorganizacije **Agent_{SO}** kot mehanizma za izvajanje funkcije samoorganizacije EDS v konceptu KFPS oz. konceptu K-KFPS. Simulacija ima za cilj pokazati, kako odločanje agenta samoorganizacije **Agent_{SO}** pri izvajanju funkcije samoorganizacije vpliva na učinkovitost proizvodnega sistema. Tudi s simulacijo želimo pokazati, kako medagentsko sodelovanje in komunikacija izboljšujeta uspešnost proizvodnega sistema.

Agent samoorganizacije **Agent_{SO}** svoje odločanje utemelji na podlagi informacijah, ki izhajajo iz komunikacij s spletnimi storitvami, oz. *na podlagi informacij, ki so rezultat uporabe* hevrističnih algoritmov FIFA, EPT in EPT & WSO algoritma, ki je bil razvit v delu [9] in ciljne funkcije oz. doseganja točnosti dobave t_{DD} . To pomeni, da agent samoorganizacije **Agent_{SO}** primerja rezultate hevrističnih algoritmov s ciljno funkcijo ter se na podlagi tega odloča o načinu ureditve agende pripadajočega elementarnega delovnega sistema **Agenda_{EWS}**. S tega vidika so za vrednotenje konceptov KFPS in K-KFPS v nadaljevanju tega poglavja rabljeni scenariji simulacije, ki temeljijo na rabi FIFA, EPT in EPT&WSO hevrističnih algoritmov ter na realnih industrijskih podatkih, ki so bili uporabljeni v delu [1]. Scenarij S1 temelji na FIFA hevrističnem algoritmu, scenarij S2 na EPT hevrističnem algoritmu in scenarij S3 na EPT&WSO algoritmu.

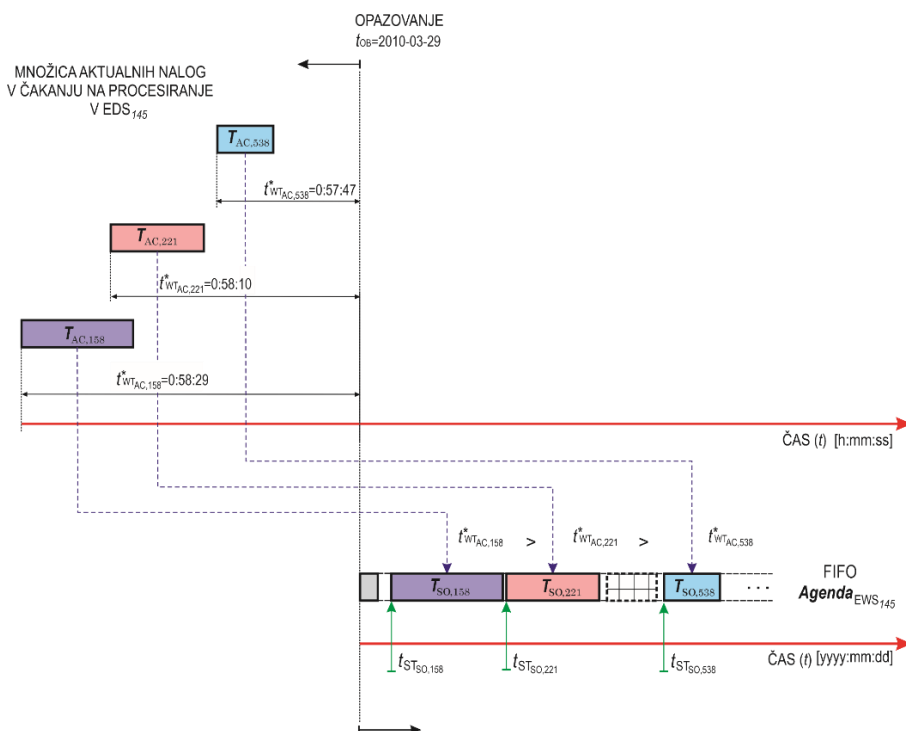
Za simulacijo so izbrani podatki iz proizvodnega informacijsko-krmilnega sistema (MES) [1]. Orodje, uporabljeno za izvajanje simulacije, je bilo predstavljeno v delu Kozjeka in soavtorjev [372]. Simulacijsko orodje omogoča testiranje različnih hevrističnih algoritmov in njihovih kombinacij za urejanje agende posameznih elementarnih delovnih sistemov **Agenda_{EWS_r}**.

7.4.2 Rezultati simulacije

Vizualna predstavitev množice aktualnih nalog v čakanju za procesiranje v opazovanem elementarnem delovnem sistemu EDS₁₄₅ in agende, ki je urejena na

podlagi rabe FIFO hevrističnega algoritma odločanja agenta samoorganizacije **Agent**_{SO}, je predstavljena na Sliki 7.12.

Slika 7.12. Ureditev agende na podlagi rabe FIFO hevrističnega algoritma za EDS₁₄₅ [1]



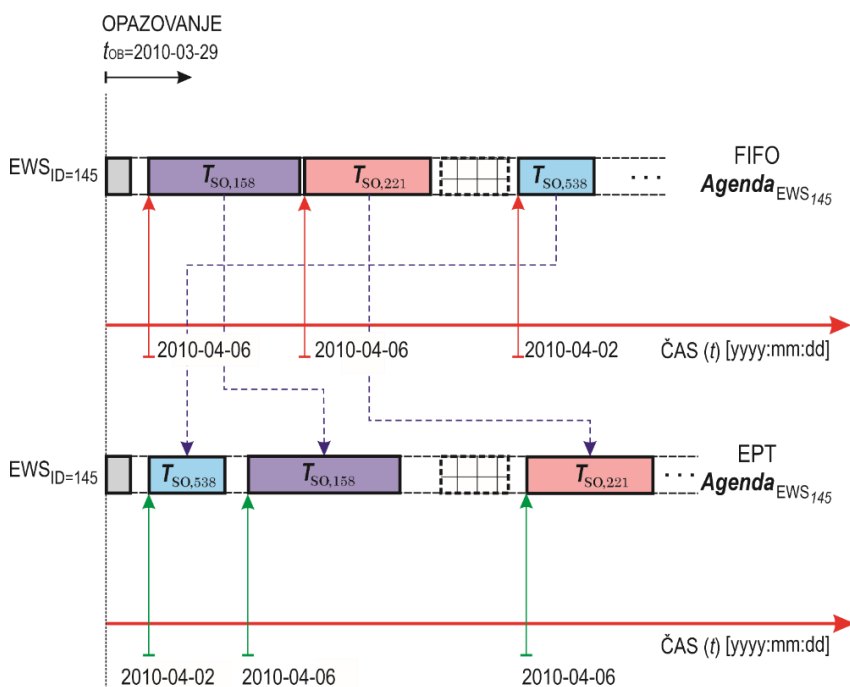
FIFO hevristični algoritem omogoča ureditev agende elementarnega delovnega sistema EDS₁₄₅ na način, da aktualna naloga $T_{AC,158}$, ki ima najdaljši čas trajanja čakanja $t_{WT_{AC,158}}^* = 0:58:29$, pride prva na vrsto za izvajanje v FIFO agendi obravnavanega elementarnega delovnega sistema **Agenda**_{EWS₁₄₅} in postane samoorganiziran naloga $T_{SO,158}$.

Na Sliki 7.12 je razvidno, da med množico aktualnih nalog, ki čakajo na procesiranje v opazovanem elementarnem delovnem sistemu EDS₁₄₅ in FIFO agendo opazovanega elementarnega delovnega sistema EDS₁₄₅ ne obstaja razlika. To pomeni, da so v tej študiji industrijski podatki vnaprej predprocesirani in urejeni po načelu *prvi pride, prvi gre*. (Na podlagi podatkov, shranjenih v

podatkovno bazo MES, lahko sklepamo, da so naloge v realni proizvodnji izvajane po tem načelu).

Simulacijski rezultati za primer rabe EPT hevrističnega algoritma za avtonomno odločanje agenta samoorganizacije **Agent_{SO}** so prikazani na Sliki 7.13.

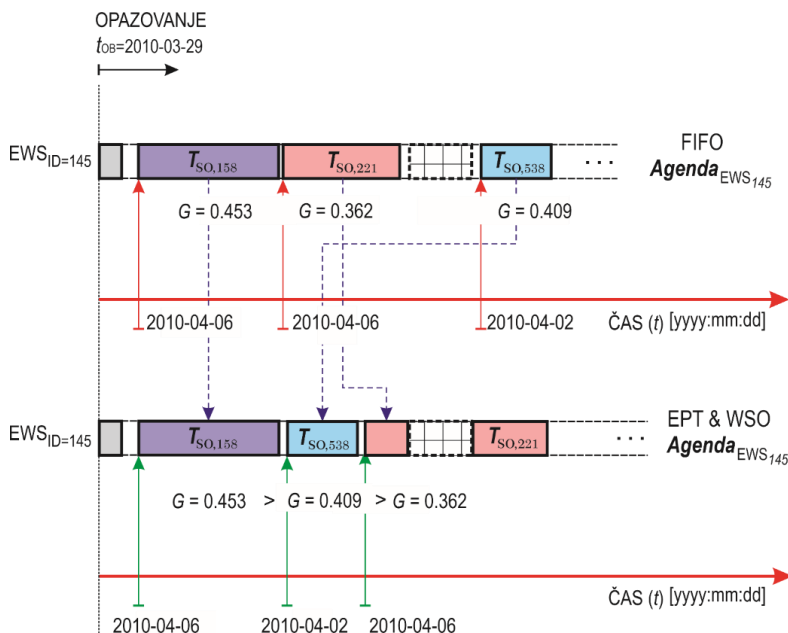
Slika 7.13. Ureditev agende na podlagi rabe EPT-hevrističnega algoritma za EDS₁₄₅ [1]



EPT-hevristični algoritem omogoča, da bo prva za realizacijo samoorganizirana naloga $T_{SO,538}$, ki ima čas začetka izvajanja nastavljen na 2010-04-02, glej Sliko 7.13. Potem sledi samoorganizirana naloga $T_{SO,158}$, ki ima čas začetka izvajanja nastavljen na 2010-04-06, ter samoorganizirana naloga $T_{SO,221}$, ki ima tudi čas začetka izvajanja nastavljen na 2010-04-06.

Simulacijski rezultati za primer rabe EPT&WSO hevrističnega algoritma, ki je bil razvit v delu [9] za urejanje agende elementarnega delovnega sistema EDS₁₄₅ so prikazani na Sliki 7.14.

Slika 7.14. Ureditev agende na podlagi rabe EPT & WSO-hevrističnega algoritma za EDS₁₄₅ [1]



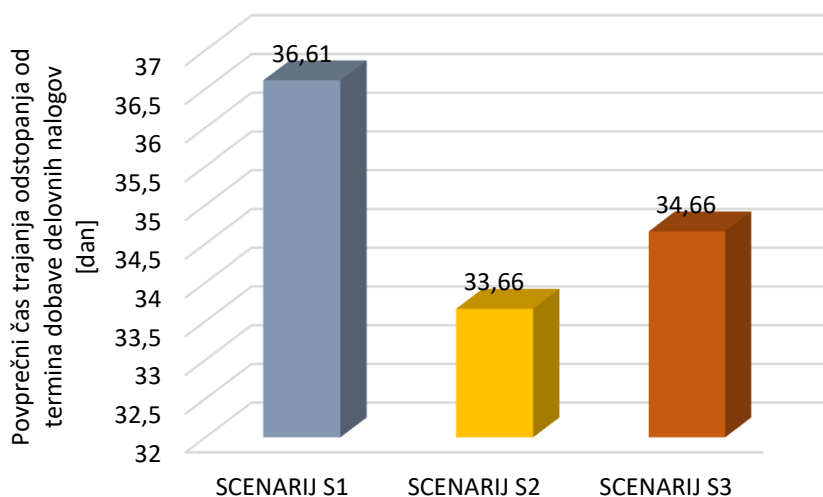
Samoorganizirano nalogo $T_{SO,158}$, ki ima največjo vrednost indikatorske funkcije G , agent samoorganizacije **Agent_{SO}** prestavi na pozicijo ena v EPT&WSO agendi opazovanega elementarnega delovnega sistema EDS₁₄₅ (glej Sliko 7.14).

V simulaciji celotnega proizvodnega sistema obravnavanega ETO podjetja je v nadaljevanju vsak hevristični algoritem, testiran v posamezni simulaciji in rezultat takšne simulacije predstavlja določen proizvodni scenarij. Na osnovi tega so vzpostavljeni trije scenariji (S1, S2, in S3). Scenarij S1 temelji na FIFO-hevrističnem algoritmu, scenarij S2 na EPT-hevrističnem algoritmu in scenarij S3 na EPT & WSO hevrističnem algoritmu.

Za merjenje učinka različnih scenarijev na zmogljivost proizvodnega sistema so izbrani štiri kazalniki uspešnosti, in sicer: 1) Porazdelitev časov trajanja odstopanja od roka dobave delovnih nalogov. Na splošno je cilj, da se delovni nalog ne konča prepozno niti zelo zgodaj; 2) Povprečni čas izvedbe delovnega naloga. Cilj je skrajšati čas za izvedbo realizacije delovnega naloga; 3) Povprečni čas čakanja naloge pred obdelavo na EDS. Cilj je dosegati čim krajši pretočni čas;

4) Povprečno število čakajočih delovnih nalogov v proizvodnji. Cilj je, da je to število čim manjše. Rezultati simulacije so predstavljeni na Sliki 7.15.

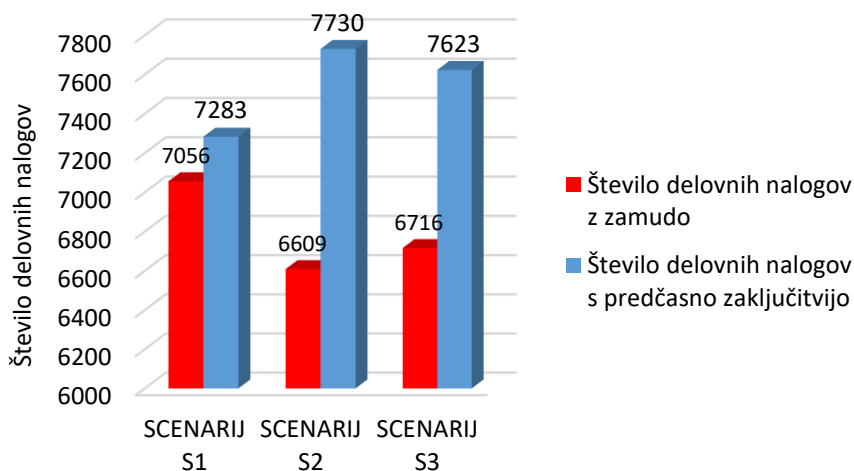
Slika 7.15. Povprečni čas trajanja odstopanja od termina dobave nalogov [1]



Če primerjamo scenarija S3 in S2, ugotovljamo, da so porazdelitve časov trajanja odstopanja od termina dobave delovnih nalogov zelo podobne. V scenariju S3 je bil povprečni čas trajanja odstopanja od termina dobave delovnih nalogov 34,66 dneva. V istem časovnem obdobju je bil po scenariju S2 povprečni čas trajanja odstopanja od termina dobave delovnih nalogov 33,66 dneva. To pomeni, da je povprečni čas trajanja odstopanja od termina dobave delovnih nalogov v scenariju S2 krajši za 2,88 % v primerjavi s scenarijem S3. V primerjavi s scenarijem S1 pa je bil povprečni čas trajanja odstopanja od termina dobave delovnih nalogov v scenariju S2 krajši za 8,06 % in je bil v scenariju S3 krajši za 5,32 % (glej Sliko 7.15).

Število delovnih nalogov, ki imajo zamudo, je 7056 v scenariju S1 ter se zmanjša v scenariju S2 za 447 delovnih nalogov oz. za 340 delovnih nalogov v scenariju S3. To pomeni, da se število delovnih nalogov z zamudo v scenariju S2 zmanjša za 6,33 % (6609 delovnih nalogov, ki imajo zamudo) in v scenariju S3 za 4,82 % (6716 delovnih nalogov, ki imajo zamudo) – kot je prikazano na Sliki 7.16.

Slika 7.16. Število delovnih nalogov z zamudo oz. predčasno zaključitvijo [1]

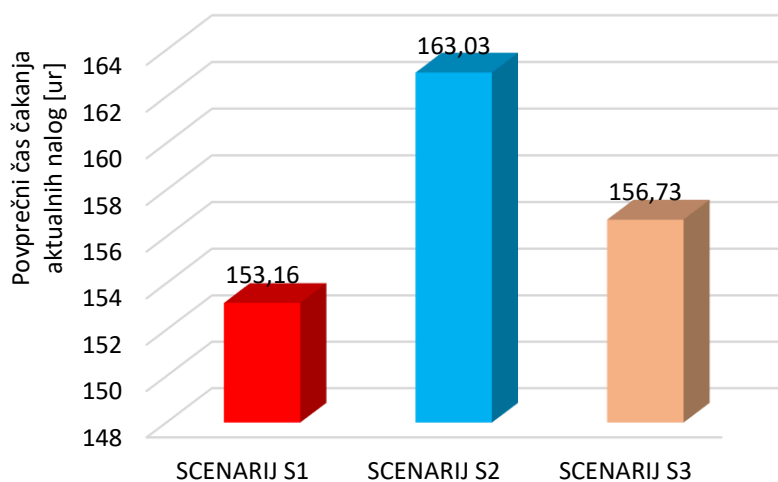


Število delovnih nalogov, ki imajo predčasno zaključitev, je 7283 v scenariju S1 in se poveča v scenariju S2 za 447 delovnih nalogov oz. za 340 delovnih nalogov v scenariju S3. To pomeni, da se število delovnih nalogov s predčasno zaključitvijo v scenariju S2 zmanjša za 6,33 % (7730 delovnih nalogov, ki imajo predčasno zaključitev) in v scenariju S3 za 4,82 % (7623 delovnih nalogov, ki imajo predčasno zaključitev) – kot je prikazano na Sliki 7.16.

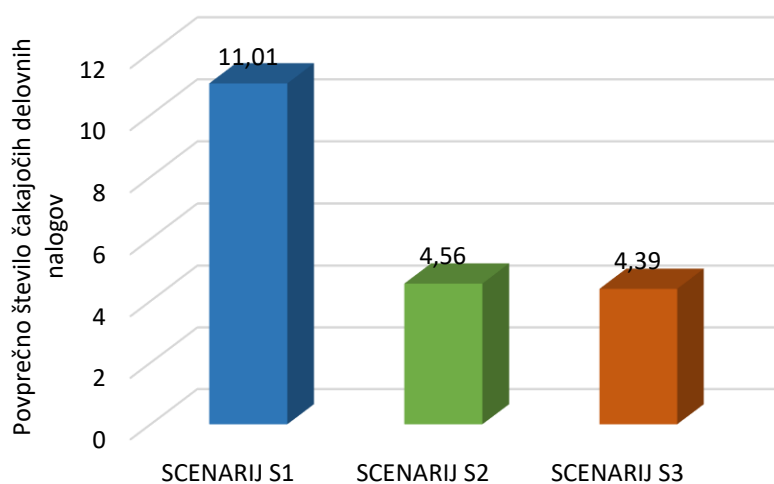
Povprečni čas čakanja na elementarnih delovnih sistemih v primeru scenarija S1 znaša 153,16 ure. V primeru scenarija S3 povprečni čas čakanja nalog na elementarnih delovnih sistemih znaša 156,73 ure. To pomeni, da je bil pri scenariju S3 daljši za 2,33 %. V primeru scenarija S2 čas čakanja na elementarnih delovnih sistemih znaša 163,03 ure, kar predstavlja povečanje za 6,44 % v primerjavi s scenarijem S1, oziroma povečanje za 4,02 % v primerjavi s scenarijem S2. To pomeni, da uporaba scenarija S1 zagotavlja najkrajši povprečni čas čakanja na elementarnih delovnih sistemih. Najdaljši povprečni čas čakanja na elementarnih delovnih sistemih pa zagotavlja uporaba scenarija S2 (glej Sliko 7.17).

Povprečno število čakajočih delovnih nalogov v obravnavani ETO-proizvodnji se zmanjša pri uporabi scenarija S2 na 4,56 delovne naloge oz. Za 58,58 % v primerjavi s scenarijem S1. Pri uporabi scenarija S3 se zmanjša na 4,39 delovne naloge oz. Za 60,13 % v primerjavi s scenarijem S1 oz. Za 3,73 % v primerjavi s scenarijem S2 (glej Sliko 7.18).

Slika 7.17. Povprečni čas čakanja aktualnih nalog na EDS [1]

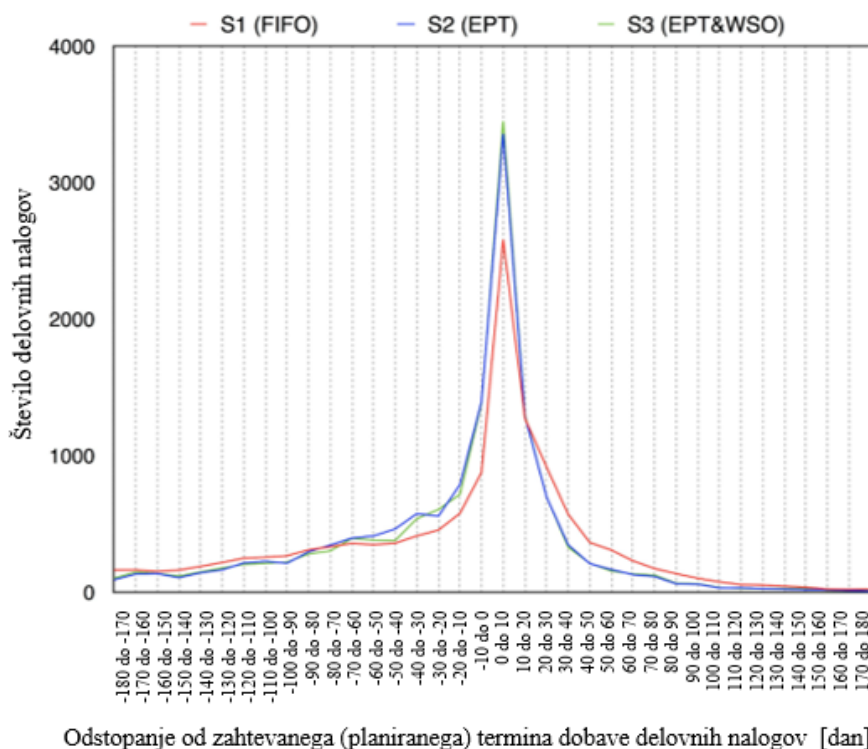


Slika 7.18. Povprečno število čakajočih delovnih nalogov v obravnavani ETO-proizvodnji [1]



Skupni rezultati distribucije časa trajanja odstopanja od planiranega termina dobave delovnih nalogov za vse scenarije (scenarij S1, S2 in S3) so prikazane na Sliki 7.19. Na podlagi takega prikaza lahko sklepamo, da je zmogljivost proizvodnega sistema boljša v scenarijih S2 in S3 v primerjavi s scenarijem S1 glede na porazdelitev časa trajanja odstopanja od planiranega termina dobave delovnih nalogov.

Slika 7.19. Rezultati distribucije časa trajanja odstopanja od zahtevanega (planiranega) termina dobave delovnih nalogov [9]



Primerjava rezultatov simulacije celotnega proizvodnega sistema obravnavanega ETO podjetja, ki je osredotočena na predlagani pristop kibernetizacije funkcij PPC kaže, da omogoča uvedba funkcije samoorganizacije in dodatnih komunikacij med elementi v kibernetnem sistemu boljše proizvodno učinkovitost z vidika izbranih kazalnikov uspešnosti.

Na podlagi predstavljenih rezultatov je mogoče zaključiti, da predlagani pristop digitalizacije in kibernetizacije funkcij PPC, v katerem mehanizme za izvajanje

digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij PPC predstavljajo agentske strukture, omogoča sprejemanje avtonomnih odločitev na operativnem in koordinacijsko-kolaborativnem nivoju kibernetkega sistema KFPS oz. K-KFPS in izboljšuje uspešnost proizvodnega sistema.

Lastnosti agentov, da se lahko adaptirajo in samoorganizirajo glede na trenutno situacijo, omogočajo agentom, da svoje odločanje pri izvajanju funkcij PPC utemeljijo na rabi informacij, pridobljenih iz različnih hevrističnih algoritmov. Predlagani koncept kibernetizacije funkcij PPC nima vloge ponujati optimalne rešitve v danem trenutku, vendar omogoča, da se elementi proizvodnega sistema oz. agenti, ki jih zastopajo v kibernetnem sistemu KFPS oz. K-KFPS, prilagajajo trenutni situaciji in pri tem iščejo najbolj primerno odločitev o svojih aktivnostih v trenutni situaciji, pri čemer pa upoštevajo navodila in omejitve nadrejenih struktur.

8 ZAKLJUČEK

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

Homer

V predstavljeni znanstveni monografiji so na podroben in sistematičen način predstavljeni koncepti naprednih proizvodnih sistemov evolucijo proizvodnih sistemov.

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*.

Rdeča nit tega znanstvenega dela je utemeljena na viziji, da bo nadaljnji razvoj konceptov in modelov naprednih proizvodnih sistemov v prihodnosti omogočal realizacijo učinkovitejših, bolj odzivnih in odpornih proizvodnih sistemov ter da bo na osnovi takšnih konceptov in modelov možno strukturiranje, modeliranje, upravljanje in krmiljenje naprednih proizvodnih sistemov v realnem času.

Znanstvena monografija temelji na teoretičnih osnovah proizvodne kibernetike, moderne teorije proizvodnih sistemov, sodobne informacijsko-komunikacijske tehnologije, umetne inteligence in kognitivnih tehnologij. V znanstveni monografiji je podan obsežen pregled relevantne domače in tuje literature, na podlagi kateri temelji doprinos znanosti v tem znanstvenem delu.

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 okviru 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.

V uvodnem poglavju je predstavljena motivacija za raziskovanje na temo, ki jo obravnava predložena znanstvena monografija. Motivacija za raziskovanje na omenjenem področju izhaja iz pomena proizvodnje za Slovenijo in celotno EU.

V okviru programa *Tovarne prihodnosti*, ki ga je definirala industrijska svetovalna skupina EU, so določene smernice za razvoj naprednih proizvodnih sistemov, ki vključujejo razvoj novih konceptov kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov, razvoj novih arhitektur za kompleksne adaptivne kibernetско-fizične proizvodne sisteme ter razvoj novih tehnologij za modeliranje in simulacijo. Predhodno navedene smernice za razvoj novih konceptov kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov so usmerile predloženo raziskavo v smeri razvoja novih konceptov proizvodnje v distribuiranem mrežnem okolju v obliki kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov in kognitivnih kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov. Najprej je predstavljena problematika ter je na tej osnovi predstavljena utemeljitev raziskave, ki temelji na potencialu povezovanja fizičnih in digitalnih elementov proizvodnih sistemov v funkcionalno proizvodno strukturo, ki omogoča digitalizacijo in kibernetizacijo funkcij v proizvodnih sistemih ter realizacijo takšnih funkcij s pomočjo umetne inteligence in kognitivnih tehnologij. Od takšnih proizvodnih struktur se pričakujeta harmonizirana interakcija in ustvarjanje sinergije med elementi proizvodnega sistema, kar bo pripomoglo k povečanju učinkovitosti, odzivnosti in konkurenčnosti proizvodnih podjetij. Na teh predpostavkah je zgrajena rdeča nit predstavljene znanstvene monografije.

V drugem poglavju predstavljene znanstvene monografije je podana definicija proizvodnega sistema in so opisani njegovi glavni elementi. Elementi sodobnih, kompleksnih proizvodnih sistemov so v medsebojni povezavi prek materialnega in informacijskega toka ter skušajo dosegati medsebojno komunikacijo, interakcijo in porazdelitev proizvodnih aktivnosti. Iz medsebojnih povezav elementov proizvodnih sistemov izhaja potreba po usklajevanju aktivnosti med elementi za delo v skupini. V ta namen so opisani pojmi kooperacije, kolaboracije in koordinacije. Prikazan je razvoj proizvodnih paradig in konceptov naprednih proizvodnih sistemov, za katere so pomembne lastnosti fleksibilnost, rekonfigurabilnost, agilnost, samoorganizacija, adaptacija ipd.

Napredne tehnologije in sistemi, na podlagi katerih je omogočena implementacija novih konceptov za modeliranje in strukturiranje, upravljanje in krmiljenje naprednih proizvodnih sistemov, so predstavljeni v tretjem poglavju. Ključno tehnologijo za implementacijo konceptov proizvodnih sistemov Industrije 4.0 in nove industrijske revolucije t. i. Industrije 5.0 predstavljajo agentske tehnologije, ki se iz tega razloga prikazuje na teoretični osnovi iz relevantne literature s

področja agentskih tehnologij in njihove aplikacije na področju proizvodnih sistemov.

Metodologije, metode in orodja za modeliranje in simulacijo obnašanja naprednih proizvodnih sistemov so predstavljene v četrtem poglavju tega znanstvenega dela. V tem okvirju je podan poudarek na konceptu ontološkega pristopa k modeliranju naprednih proizvodnih sistemov.

V petem poglavju so opisani koncepti proizvodne paradigme pametnih proizvodnih sistemov, ki integrirajo socialne, kibernetske in fizične elemente v funkcionalno celoto ter izhajajo iz osnov jasne identifikacije socialnega, kibernetskega in fizičnega prostora znotraj posameznih sistemskih struktur. Znotraj jasno opredeljenih konceptov je predstavljen kibernetski sistem kot novi podsistem v konceptu KFPS, ki omogoča tako vertikalne povezave sistemskih proizvodnih struktur kot tudi horizontalne povezave v različne kibernetske mrežne strukture.

Naslednje, šesto, poglavje obravnava tematiko prihodnjih naprednih proizvodnih sistemov, njihovih konceptov in modelov. Prihodnji napredni proizvodni sistemi so identificirani skozi novo proizvodno paradigmo adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov in konceptov pete industrijske revolucije t. i. Industrije 5.0. V tem poglavju je bolj podrobno predstavljen koncept kognitivnih kibernetsko-fizičnih sistemov kot osnovni gradivni blok proizvodne paradigme adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov.

Predstavljeni koncepti naprednih pametnih in adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov so z vidika njihovega upravljanja, vodenja in krmiljenja obravnavani v sedmem poglavju tega znanstvenega dela. Upravljanje in krmiljenje osnovnih gradnikov pametnih in adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov, kot so kibernetsko-fizični proizvodni sistemi in kognitivni kibernetsko-fizični proizvodni sistemi je opisano skozi ontološki pristop in implementacijo umetne inteligence za realizacijo digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij naprednih proizvodnih sistemov.

V tem zadnjem vsebinskem poglavju predstavljene znanstvene monografije je opisana znanstvena raziskava, ki je na temeljit, sistematičen in slikovit način ovrednotila prednosti implementacije novih konceptov KFPS in K-KFPS v realna industrijska okolja.

V okviru obravnave predložene znanstvene monografije ostaja veliko odprtih smeri za nadaljnje delo.

Predloženo delo je utemeljilo koncepte in modele kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov in kognitivnih kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov. Na ta način je sistematično postavljen pristop k novim, naprednim proizvodnim sistemom, ki so po posvetovalnem dokumentu *Tovarne prihodnosti* zasnovani na konceptu kibernetско-fizičnih sistemov.

Nadaljevanje raziskovalnega dela je mogoče pričakovati na naslednjih področjih:

- Kibernetizacija funkcionalnosti, kot so: funkcija samodiagnostike, planiranja procesa, samovzdrževanja, samoadaptacije procesnih parametrov in podobno.
- Razvoj novih funkcij za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje K-KFPS, ki izhajajo iz horizontalnih povezav KFPS, povezanih v različne mrežne strukture.
- Vzpostavitev agentskih struktur na ustrezni večagentni platformi, ki bi predstavljala odprtokodno rešitev za operiranje, upravljanje in krmiljenje adaptivnih distribuiranih proizvodnih sistemov, zasnovanih na konceptu K-KFPS.
- Razvoju ustreznih algoritmov vedenja agentskih struktur v kibernetickem sistemu.
- Razvoju komunikacijskih vmesnikov za komunikacijo med socialnimi in kibernetickimi sistemi na eni strani, kot tudi vmesnikov med kibernetickim in fizičnim okoljem po drugi strani.
- Implementacija modela K-KFPS v realnem industrijskem okolju, ker se na teoretičnih osnovah pričakuje, da bodo predloženi koncepti ponujali dobre rezultate z vidika povečanja zmogljivosti in produktivnosti, dviga kakovosti in učinkovitega obvladovanja kompleksnosti naprednih proizvodnih sistemov.

9 LITERATURA

- [1] Hozdić, E. (2020). *Model kiberntesko-fizičnih proizvodnih sistemov*. Doktorsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- [2] Hon, K. K. B. (2005). Performance and Evaluation of Manufacturing Systems. *CIRP Annals*, vol. 54, št. 2, str. 139–154, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60023-7.
- [3] Vrabič, R., Husejnagić, D., Butala, P. (2012). Discovering autonomous structures within complex networks of work systems. *CIRP Annals*, vol. 61, št. 1, str. 423–426, doi: 10.1016/j.cirp.2012.03.083.
- [4] Gill, H. (2006). NSF perspective and status on cyber-physical systems. In National Workshop on Cyber-physical Systems. Austin, TX.
- [5] Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., Atzori, L. (2010). *The Internet of Things*. Springer.
- [6] Baheti, R., Gill, H. (2011). Cyber-physical systems. *The Impact of Control Technology*, str. 161–166.
- [7] Hozdić, E., Kendić, S., Jurković, Z. (2022). Complex Adaptive Manufacturing System Concept as a Cyber-Physical Production System: Solutions to the Covid-19 Pandemic Challenges. In *Cyber-Physical Systems*, Boca Raton: CRC Press, str. 129–156.
- [8] Westkämper, E. (2014). *Towards the Re - Industrialization of Europe*. Stuttgart: Springer Heidelberg New York Dordrecht London.
- [9] Hozdić, E., Kozjek, D., Butala, P. (2020). A cyber-physical approach to the management and control of manufacturing systems. *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, št. 1, str. 61–70.
- [10] Davis, J., Edgar, T., Porter, J., Bernaden, J., Sarli, M. (2012). Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Computers & Chemical Engineering*, vol. 47, str. 145–156, doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.06.037.
- [11] Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP (Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems)*, vol. 17, str. 9–13, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
- [12] Zhang, L. in sod. (2014). Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm. *Enterprise Information Systems*, vol. 8, št. 2, str. 167–187, 2014, doi: 10.1080/17517575.2012.683812.

- [13] Wang, X. V., Wang, L., Mohammed, A., Givehchi, M. (2017). Ubiquitous manufacturing system based on Cloud: A robotics application. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 45, str. 116–125, doi: 10.1016/j.rcim.2016.01.007.
- [14] Morosini, E. F., Hartmann, J., Makuschewitz, T., Scholz-Reiter, B. (2013). Towards Socio-Cyber-Physical Systems in Production Networks. *Procedia CIRP*, vol. 7, str. 49–54, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.05.009.
- [15] Hozdić, E., Butala, P. (2020). Concept of Socio-Cyber-Physical Work Systems for Industry 4.0. *Tehnički vjesnik - Technical Gazette*, vol. 27, št. 2, str. 399–410.
- [16] Espinoza Pérez, A. T., Rossit, D. A., Tohmé, F., Vásquez, Ó. C. (2022). Mass customized/personalized manufacturing in Industry 4.0 and blockchain: Research challenges, main problems, and the design of an information architecture. *Information Fusion*, vol. 79, str. 44–57, doi: 10.1016/j.inffus.2021.09.021.
- [17] World Health Organization (WHO), (2020). Coronavieus disease (COVID-19). [Online]. Dostopno: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>.
- [18] Romero, D., Stahre, J. (2021). Towards The Resilient Operator 5.0: The Future of Work in Smart Resilient Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, vol. 104, str. 1089–1094, doi: 10.1016/j.procir.2021.11.183.
- [19] Tissir, S., El Fezazi, S., Cherrafi, A. (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*, str. 3123–3129.
- [20] UNCTAD, (2020). Impact of the COVID-19: Pandemic on Trade and Development - Transitioning to a new normal. Geneva, Switzerland.
- [21] Chen, T., Lin, C. W. (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*, vol. 111, št. 11–12, str. 3545–3558, doi: 10.1007/s00170-020-06097-w.
- [22] Kumar, A., Luthra, S., Mangla, S. K., Kazançoğlu, Y. (2020). COVID-19 impact on sustainable production and operations management. *Sustainable Operations and Computers*, vol. 1, str. 1–7, doi: 10.1016/j.susoc.2020.06.001.
- [23] ElMaraghy, H., Monostori, L., Schuh, G., ElMaraghy, W. (2021). Evolution and future of manufacturing systems. *CIRP Annals*, vol. 70, št. 2, str. 635–658, doi: 10.1016/j.cirp.2021.05.008.
- [24] Tao, F., Cheng, Y., Zhang, L., Nee, Y. C. A. (2017). Advanced manufacturing systems: Socialization characteristics and trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 28, št. 5, str. 1079–1094.
- [25] Monostori, L., Váncza, J. (2020). Towards living manufacturing systems. *Procedia CIRP*, vol. 93, str. 323–328, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.150.

- [26] Patriarca, R., Bergström, J., Di Gravio, G., Costantino, F. (2018). Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. *Safety Science*, vol. 102, str. 79–100, doi: 10.1016/j.ssci.2017.10.005.
- [27] European Commission, (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry.
- [28] European Commission, (2020). Enabling Technologies for Industry 5.0: results of a workshop with Europe's technology leaders.
- [29] Bitsch, G. (2022). Conceptions of Man in Human-Centric Cyber-Physical Production Systems. *Procedia CIRP*, vol. 107, str. 1439–1443.
- [30] ElMaraghy, H., ElMaraghy, W. (2022). Adaptive Cognitive Manufacturing System (ACMS) – a new paradigm. *International Journal of Production Research*, vol. 60, št. 24, str. 7436–7449, doi: 10.1080/00207543.2022.2078248.
- [31] Taylor, F. W. (1911). *The Principles of Scientific Management*. New York, NY, USA and London UK: Harper & Brothers.
- [32] Ueda, K., Takenaka, T., Vancza, J., Monostori, L. (2009). Value creation and decision-making in sustainable society. *CIRP Annals*, vol. 58, št. 2, str. 681–700.
- [33] Peklenik, J. (1991). *Proizvodna kibernatika z računalniško tehnologijo*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana, Ljubljana.
- [34] Compton, W. D., Bowen, H. K., Cook, H. E., Lardner, J. F., Pritsker, A. B. (1992). Report of the Committee on Foundations of Manufacturing. In *Manufacturing systems: Foundations of World-Class Practice*, Washington, DC USA: Foundations of World-Class Practice, National Academy Press, str. 1–82.
- [35] Peklenik, J. (1988). *Fertigungskybernetik, eine neue wissenschaftliche Disziplin für die Produktionstechnik*. Berlin: Festvortrag anlässlich der Verleihung des Georg - Schlesinger Preises 1988 des Landes Berlin.
- [36] Peklenik, J. (1995). Complexity in Manufacturing Systems. *CIRP Journal of Manufacturing Systems*, vol. 24, str. 17–25.
- [37] Peklenik, J. (1998). Structural and Operational Complexity of Manufacturing Systems. *Manufacturing Systems*, vol. 27, št. 1, str. 5–11.
- [38] Peklenik, J. (1993). Theoretical models of manufacturing systems - a critical assessment. In *Flexible Manufacturing Systems: past-present-future*. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering Ljubljana, str. 57–72.
- [39] Cai, J., Lu, S. C. Y., Grobler, F., Case, M., Jing, N. (2005). Modeling and managing collaborative processes over the internet. *Business Process Management Journal*, vol. 11, št. 3, str. 255–274.
- [40] Lu, S. C. Y., ElMaraghy, W., Schuh, G., Wilhelm, R. (2007). A Scientific Foundation of Collaborative Engineering. *CIRP Annals*, vol. 56, št. 2, str. 605–634.
- [41] Suh, N. P. (2005). Complexity in Engineering. *CIRP Annals*, vol. 54, št. 2, str. 581–598.
- [42] Vrabič, R., Butala, P. (2012). Assessing operational complexity of manufacturing

- systems based on statistical complexity. *International Journal of Production Research*, vol. 50, št. 14, str. 3673–3685, doi: 10.1080/00207543.2011.575098.
- [43] OECD, (2005). *OECD handbook on economic globalisation indicators*. OECD Publishing.
- [44] Iwata, K., Onosato, M., Fuse, M., Fucuda, Y., Miki, M. (1993). Manufacturing Systems Evolution: Historical and Structural Aspects of Manufacturing Systems Research. In *Flexible Manufacturing Systems - Past, Present, Future*, Janez Peklenik (Ed.), University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering Ljubljana, str. 113–127.
- [45] Hozdić, E., Jurković, Z. (2016). Cyber structures for network production systems. *International Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, vol. 8, št. 1, str. 41–52.
- [46] Žapčević, S. (2013). *Model samoučečega proizvodnega delovnega sistema*. Doktorsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- [47] Kirshbaum, D. (2011). Introduction to Complex Systems. Dostupno na: <http://www.calresco.org/intro.htm> [26.01.2011].
- [48] Lukas, C. (1999). Complex Adaptive Systems - Webs of Delight. Dostupno na: <http://calresco.org/lucas/cas.htm>.
- [49] Zupančič, R. (2012). *Strukturiranje avtonomnih delovnih sistemov*. Doktorsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- [50] Suh, N. P. (2005). *Complexity: Theory and applications*. Oxford University Press.
- [51] Hozdić, E., Makovec, I. (2023). Evolution of the Human Role in Manufacturing Systems: On the Route from Digitalization and Cybernation to Cognitization. *Applied System Innovation*, vol. 6, št. 2, str. 49, doi: org/10.3390/asi6020049.
- [52] Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*, World Econ. Geneva, Switzerland: Currency.
- [53] Kegermann, H., Wahlster, W., Johannes, H. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt an Main.
- [54] Westkämper, E. (2008). Manufuture and Sustainable Manufacturing. In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. Mitsuishi, M., Ueda, K., Kimura, F. (Eds.). Springer London, str. 11–14.
- [55] Lucke, D., Constantinescu, C., Westkämper, E. (2008). Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing. In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. Mitsuichi, M., Ueda, K., Kimura, F. (Eds.). Springer London, str. 115–118.
- [56] Hozdić, E. (2015). Smart factory for Industry 4.0: a review. *International Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, vol. 7, št. 1, str. 28–35.
- [57] Koren, Y. (2010). *The Global Manufacturing Revolution Product - Process - Business Integration*. John Wiley.

- [58] Koren, Y., in sod. (1999). Reconfigurable Manufacturing Systems. *CIRP Annals*, vol. 48, št. 2, str. 527–540.
- [59] ElMaraghy, H. A. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 17, št. 4, str. 261–276.
- [60] Wiendahl, H.-P. in sod. (2007). Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals*, vol. 56, št. 2, str. 783–809, doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.003.
- [61] Koren, Y. (2010). *The Global Manufacturing Revolution*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [62] Tseng, M. M., Jiao, J. (2001). Mass Customization. In *Handbook of Industrial Engineering*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., str. 684–709.
- [63] Jovane, F., Koren, Y., Boer, C. R. (2003). Present and future of flexible automation : Towards new paradigms. *CIRP Annals*, vol. 52, št. 1, str. 543–560.
- [64] Womack, J. P., Jones, D. T., Roos, D. (1990). *Machine that changed the world*. New York, New York, USA: Simon & Schuster.
- [65] Tseng, M. M., Jiao, J., Merchant, M. E. (1996). Design for mass customization. *CIRP Annals*, vol. 45, št. 1, str. 153–156.
- [66] Elango, B. (2004). Geographic Scope of Operations by Multinational Companies: An Exploratory Study of Regional and Global Strategies. *European Management Journal*, vol. 22, št. 4, str. 431–441.
- [67] Tseng, M. M., Jiao, R. J., Wang, C. (2010). Design for Mass Personalization. *CIRP Annals*, vol. 59, št. 1, str. 175–178.
- [68] Nacional Institute of Standard and Technology (NIST), (2014). Smart Manufacturing Operations Planning and Control.
- [69] Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, vol. 56, št. 1–2, str. 508–517, doi: 10.1080/00207543.2017.1351644.
- [70] Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., Madsen, E. S. (2014). The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions. *Procedia Engineering*, vol. 69, str. 1184–1190, doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.108.
- [71] Tolio, T. in sod. (2010). SPECIES - Co-evolution of products, processes and production systems. *CIRP Annals*, vol. 59, št. 2, str. 672–693, doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.008.
- [72] Perry, C. B. (1971). Variable-Mission Manufacturing Systems. In *The Opening Door to Productivity and Profits*, Numerical Control Society, str. 409–433.
- [73] Katz, R. (2007). Design principles of reconfigurable machines. The *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, str. 430–439.
- [74] Davidrajuh, R., Skolud, B., Krenczyk, D. (2018). Performance Evaluation of Discrete Event Systems with GPenSIM. *Computers*, vol. 7, št. 1, str. 8, doi.org/10.3390/computers7010008.

-
- [75] Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S. P., Stecke, K. E. (1984). Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine*, vol. 2, št. 2, str. 114–117.
- [76] Jain, A., Jain, P. K., Chan, F. T., Singh, S. (2013). A review on manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research*, vol. 51, št. 19, str. 5946–5970.
- [77] Koren, Y., Moriwaki, T., Van Brussel, H. (1999). Reconfigurable Manufacturing Systems. *CIRP Annals*, vol. 48, št. 2, str. 527–540.
- [78] Koren, Y., Ulsoy, A. G. (2002). Vision, principles and impact of reconfigurable manufacturing systems. *Powertrain Internationala*, vol. 5, št. 3, str. 14–21.
- [79] Abdul Rahman, A. A. (2020). Revolution of Production System for the Industry 4.0. In *Mass Production Processes*, Akdogan, A., Serdar Vanli, A. (Eds.), IntechOpen, doi: 10.5772/intechopen.83280.
- [80] Pfeifer, R., Scheier, C. (1999). *Understanding intelligence*. Cambridge, MA, MIT Press.
- [81] Hatwany, J. (1983). The efficient use of deficient information. *CIRP Annals*, vol. 32, št. 1, str. 423–425.
- [82] Yoshikawa, H. (1992). Intelligent Manufacturing Systems Program (IMS). *Technical Cooperation That Transcends Cultural Differences*. University of Tokyo.
- [83] Monostori, L. (2003). AI and machine learning techniques for managing complexity, changes and uncertainties in manufacturing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 16, št. 4, str. 277–291, doi: 10.1016/S0952-1976(03)00078-2.
- [84] Warnecke, H. J. (1993). *Die Fraktale Fabrik, Revolution der Unternehmenskultur*. Springer - Verlag.
- [85] Lee, S., Ryu, K. (2022). Development of the Architecture and Reconfiguration Methods for the Smart, Self-Reconfigurable Manufacturing System. *Applied Sciences*, vol. 12, št. 10, str. 5172, doi: org/10.3390/app12105172.
- [86] Tharumarajah, A., Wells, A. J., Nemes, L. (1998). Comparison of emerging manufacturing concepts. In *SMC'98 Conf. Proceedings. 1998 IEEE Int. Conf. Syst. Man, Cybern. (Cat. No.98CH36218)*, vol. 1, doi: 10.1109/ICSMC.1998.725430.
- [87] Ryu, K., Jung, M. (2003). Agent - based fractal architecture and modelling for developing distributed manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, vol. 41, št. 17, str. 4233–4255.
- [88] Okino, N. (1989). Bionical manufacturing systems - modelon based approach. In *Proceedings of the CAM-I 18th Annual International Conference*, str. 485–492.
- [89] Ueda, K., Vaario, J., Ohkura, K. H. (1997). Modelling of biological manufacturing systems for dynamic reconfiguration. *CIRP Annals*, vol. 46, št. 1, str. 343–346.
- [90] Ueda, K., Kito, T., Fujii, N. (2006). Modeling biological manufacturing systems

- with bounded-rational agents. *CIRP Annals*, vol. 55, št. 1, str. 469–472.
- [91] Koestler, A. (1969). *The ghost in the machine*. London: Arkana Books.
- [92] Fletcher, M., Brusey, J. (2003). The Story of the Holonic Packing Cell. In Conference AAMAS'03, Melbourne, Australia.
- [93] Van Brussel, H. (1994). Holonic manufacturing systems, the vision matching the problem. In Proceedings of the 1st European Conference on Holonic Manufacturing Systems. IFW-Hannover, Hannover.
- [94] Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., Peeters, P. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry*, vol. 37, št. 3, str. 255–274, doi: 10.1016/S0166-3615(98)00102-X.
- [95] Leitao, P., Colombo, A. W., Restivo, F. J. (2005). ADACOR: A Collaborative Production Automation and Control Architecture. *IEEE Intelligent Systems*, vol. 20, št. 1, str. 58–66, doi: 10.1109/MIS.2005.2.
- [96] Kruger, K., Basson, A. (2013). Multy-agent Systems vs IEC 61499 for Holonic Resource Control in Reconfigurable Systems. *Procedia CIRP*, vol. 7, str. 503–508.
- [97] Jovanović, M., Zupan, S., Starbek, M., Prebil, I. (2014). Virtual approach to holonic control of the tyre-manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, št. 1, str. 173–179, doi: org/10.1016/j.jmsy.2013.07.005.
- [98] Škulj, G. (2016). *Samoorganizacija avtonomnih delovnih sistemov v decentraliziranem proizvodnem sistemu*. Doktorsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- [99] Wang, Z. Y., Rajurkar, K. P., Kapoor, A. (1996). Architecture for agile manufacturing and its interface with computer integrated manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 61, št. 1–2, str. 99–103, doi: 10.1016/0924-0136(96)02472-7.
- [100] Gunasekaran, A. (1998). Agile manufacturing: Enablers and an implementation framework. *International Journal of Production Research*, vol. 36, št. 5, str. 1223–1247, doi: 10.1080/002075498193291.
- [101] Gunasekaran, A. (1999). Agile manufacturing: A framework for research and development. *International Journal of Production Economics*, vol. 62, št. 1–2, str. 87–105, doi: 10.1016/S0925-5273(98)00222-9.
- [102] Cheng, K., Harrison, D. K., Pan, P. Y. (1998). Implementation of agile manufacturing: an AI and Internet based approach. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 76, št. 1–3, str. 96–101, doi: 10.1016/S0924-0136(97)00329-4.
- [103] Elkins, D. A., Huang, N., Alden, J. M. (2004). Agile manufacturing systems in the automotive industry. *International Journal of Production Economics*, vol. 91, št. 3, str. 201–214, doi: 10.1016/j.ijpe.2003.07.006.
- [104] Bottani, E. (2010). Profile and enablers of agile companies: An empirical investigation. *International Journal of Production Economics*, vol. 125, št. 2, str. 251–261, doi: 10.1016/j.ijpe.2010.02.016.

- [105] Inman, R. A., Sale, R. S., Green, K. W., Whitten, D. (2011). Agile manufacturing: Relation to JIT, operational performance and firm performance. *Journal of Operations Management*, vol. 29, št. 4, str. 343–355, doi: 10.1016/j.jom.2010.06.001.
- [106] Zhang, D. Z. (2011). Towards theory building in agile manufacturing strategies - Case studies of an agility taxonomy. *International Journal of Production Economics*, vol. 131, št. 1, str. 303–312, doi: 10.1016/j.ijpe.2010.08.010.
- [107] Dubey, R., Gunasekaran, A. (2015). Agile manufacturing: framework and its empirical validation. *International Journal of Advanced Manufacturing systems and Technology*, vol. 76, št. 9–12, str. 2147–2157, doi: 10.1007/s00170-014-6455-6.
- [108] Yusuf, Y. Y., Sarhadi, M., Gunasekaran, A. (1999). Agile manufacturing: The drivers, concepts and attributes. *International Journal of Production Economics*, vol. 62, št. 1–2, str. 33–43.
- [109] Butala, P., Sluga, A. (2002). Dynamic structuring of distributed manufacturing systems. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 16, št. 2, str. 127–133, doi: 10.1016/S1474-0346(02)00007-1.
- [110] Butala, P., Sluga, A. (2006). Autonomous work systems in manufacturing networks. *CIRP Annals*, vol. 55, št. 1, str. 521–524, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60473-9.
- [111] Scholz-Reiter, B., Höhns, H. (2003). Integrated software agents: Enabling technology for collaborative E-logistics and E-business. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 16, št. 7-8, str. 517–525, doi: org/10.1080/0951192031000115840.
- [112] Seidel, D., Mey, M. (1994). *IMS-Holonic Manufacturing Systems: Glossary of Terms*, IMS-Holo. Hannover: University of Hannover, Nemčija.
- [113] Žapčević, S., Butala, P. (2012). Adaptive process control based on a self-learning mechanism in autonomous manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 66, št. 9–12, str. 1725–1743, doi: 10.1007/s00170-012-4453-0.
- [114] Sluga, A., Butala, P., Peklenik, J. (2005). A Conceptual Framework for Collaborative Design and Operations of Manufacturing Work Systems. *CIRP Annals*, vol. 54, št. 1, str. 437–440, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60139-5.
- [115] Huang, G. in sod. (2011). Establishing production service system and information collaboration platform for mold and die products. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 52, št. 9, str. 1149–1160, doi: org/10.1007/s00170-010-2762-8.
- [116] Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th Editio. John Wiley and Sons.
- [117] Feigenbaum, A. V. (1991). *Total Quality Control*. New York, New York, USA: McGraw - Hill.

- [118] Garvin, D. A. (1988). *Managing Quality: The Strategic and Competative Edge*. New York, New York, USA: Harvard Business School, Simon and Schuster.
- [119] Wiendahl, H. P., Lutz, S. (2002). Production in networks. *CIRP Annals*, vol. 51, št. 2, str. 573–586.
- [120] Villa, A. (2002). Emerging trends in large-scale supply chain management. *International Journal of Production Research*, vol. 40, št. 15, str. 3487–3498.
- [121] Ned, K. (2008). *Encyclopedia of E-Collaboration*, Texax A&M. Hershey - New York: IGI Publishing.
- [122] Hribernik, K. A., Thoben, K.-D., Nilsson, M. (2009). A Generic Definition of Collaborative Working Environments. In *E-Collaboration*, IGI Global, str. 90-97.
- [123] Krar, S., Gill, A. R. (2004). e-Manufacturing. In *Exploring Advanced Manufacturing Technologies*, New York, NY, USA: Industrial Press Inc.
- [124] Peklenik, J. (2005). A new structure of an adaptable manufacturing system based on elementary work units and network integration. In *7th International Conference AMST 2005, Springer*, str. 27-40.
- [125] Westkämper, E., Hummel, V. (2006). The Stuttgart enterprise model - integrated engineering of strategic & operational functions. In *Manufacturing Systems. Proceedings of the CIRP Seminars on Manufacturing Systems*, str. 89-93.
- [126] Zupančič, R., Sluga, A., Butala, P. (2012). A service network for the support of manufacturing operations. *Internationa Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 25, št. 9, str. 790–803, doi: 10.1080/0951192X.2012.665188.
- [127] Wiendahl, H. P., Engelbrecht, A., Hamacher, O. (2001). From Single Enterprises to Complementary Networks. In *Global Engineering, Manufacturing and Enterprise Networks*, Boston, MA: Springer US, str. 66–73.
- [128] Camarinha-Matos, L. M., Afsarmanesh, H. (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)*, str. 3–14, doi: 10.1007/978-0-387-35577-1_1.
- [129] Kalpič, B. (2002). Nove proizvodne organizacijske strukture. In *Dinamične grozdne strukture, prehod v novo proizvodno paradigmo*, Sluga, A., Butala, P. (Eds.). Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- [130] Aerts, A. T. M., Szirbik, N. B., Goossenaerts, J. B. M. (2001). Flexible Infrastructure for Virtual Enterprises. In *Global Engineering, Manufacturing and Enterprise Networks*, Boston, MA: Springer US, str. 26–37.
- [131] Porter, M. (1998). Clusters and the new economies of competition. *Harvard Business Review*, vol. 76, str. 77–90.
- [132] Carrie, A. (2000). From integrated enterprises to regional clusters: the changing basis of competition. *Computers in Industry*, vol. 42, št. 2-3, str. 289–298.
- [133] 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*, Vienna: Springer Vienna, str. 1–13.
- [134] Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, vol. 27, št. 3, str. 379–423, doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- [135] Wittmann, W. (1959). Unternehmung und unvollkommene Information. In *Unternehmerische Voraussicht - Ungewissheit und Planung*, Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag, str. 230.
- [136] Luftman, J. N. (2003). *Competing in the Information Age: Align in the Sand*. Oxford University Press.
- [137] Schermerhorn, J. R., Hunt, J. G., Osborn, R. N. (2002). *Organizational Behavior*. New York, SAD: John Wiley and Sons.
- [138] Bakopoulos, J. Y. (1985). Toward a More Precise Concept of Information Technology. Cambridge, Mass.: Center for Information Systems Research, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.
- [139] Weill, P., Broadbent, M. (1998). *Leveraging the New Infrastructure: How Market Leaders Capitalize on Information Technology*. Harvard Business Review Press.
- [140] O'Brien, J. A. (2003). *Introduction to Information Systems: Essentials for the E-business Enterprise*. McGraw-Hill Education.
- [141] Turban, E., Volonino, L., Wood, G. (2013). *Information Technology for Management: Advancing Sustainable, Profitable Business Growth*. Wiley.
- [142] Applegate, L., Austin, R., Soule, D. (2007). *Corporate Information Strategy and Management: Text and Cases*. McGraw-Hill Education.
- [143] Leiner, R. M. in sod. (2009). A brief history of the Internet. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 39, št. 5, str. 22–31.
- [144] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, št. 7, str. 1645–1660, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [145] Sundmaeker, H., Guillemin, P., Friess, P., Woelffle, S. (2010). Vision and challenges for realising the Internet of Things. *Cluster of European Research Projects on the Internet of Things (CERP - IoT)*. European Commission.
- [146] Haller, S. (2009). Internet of Things. [Online]. Dostopno na: <http://services.future-internet.eu/images/1/16/A4 Things Haller.pdf>.
- [147] Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*, vol. 10, št. 7, str. 1497–1516, doi: 10.1016/j.adhoc.2012.02.016.
- [148] Want, R. (2006). An Introduction to RFID Technology. *IEEE Pervasive Computers*, vol. 5, št. 1, str. 25–33, doi: 10.1109/MPRV.2006.2.
- [149] Lee, J., Su, Y., Shen, C. (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*, str. 46–51, doi: 10.1109/IECON.2007.4460126.
- [150] Verma, P. K. in sod. (2016). Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 66, str. 83–105.
- [151] Baird, M., Ng, B., Seah, W. (2017). WiFi Network Access Control for IoT Connectivity with Software Defined Networking. In *Proceedings of the 8th ACM on Multimedia Systems Conference*, str. 343–348, doi: 10.1145/3083187.3084021.
- [152] Finkenzeller, K. (2003). *RFID handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards and identification*. John Wiley and Sons, Inc.
- [153] Ahson, S. A., Ilyas, M. (2010). *RFID handbook: applications, technology, security, and privacy*. CRC Press.
- [154] Sohrawy, K., Minoli, D., Znati, T. (2007). *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. John Wiley and Sons.
- [155] Akyildiz, F. I., Vuran, M. C. (2010). *Wireless sensor networks*, Vol. 4. John Wiley and Sons.
- [156] CISCO, (2012). IPv6 Internetworking Technology handbook.
- [157] 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).
- [158] Dohler, M., Watteyne, T., Alonso-Zarate, J. (2010). Machine-to-Machine: An Emerging Communication Paradigm. *Present. Rep.*, str. 88–107.
- [159] ETSI, (2011). *Machine-to-Machine communications (M2M): Functional architecture*, TS 102 690.
- [160] Wan, J., Chen, M., Leung, V. (2014). M2M Communications in the Cyber-Physical World: Case Studies and Research Challenges. In *Machine-to-Machine Communications*, CRC Press, str. 1–30.
- [161] Xu, X. (2012). From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, št. 1, str. 75–86, doi: 10.1016/j.rcim.2011.07.002.
- [162] Kulkarni, N., Dwivedi, V. (2008). The Role of Service Granularity in a Successful SOA Realization: A Case Study. In *2008 IEEE Congress on Services - Part I*, str. 423–430, doi: 10.1109/SERVICES-1.2008.86.
- [163] Will, T., Blecker, T. (2012). RFID-driven process modifications in container logistics: SOA as a solution approach. *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 15, št. 2, str. 71–86, doi: 10.1080/13675567.2012.674106.
- [164] Curbera, F., Duftler, M., Khalaf, R., Nagy, W., Mukhi, N., Weerawarana, S. (2002). Unraveling the Web services web: an introduction to SOAP, WSDL, and UDDI. *IEEE Internet Computing*, vol. 6, št. 2, str. 86–93, doi: 10.1109/4236.991449.

- [165] Devedžić, V. (2004). *Technologies of intelligent systems*. Department of Information Systems and Technologies FON - School of Business Administration University of Belgrade.
- [166] Wu, B., Xi, L., Zhou, B. (2008). Service-oriented Communication Architecture for Automated Manufacturing System Integration. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 21, št. 5, str. 599–615.
- [167] Hu, Y., Zhou, X., Li, C. (2010). Internet-based Intelligent Service-oriented System Architecture for Collaborative Product Development. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 23, št. 2, str. 113–125, doi: 10.1080/09511920701370746.
- [168] Estrem, W. A. (2003). An Evaluation Framework for Deploying Web Services in the Next Generation Manufacturing Enterprise. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 19, št. 6, str. 509–519, doi: org/10.1016/S0736-5845(03)00061-9.
- [169] Bellifemine, F. L., Caire, G., Greenwood, D. (2007). *Developing multi-agent systems with JADE*. John Wiley and Sons.
- [170] Leitão, P., Karnouskos, S. (2015). *Industrial agnets: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Elsevier.
- [171] Barnes, J. A. (1954). Class and Committees in a Norwegian Island Parish. *Human Relations*, vol. 7, št. 1, str. 39–58, doi: 10.1177/001872675400700102.
- [172] Blažun, H. (2012). *Vključevanje starostnikov v računalniško podprto mreženje*, Doktorsko delo. Univerza v Mariboru, Ekonomsko-poslovna fakulteta.
- [173] Boyd, D. M., Ellison, N. B. (2007). Social network sites: Definition, history, and scholarship. *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 13, št. 1, str. 210–230, doi: 10.1111/j.1083-6101.2007.00393.x.
- [174] Alrubaian, M., Al-Qurishi, M., Alamri, A., Al-Rakhami, M., Hassan, M. M., Fortino, G. (2019). Credibility in Online Social Networks: A Survey. *IEEE Access*, vol. 7, str. 2828–2855, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2886314.
- [175] Kingsley, D. (2008). Sensoring the Future: Complex Geographies of Connectivity and Communication. *World Futures*, vol. 64, št. 1, str. 22–33, doi: 10.1080/02604020701802021.
- [176] Škulj, G., Vrabič, R., Butala, P. (2014). Experimental study of work system networking in production environment. *CIRP Annals*, vol. 63, št. 1, str. 401–404, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.115.
- [177] Putnik, G., Škulj, G., Vrabič, R., Varela, L., Butala, P. (2015). Simulation study of large production network robustness in uncertain environment. *CIRP Annals*, vol. 64, str. 439–442, doi: org/10.1016/j.cirp.2015.04.118.
- [178] Kaplan, A. M., Haenlein, M. (2010). Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media. *Business Horizons*, vol. 53, št. 1, str. 59–68, 2010, doi: 10.1016/j.bushor.2009.09.003.
- [179] Mourtzis, D., Doukas, M., Milas, N. (2016). A knowledge-based social networking

- app for collaborative problem-solving in manufacturing. *Manufacturing Letters*, vol. 10, str. 1–5, doi: 10.1016/j.mfglet.2016.08.001.
- [180] Hiertz, G., Denteneer, D., Stibor, L., Zang, Y., Costa, X., Walke, B. (2010). The IEEE 802.11 universe. *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, št. 1, str. 62–70, doi: 10.1109/MCOM.2010.5394032.
- [181] Wan, J., Chen, M., Xia, F., Li, D., Zhou, K. (2013). From Machine-to-Machine Communications towards Cyber-Physical Systems. *ComSIS*, vol. 10, št. 3, doi: 10.2298/CSIS120326018W.
- [182] Kim, D.-H., Song, J.-Y., Lee, J.-H., Cha, S.-K. (2009). Development and evaluation of intelligent machine tools based on knowledge evolution in M2M environment. *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 23, št. 10, str. 2807–2813, doi: 10.1007/s12206-009-0725-5.
- [183] Putnik, G. in sod. (2013). Scalability in manufacturing systems design and operation: State-of-art and future developments roadmap. *CIRP Annals*, vol. 62, str. 751–774.
- [184] Gao, R. (2015). Cloud-enabled prognosis for manufacturing. *CIRP Annals*, vol. 64, št. 2, str. 749–772, doi: 10.1016/j.cirp.2015.05.011.
- [185] Caseres, J., Vaquero, L., Roderio-Merino, L., Polo, A., Hierro, J. (2010). Service Scalability Over the Cloud. In *Handbook of Cloud Computing*, Furht, B., Escalante, A. (Eds.). New York, NY, USA: Springer, str. 357–377.
- [186] Bughin, J., Chui, M., Clouds Manyika, J. (2010). *Big data, and smart assets: teh tech-enabled business trends to wath*. McKinsey Quarterly. McKinsey Global Institute.
- [187] Wang, L., von Laszewski, G. (2008). *Cloud Computing – A Perspective Study*. Rochester, New York: Rochester Institute of Technology.
- [188] Suthar, A. A. (2013). An Overview of Using Cloud Computing in Libraries. *INDIAN Journal of Applied Research*, vol. 3, št. 6, str. 303–305.
- [189] Wu, D., Greer, M. J., Rosen, D. W., Schaefer, D. (2013). Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 32, št. 4, str. 564–579, doi: org/10.1016/j.jmsy.2013.04.008.
- [190] Škulj, G., Vrabčič, R., Butala, P., Sluga, A. (2015). Decentralised network architecture for cloud manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, str. 395–405, doi: 10.1080/0951192X.2015.1066861.
- [191] Wei, X., Liu, H. A. (2015). A cloud manufacturing resource allocation model based on ant colony optimization algorithm. *International Journal of Grid Distribution Computing*, vol. 8, št. 1, str. 55–66, doi: org/10.14257/ijgcd.2015.8.1.06.
- [192] Lin, Y.-K., Chong, C. S. (2015). Fast GA-based project scheduling for computing resources allocation in a cloud manufacturing system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, str. 1–13.
- [193] Russel, S., Norving, P. (1995). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice - Hall.

- [194] Agha, G., Wegner, P., Yonezawa, A. (1993). *Research Directions in Concurrent Object-Oriented Programming*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [195] Maes, P. (1004). Agents that reduce work and information overload. *Communications of the ACM*, vol. 37, št. 7, str. 31–40.
- [196] Jennings, N., Sycara, K., Georgeff, M. (1998). A Roadmap of Agent Research and Development. In *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 1, str. 7-38, doi: org/10.1023/A:1010090405266.
- [197] Wooldridge, M., Jennings, N. R. (1995). Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*, vol. 10, Cambridge University Press, str. 115–152.
- [198] Knapik, M., Johnson, J. (1998). *Developing Intelligent Agents for Distributed Systems*. McGraw - Hill.
- [199] Sluga, A., Butala, P., Bervar, G. (1998). A multi-agent approach to process planning and fabrication in distributed manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 35. str. 455–458, doi: 10.1016/S0360-8352(98)00132-6.
- [200] d’Inverno, M., Luck, M. (1997). Development and application of a formal agent framework. *First IEEE International Conference on Formal Engineering Methods, Hiroshima, Japan*, str. 222-231, doi: 10.1109/ICFEM.1997.630429.
- [201] Bellifemine, F., Poggi, A., Rimassa, G. (1999). JADE - A FIPA - compliant agent framework. In *Proceedings of PAAM 99*, str. 97–108.
- [202] FIPA, (2014). Foundation for Intelligent Agents. [Online]. Dostopno na: <http://www.fipa.org>.
- [203] Hanisch, H.-M., Vyatkin, V. (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.
- [204] Christensen, J. H. (2003). HMS/FB architecture and its implementation. In *Agent Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach*, Deen, S. M. (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer - Verlag, str. 53–87.
- [205] Maturana, F. P., Tichý, P., Šlechta, P., Discenzo, V., Staron, R. J., Hall, K. H. (2004). Distributed multi-agent architecture for automation systems. *Expert Systems with Applications*, vol. 26, št. 1, str. 49–56, doi: 10.1016/S0957-4174(03)00068-X.
- [206] Shaw, M. J. (1988). Dynamic scheduling in cellular manufacturing systems: A framework for networked decision making. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 7, št. 2, str. 83–94, doi: 10.1016/0278-6125(88)90016-7.
- [207] Duffie, N. A., Piper, R. S. (1986). Nonhierarchical control of manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 5, št. 2, str. 141, doi: 10.1016/0278-6125(86)90036-1.
- [208] Parunak, H. V. D., Baker, A. D., Clark, S. J. (1997). The AARIA Agent Architecture: An Example of Requirements-Driven Agent-Based Design. Agents ’97 Marina del Rey, CA, USA.

- [209] Shen, W., Wang, L., Hao, Q. (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)*, vol. 36, št. 4, str. 563–577, doi: 10.1109/TSMCC.2006.874022.
- [210] Buddhakulsomsiri, J., Kim, D. S. (2007). Priority rule-based heuristic for multi-mode resource-constrained project scheduling problems with resource vacations and activity splitting. *European Journal of Operational Research*, vol. 178, št. 2, str. 374–390, doi: 10.1016/j.ejor.2006.02.010.
- [211] Leitao, P., Marik, V., Vrba, P. (2013). Past, Present, and Future of Industrial Agent Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, št. 4, str. 2360–2372, doi: 10.1109/TII.2012.2222034.
- [212] Rodrigues, N., Pereira, A., Leitão, P. (2013). Adaptive Multi-Agent System for a Washing Machine Production Line. In: Mařík, V., Lastra, J.L.M., Skobelev, P. (Eds.), *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol 8062, str. 212–223. Springer, Berlin, Heidelberg, doi.org/10.1007/978-3-642-40090-2_19.
- [213] Leitão, P., Colombo, A. W., Karnouskos, S. (2016). Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*, vol. 81, str. 11–25, doi: 10.1016/j.compind.2015.08.004.
- [214] Leitão, P., Karnouskos, S., Ribeiro, L., Lee, J., Strasser, T., Colombo, A. W. (2016). Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems. *Proc. IEEE*, vol. 104, št. 5, str. 1086–1101, doi: 10.1109/JPROC.2016.2521931.
- [215] Cruz, L.A.S., Carvajal, J. H., Rojas, O. A., Chacon, E. (2018). Cyber-Physical System for Industrial Control Automation Based on the Holonic Approach and the IEC 61499 Standard. In *2018 Forum on Specification & Design Languages (FDL)*, Garching, Germany, str. 5–16, doi: 10.1109/FDL.2018.8524082.
- [216] Zelatelj, V. (2008). *Modelirno okolje za gradnjo distribuiranih proizvodnih sistemov*. Doktorsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- [217] Jepsen, T. C. (2009). Just what Is an ontology, anyway? *IT Professional*, vol. 11, št. 5, str. 22–27, doi: 10.1109/MITP.2009.105.
- [218] Musen, M. A. (1992). Dimensions of knowledge sharing and reuse. *Computers and Biomedical Research*, vol. 25, str. 435–467.
- [219] Gruber, T. R. (1995). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 43, št. 5–6, str. 907–928, doi: 10.1006/ijhc.1995.1081.
- [220] Chungoora, N., Young, R. I. M. (2011). The configuration of design and manufacture knowledge models from a heavyweight ontological foundation. *International Journal of Productio Research*, vol. 49, št. 15, str. 4701–4725, doi: 10.1080/00207543.2010.504754.
- [221] Uschold, M., Gruninger, M. (1996). Ontologies: principles, methods and applications. *The Knowledge Engineering Review*, vol. 11, str. 93, doi:

10.1017/S0269888900007797.

- [222] Dadzie, A.-S. in sod. (2009). Applying semantic web technologies to knowledge sharing in aerospace engineering. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 20, št. 5, str. 611–623, doi: 10.1007/s10845-008-0141-1.
- [223] Zhang, X., Hou, X., Chen, X., Zhuang, T. (2013). Ontology-based semantic retrieval for engineering domain knowledge. *Neurocomputing*, vol. 116, str. 382–391, doi: 10.1016/j.neucom.2011.12.057.
- [224] Fenves, S. J., Foufou, S., Bock, C., Sriram, R. D. (2008). CPM2: A Core Model for Product Data. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 8, št. 1, str. 014501, doi: 10.1115/1.2830842.
- [225] Lee, J. H. in sod. (2012). A Semantic Product Modeling Framework and Its Application to Behavior Evaluation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 9, št. 1, str. 110–123, doi: 10.1109/TASE.2011.2165210.
- [226] Ramos, L. (2010). Toward dynamic Ontologies for the Industrial Manufacturing Domain, Computer Science.
- [227] Zdravkovic, M., Trajanovic, M. (2009). Integrated product ontologies for inter-organizational networks. *Computer Science and Information Systems*, vol. 6, št. 2, str. 29–46, doi: 10.2298/CSIS0902029Z.
- [228] Bock, C., Zha, X., Suh, H., Lee, J.-H. (2010). Ontological product modeling for collaborative design. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 24, št. 4, str. 510–524, doi: 10.1016/j.aei.2010.06.011.
- [229] Uschold, M., King, M., Moralee, S., Zorgios, Y. (1998). The Enterprise Ontology. *The Knowledge Engineering Review*, vol. 13, št. 1, str. 31–89, doi: 10.1017/S0269888998001088.
- [230] Fadel, F. G., Fox, M. S., Gruninger, M. (1994). A generic enterprise resource ontology. In *Proceedings of 3rd IEEE Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WET ICE '94)*, str. 117–128, doi: 10.1109/ENABL.1994.330496.
- [231] Borgo, S., Leitão, P. (2004). The role of foundational ontologies in manufacturing domain applications. In: Meersman, R., Tari, Z. (Eds.) *On the Move to Meaningful Internet Systems 2004: CoopIS, DOA, and ODBASE. OTM 2004. Lecture Notes in Computer Science*, vol 3290, str. 670–688, Springer, Berlin, Heidelberg, doi.org/10.1007/978-3-540-30468-5_43.
- [232] Masolo, C., Borgo, S., Gangemi, A., Guarino, N., Oltmari, A. (2003). Wonder Web Deliverable D18 Ontology Library (final); Ontology Infrastructure for the Semantic Web. Trento, Italy.
- [233] Grubic, T., Fan, I.-S. (2010). Supply chain ontology: Review, analysis and synthesis. *Computers in Industry*, vol. 61, št. 8, str. 776–786, doi: 10.1016/j.compind.2010.05.006.
- [234] Petnga, L., Austin, M. (2016). An ontological framework for knowledge modeling and decision support in cyber-physical systems. *Advanced Engineering*

- Informatics*, vol. 30, št. 1, str. 77–94, doi: 10.1016/j.aei.2015.12.003.
- [235] Garetti, M., Fumagalli, L., Lobov, A., Martinez Lastra, J. L. (2013). Open Automation of Manufacturing Systems through Integration of Ontology and Web Services. In *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*, str. 19–21, doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00169.
- [236] Zaletelj, V., Vrabčič, R., Hozdić, E., Butala, P. (2018). A foundational ontology for the modelling of manufacturing systems. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 38, str. 129–141, doi: 10.1016/j.aei.2018.06.009.
- [237] Zaletelj, V., Sluga, A., Butala, P. (2008). A Conceptual Framework for the Collaborative Modeling of Networked Manufacturing Systems. *Concurrent Engineering*, vol. 16, št. 1, str. 103–114, doi:10.1177/1063293X07084636
- [238] ZIFA, (1987). *Zachman Institute for Framework Advancement*.
- [239] IFIP - IPAC, (1999). *GERAM: Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology*.
- [240] Williams, T. J., Li, H., Bernus, P., Uppington, G. (1998). The Life Cycle of an Enterprise. In *Handbook of Life Cycle Engineering: Concepts, Models and Technologies*, London: Chapman & Hall.
- [241] Zaletelj, V. (2003). *Metoda za modeliranje računalniško integriranih proizvodnih sistemov. Magistrsko delo*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- [242] Jouault, F., Bézivin, J. (2006). KM3: A DSL for Metamodel Specification. In *FMODS'06 Proceedings of the 8th IFIP WG 6.1 International conference on Formal Methods for Open Object-Based Distributed Systems*, str. 171–185, doi: 10.1007/11768869_14.
- [243] Bussman, S., Jennings, N., Wooldridge, M. (2004). *Multi-agent System for Manufacturing Control*. Springer.
- [244] Hussmann, H. (1997). *Formal Foundations for Software Engineering Methods*, LNCS 1322. Berlin, Germany: Springer - Verlag.
- [245] NIST, (1993). *IDEF0, Integration definition for function modelling*. ZDA: Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Computer Systems Laboratory.
- [246] Scheer, A. (2000). *ARIS - Business Process Modeling*, SeSam-Sh. Berlin, Germany: Springer.
- [247] OMG-UML, (1996). Unified Modeling Language. [Online]. Dostopno na: <http://uml.org>.
- [248] Roubach, J., Jacobson, I., Booch, G. (1999). *The unified modeling language reference manual*. Addison - Wesley.
- [249] Niazi, M. A. K. (2011). *Towards a novel unified framework for developing formal, network and validated agent - based simulation models of complex adaptive systems*. Scotland UK: Computing Science and Mathematics School of Natural Sciences University of Stirling Scotland UK.

- [250] Wiener, N. (1948). *CYBERNETICS or control and communication in the animal and the machine*. The Massachusetts Institute of Technology.
- [251] Vrabič, R. (2012). *Krmljenje avtonomnih obdelovalnih sistemov v proizvodnem okolju*. Dokosko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
- [252] Shalizi, C. R. (2006). Methods and techniques of complex systems science: An overview. In *Complex Systems Science in Biomedicine*, Thomas, D. S., Kresh, J. Y. (Eds.) New York: Springer New York, str. 33–114.
- [253] Helbing, D., Baliotti, S. (2012). How to do agent-based simulations in the future: from modeling social mechanisms to emergent phenomena and interactive systems design. In *Social Self-Organization*, Helbing, D. (Ed.) Berlin: Springer, str. 25–70.
- [254] Paunovski, O., Eleftherakis, G., Cowling, A. J. (2009). Disciplined exploration of emergence using multi-agent simulation framework. *Computing and Informatics*, vol. 28, št. 3, str. 369–391.
- [255] Niazi, M. A. K., Hussain, A. (2011). Sensing Emergence in Complex Systems. *IEEE Sensors*, vol. 11, št. 10, str. 2479–2480, doi: 10.1109/JSEN.2011.2142303.
- [256] Allan, R. J. (2009). *Survey of agent based modelling and simulation tools*. Technical report.
- [257] Niazi, M. A. K., Hussain, A. (2009). Agent based tools for modelling and simulation of self-organization in peer-to-peer, ad-hoc and other complex networks. *IEEE Communication Magazine*, vol. 47, št. 3, str. 163–173.
- [258] Barabasi, A. L. (2012). The network takeover. *Nature Phys*, vol. 8, str. 14–16, doi: org/10.1038/nphys2188.
- [259] Barabasi, A. L., Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, vol. 286, št. 5439, str. 509–512, doi: 10.1126/science.286.5439.509.
- [260] Newman, M. (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary Physics*, vol. 46, št. 5, str. 323–351, doi: 10.1080/00107510500052444.
- [261] Barrat, A., Barthélemy, M., Vespignani, A. (2008). *Dynamical processes on complex networks*. Cambridge UP.
- [262] Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, vol. 45, št. 2, str. 167–256, doi: org/10.1137/S003614450342480.
- [263] Holme, P., Saramäki, J. (2012). Temporal networks. *Physics Reports*, vol. 519, št. 3, str. 97–125, doi: 10.1016/j.physrep.2012.03.001.
- [264] Pfitzner, R., Scholtes, I., Tessone, C.J., Garas, A., Schweitzer, F. (2012). Time-Explicit Graphs: A Framework for Dynamic Network Analysis. Würzburg: Modeling and Analysis of Novel Mechanisms in Future Internet Applications.
- [265] Arai, T., Shimomura, Y. (2004). Proposal of Service CAD System - A Tool for Service Engineering. *CIRP Annals*, vol. 53, št. 1, str. 397–400, doi: org/10.1016/S0007-8506(07)60725-2.
- [266] Poggio, T. (2012). Managing complexity. *Hi!tech - Innovations Magazin Siemens*,

vol. 1, št. 12, str. 38–40.

- [267] Ammar - Khodja, S., Bernard, A. (2008). An overview on knowledge management. In *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management*, Berlin, Germany: Springer - Verlag Berlin Heidelberg, str. 3–21.
- [268] Nonaka, I., Takeuchi, H. (1995). *The Knowledge Creating Company*. New York: Oxford University Press.
- [269] Cios, K. J., Pedrycz, W., Swiniarski, R. W., Kurgan, L. (2007). A knowledge Discovery Approach. In *Data mining*, New York: Springer USA.
- [270] Cios, K. J., Teresinka, A., Konieczna, S., Potocka, J., Sharma, S. (2000). A knowledge discovery approach to diagnosing myocardial perfusion. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 19, št. 4, str. 17–25, doi: 10.1109/51.853478.
- [271] Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P. (1996). From data mining to knowledge discovery in databases. *AI Magazine*, vol. 17, str. 37–54, doi: org/10.1609/aimag.v17i3.1230.
- [272] Anand, S., Buchner, A. (1998). *Decision Support Using Data mining*, Financial. London: Pitman Publishing.
- [273] Cabena, P., Hadjinian, P., Stadler, R., Verhees, J., Zanasi, A. (1998). *Discovering Data Mining: From Concept to Implementation*. New Jersey: Prentice - Hall.
- [274] Wang, K. (2006). Data mining in manufacturing: the nature and implications. In *Knowledge Enterprise: Intelligent Strategies in Product Design, Manufacturing, and Management*, Boston, MA, USA: International Federation for Information Processing (IFIP), Springer, str. 1–10.
- [275] Jain, A. K., Murty, M. N., Flynn, P. J. (1999). Data clustering: a review. *ACM Computing Surveys*, vol. 31, str. 264–323, doi: 10.1145/331499.331504.
- [276] Charaniya, S., Hu, W. S., Karypis, G. (2008). Mining bioprocess data: opportunities and challenges. *Trends Biotechnol.*, vol. 26, št. 12, str. 690–699, doi: 10.1016/j.tibtech.2008.09.003.
- [277] Han, J., Pei, J., Yin, Y., Mao, R. (2004). Mining frequente patterns without candidate generation: a frequente-pattern tree approach. *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 8, str. 53–87, doi: 10.1023/B:DAMI.0000005258.31418.83.
- [278] Rokach, L., Maimon, O. (2005). Clustering methods. In *Data mining and knowledge discovery handbook*, New York: Springer.
- [279] Bharatheesh, T. L., Iyengar, S. S. (2004). Predictive data mining for delinquency modeling. In *Procedings of the 2004 International Conference on Embedded Systems and Applications*, str. 99–105.
- [280] Fürnkranz, J., Gamberger, D., Lavrač, N. (2012). *Foundations of Rule Learning*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London.
- [281] Witten, I. H., Frank, E. (2005). *Data mining: practical machine learning tools and*

- techniques*, Second edi. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- [282] Zupančič, B., Karba, R., Matko, D., Škrjanc, I. (2010). *Simulacija dinamičnih sistemov*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko Ljubljana.
 - [283] McLeod, J. (1986). Computer modeling and simulation: The changing challenge. *Simulation*, vol. 46, št. 3, str. 114–118, doi: 10.1177/003754978604600305.
 - [284] Schmidt, B. (1986). Classification of simulation software. *Systems Analysis Modelling Simulation*, vol. 3, št. 2, str. 133–140.
 - [285] Rasmussen, J. J., George, T. (1978). After 25 years: A survey of operations research alumni, Case Western Reserve University. *Interfaces (Providence)*, vol. 8, št. 3, str. 48–52, doi: 10.1287/inte.8.3.48.
 - [286] Lane, M. S., Mansour, A. H., Harpell, J. L. (1993). Operations Research Techniques: A Longitudinal Update 1973–1988. *Interfaces (Providence)*, vol. 23, št. 2, str. 63–68, doi: 10.1287/inte.23.2.63.
 - [287] Benedettini, O., Tjahjono, B. (2009). Towards an improved tool to facilitate simulation modelling of complex manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 43, št. 1–2, str. 191–199, doi: 10.1007/s00170-008-1686-z.
 - [288] Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L. K., Young, T. (2010). Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research*, vol. 203, št. 1, str. 1–13, doi: 10.1016/j.ejor.2009.06.004.
 - [289] Smith, J. S. (2003). Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 22, št. 2, str. 157–171, doi: 10.1016/S0278-6125(03)90013-6.
 - [290] Negahban, A., Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, št. 2, str. 241–261, doi: 10.1016/j.jmsy.2013.12.007.
 - [291] Rao, Y., He, F., Shao, X., Zhang, C. (2008). On-Line Simulation for Shop Floor Control in Manufacturing Execution System. In *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2008. Lecture Notes in Computer Science*, Xiong, C., Liu, H., Huang, Y., Xiong, Y. (Eds.). Springer, Berlin, Heidelberg, str. 141–150.
 - [292] Zupan, H. (2019). *Inteligentni algoritmi za optimiranje montažnih in strežnih sistemov ter procesov linijske proizvodnje*, Doktorsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo Ljubljana.
 - [293] Song, L., Ramos, F., Arnold, K. (2008). A framework for real-time simulation of heavy construction operations. In *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, str. 2387–2395, doi: 10.1109/WSC.2008.4736346.
 - [294] Lee, K., Fishwick, P. A. (2001). Building a model for real-time simulation. *Future Generation Computer Systems*, vol. 17, št. 5, str. 585–600, doi: 10.1016/S0167-739X(00)00086-8.
 - [295] Manivannan, S., Banks, J. (1992). Design of a knowledge-based on-line simulation system to control a manufacturing shop floor. *IIE Transactions*, vol. 24, št. 3, str.

- 72–83, doi: 10.1080/07408179208964225.
- [296] Mirdamadi, S., Fontanili, F., Dupont, L. (2007). Discrete Event Simulation-Based Real-Time Shop Floor Control. In *Proceedings of 21st European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2007*, Prague. Zelinka, I., Oplatkova, Z., Orsoni, A., str. 572–577, doi: 10.7148/2007-0572.
 - [297] Grieves, M., Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Kahle, F. J., Flumerfelt, S., Alves, A. (Eds.). Cham: Springer.
 - [298] Boschert, S., Rosen, R. (2016). Digital Twin - The Simulation Aspect. In *Mechatronic Futures*, Hehenberger, P. Bradley, D. (Eds.). Cham: Springer.
 - [299] Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, št. 3, str. 567-572, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
 - [300] Vrabčič, R., Erkoyuncu, J. A., Butala, P., Roy, R. (2018). Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services. *Procedia Manufacturing*, vol. 16, str. 139–146, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.167.
 - [301] Suh, N. P. (1990). *The Principles of Design*. Oxford University Press, Inc. New York, NY, USA.
 - [302] Van der Zee, D. (2003). Next generation modelling II - applications: modeling control in manufacturing simulation. In *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation*, str. 791–798.
 - [303] Zuehlke, D. (2010). Smart Factory - towards a factory - of - things. *Annual Reviews in Control*, vol. 34, št. 1, str. 129–138, doi: 10.1016/j.arcontrol.2010.02.008.
 - [304] Weiser, (1991). The computer for the 21 st century. *Scientific American*, vol. 265, št. 3, str. 94–104.
 - [305] Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., Yin, B. (2018). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access*, vol. 6, str. 6505–6519, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2783682.
 - [306] Yoon, J. S., Shin, S. J., Suh, S. H. (2012). A conceptual framework for the ubiquitous factory. *International Journal of Production Research*, vol. 50, št. 8, str. 2174–2189, doi: 10.1080/00207543.2011.562563.
 - [307] Hameed, B. Durr, F., Rothermel, K. (2011). *RFID based Complex Event Processing in a Smart Real - Time Factory, Expert discussion: Distributed Systems in Smart Spaces, Business, Computer Science*.
 - [308] Li, B. H. in sod. (2010). Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol. 16, št. 1, str. 1–8.
 - [309] Putnik, G. (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*, str. 23–254.
- [310] Monostori, L. in sod. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, vol. 65, št. 2, str. 621–641, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.
- [311] Qi, Q., Tao, F. (2019). A Smart Manufacturing Service System Based on Edge Computing, Fog Computing, and Cloud Computing. *IEEE Access*, vol. 7, str. 86769–86777, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923610.
- [312] Wu, D., Thames, J. L., Rosen, D. W., Schaefer, D. (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*, str. 315–328.
- [313] Diegel, O., Bright, G., Potgieter, J. (2004). Bluetooth Ubiquitous networks: seamlessly integrating humans and machines. *Assembly Automation*, vol. 24, no. 2, pp. 168–176, doi: 10.1108/01445150410529955.
- [314] Subirana, B., Sarma, S., Fleisch, E. (2006). High-Resolution Management. *IESE Alumni Magazine*, str. 8–13.
- [315] Ma, J., Yang, L., Apduhan, B., Huang, R., Barolli, L., Takizawa, M. (2005). Towards a Smart World and Ubiquitous Intelligence: A Walkthrough from Smart Things to Hyperspaces and UbicKids. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, vol. 1, št. 1, str. 53–68, doi: 10.1108/17427370580000113.
- [316] Suh, S., Shin, S.-J., Yoon, J. S., Um, J. M. (2008). UbiDM: a new paradigm for product design and manufacturing via ubiquitous computing technology. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 21, št. 5, str. 540–549, doi: 10.1080/09511920802023012.
- [317] Putnik, G. in sod. (2017). Towards Ubiquitous Production Systems and Enterprises. *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, Spain, str. 3203–3208, doi: 10.1109/ISIE.2007.4375128.
- [318] Lin, Y. C., Chen, T. (2017). A ubiquitous manufacturing network system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 45, str. 157–167, doi: 10.1016/j.rcim.2015.10.009.
- [319] Husejnagić, D., Sluga, A. (2015). A conceptual framework for a ubiquitous autonomous work system in the Engineer-To-Order environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 78, str. 1971–1988, doi: 10.1007/s00170-015-6798-7.
- [320] Vrabič, R., Škulj, G., Sluga, A., Butala, P. (2011). Towards Ubiquitous Manufacturing Systems : ICT Infrastructure for a Global Manufacturing Network. In *44nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, str. 1–6.
- [321] Zhang, Y., Huang, G. O., Qu, T., Sun, S. (2013). *Cloud manufacturing*. London: Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer-Verlag.
- [322] Gibson, W. F. (1984). *NEUROMANCER*. New York, Berkley Pub. Group.

- [323] Benedikt, M. (1991). *Cyberspace: First Steps*. Mit Pr; First Edition, First Printing edition (November 1991).
- [324] Heim, M. H. (1993). *The Metaphysics of Virtual Reality*. Oxford University Press, Inc. New York, NY, USA.
- [325] Lee, E. A. (2008). Cyber Physical Systems: Design Challenges. In *International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, str. 363–369, doi: 10.1109/ISORC.2008.25.
- [326] Lee, E. A., Seshia, S. A. (2011). *Introduction to Embedded Systems A Cyber - Physical Systems Approach*. California, USA: Berkeley University of California.
- [327] Eric, D. S. in sod. (2013). *A Vision of Cyber - Physical Cloud Computing for Smart Networked Systems*. National Institute of Information and Communications Technology, Department of Commerce.
- [328] Cardenas, A. A., Amin, S., Sastry, S. (2008). Secure Control: Towards Survivable Cyber-Physical Systems. In *The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, str. 495–500, doi: 10.1109/ICDCS.Workshops.2008.40.
- [329] Kumar, P. R. (2012). Cyber-Physical Systems: A Perspective at the Centennial. *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, str. 1287–1308, doi: 10.1109/JPROC.2012.2189792.
- [330] E. Geisberger and M. Broy, *Agenda CPS: integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Springer, 2012.
- [331] Hu, F. (2013). *Cyber-Physical Systems: Integrated Computing and Engineering Design*. CRC Press.
- [332] Broy, M. (2010). *Cyber-Physical Systems*. Berlin: Springer.
- [333] Detlef, Z., Lisa, O. (2011). Agile Automation Systems Based on Cyber-Physical Systems and Service-Oriented Architectures. In *Advances in Automation and Robotics, Vol. 1*, Lee, G. (Ed.). Springer - Verlag Berlin Heidelberg, str. 567–574.
- [334] Spath, D., Gerlach, S., Schlund, S. (2013). Cyber-physical system for self-organised and flexible labour utilisation. In *22nd International Conference on Production Research, ICPR 2013*, str. 6, doi: 978-85-88478-47-3.
- [335] Esmaeilian, B., Behdad, S., Wang, B. (2016). The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 39, str. 79–100, doi: 10.1016/j.jmsy.2016.03.001.
- [336] Wang, L., Haghighi, A. (2016). Combined strength of holons, agents and function blocks in cyber-physical systems. *Journal of Manufacturing Systems*, doi: 10.1016/j.jmsy.2016.05.002.
- [337] Hozdić, E. (2020). Socio-Cyber-Physical Systems Alternative for Traditional Manufacturing Structures. In *New Technologies, Development and Application II. NT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 76, str. 15-24, Karabegović, I. (Eds.) Cham: Springer, doi: 10.1007/978-3-030-18072-0_2.

- [338] Frei, F., Hugentobler, M., Schurman, S. (1993). *Work Design for the Competent Organization*. Praeger, Westport, CT.
- [339] Parsons, T. (1977). Social System. In *Social System and Evolution of Action Theory*, T. Parsons, Ed. New York: Free Press London.
- [340] Brennen, S., Kreiss, D. (2016). Digitalization. *International Encyclopedia of Communication Theory and Philosophy*, [Online]. Dostopno na: <http://culturedigitally.org/2014/09/digitalization-and-digitization/>.
- [341] Henriette, E., Feki, M., Boughzala, I. (2015). The Shape of Digital Transformation: A Systematic Literature Review. In *Proceedings of 9th Mediterranean Conference on Information Systems*, str. 1–13.
- [342] Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., Teppola, S. (2017). Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice. *International Journal of Information Systems and Project Management*, vol. 5, št. 1, str. 63–77, doi: 10.12821/ijispm050104.
- [343] Zizic Crnjac, C., Mladineo, M., Gjeldum, N., Celent, L. (2022). From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology. *Energies*, vol. 15, št. 14, str. 5221, doi: 10.3390/en15145221.
- [344] Maddikunta, P. K. R. in sod. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 26, str. 100257, doi: 10.1016/j.jii.2021.100257.
- [345] Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0 - A Human-Centric Solution. *Sustainability*, vol. 11, št. 16, str. 4371, doi: 10.3390/su11164371.
- [346] Pathak, P., Pal, R. P., Shrivastava, M., Ora, P. (2019). Fifth Revolution: Applied AI and Human Intelligence with Cyber-Physical Systems. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 8, št. 3, str. 23-27.
- [347] 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*, vol. 21, str. 5–39, doi: 10.36897/jme/141834.
- [348] Longo, F., Padovano, A., Umbrello, S. (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 Science*, vol. 10, št. 12, str. 4182, doi: 10.3390/app10124182.
- [349] Grabowska, S., Saniuk, S., Gajdzik, B. (2022). Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0. *Scientometrics*, vol. 127, str. 3117–3144, doi: 10.1007/s11192-022-04370-1.
- [350] Margherita, E. G., Braccini, A. M. (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 *Proceedings of the 7th International Workshop on Socio-Technical Perspective in IS Development (STPIS 2021)*, str. 74-82.

- [351] Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 61, str. 530–535, doi: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
- [352] Neumann, W. P., Winkelhaus, S., Grosse, E. H., Glock, C. H. (2021). Industry 4.0 and the human factor – A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, vol. 233, str. 107992, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107992.
- [353] Bednar, P. M., Welch, C. (2020). Socio-Technical Perspectives on Smart Working: Creating Meaningful and Sustainable Systems. *Information Systems Frontiers*, vol. 22, str. 281–298, doi: 10.1007/s10796-019-09921-1.
- [354] Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Panopoulos, N. (2022). A Literature Review of the Challenges and Opportunities of the Transition from Industry 4.0 to Society 5.0. *Energies*, vol. 15, št. 17, str. 6276, doi: 10.3390/en15176276.
- [355] Lee, J., Siahpour, S., Jia, X., Brown, P. (2022). Introduction to resilient manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, vol. 32, str. 24–27, doi: 10.1016/j.mfglet.2022.02.002.
- [356] Mensah, P., Merkuryev, Y., Longo, F. (2015). Using ICT in Developing a Resilient Supply Chain Strategy. *Procedia Computer Science*, vol. 43, str. 101–108, doi: 10.1016/j.procs.2014.12.014.
- [357] Gu, X., Jin, X., Ni, J., Koren, Y. (2015). Manufacturing System Design for Resilience. *Procedia CIRP*, vol. 36, str. 135–140, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.075.
- [358] Ding, S., Yang, S., Zhang, Y., Liang, C., Xia, C. (2014). Combining QoS prediction and customer satisfaction estimation to solve cloud service trustworthiness evaluation problems. *Knowledge-Based Systems*, vol. 56, str. 216–225, doi: 10.1016/j.knsys.2013.11.014.
- [359] Zhang, W. J., van Luttervelt, C. A. (2011). Toward a resilient manufacturing system. *CIRP Annals*, vol. 60, št. 1, str. 469–472, doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.041.
- [360] Heinicke, M. (2014). Implementation of Resilient Production Systems by Production Control. *Procedia CIRP*, vol. 19, str. 105–110, doi: 10.1016/j.procir.2014.05.001.
- [361] Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., Rosenberg, N. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, vol. 8, št. 1, str. 37–44.
- [362] Monostori, L., Vancza, J., Kumara, S. R. T. (2006). Agent - based systems for manufacturing. *CIRP Annals*, vol. 55, št. 2, str. 697–720, doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.004.
- [363] Shen, W., Hao, Q., Yoon, H. J., Norrie, D. H. (2006). Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 20, str. 415–431, doi: 10.1016/j.aei.2006.05.004.

- [364] FIPA00061, FIPA Agent Communication Language Specification. [Online]. Dostopno na: <http://www.fipa.org/specs/fipa00061>.
- [365] Hozdić, E. (2020). An Ontology-Based Approach for Production Planning and Control of Cyber-Physical Production Systems. In *Handbook of Research on Integrating Industry 4.0 in Business and Manufacturing*, Karabegović, I., Kovačević, A., Banjanović-Mehmedović, L., Dašić, P. (Eds.). IGI Global, str. 274–300.
- [366] Bitran, G. R., Tirupati, D. (1993). Chapter 10 Hierarchical production planning. In *Handbooks in Operations Research and Management*, vol. 4, str. 523–568, doi: 10.1016/S0927-0507(05)80190-2.
- [367] Cai, Y., Kutanoglu, E., Hasenbein, J. (2011). Production Planning and Scheduling: Interaction and Coordination. In *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise, A State-of-the-Art Handbook*, Kempf, K. G., Keskinocak, P., Uzsoy, R. (Eds), vol. 2, str. 15–42, Springer New York, NY, doi: 10.1007/978-1-4419-8191-2.
- [368] Wiendahl, H. (1986). *Betriebsorganisation für Ingenieure*. Munchen: Hanser.
- [369] Russell, R., Taylor, B. W. (1998). *Operations Management: Focusing on Quality and Competitiveness*, 2nd edition. New Jersey: Prentice - Hall Inc.
- [370] Gaither, N., Frazier, G. (1999). *Production and Operations Management*, 8th edition. South-Western.
- [371] Goldreich, O. (2010). *P, NP, and NP-Completeness: The basics of Computational Complexity*. Cambridge University Press.
- [372] Kozjek, D., Vrabič, R., Rihtaršič, B., Butala, P. (2018). Big data analytics for operations management in engineering-to-order manufacturing. In *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP 2018*, vol. 72, str. 209–214, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.098.

Javni razpis za sofinanciranje izdajanja znanstvenih monografij v letu 2023

Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije

Bleiweisova cesta 30

SI-1000 Ljubljana

Ime, priimek in naziv recenzenta: Prof. dr. Mirko Soković
Znanstveni naziv: Redni profesor
Zaposlitev: po pogodbi na UNM Fakulteti za strojništvo
E-poštni naslov: mirko.sokovic@fs.uni-lj.si
Naslov monografije: "NAPREDNI PROIZVODNI SISTEMI - osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje"
Avtor/ji monografije: dr. Elvis Hozdić
Število strani rokopisa, prejetega v oceno: 188 strani teksta in 26 strani literature in drugih virov
Vrsta publikacije: Znanstvena monografija
Monografija je primerna za objavo: ✓ da da, vendar s predlaganimi popravki ne.

Znanstvena monografija, ki je predmet recenzije, obsega 188 strani teksta in obsežen pregled (372 navedb) relevantne literature na obravnavanem področju, na dodatnih 26 straneh. Tekst monografije je razdeljen na predgovor in osem osnovnih poglavij, ki so primerno strukturirani in povezani v logično celoto.

V **Predgovoru** avtor ugotavlja da se sodobna industrijska proizvodnja odvija v okolju nenehnih sprememb in zahtev po spremembi strukture proizvodnje z namenom, da bi ta sledila potrebam trga in pospešenemu tehnološkemu razvoju. V ta namen nova proizvodna filozofija mora temeljiti na znanju, novih poslovnih modelih, proizvodnih procesih in tehnologijah, na IK-tehnologiji ter umetni inteligenci in kognitivnih tehnologijah v sleherni fazi priprave in izvedbe proizvodnega procesa. V slovenskem jeziku še ni dostopne ustrezne znanstvene literature, ki bi na sistematičen način obravnavala napredne proizvodne sisteme. To je avtorja predložene znanstvene monografije spodbudilo, da na enem mestu

poda vseobsegajoči in sistematičen pristop k koncipiranju naprednih proizvodnih sistemov, njihovih konceptov in modelov.

V **Uvodu** avtor poskuša opredeliti razmere v katerih danes deluje industrijska proizvodnja, ki se sooča z problemi globalizacije in vse bolj prisotno personalizacijo, ki pomembno vplivajo na konkurenčnost proizvodnih podjetij na globalnem trgu. Možen odgovor na to je razvoj naprednih proizvodnih sistemov, ki temeljijo na inovativnih konceptih proizvodnje in omogočajo povezovanje geografsko oddaljenih proizvodnih enot, virov in storitev ter njihovo integracijo v t.i. *pametno in kognitivno kibernetsko-fizično okolje*. Razložen je tudi termin *Industrija 4.0*, ter ključni elementi proizvodnih sistemov *Industrijo 4.0*, poznanih kot *pametni proizvodni sistemi* (PPS).

V poglavju **Industrijske revolucije, proizvodne paradigme in sistemi** avtor najprej oriše zgodovinsko ozadje pojava posameznih industrijskih revolucij skozi čas in opredeli evolucijo razvoja proizvodnih paradigem in njihovih pripadajočih proizvodnih sistemov. Pri tem definira napredni proizvodni sistem kot "*kompleksni tehnološko-ekonomsko-družbeni sistem*", ki obsega številne 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.

V naslednjem poglavju **Tehnologije in sistemi za strukturiranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje naprednih proizvodnih sistemov** avtor predstavi napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije (IKT), ki omogočajo razvoj in implementacijo naslednje generacije naprednih proizvodnih sistemov kot tudi prihajajoče proizvodne paradigme adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov. Obravnavani so predvsem: internet, socialne mreže, komunikacijske tehnologije, računalniški oblak in večagentni sistemi ter predstavljene celovite systemske rešitve za realizacijo različnih tipov informacijskih sistemov. Vse pa z namenom odpiranja poti razvoju naprednejših konceptov in modelov proizvodnih sistemov prihodnje industrijske revolucije, t.i. *Industrija 5.0*.

Poglavje **Osnove za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov** obravnava temeljne ontologije v modeliranju naprednih proizvodnih sistemov, metodologije, metode in jezike za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov, modelirna orodja, modele znanja v naprednih proizvodnih sistemih, simulacije modelov in ocenjevanje modela. Izkaže se, da je za reševanje kompleksnih problemov v proizvodnih sistemih za celovito obravnavo potrebno razviti hkrati več različnih modelov. Posamezne soodvisnosti, ki se pri tem pojavijo, zahtevajo zmanjšanje nedoločenosti ter povečanje razumevanja in natančnosti v medsebojni komunikaciji. To pomeni, da je potrebna ustrezna ontologija.

V poglavju **Pametni proizvodni sistemi – Proizvodna paradigma za Industrijo 4.0** je na sistematičen način predstavljen koncept četrte industrijske revolucije skozi koncepte in modele pametnih proizvodnih sistemov, ter *kibernetiko-fizični proizvodni sistemi* (KFPS) kot gradniki pametnih proizvodnih sistemov. Takšni proizvodni sistemi predstavljajo temelj za nadaljnje evolucije proizvodnih sistemov in njihovih gradnikov na poti k novi industrijski revoluciji (t.i. *Industrija 5.0*).

Poglavje **Adaptivni kognitivni proizvodni sistemi - Proizvodna paradigma za Industrijo 5.0** predstavlja evolucijsko nadgradnjo predhodnega poglavja. Za razliko od koncepta *Industrije 4.0*, ki je bolj osredotočen na samo tehnologijo, je novi koncept *Industrija 5.0* bolj usmerjen k praktičnem izvajanju razpoložljivih možnosti, ki jih nudijo nove tehnologije v industriji pri transformaciji iz pametnih proizvodnih sistemov (*Industrija 4.0*) v adaptivne kognitivne proizvodne sisteme (*Industrija 5.0*). *Adaptivni kognitivni proizvodni sistemi* (AKPS) 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. Pri tem je posebej poudarjena transformacija vloge človeka v novih proizvodnih sistemih *Industrije 5.0*.

Poglavje **Upravljanje, vodenje in krmiljenje pametnih in adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov** podrobno obravnava naslednja pomembna področja: implementacija digitaliziranih in kibernetiziranih funkcij pametnih proizvodnih sistemov, ontološki pristop k upravljanju in krmiljenju naprednih proizvodnih sistemov, agentske strukture za implementacijo funkcij PPS v konceptu KFPS, ter simulacija izvajanja funkcij PPC v konceptih naprednih proizvodnih sistemov. Pri tem je poudarek na možnostih, da vlogo človeka pri planiranju in vodenju proizvodnje prevzamejo umetna inteligenca in kognitivne tehnologije. V tem vsebinsko najbolj pomembnem poglavju predstavljene znanstvene monografije je opisana lastna znanstvena raziskava avtorja, ki je na temeljit, sistematičen in slikovit način ovrednotil prednosti implementacije novih konceptov KFPS in K-KFPS v realna industrijska okolja.

V **Zaključku** avtor predložene monografije povzame vse relevantne ugotovitve posameznih poglavij kot tudi lastnih raziskav na področju naprednih proizvodnih sistemov z ugotovitvijo, da ostaja še veliko odprtih smeri za nadaljnje raziskovalno delo.

Glede na dejstvo, da v slovenskem jeziku še ni v zadostni meri dostopna ustreznna znanstvena literatura, ki bi na sistematičen način obravnavala napredne proizvodne sisteme, pričujoča znanstvena monografija lahko zapolni to vrzel in

rabi kot primerno gradivo za študente na podiplomskem in doktorskem študiju strojništva, industrijskega inženiringa, proizvodne informatike ipd.

Rokopis znanstvene monografije, ki je predmet recenzije, temelji na obsežnem pregledu relevantne tuje in domače literature ter rezultatih doktorske disertacije kot tudi podoktorskega študija dr. inž. Elvise Hozdića. S tega stališča predstavlja monografija tudi aktualno in izvirno znanstveno delo. Upoštevajoč dejstvo, da se osrednji del raziskav nanaša na razvoj naprednih proizvodnih sistemov, ki predstavljajo hrbtenico vsake industrializirane družbe in definirajo ekonomski položaj države, naslov monografije "NAPREDNI PROIZVODNI SISTEMI - osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje" v celoti ustreza obravnavani problematiki.

Tekst monografije je logično in sistematično strukturiran. Prične se z Predgovorom, ki natančno seznani bralca s pomenom obravnavane problematike in cilji rokopisa. V Uvodu so opredeljene razmere v katerih danes deluje industrijska proizvodnja ter razložen termin *Industrija 4.0*, katere ključni element predstavljajo *pametni proizvodni sistemi*. Sledijo osrednja poglavja v katerih avtor oriše zgodovinsko ozadje pojava posameznih industrijskih revolucij in na podlagi lastnih raziskav opredeli evolucijo razvoja naprednih proizvodnih sistemov. Zelo podrobno so definirane značilnosti in možnosti za prehod na novi koncept *Industrija 5.0* ter transformacijo iz pametnih proizvodnih sistemov (*Industrija 4.0*) v *adaptivne kognitivne proizvodne sisteme (Industrija 5.0)*. Tekst je sklenjen s poglavjem Zaključek v katerem so poudarjene vse relevantne ugotovitve s poudarkom na lastnih raziskavah in priporočilih za nadaljnje raziskovalno delo na področju naprednih proizvodnih sistemov.

Monografija vsebuje 84 slik in 5 preglednic kar še dodatno prispeva k boljši grafični nazornosti in preglednosti obravnavane problematike. Podan je tudi obsežen seznam (372 navedb) relevantne literature na obravnavanem področju, ki je v tekstu bila akademsko korektno citirana.

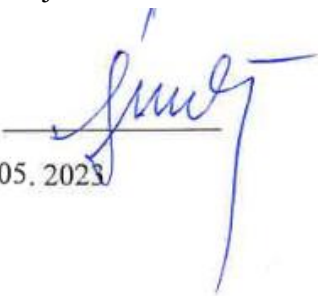
Stil pisanja, ki ga avtor vse skozi uporablja, je nazoren in razumljiv, hkrati pa tudi na zahtevani akademski ravni. To pove, da se je avtor poglobil v študij in raziskovanje zahtevnih, ponekod tudi povsem novih, tehnologij in konceptov sodobnih kibernetско-fizičnih proizvodnih sistemov. Zaključki so strokovno in znanstveno korektno prezentirani. Osnovna terminologija na tem področju izvira iz angleščine, ki pa je v večini primerov že ustrezno jezikovno in strokovno korektno prevedena v slovenščino.

Predloženi rokopis znanstvene monografije vsebuje natančno opredeljeno in znanstveno utemeljeno analizo razvoja novih konceptov sodobnih proizvodnih sistemov. To pomeni, da je primerna tako za akademsko okolje (pedagoško in

raziskovalno osebje, študente) kot tudi za strokovno javnost, še posebej za načrtovalce sodobnih proizvodnih sistemov.

Glede na aktualnost obravnavane problematike, izvirnost in utemeljenost znanstvene obravnave, ter kakovost prispevka za strokovno javnost priporočam monografijo z naslovom "**NAPREDNI PROIZVODNI SISTEMI - osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje**" avtorja dr. inž. Elvisa Hozdića v objavo.

Podpis recenzenta:



Kraj in datum: 12. 05. 2023

Javni razpis za sofinanciranje izdajanja znanstvenih monografij v letu 2023
Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije

Bleiweisova cesta 30

SI-1000 Ljubljana

Ime, priimek in naziv recenzenta: izr. prof. dr. Sandro Doboviček
Znanstveni naziv: izredni profesor
Zaposlitev: Univerza na Reki, Tehniška fakulteta
E-poštni naslov: sandro.dobovick@riteh.hr
Naslov monografije: "NAPREDNI PROIZVODNI SISTEMI - osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje"
Avtor/ji monografije: dr. Elvis Hozdić
Število strani rokopisa, prejetega v oceno: 188 strani teksta in 26 strani literature in drugih virov
Vrsta publikacije: Znanstvena monografija
Monografija je primerna za objavo: ✓ da da, vendar s predlaganimi popravki ne.

Predložena publikacija pod naslovom »*Napredni proizvodni sistemi – osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje*«
sadrži 188 stranice teksta i 26 stranica popisa relevantne znanstvene literature. Početni dio publikacije čini sadržaj, popis slika, popis tablica, značenja kratica i simbola. Tekst Publikacije počinje *Predgovorom* nakon kojeg slijedi 8 (osam) logičkih cjelina (poglavlja) i popis *Literature*.

Predgovorom autor opisuje kontekst današnje industrijske proizvodnje koju karakteriziraju nepredvidive i dinamične tržišne promjene te nagli tehnološki razvoj. Autor obrazlaže motiv za izradu monografije u vidu nedostatka znanstvene literature na slovenskom jeziku koja bi na odgovarajući način obuhvatila koncepte i modele obuhvaćene industrijskim revolucijama, *Industrije 4.0* i *Industrije 5.0*.

U prvom poglavlju *Uvod* autor naglašava značaj industrijske proizvodnje za ekonomiju, značaj potrebne povezanosti svih elemenata proizvodnog sustava u

vidu komunikacije i izmjene informacija, decentralizaciju sustava odlučivanja, horizontalnu i vertikalnu organizacijsku integraciju, mogućnosti rekonfiguracije proizvodnih struktura kao i kooperaciju i interakciju čovjeka i stroja kao osnovu za stvaranje *Pametnih proizvodnih sustava* i *Socio-kibernetско-fizičkih proizvodnih sustava*.

Drugim poglavljem pod nazivom *Industrijske revolucije, proizvodne paradigme in sistemi*, autor definira procesni model proizvodnog sustava, njegovu strukturu i ključne značajke. U nastavku, autor se osvrće na kronološki razvoj industrijskih revolucija, dominantne modele proizvodnih sustava u pojedinoj industrijskoj revoluciji i elemente koji su takav razvoj omogućili. Konačno, poglavlje zaključuje pregled osnovnih modela i koncepata naprednih proizvodnih sustava.

U trećem poglavlju pod naslovom *Tehnologije in sistemi za strukturiranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje naprednih proizvodnih sistemov*, autor ističe važnosti naprednih informacijskih i komunikacijskih tehnologija, industrijskog interneta stvari i računalstva u oblaku za industrijsku proizvodnju. Poseban osvrt u ovom poglavlju odnosi se na model više-agentskih struktura osnova kojih su računalni ili proizvodni agenti kao autonomni elementi proizvodnog sustava koji imaju mogućnosti komunikacije, reakcije na promjene te inicijativu promjene u skladu s poznatim ciljevima.

Četvrtim poglavljem pod nazivom *Osnove za modeliranje naprednih proizvodnih sistemov*, autor naglašava ulogu modeliranja kao polazne točke u optimizaciji proizvodnih sustava sa ciljem upravljanja i kontrole pojedinih procesa i sustava cjelini. Nadalje autor pobliže objašnjava osnovne značajke okvira za modeliranje GERAM i ADMO koje se u nastavku rada koriste. U procesu modeliranja proizvodnih sustava autor ističe različite metode modeliranja, alata za modeliranje i modela znanja (baze podataka i rudarenje podataka) kao ključne elemente naprednih proizvodnih sustava. U nastavku poglavlja, autor zaključuje različite definicije pojma „simulacija“, navodi različite opće programske jezike i namjenske softvere za simulaciju. Poglavlje autor zaključuje opisom procesa ocjene modela.

Peto poglavlje naziva *Pametni proizvodni sistemi – proizvodna paradigma za Industriju 4.0* prikazuje hijerarhijsku strukturu pametne tvornice izgrađenu na temeljima koncepta Industrije 4.0 i kibernetско-fizičkih sustava, koncepte i modele pametnih proizvodnih sustava. Takav proizvodni sustav prikazan je kao temelj daljnje evolucije proizvodnih sustava i njihovih sastavnih dijelova na putu prema novoj industrijskoj revoluciji.

Nastavak industrijske revolucije poznat kao koncept *Industrije 5.0* prikazan je u šestom poglavlju pod naslovom *Adaptivni kognitivni proizvodni sistemi – proizvodna paradigma za Industriju 5.0*. Petu industrijsku revoluciju autor opisuje kao onu u kojoj su ključna sljedeća tri faktora: usmjerenost na čovjeka, održivost i otpornost tj. simbioza sljedeća tri segmenta: tehnološkog, socijalnog i ekološkog. Autor navodi i ključne tehnologije koje mogu omogućiti Industriju 5.: *Edge Computing*, *Big Data Analytics*, *Internet of Everything*, *Blockchain*, *Digital Twin*, umjetna inteligencija, kolaborativni roboti (*Cobot*) itd. Današnji izazovi u području proizvodnje usmjereni su na rješavanje problema nepredvidivosti proizvodnog okruženja s ciljem povećanja prilagodljivosti proizvodnih sustava usmjerenih personaliziranoj proizvodnji. Upravo veća sposobnost prilagodbe proizvodnih sustava poboljšava uspješnost postizanja ekonomskih i poslovnih ciljeva, odnosno prijelaz sa pametnih na adaptivno kognitivne proizvodne sustave iz kojih su se počeli razvijati nove generacije sustava. U radu su dva detaljnije analizirana takva sustava: otporni proizvodni sustavi i kognitivni kibernetско-fizički proizvodni sustavi. Poglavlje zaključuje opis transformacije uloge čovjeka u proizvodnim sustavima koncepta Industrije 5.0.

Sedmo poglavlje ovog rada pod naslovom *Upravljanje, vodenje in krmiljenje pametnih in adaptivnih kognitivnih proizvodnih sistemov* zaokružuje cjelinu ovoga rada razmatranjima kako s raspoloživim resursima i unutar predviđenih troškova osigurati pravovremenu isporuku proizvoda i usluga na temelju narudžbi kupaca te kako postići optimalno opterećenje resursa? Kao odgovor na ta pitanja autor vidi kroz digitalizaciju i kibernetizaciju poslovne funkcije planiranja i upravljanja proizvodnjom i njihovu implementaciju uz pomoć umjetne inteligencije i kognitivnih tehnologija, ontološki pristup planiranju i upravljanju naprednih proizvodnih sustava te agentsku strukturu sustava.

U *Zaključku* autor daje konačan osvrt na svoja dosadašnja istraživanja u području složenih adaptivnih proizvodnih sustava i adaptivnih distribuiranih proizvodnih sustava te koncepta kibernetско-fizičkih proizvodnih sustava, te daje smjernice za daljnji istraživački rad u području naprednih proizvodnih sustava.

Znanstvena monografija u ovakvom obliku pruža sveobuhvatni pregled znanstvene literature, poznatih koncepata i principa za koja se očekuje da će predstavljati temelj industrijske proizvodnje u godinama koje slijede te predstavlja primjereno gradivo na slovenskom jeziku za studente diplomskih i poslijediplomskih (doktorskih) studija.

Znanstvena monografija naslova »Napredni proizvodni sistemi – osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje« bazirana je na

relevantnoj, većinom stranoj znanstvenoj literaturi. U radu su primijenjene sljedeće metode znanstvenog istraživanja: induktivna i deduktivna metoda, metode analize, sinteze, klasifikacije, deskripcije, kompilacije i metoda modeliranja. Sadržajno, monografija u ovakvom obliku može biti korisna studentima proizvodnih usmjerenja na višim godinama diplomskih studija te studentima doktorskih studija iz razloga što na jednom mjestu pruža pregled temeljnih principa i metodologija naprednih proizvodnih sustava. Naslov monografije ističe da se radi o radu koji pruža osnove za strukturiranje, modeliranje i upravljanje naprednih proizvodnih sustava i kao takav je prikladan sadržaju.

Tekst monografije je logički strukturiran kroz poglavlja počevši s Predgovorom koji radu daje kontekst i motiv. Uvodno poglavlje čitaoca upoznaje s ulogom industrijske proizvodnje za ekonomiju i daje uvid u koncept Industrije 4.0 i Pametnih proizvodnih sustava kao njenog ključnog elementa. Nakon Uvoda slijedi dio teksta koji je adekvatno strukturiran u šest poglavlja i predstavlja logičku cjelinu u kojima se čitatelja uvodi u dostupna znanja, poznate koncepte i mogućnosti koji mogu omogućiti transformaciju pametnih proizvodnih sustava u adaptivne-kognitivne proizvodne sustave za nadolazeću petu industrijsku revoluciju. Zaključnim poglavljem logički je zaokružena tematika izlaganja te su predložene smjernice za daljnja istraživanja.

U radu je navedeno i ispravno citirano 372 različitih izvora informacija. Rad sadrži velik broj slika i dijagrama (84) koji uvelike doprinose boljem razumijevanju koncepata koji se u radu opisuju, a izvedeni su na način da je zadržana akademska čestitost citiranja izvora informacija pri čemu je zadržana unificiranost grafičkih elemenata kroz cijeli rad. Rad sadrži 5 tablica i 112 navoda kratica i simbola.

Stil pisanja odlikuje razumljivost i visoka akademska razina koja ukazuje da se autor studiozno bavio proučavanjem recentne literature koja je uvelike uključivala i velik broj novih pojmova i koncepata prije nego li je predstavio svoje viđenje tematike. Nova terminologija navedena u citiranim izvorima informacija najčešće potiče iz engleskog jezika, a prikladno je usklađena i prevedena na slovenski jezik.

Predložena znanstvena monografija sadrži sveobuhvatni, znanstveno utemeljeni pregled razvoja naprednih proizvodnih sustava te predstavlja vrijedan i jedinstven izvor informacija studentima diplomskih i doktorskih studija na slovenskom jeziku. Monografija može biti korisna i široj, stručnoj javnosti zainteresiranoj za aktualne razvojne trendove u području proizvodnih sustava.

Ovo djelo obuhvaća vrlo aktualne promjene u industrijskom okruženju, znanstveno je utemeljeno i kvalitetno napisano. Iz tog sam razloga slobodan preporučiti znanstvenu monografiju pod nazivom »**Napredni proizvodni sistemi – osnove za strukturiranje, modeliranje, upravljanje, vodenje in krmiljenje**« autora dr. Elvisa Hozdića za objavu.

Podpis recenzenta:



Kraj in datum: 16.05.2023.