

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**UPRAVLJANJE KOMPLEKSNOŠĆU
VARIJABILNOG PROCESA MONTAŽE**

Marina Crnjac

Split, travanj 2019.

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	UPRAVLJANJE KOMPLEKSNOŠĆU	3
2.1.	Pokretači kompleksnosti	6
2.2.	Razvoj teorije kompleksnosti na temelju različitih pristupa	7
2.2.1.	Pristupi kod mjerenja kompleksnosti	7
2.2.2.	Domene kompleksnosti	9
2.3.	Pregled primjene teorije kompleksnosti na problemima proizvodnje i montaže	10
2.3.1.	Primjena teorije nelinearne dinamike i teorije informacija u kombinaciji sa simulacijama.....	10
2.3.2.	Primjena teorije informacija na dizajnu familije proizvoda.....	11
2.3.3.	Kompleksnost radnog mjesta te primjena upitnika za istraživanje subjektivne percepcije kompleksnosti	11
2.3.4.	Primjena teorije grafova te sustava kodiranja za određivanje kompleksnosti.....	12
2.3.5.	Primjena teorije informacija i aksiomatskog dizajna	12
2.3.6.	Primjena vektora kompleksnosti za proizvodni sustav	13
3.	PROCES MONTAŽE I PRIMJENA MJERA KOMPLEKSNOSTI.....	17
3.1.	Uloga montažnih sustava danas i novi trendovi	17
3.2.	Kompleksnost proizvoda.....	20
3.2.1.	Utjecaj kompleksnosti proizvoda na proces montaže	20
3.2.2.	Primjeri razvoja mjera kompleksnosti proizvoda.....	21
3.3.	Kompleksnost procesa.....	23
3.3.1.	Problemi procesa montaže u znanstvenoj literaturi s pristupima rješavanja.....	24
3.3.2.	Primjeri razvoja mjera kompleksnosti procesa	29
3.4.	Prednosti i nedostaci mjera za kompleksnost proizvoda i procesa montaže.....	32
3.4.1.	Prednosti mjera za kompleksnost proizvoda i procesa montaže	32
3.4.2.	Nedostaci mjera za kompleksnost proizvoda i procesa montaže	33
4.	POTPORA DONOŠENJU ODLUKA KOD PROCESA MONTAŽE	34
4.1.	Općenito o metodama za potporu donošenja odluka	34
4.2.	Grafički prikazi korišteni kod montaže	37
5.	OTVORENI PROBLEMI I BUDUĆA ISTRAŽIVANJA.....	39
5.1.	Kritički osvrt na izazove otvorenih problema	39
5.2.	Buduća istraživanja	39
6.	ZAKLJUČAK	41

LITERATURA.....	42
SAŽETAK.....	49
POPIS OZNAKA I KRATICA	50

1. UVOD

Svaka organizacija danas djeluje u vrlo promjenjivoj okolini, iz okoline uzima sve što joj je potrebno, da bi svojom aktivnošću povećala vrijednost predmeta rada i ostvarila dobit. Pritom se događa kompleksan transformacijski proces kojim je potrebno učinkovito upravljati. Upravljanje proizvodnjom je studij donošenja odluka u funkciji proizvodnje [1]. Zbog brojnih nepredvidljivih varijabli koje sačinjavaju okolinu, gospodarski subjekti imaju slične poteškoće. Globalizacija, porast dinamičnog tržišta te skraćivanje životnog ciklusa proizvoda, samo su neke od pojava koje uzrokuju visoki pritisak na proizvodne sustave [2].

U dinamičnim uvjetima na tržištu, gdje djeluju različiti proizvodni sustavi, više nije dovoljno ponuditi kupcima uzak asortiman proizvoda, već široku paletu proizvoda prilagođenih zahtjevima kupaca. Takvi uvjeti prisiljavaju tvrtke na nove strategije izrade proizvoda prilagođenih kupcu (engl. *product personalization*), koje mogu donijeti značajne kompetitivne prednosti svojim korisnicima. Navedenu strategiju nije jednostavno usvojiti bez praćenja razvoja digitalizacije koja utječe na svaki korak u proizvodnim sustavima, transformirajući ih informacijskim i komunikacijskim tehnologijama posebno u posljednjem desetljeću, kad se javlja koncept Pametnih tvornica (engl. *Smart factory concept*). Koncept Pametnih tvornica je glavna značajka četvrte industrijske revolucije, čiji naziv Industrija 4.0 potječe iz Njemačke strategije za tehnološki razvoj [3]. Industriju 4.0 obilježavaju i tri vrlo aktualna pojma: Internet stvari (engl. *Internet of Things - IoT*), Internet usluga (engl. *Internet of Services - IoS*), Internet podataka (engl. *Internet of Data - IoD*) [4]. Internet stvari se odnosi na objekte koji komuniciraju međusobno, Internet usluga na novi pristup pružanja usluga putem Interneta te Internet podataka koji se bavi prikupljanjem, pohranjivanjem i dijeljenjem podataka vezanih za proizvodnju.

Visoke fluktuacije u potražnji za određenim proizvodima uvelike utječu na fleksibilnost proizvodnog sustava. Montaža kao temeljni proces za realizaciju krajnjeg proizvoda, sačinjenog od brojnih dijelova proizvedenih u vlastitoj proizvodnji ili kupljenih kod dobavljača, predstavlja troškovno važno područje za visoko varijabilne proizvode. Odgovarajućim dizajnom, svaki funkcionalni modul (podsklop) proizvoda dolazi u više varijanti tako da kombinacija montaže pruža visoku varijabilnost krajnjih proizvoda [5]. S obzirom na mogućnosti praćenja proizvodnje i prikupljanja podataka iz montažnog sustava, zahvaljujući novim tehnologijama, danas je u znanstvenoj i stručnoj literaturi vrlo prisutan razvoj metoda za potporu prilikom donošenja odluka o smjerovima djelovanja unutar sustava. Zbog svoje dinamične prirode i brojnih čimbenika koji su u interakciji, proces montaže privlači veliki broj istraživača, koji različitim načinima opisuju takvu vrstu sustava s ciljem dobivanja podataka koji mogu pomoći unaprijeđenju rada sustava. Lean metodologija poznata po svojim pristupima za uklanjanje gubitaka unutar proizvodnog sustava [6], zapravo čini temelj za masovnu prilagodbu (engl. *mass customization*), posebno ističući brzu isporuku kroz male serije proizvoda koje reduciraju ukupno vrijeme proizvodnje [7]. Orijentacija na tokove materijala i informacija potječe iz lean metodologije, gdje se otvara pitanje važnosti digitalizacije. Prema uputama ISO 9001:2015 normi potrebno je imati dokumentirane procese, definirane i opisane mrežu procesa i njihove interakcije te sučelja o kojima procesi ovise ili koja ih omogućuju [8]. Nakon što je sustav opisan, on se može analizirati, a tek nakon analize ga je moguće poboljšati. Ovisnost organizacija o informacijskim tokovima je ključna, donošenje odluka treba biti temeljeno na zapisanim činjenicama, a ne na subjektivnom mišljenju.

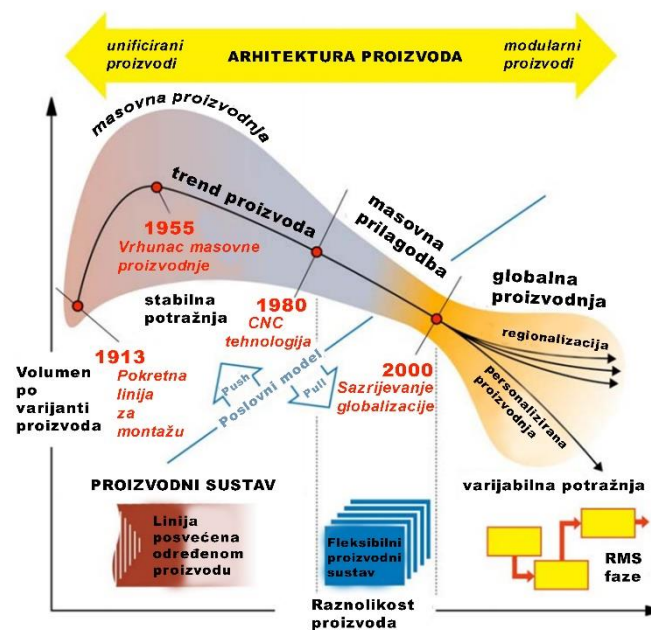
Ovaj rad je usredotočen na upravljanje kompleksnošću kod montaže visoko varijabilnih proizvoda. Provedeno je istraživanje literature koja opisuje načine mjerenja kompleksnosti te interakcije čimbenika koje su kompleksne, a ostavljaju značajne posljedice u sustavu. Kao što je ranije spomenuto, stanje na tržištu prisiljava gospodarske subjekte na promjene, međutim u većini slučajeva nije jednostavno uvesti promjene u postojeće proizvodne sustave. Mnoge prepreke se nalaze na tom putu, a neke od najznačajnijih su otpor zaposlenika unutar određenog sustava, financiranje novih tehnologija te pratećih softvera u svrhu digitalizacije proizvodnje. Osim svijesti o brojnim preprekama, otvaraju se pitanja koje točno promjene uvesti u proizvodni sustavi učinkovito njim upravljati. Da bi se približili odgovoru, a polazeći od strategija kojima se vodi određena tvrtka, iz pregledane literature očito je potreban novi pristup koji će rezultirati analizom kako se promatrani sustav može nositi sa zadanim strategijama te konačno dati određenu potporu donošenju odluka o smjerovima djelovanja.

Pregled literature započet je poglavljem rada koje govori o upravljanju kompleksnošću, gdje su opisani pokretači kompleksnosti te je dan pregled trenutnih teorija kompleksnosti, njihovih pristupa i domena djelovanja. Pred kraj drugog poglavlja prikazana je primjena navedenih teorija na problemima proizvodnih i montažnih sustava. Nadalje, poglavljem tri su izdvojeni novi trendovi koji se tiču montažnih sustava, promatranje kompleksnosti proizvoda te kompleksnosti procesa. Za svako od promatranih područja predstavljeno je nekoliko primjera iz literature. Naglašene su prednosti, ali i nedostaci postojećih pristupa. Četvrto poglavlje ističe važnost metoda za potporu kod donošenja odluka i njihovo korištenje ovisno o vrsti problema koje istražuju. Istaknuti su i grafički prikazi koji se često koriste za opisivanje tijeka montaže. Na kraju ovog rada dan je kratak kritički osvrt na izazove otvorenih problema područja kompleksnosti proizvoda i procesa, također su istaknute smjernice za buduća istraživanja i zaključak.

2. UPRAVLJANJE KOMPLEKSNOŠĆU

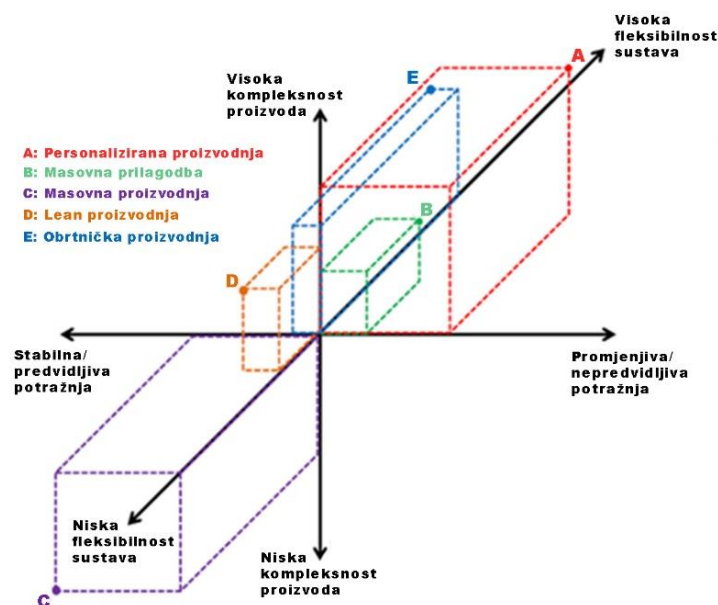
Etimologija upućuje na opće značenje riječi *kompleksnost* čiji naziv potječe od latinske riječi *complexus*, a znači složen te se vezuje uz opsežnost, povezanost, konfuznost i isprepletenost. Kompleksnost se upotrebljava u kontekstu koji odgovara cjelovitosti i složenosti, što se izravno može povezati s pojmom sustava. Urlich i Probst [9] definiraju kompleksnost kao značajku sustava, čiji stupanj ovisi o broju elemenata, njihovih poveznica i broja različitih stanja sustava. Bleicher kompleksnost promatra kao karakteristiku sustava koji može proći kroz veliki broj različitih stanja u zadanom periodu vremena [10]. Iako nema formalne definicije kompleksnosti, u znanstvenoj literaturi povezanoj s modernim proizvodnim sustavima je prihvaćeno da napredak povlači za sobom povećanje kompleksnosti. Povećanje kompleksnosti se može najbolje vidjeti kroz napredak tehnologije koja danas utječe na sve aspekte života. Promatrajući napredak proizvodnih sustava današnjice, rastuća kompleksnost upućuje na opasnosti poput destabilizacije sustava, reduciranja performansi sustava, viših troškova te brojnih drugih. Jedan od načina zadržavanja kompleksnosti pod kontrolom je sposobnost njenog definiranja i mjerenja.

Čini se da je pitanje kompleksnosti svima intuitivno jasno, do trenutka dubljeg upuštanja u razumijevanje kompleksnosti. Tada se vidi da svaki pojedinac ima drugačiji pogled i razumijevanje određenog područja kompleksnosti. Pitanje značenja kompleksnosti ostaje nejasno sve dok se ne pronađe odgovor što se želi postići s njenom definicijom. Promatrajući nove trendove koje slijede različite industrije, može se zaključiti da natjecanje ide putem udovoljavanja kupcu. Udovoljavanje kupcu za sobom povlači brojne prilagodbe sustava koji mora brzim odgovorom najbolje zadovoljiti kupčeve potrebe. Slika 2.1. opisuje Korenovu viziju razvoja proizvodnih paradigmi, poslovnih modela i raznolikosti proizvoda.



Slika 2.1. Proizvodne paradigme i njihovi proizvodi [11]

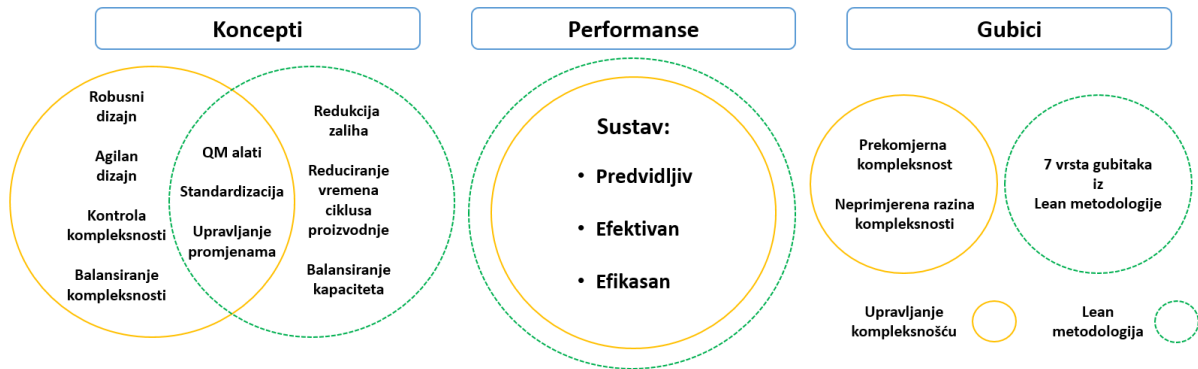
Obzirom da je polazište u proizvodnji, prema napretku proizvodnih paradigmi na Slici 2.1., kompleksnost se može promatrati kroz dvije karakteristike koje se tiču proizvoda. Prva karakteristika se tiče odlika proizvoda, a druga njegove povezanosti. Odlike proizvoda se mogu razjasniti kroz heterogenost i različito ponašanje svakog kompleksnog dijela. Povezivanje se odnosi na činjenicu da različiti dijelovi nisu međusobno neovisni, ali ipak saznanja o svakom pojedinom dijelu dozvoljavaju određivanje povezivanja sa drugim dijelovima. Ako se promotre ova dva aspekta, vidljivo je da prvi dovodi do nereda, kaosa ili entropije, dok drugi dovodi do uređenosti stavlajući raznolikosti u određeni međusobni odnos [12]. Ukoliko se na ovaj način promatra kompleksnost, onda se može upravljanje kompleksnošću orijentirati na njeno mjerenje i kontrolu. Različite paradigme proizvodnje su se razvile kako bi služile specifičnim tržišnim i ekonomskim situacijama. Karakteristike različitih proizvodnih paradigmi, u ovisnosti o potražnji na tržištu te kompleksnosti proizvoda i fleksibilnosti proizvodnje su prikazane na Slici 2.2. Vidljivo je da područje A, koje pripada paradigmi proizvodnje personaliziranih proizvoda ima vrlo visoku kompleksnost proizvoda, kao i nepredvidljivu potražnju, što čini to područje izazovnim za daljnje istraživanje.



Slika 2.2. Karakteristike proizvodnih paradigmi [13]

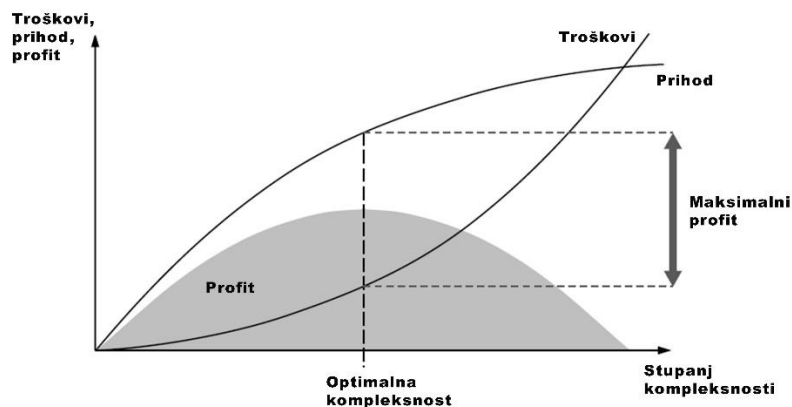
Razumijevanje kompleksnosti se može promatrati zajedno sa lean metodologijom kroz orijentaciju na performanse sustava te uklanjanje različitih vrsta gubitaka. Mnoge tvrtke izričito navode da su saznanja o Toyota proizvodnom sustavu (TPS) i lean proizvodnji snažno utjecali na razvoj njihovih vlastitih proizvodnih sustava [14]. Lean metodologija je filozofija proizašla iz TPS-a, a temelji se na uklanjanju različitih vrsta gubitaka koji se javljaju tijekom proizvodnje. Gubici u proizvodnji predstavljaju sve aktivnosti u kojima se ne dodaje vrijednost proizvodu ili sve koje nisu korisne, smislene i efektivne. Neke aktivnosti ne doprinose direktno dodavanju vrijednosti, ali su potrebne za izvođenje aktivnosti dodavanja vrijednosti predmetu rada, one predstavljaju neizbježne gubitke. Sustavno pronalaženje i analiziranje gubitaka te njihovo reduciranje dovodi do povećanja performansi sustava. Lijevo na Slici 2.3. je vidljiva orijentacija kompleksnosti prema dizajnu, bilo proizvoda ili procesa, dok je orijentacija lean metodologije na upravljanju zalihama, vremenom te kapacitetima proizvodnje. Njihovo preklapanje dolazi

do izražaja kod upravljanja kvalitetom proizvoda, prilikom provođenja standardizacije te upravljanja promjenama. Oba pristupa ciljaju na poboljšanje stabilnosti sustava i njegovih performansi. Prema [15] upravljanje kompleksnošću u proizvodnji prelazi granice lean-a. Naime, kod kompleksnosti treba postojati holistički pristup (perspektiva zaposlenika, menadžera i sustava) jer je potrebno identificirati prekomjernu i neadekvatnu kompleksnost u bilo kojem dijelu kao dio gubitaka u proizvodnji.



Slika 2.3. Upravljanje kompleksnošću i lean metodologija [15]

S obzirom na širenje broja razmatranih gubitaka naspram klasičnom lean pristupu koji broji sedam (plus jedan) vrsta gubitaka [6], može se i prekomjerna kompleksnost definirati kao gubitak kojim je potrebno upravljati. Ako se uzme u obzir perspektiva sustava, prema [16, 17] svaki promatrani sustav ima svoj maksimalni nivo kompleksnosti, kada sustav postaje ranjiv. Nove tehnologije uzrokuju troškove, dok pritom donose određene prednosti i povećavaju kompleksnost sustava, međutim svaka kompleksnost koja nije potrebna predstavlja rizik za konačan rezultat. Slika 2.4. prikazuje troškove, prihode i profit u odnosu na stupanj kompleksnosti. Modrak i Solysova [16] prikazuju krivulju kompleksnosti Tainer-ovom krivuljom, gdje je vidljiv optimalni balans, jednako kao i na Slici 2.4 iz [16]. Važno je naglasiti da kod upravljanja kompleksnošću nije cilj redukcija kompleksnosti, već je cilj naći optimalnu razinu kompleksnosti koja uzima u obzir prednosti kao i dodatne napore generirane uslijed povećanja kompleksnosti.



Slika 2.4. Uravnoteženje prihoda i troškova te optimalna razina kompleksnosti [17]

Općenito u literaturi, percepcija kompleksnosti proizvoda, operacija, procesa i sustava se povezuje s količinom informacija koja mora biti procesuirana. S obzirom da povećana varijabilnost proizvoda uzrokuje povećanu raznolikost ili nedostatak informacija, time pruža prilike proizvodu, operaciji, procesu ili sustavu da se ponaša na neočekivani način. Trošak dodane kompleksnosti mora biti u ravnoteži sa poboljšanjem performansi u sustavu [18]. Stoga će se u nastavku dati pregled pokretača kompleksnosti te razmotriti kompleksnost proizvoda i procesa.

2.1. Pokretači kompleksnosti

Brojni su pokretači kompleksnosti, a za razmatranje utjecaja na proizvodni sustav, mogu se svrstati u vanjske i unutrašnje pokretače. Vanjski pokretači su vanjski sudionici koji utječu na promatrani sustav, a koji su u izravnoj vezi sa sustavom – kupci, dobavljači, distributeri te regulatorna tijela. Bliss [19] ih svrstava u tri kategorije:

- kompleksnost potražnje, prouzrokovana podijeljenim tržištima, njihovim brojem, veličinom, raznolikošću te opsežnim specifikacijama i regulativama,
- kompetitivna kompleksnost, gdje otvaranjem novih tržišta tvrtke žele doći do novih kupaca,
- tehnološka kompleksnost, gdje tehnološki napredak poboljšava rezultate u velikom broju funkcija proizvoda.

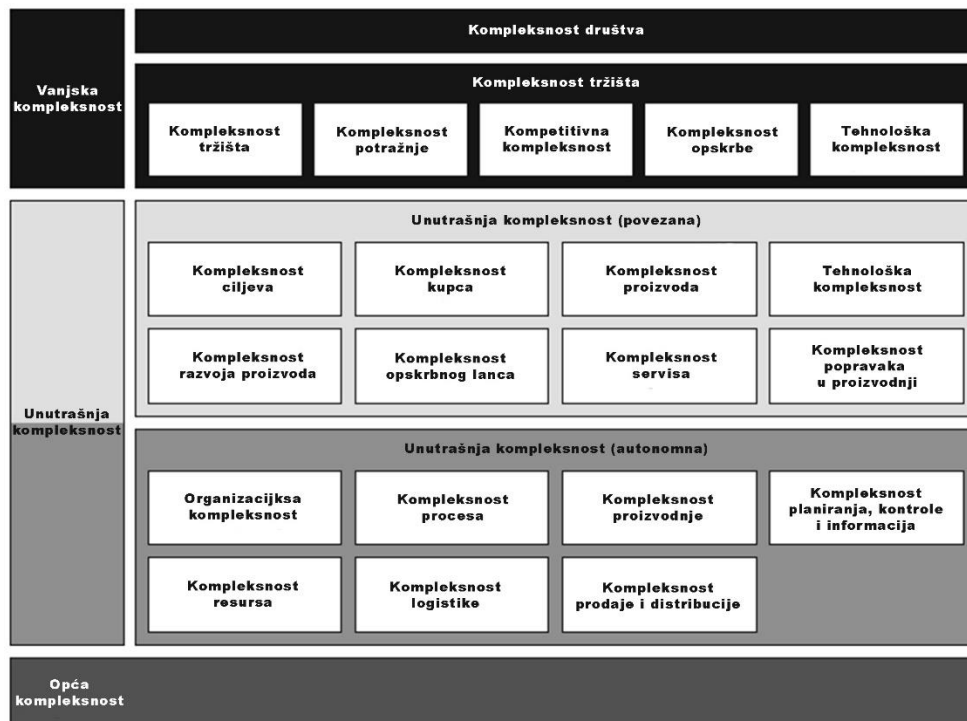
Ako se promatraju s aspekta kontrole, vanjske pokretače je teško kontrolirati, a u izravnoj su vezi sa unutrašnjim pokretačima. Unutrašnji pokretači su unutar proizvodnog sustava i javljaju se kod transformacije kupčevih zahtjeva u gotovi proizvod. Bliss [18] ih dijeli na:

- kompleksnost strukture kupaca, koja je rezultat velikog broja heterogenih skupina sa zahtjevima za malim brojem proizvoda,
- složenost portfelja proizvoda uvjetovanu širinom portfelja proizvoda (broj varijanti i raznolikost među varijantama),
- kompleksnost proizvoda koja nastupi kada arhitektura proizvoda zahtijeva velik broj sirovina, dijelova i podsklopova s visokom razinom diferencijacije,
- kompleksnost cilja koja se očituje u raznolikosti operativnih ciljeva za paralelno ostvarenje unutar organizacije.

Vanjske i unutrašnje pokretače nije moguće razdijeliti jer unutrašnji pokretači zapravo predstavljaju prilagodbu sustava uslijed djelovanja vanjskih pokretača. Ipak Bliss slično dijeli i kompleksnost unutar proizvodnje u kontekstu proizvodnje velikog broja varijanti proizvoda i naziva je autonomna kompleksnost:

- kompleksnost proizvodnog procesa, koja potječe iz visoke varijabilnosti proizvoda, poput konfiguracije procesa, rasporeda radnih stanica, dobave materijala,
- organizacijska kompleksnost, koja je rezultat snažne funkcionalne i hijerarhijske orijentacije te podjele rada unutar lanca vrijednosti, tvrtke koje ju imaju ulažu visoke napore u planiranje i kontrolu,
- kompleksnost proizvodnog sustava, se javlja kada se u isto vrijeme odvijaju proizvodni procesi za veći broj varijanti proizvoda.

Autonomna kompleksnost nije izravno povezana sa vanjskim pokretačima i time je ona nepoželjna, zato je uvijek ova vrsta kompleksnosti prvi predmet proučavanja unutar proizvodnog sustava, što se može promatrati i kroz spomenutu lean metodologiju, gdje prekomjerna kompleksnost predstavlja gubitak. Serdarasan [20] je provela istraživanje o pokretačima kompleksnosti dobavnog lanca putem upitnika kod dvadeset i četiri tvrtke. Nekoliko pokretača svrstava u tri skupine prema tipu: statični, dinamični i pokretači kod donošenja odluke. Promatra ih jednako kao i Bliss, gdje pokretače dijeli prema porijeklu na vanjske i unutrašnje, ali između njih definira i sučeljavanje pokretača kompleksnosti kod ponude i potražnje, gdje ističe kod donošenja odluka nedostatke u informacijama, neprikladne sustave informacijske tehnologije (engl. *Information Technology - IT*), nesinkronizirano donošenje odluka te konfliktna djelovanja. Vogel i Lasch [21] ističu važnost kvantificiranja pokretača kompleksnosti i njihovih utjecaja te u svom pregledu literature daju klasifikacijski sustav pokretača kompleksnosti prikazan na Slici 2.5.

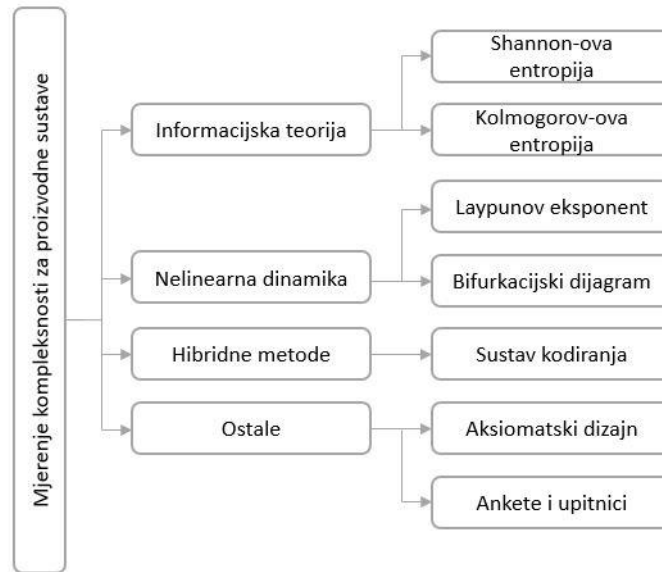


Slika 2.5. Klasifikacijski sustav pokretača kompleksnosti [21]

2.2. Razvoj teorije kompleksnosti na temelju različitih pristupa

2.2.1. Pristupi kod mjerenja kompleksnosti

Često se u literaturi operacijskih istraživanja javljaju različiti načini mjerenja kako bi se lakše upravljalo područjima interesa, što potiče istraživače na razvoj teorije kompleksnosti i metoda za mjerenje. Na Slici 2.6. prikazan je kratak pregled pristupa za mjerenje kompleksnosti unutar proizvodnog sustava, kako bi se olakšalo praćenje daljnjeg pregleda literature, gdje će biti navedene osnove o svakom od pristupa.



Slika 2.6. Pristupi kod mjerenja kompleksnosti u proizvodnom sustavu [22]

Prva teorija se temelji na teoriji informacija čije osnovne postavke daje Shannon [23], a koje se zasnivaju na teoriji vjerojatnosti i statistici. Mjerljivost količine informacija, koje se šalju komunikacijskim kanalima, je fokus teorije informacija, gdje se navode dvije veličine, entropija i informacija. Mjerenje količine informacija se dobiva izračunavanjem njihove entropije. Entropija predstavlja prirodnu težnju nekog sustava da dođe u stanje potpunog kaosa, kao posljedica njegove potpune neorganiziranosti. U pogledu kompleksnosti, ova teorija mjeru entropije koristi za kvantificiranje neizvjesnosti koja karakterizira proizvodnju ili informacije potrebne da bi se opisale komponente sustava odnosno njihova stanja (može se još reći da kvantificira nedostatak znanja o sustavu). Primjerice za ulazne informacije ove mjere u proizvodnji, ako se promatraju strojevi, se koriste stanja strojeva (zauzet, slobodan ili u kvaru), raznolikost proizvoda koji se na njemu trebaju izraditi i duljina reda čekanja na stroju. Kolmogorova entropija, koja pripada prvoj skupini, pak daje izračun stope kompleksnosti koju promatra na način da uzima analizu stanja komponenti sustava u različitim vremenskim intervalima, razmatra prosječni rast stope kompleksnosti slučajne sekvence (engl. *random sequence*) [24]. Time se dobiva mjera za dinamiku sustava, koja predstavlja evoluiranje sustava tijekom vremena. S obzirom da se Kolmogorova mjera za kompleksnost temelji na procjeni, razvijena je Lempel Ziv mjera kompleksnosti za mjerenje Kolmogorove kompleksnosti te niz algoritama. Lempel Ziv algoritam se u podjeli gleda kao zaseban dio. U proizvodnom sustavu je korištena Lempel Ziv mjera za dobivanje nepredvidljivosti indikatora performansi sustava u kontekstu procjene kompleksnosti dinamike sustava [25].

Teorija nelinearne dinamike i teorija kaosa nudi temelje za interpretaciju nelinearnosti, nestabilnosti i nepouzdanosti koja karakterizira sustave sa rastućom kompleksnošću [26]. Laypunov eksponent za neku varijablu opisuje porast odstupanja između dva stanja kaotičnog sustava. Sustav koji sadrži najmanje jedan pozitivan Laypunov eksponent je definiran kao kaotičan [22]. Deshmukh [27] modelira proizvodni sustav temeljen na teoriji kaosa, koristi Laypunov eksponent za kvantificiranje granične stope gdje proizvodni sustav odstupa od svog predviđenog rasporeda rada. Pozitivna vrijednost Laypunovog eksponenta označava

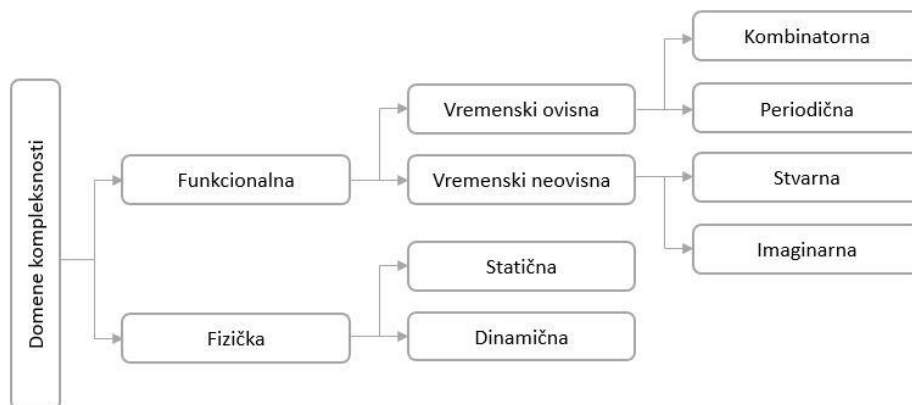
eksponencijalno odstupanje od planiranog stanja. Taj podatak služi kontroli kako bi se sustav vratio u predviđeno stanje, koristeći pritom redukciju varijabilnih procesnih vremena. Bifurkacijski dijagrami mogu prikazati očekivano ponašanje proizvodnog sustava i olakšati identifikaciju parametara sustava koji vode do nestabilnog ponašanja i kaosa, koje bi trebalo izbjeći [22, 28].

ElMaraghy, Kuzgunkaya i Urbanic [18] su razvili kodiranje kompleksnosti, tako da svaki kod kompleksnosti predstavlja informaciju potrebnu za opisivanje različitih područja interesa u proizvodnji. Takav pristup prema literaturi spada u hibridne metode. U njihovom primjeru dobivena je kompleksnost strojeva, međuskladišta te sustava za dopremu materijala.

Među ostale teorije se ubrajaju aksiomatski dizajn te istraživanja putem upitnika. U Aksiomatskom dizajnu Suh [29] koristi aksiom kao polazište i kompleksnost definira kao mjeru nepouzdanosti u zadovoljenju funkcionalnih zahtjeva. Glavni cilj je maksimiziranje proizvodnosti, reducirajući kompleksnost proizvodnog sustava sljedeći proces kompleksnosti orijentirane prema dizajnu proizvoda (engl. Design-Centric Complexity - DCC). Prema Suh-u funkcionalni zahtjevi u aksiomatskom dizajnu su definirani kao minimalni skup neovisnih zahtjeva koji u potpunosti karakteriziraju funkcionalne potrebe proizvoda, sustava, organizacije ili slično. Među istraživanja pomoću upitnika spadaju i istraživanja o subjektivnoj percepciji kompleksnosti, što će biti pojašnjeno u poglavlju 2.3.

2.2.2. Domene kompleksnosti

Kompleksnost se još može podijeliti na dvije vrste ovisno o domeni – funkcionalnoj ili fizičkoj, Slika 2.7. U funkcionalnoj domeni se podjela oslanja na aksiomatski dizajn, gdje se kompleksnost definira kao mjera nepouzdanosti u ostvarenju prethodno definiranih funkcionalnih zahtjeva. Ova vrsta kompleksnosti se najviše u literaturi povezuje sa dizajnom, bilo sustava, procesa ili proizvoda. Dalje se funkcionalna domena dijeli na vremenski ovisnu i neovisnu kompleksnost. Vremenski ovisna kompleksnost može biti kombinatorna i rasti kao funkcija vremena tijekom kontinuiranog porasta mogućih kombinacija stanja porastom vremena. Također može biti periodična, koja postoji u ograničenom vremenskom intervalu i sa ograničenim brojem stanja koje može poprimiti u tom vremenskom intervalu. Vremenski neovisna kompleksnost može biti stvarna ili imaginarna [29]. Stvarna vremenski neovisna kompleksnost se može razmatrati kao vjerojatnost ostvarenja funkcionalnih zahtjeva. Imaginarna vremenski neovisna kompleksnost se odnosi na neizvjesnost zbog nedostatka razumijevanja između funkcionalnih zahtjeva i parametara dizajna [30]. U fizičkoj domeni postoji podjela na statičku i dinamičnu domenu. Statična domena (u literaturi se koristi naziv i strukturna) se dotiče strukture sustava i njegove konfiguracije, broja različitih proizvoda, broja različitih komponenti sustava (kao što su strojevi, međuskladišta, radnici, mehanizmi transportiranja) te njihovih međuovisnosti i međuveza. Dinamična domena se pak tiče neizvjesnosti ponašanja sustava kojeg se može promatrati u određenom vremenskom razdoblju. Također se dinamična domena dotiče vjerojatnosti da će sustav biti pod kontrolom [29].



Slika 2.7. Podjela kompleksnosti ovisno o domeni [29]

Različite teorije na kojima se temelji razvoj teorije kompleksnosti se razlikuju u pristupima. Teorija informacija je veoma zastupljena u literaturi kvantificirajući na taj način statičnu ili dinamičnu kompleksnost proizvodnih sustava. Međutim problem nastaje kod primjene jer njene mjere kompleksnosti se temelje na vjerojatnosti pojave određenog događaja, što ponekad nije dostupno kao informacija u promatranom proizvodnom sustavu. Mjere kompleksnosti razvijene na temelju teorije nelinearne dinamike i kaosa identificiraju i mjere stupanj kaosa unutar sustava. Promatrajući primjenu u proizvodnim sustavima, nije dovoljno mjerenje kaosa. Proizvodni sustavi su stohastičke prirode, gdje se takvo ponašanje nije identificiralo pomoću navedenih teorija u pretraženoj literaturi. Pristupi inspirirani dinamikom fluida postoje, međutim nisu razrađeni, trenutno su u začetnoj fazi, u nekim radovima je raspravljano o analogiji s kompleksnošću proizvodnih sustava, što zahtijeva još istraživanja, da bi se pružila određena mjera kompleksnosti.

2.3. Pregled primjene teorije kompleksnosti na problemima proizvodnje i montaže

2.3.1. Primjena teorije nelinearne dinamike i teorije informacija u kombinaciji sa simulacijama

S obzirom na karakteristike, a posebno na dinamiku proizvodnog sustava, često se teorije kompleksnosti primijenjene na problemima proizvodnje istražuju uz pomoć simulacija. Papakostas i ostali [31] teoriju nelinearne dinamike koriste u kombinaciji sa simulacijom diskretnih događaja (engl. *discrete event simulation - DES*) predstavljajući na taj način skup modela proizvodnje s različitom konfiguracijom i putanjama proizvoda te različitim radnim opterećenjima. Laypunov eksponent je korišten u njihovom radu s ciljem prikaza kako sustav proizvodnje reagira uslijed promjena trajanja pojedinih poslova. Usporedbu različitih strategija planiranja u odnosu na njihovu efikasnost u reduciranju kompleksnosti prikazuje Huaccho Huatuco i ostale [32] koristeći pritom simulacije. Kompleksnost u njihovom slučaju je prouzrokovana kvarovima strojeva u sustavu. Određena je pomoću entropije, kao očekivanog iznosa informacija potrebnih za opisivanje stanja sustava odnosno rasporeda rada pojedinog stroja. Vrlo slično kroz mjere kompleksnosti temeljene na teoriji informacija, Cho i ostali [33] proučavaju različite konfiguracije u proizvodnom sustavu uključujući montažu i demontažu. Kroz studije slučaja prikazuju vezu između kompleksnosti sustava i performansi u pogledu iskorištenosti resursa i vremena proizvodnje. Efthymiou i ostali [34] na primjeru montaže

različitih proizvoda koriste Lempel Ziv Kolmogorovu mjeru za kompleksnost. Pomoću simulacijskih modela prikazuju vrijeme ciklusa proizvodnje, vrijeme kašnjenja i fleksibilnost. Obje linije koje su predstavljene radom rezultiraju niskom kompleksnošću, što odgovara visokoj razini predvidljivosti ponašanja sustava. Smart [35] u svom radu modificira definiciju dinamične kompleksnosti koju su ranije razvijali Frizelle i Deshmukh, dinamičnu kompleksnost definira kao očekivanu količinu informacija za opisivanje stanja sustava ili odstupanja od njegovog predviđenog rasporeda rada. Interpretacija ovog stanja predviđenog rasporedom rada je jednaka stanju koje je pod kontrolom. Mourtzis i ostali [36] razmatraju problem konfiguracije proizvodne mreže te predlažu način dobivanja optimalnog rješenja. Mjeru dinamične kompleksnosti integriraju u proces donošenja odluke kao jednu od kriterija koji utječe na donošenje odluke. Mjera se sastoji od nekoliko parametara koji utječu na nju, kao što su broj i veličina međuspremnika, vrijeme ciklusa proizvodnje, srednje vrijeme između kvarova, srednje vrijeme popravka te omjer zahtjeva prema potražnji i proizvodnog kapaciteta.

2.3.2. Primjena teorije informacija na dizajnu familije proizvoda

Dizajn familije proizvoda je također fokus istraživača, posebno zbog pritiska tržišta za personalizacijom proizvoda. Kombinacijom teorije informacija, odnosno entropije Zhu [37] predlaže mjeru kompleksnosti (engl. *Operator Choice Complexity - OCC*) da bi kvantificirao učinkovitost radnika prilikom odabira točnih dijelova za određeni proizvod od mogućih varijanti te alata potrebnih za izradu, s ciljem izrade komada prema konkretnoj narudžbi. Pritom definira tok kompleksnosti, gdje je gomilanje kompleksnosti na pojedinoj radnoj stanici statično, dok se transfer kompleksnosti odvija prelaskom s jedne na drugu radnu stanicu, čime predlaže primjenu u dizajnu sustava. Wang i ostali [38] promatraju dizajn familije proizvoda s ciljem minimiziranja kompleksnosti u sustavima montaže za različite proizvode. Kroz minimiziranje kompleksnosti pronalaze najbolju kombinaciju raznolikosti proizvoda koja postiže najveći udio na tržištu. Navedeno predstavlja višeciljni optimizacijski problem, koji nadalje rješavaju uz pomoć genetskog algoritma. Park i Okudan [39] svoju mjeru kompleksnosti za familiju proizvoda predstavljaju kao kompleksnost pojedinog dijela u proizvodu u odnosu na razinu sličnosti s dijelovima unutar familije proizvoda. Mjerom kompleksnosti za familiju proizvoda provjeravaju utjecaj na performanse proizvodnje kao što su vrijeme ciklusa proizvodnje i ukupni proizvodni troškovi, gdje ujedno razmatraju što se događa uslijed strategije proizvodnje prema narudžbi i proizvodnje za nepoznatog kupca odnosno za skladište.

2.3.3. Kompleksnost radnog mjesta te primjena upitnika za istraživanje subjektivne percepcije kompleksnosti

U svojim radovima, Mattson, Gullander [40, 41] i ostali istražuju kompleksnost putem upitnika koji sadrži pitanja o proizvodu, načinima proizvodnje, informacijskoj podršci, broju uputa, tipu uputa, vrsti montaže, različitostima i sličnostima u zadacima, rasporedu radnih stanica, opremi, alatima, steznim napravama, planiranju vremena, problemima u komunikaciji te pritiscima uslijed nedostatka vremena. Njihovi zaključci o prijašnjim istraživanjima su ih potakli na ispitivanje subjektivne percepcije kompleksnosti jer prijašnji modeli su vezani za statičnu i dinamičnu kompleksnost, međutim ne uključuju subjektivnu percepciju radnika, koju oni smatraju važnom. Mattsson i ostali [42] ističu važnost upravljanja kompleksnošću putem osnaživanja radnika, u smislu njihovog razvoja i povećanju slobode odlučivanja u radu. Kao i

u prethodnim istraživanjima, koriste upitnike. Koje područje od tri, varijabilnost rada, dodatno rukovanje predmetom rada, dizajn radnog mjesta, najviše doprinosi kompleksnosti prikazano je pomoću istraživanja provedenih također uz pomoću upitnika [43]. Analizu kompleksnosti radnog mjesta u svom radu predstavljaju Alkan i ostali [44] rastavljajući aktivnosti pojedinog zadatka u montaži na elemente, pridjeljujući im kodove i vremena potrebna za izvršenje. Cilj je pomoću analize pronaći optimalne radne uvjete i integrirati model u postojeći alat za virtualni prikaz pokreta radnika tijekom izvršavanja zadataka. U svom idućem radu Alkan i ostali [45] predstavljaju indeks kompleksnosti za automatizirani sustav, pomoću Petrijevih mreža, koji uključuje stanja sustava te skup uvjeta koji dovode do tih stanja. Minimiziranje radnog opterećenja na radnim stanicama te pritom raspoređivanje kompleksnosti prilikom montaže motora za automobilske industriju u svom radu su prikazali Zeltzer i ostali [46].

2.3.4. Primjena teorije grafova te sustava kodiranja za određivanje kompleksnosti

Model temeljen na grafičkom prikazu kompleksnosti proizvodnje predlažu Jenab i Liu [47] tvrdeći da je najprikladniji prikaz pomoću grafa, posebno pri razvijanju modela nekog sustava te njegovoj modifikaciji i korištenju. U radu ispituju model na primjeru proizvodnje četiri vrste motora kako bi dobili analizu kompleksnosti i sličnosti motora, vremena montaže te potrebnih vještina radnika. Kao rezultat prikazuju graf u kojem je vidljiv najkompleksniji i najjednostavniji proizvod te ostali koji se nalaze između njih. Espinoza i ostali [48] također koriste teoriju grafova za procjenu strukturne kompleksnosti rasporeda radnih stanica u proizvodnji prema međuvezama, putanjama i ciklusima. Model za procjenu strukturne kompleksnosti prostornog rasporeda sustava prema ElMaraghy [49] temelji se na teoriji grafova, gdje kompleksnost sačinjava nekoliko indeksa, o kojima će u idućim poglavljima biti više riječi. Glavni cilj je pronaći među indeksima što se može reducirati s ciljem redukcije ukupne kompleksnosti prostornog rasporeda. Samy i ElMaraghy [50] predlažu model za mjerenje kompleksnosti automatiziranih i hibridnih montažnih sustava i pritom za svaku karakteristiku pojedine opreme kojom raspolaže montažni sustav definiraju kodove. Princip kodiranja karakteristika opreme s kojom se raspolaže rezultira kompleksnošću stroja, kompleksnošću sustava za opskrbu materijalom te kompleksnošću međuskladišta, čiji zbroj predstavlja kompleksnost cijelog sustava montaže. Samy i ostali [51] u svom idućem radu prikazuju strukturnu kompleksnost kroz kompleksnost opreme i njenog prostornog rasporeda, dovodeći u ravnotežu navedene kompleksnosti. Analizom osjetljivosti izvora kompleksnosti Liu i ostali [52] identificiraju ključne radne stanice koje najviše doprinose povećanju kompleksnosti. U tri koraka predstavljaju analizu osjetljivosti, putem indeksa osjetljivosti opreme, uspoređujući prethodni indeks sa kvalitetom proizvoda proizvedenog navedenom opremom, određujući ključne radne stanice s najvišim utjecajem na kompleksnost. Prema [53], Abad razvija mjere koje uzimaju u obzir kvalitetu procesa prilikom mjerenja kompleksnosti. Mjeri se sposobnost procesa pri izradi proizvoda zahtijevane kompleksnosti. Mjera je temeljena na informacijskoj teoriji. Prikazujući kvalitetu procesa, Abad prikazuje odstupanje između proizvoda koji je tražen i onog koji je proizveden. Mjeru ovog odstupanja interpretira kao mjeru iznosa kompleksnosti koju proizvodi proces na osnovu kompleksnosti koja je u proces ušla.

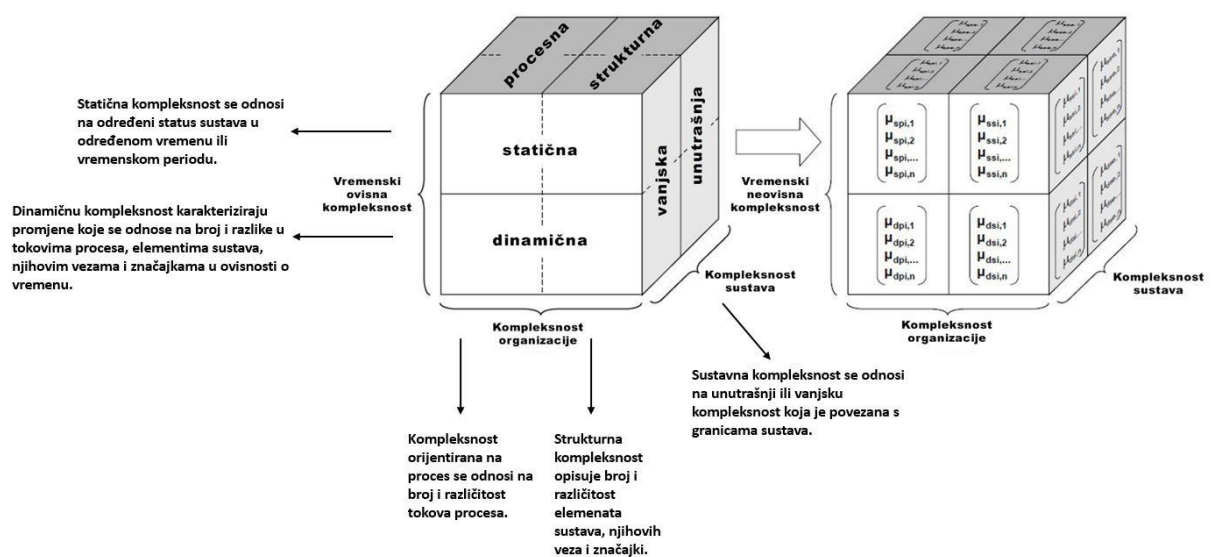
2.3.5. Primjena teorije informacija i aksiomatskog dizajna

Prema aksiomatskom dizajnu proces dizajna je predstavljen s četiri domene: kupčeva, fizička, procesna i funkcionalna. Nakon nekoliko iteracija, proces dizajna transformira kupčeve potrebe

u funkcionalne zahtjeve, koje Modrak i Bednar [54] transformiraju u parametre dizajna. Pokazuju ovisnost parametara dizajna o funkcionalnim zahtjevima te uključuju mjeru nereda kako bi kvantificirali kompleksnost prouzrokovanu raznolikošću proizvoda. Modrak i Soltysova [55] predlažu mjeru kompleksnosti koja uzima u obzir broj strojeva, broj dijelova, broj operacija te raspored dijelova po strojevima. U svom drugom radu [16] razvijaju mjeru kompleksnosti, koja osim broja dijelova i broja operacija uključuje i operacijsku kompleksnost, kroz definiciju ravnotežne točke kompleksnosti za proizvodni proces te određivanje odstupanja ravnotežne točke kompleksnosti alternativnog procesa od ranije definirane točke kompleksnosti za proizvodni proces.

2.3.6. Primjena vektora kompleksnosti za proizvodni sustav

Od ostalih teorija koje se ne uklapaju u prethodna navedena područja autori prikazuju kompleksnost proizvodnog sustava putem vektora. Ističu da je prednost korištenja vektorskog prikaza, prikazivanje mnogo parametara pojedinačno. U svom radu Schoettl i ostali [56] meta-modelom modificiraju proizvodni sustav pomoću pet parametara, broja novih dijelova, broja alternativnih dijelova, broja dijelova na jednoj radnoj stanici, broja zaposlenika i strojeva te stupnja povezanosti dijelova. Pritom koriste vektor modifikacije, kako bi izvršili usporedbu razlike prethodnog stanja sa novim stanjem. Prilikom validacije metode na primjeru proizvodne linije motora, uočili su porast kapaciteta proizvodnje, dok pritom raste broj resursa koji sudjeluju i njihovih međuveza. Istraživanje vezano za optimalnu razinu kontrole je napravljeno prema [57], čiji rezultati pokazuju da što je viša razina kompleksnosti u sustavu, spušta se razina ostvarenja ciljeva logistike, koji rastu s porastom autonomne kontrole, do jedne točke, nakon koje opadaju. Iz navedenog se može zaključiti da postoji granica kada se dodatnim uvođenjem autonomne kontrole više ne ostvaruje efikasnost. S obzirom na veliki broj varijabli koje utječu na proizvodni sustav, nije moguće mjeriti kompleksnost samo jednim parametrom. Zbog tog razloga Windt i ostali definiraju kompleksnost proizvodnog sustava kroz kocku kompleksnosti (engl. Complexity Cube), gdje za svako područje postoji vektor kompleksnosti prikazan na Slici 2.8.



Slika 2.8. Kocka kompleksnosti za proizvodni sustav [57]

Ipak podjela unutar kocke kompleksnosti je napravljena bez detalja o pojedinom dijelu i izračunu kompleksnosti. Svakako, kod navedenog pristupa postoji prostor objedinjavanja postojećih izračuna kompleksnosti unutar predložene kocke, kako bi se dobio holistički pristup za izračun kompleksnosti proizvodnog sustava.

Pregled literature o primjeni teorije kompleksnosti je napravljen u periodu od posljednjih deset godina, što prikazuje Tablica 1.1. U tablici je dan pregled istražene literature te se može vidjeti koji od problema proizvodnje obrađuje pojedini rad i kojoj od teorija ili spomenutih domena pripada.

Tablica 1.1. Pregled primjene teorija kompleksnosti na problemima proizvodnje

Autor/Autori	Problem u proizvodnji	Teorija					Domena	
		IT	ND	LZ	CS	O	S	D
Papakostas i ostali 2009.	Konfiguracija proizvodnje i putanje dijelova		✓				✓	✓
Huatuco i ostali 2009.	Planiranje proizvodnje u stvarnom vremenu	✓						✓
Cho i ostali 2009.	Montaža i demontaža, različite konfiguracije radnih stanica	✓					✓	
Zhu 2009.	Montaža različitih proizvoda, kvantifikacija učinkovitosti radnika	✓					✓	
Jenab i Liu 2010.	Montaža različitih proizvoda, sličnost proizvoda te potrebnih vještina za montažu					✓ (TG)	✓	
Abad 2010.	Analiza kvalitete i ciklusnog vremena cijele linije za montažu	✓					✓	
Samy 2011.	Kompleksnosti montažnog sustava kao cjeline	✓					✓	
Wang 2011.	Montaža različitih proizvoda, dizajn familije proizvoda	✓					✓	
Efthymiou i ostali 2011.	Kompleksnost montažne linije i veza između fleksibilnosti, proizvodnog programa i nepredvidljivosti			✓				✓
Mattsson i Gullander 2012.	Indeks kompleksnosti temeljen na upitnicima, montažni sustav					✓ (U)	✓	✓
Espinoza i ostali 2012.	Procjenu strukturne kompleksnosti rasporeda radnih stanica					✓ (TG)	✓	
Samy i ElMaraghy 2012.	Model za mjerenje kompleksnosti automatiziranih i hibridnih montažnih sustava	✓			✓		✓	
Smart 2013.	Određivanje stanja proizvodnog sustava (nalazi li se pod kontrolom ili u kojem je drugom stanju)	✓					✓	✓
Chryssolouris i ostali 2013.	Nepredvidljivosti indikatora performansi sustava	✓		✓			✓	✓

(skraćeno: IT - teorija informacija, ND - nelinearna dinamika, LZ - Lempel Ziv algoritam, CS - sustav kodiranja, O – ostalo, S – statična, strukturna, D – dinamična, TG – teorija grafova, U – upitnik, AD – aksiomatski dizajn)

Tablica 1.1. (nastavak) Pregled primjene teorija kompleksnosti na problemima proizvodnje

Autor/Autori	Problem u proizvodnji	Teorija					Domena		
		IT	ND	LZ	CS	O	S	D	
Mourtzis i ostali 2013.	Proizvodne mreže i dinamična kompleksnost			✓				✓	
ElMaraghy i ostali 2014.	Kompleksnost prostornog rasporeda u proizvodnji					✓ (TG)	✓		
Mattsson i ostali 2014.	Kompleksnost u kontekstu radnika, radi osnaživanja i boljeg razvoja pojedinog radnika					✓ (U)	✓	✓	
Schoettl i ostali 2014.	Kompleksnost montaže i modifikacije sustava					✓	✓		
Liu i ostali 2015.	Kompleksnost zavarivanja prouzrokovana različitim personaliziranim proizvodima kod automobilske industrije	✓			✓		✓		
Park i Okudan 2015.	Kompleksnost u dizajnu familije proizvoda te utjecaj na performanse proizvodnje	✓					✓		
Samy i ostali 2015.	Kompleksnost proizvodnog sustava uzrokovana kompleksnošću opreme i njenog prostornog rasporeda u proizvodnji				✓		✓		
Modrak i Berdnar 2015.	Kvantifikacija kompleksnosti prouzrokovane raznolikošću proizvoda					✓ (AD)	✓		
Mattsson i ostali 2016.	Montaža proizvoda i pritom varijabilnost rada, dodatno rukovanje predmetom rada, dizajn radnog mjesta					✓ (U)	✓	✓	
Alkan i ostali 2016.	Ručna montaža, kompleksnost prema predefiniranim vremenima, radi pronalaska optimalnih uvjeta rada	✓					✓		
Alkan i ostali 2016.	Kompleksnost automatiziranog sustava	✓				✓ (TG)	✓		
Zeltzer i ostali 2017.	Balansiranje radnog opterećenja na radnim stanicama montaže motora u autoindustriji	✓						✓	
Modrak i Soltysova 2017.	Raspoređivanje dijelova na različite strojeve	✓					✓		
Modrak i Soltysova 2018.	Izbor optimalnog rasporeda u ovisnosti o strojevima, broju dijelova i operacija	✓					✓		

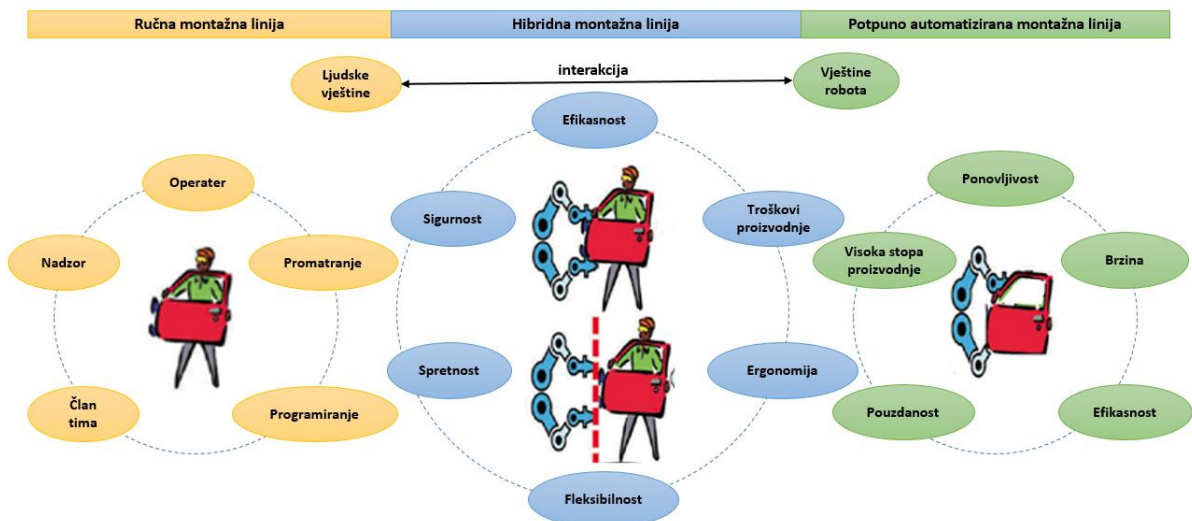
(skraćenice: IT - teorija informacija, ND - nelinearna dinamika, LZ - Lempel Ziv algoritam, CS - sustav kodiranja, O – ostalo, S – statična, strukturna, D – dinamična, TG – teorija grafova, U – upitnik, AD – aksiomatski dizajn)

3. PROCES MONTAŽE I PRIMJENA MJERA KOMPLEKSNOSTI

U proizvodnim sustavima koji se nisu u stanju prilagoditi, održivost postaje upitna posebno danas u uvjetima koje nameće tržište. Stoga se istraživanja usmjeravaju ka sve ubrzanijoj adaptaciji procesa i proizvodnje, što se može istaknuti kao najveći zahtjev uslijed personaliziranih narudžbi kupca koje uzrokuju kompleksnosti unutar proizvodnog sustava. Poimanjem proizvodnog sustava kao dinamičnog, kompleksnog i stohastičkog sustava, razmatrat će se detaljnije montažni sustav (engl. *assembly system*), koji predstavlja podsustav proizvodnog sustava. U montažnom sustavu se odvijaju montažni procesi, gdje u realizaciji proizvoda sudjeluju brojni čimbenici koje karakterizira njihova međusobna interakcija i usklađivanje međusobnih djelovanja. Zadatak montaže je sklapanje pojedinačnih ugradbenih elemenata nekog proizvoda u sklop veće kompleksnosti, gdje se montira određeni broj komada (proizvodna količina) u jedinici vremena (planiranom razdoblju). Sve navedeno važno je jer zahtjevi za montažom širokog asortimana sličnih ili različitih proizvoda, u određenom razdoblju, predstavljaju velik izazov za učinkovitu organizaciju montaže. Primjeri proizvodnja koje su prisiljene na prilagodbu kupcu se mogu naći na hrvatskim prostorima. S obzirom na oskudnu industriju i uvjete na tržištu, manji proizvođači nisu u mogućnosti određivati svoj standardni proizvod sa određenim modulima prilagodbe, već su prisiljeni ići na potpunu prilagodbu kupcu, u okviru mogućnosti koje proces može proizvesti, kako bi se održali u korak s globalnom konkurencijom. Često se postavlja pitanje: je li bolje imati optimalnu ili potrebnu razinu raznolikosti proizvoda koji se nude? S jedne strane prevelika raznolikost proizvoda uzrokuje porast troškova, dok s druge strane dovodi do povećanja udjela na tržištu. Prema istraživanjima [58] u automobilskoj industriji provedenim pomoću upitnika, 64% odgovora tvrdi da kompleksnost koja potječe iz upravljanja kompleksnošću uslijed izmjena proizvoda ima značajan udio u troškovima. U literaturi se kao cilj razvoja mjera kompleksnosti navodi upravljanje proizvodnim sustavima, što se može vidjeti u poglavljima koja slijede. Prikazan je utjecaj kompleksnosti proizvoda na proces montaže te razvoj mjera kompleksnosti procesa, čija polazišta se nalaze u kompleksnosti samog proizvoda. Prije prikaza mjera kompleksnosti proizvoda i procesa, važno je istaknuti nove trendove koji se danas javljaju u montažnim sustavima, kao i tehnologije koje omogućuju nove trendove.

3.1. Uloga montažnih sustava danas i novi trendovi

Montaža je temeljni proces za ostvarenje konačnog proizvoda. Varijacijom dijelova i podsklopova se vrši prilagodba kupcu, dok se pritom njihovom kombinacijom ostvaruje visoka varijabilnost konačnih proizvoda. Osvrtom na povijest razvoja montažnih sustava, poznato je da su u ranim fazama razvoja na montažnim linijama radili isključivo radnici koji su se specijalizirali za određena područja u montažnom procesu. Montažne linije su se počele intenzivno koristiti pojavom automobila, a Henry Ford je koristio konvejjere kao pomičnu platformu za svoju montažnu liniju. Pojavom robota, montažni sustavi se pretvaraju iz ručnih montažnih sustava u hibridne ili potpuno automatizirane sustave, Slika 3.1. Roboti mijenjaju čovjeka u monotonim te zahtjevnim zadacima montaže, što povećava produktivnost.

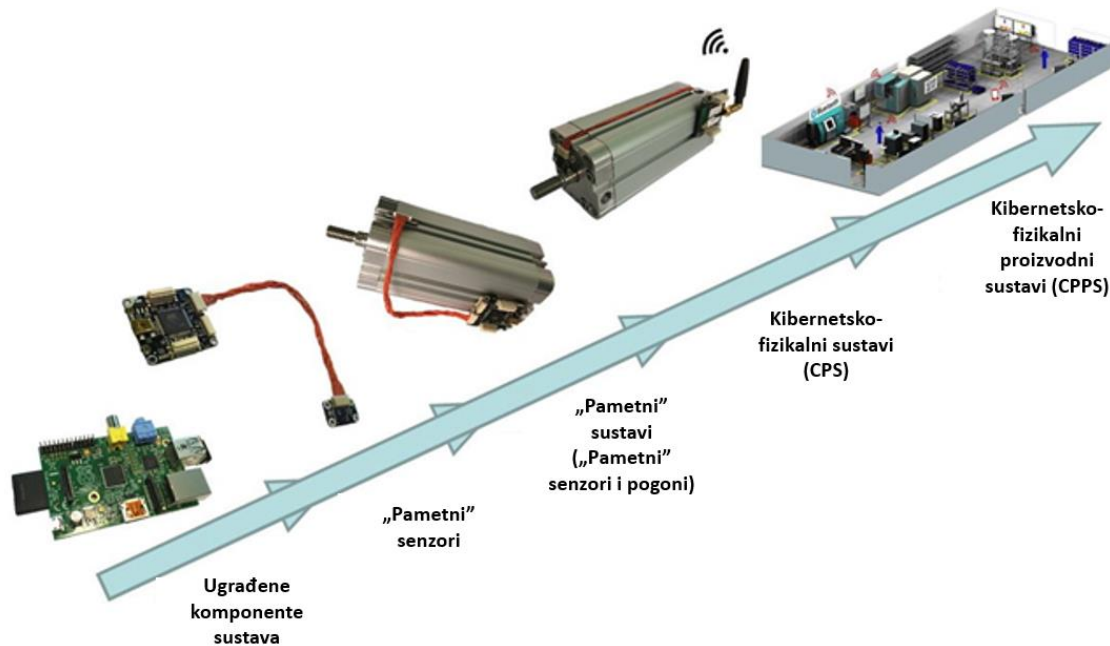


Slika 3.1. Vrste montažnih sustava [59]

Danas uvođenje robota u montažu poprima potpuno novu razinu razvoja, gdje roboti surađuju s ljudima prilikom izvođenja montažnih zadataka, s ciljem ostvarenja veće fleksibilnosti. Navedeni cilj se ostvaruje spajanjem vještina čovjeka i robota. Veza između ljudske spretnosti, fleksibilnosti i inteligencije te robotske preciznosti i ponovljivosti, daje prednosti okvirima u kojima se vrši njihova međusobna suradnja [59]. Sigurna suradnja čovjeka i robota, definirana tradicionalnim standardima, podrazumijeva da ovlašteno osoblje može biti unutar radnog područja robota samo ukoliko robot ne radi u automatskom modu. Kako bi se omogućila suradnja čovjeka i robota prethodne barijere, koje su odvajale radni prostor čovjeka i robota, se uklanjaju. Ove promjene su potaknute i od strane ISO10218 standarda, gdje se javljaju novi koncepti uključujući suradnju tijekom izvođenja operacije te zajednički prostor djelovanja. Sljedeća ažuriranja standarda ISO 10218-1 i ISO 10218-2 [60] su fokusirana na vrstu zadataka u kojima surađuju čovjek i robot te pritom kontrolu sigurnosnih sustava, kretanja i brzine. I dalje se standard poboljšava u smjeru ujednačavanja terminologije te dodataka na postojeći standard ISO 10218. Danas je napretkom kontrolnih sustava omogućena sigurna i nesmetana suradnja čovjeka i robota u montažnim sustavima, ali i općenito u proizvodnji. Za aktivnosti montaže, intenzivno se razvija područje primjene proširene stvarnosti (engl. *Augmented Reality - AR*), gdje se putem aplikacije kroz zaslon određenog uređaja prikazuju montažni elementi proširujući tako stvarnost oko nas [61]. Namjena ide u smjeru prikaza gdje se nalazi pojedini dio za montažu te koji su koraci putem kojih mora biti sastavljen konačan proizvod. Proširena stvarnost ima svoju implementaciju u širokom spektru problema montaže, od planiranja, dizajna, ergonomije do uputa za montažu na montažnim linijama. Koristeći proširenu stvarnost, korisnici dobivaju povratne informacije za analizu ponašanja i značajki proizvoda, ali i cijelog montažnog procesa [62].

Osim navedenog razvoja montažnih sustava pomoću suradnje čovjeka i robota, razvoj se odvija i u smjeru Industrije 4.0 gdje je sveprisutna povezanost ljudi, dijelova proizvoda i strojeva. Proizvodi, transportna sredstva i alati „surađuju“ kako bi najbolje odradili svaki sljedeći proizvodni korak, što dovodi do povezivanja virtualnog svijeta i fizičkih objekata u stvarnom svijetu. Pomoću novih tehnologija, razvoja senzora, objekti u proizvodnom sustavu postaju „nositelji informacija“ i u stanju su međusobno razmjenjivati informacije, pritom tvoreći kibernetско-fizikalni proizvodni sustav (engl. *Cyber-Physical System - CPS*), Slika 3.2. Razvoj

montažnih sustava uvođenjem novih tehnologija je krucijalan, posebno kada je potrebno imati široku ponudu i brzu isporuku visoko varijabilnih proizvoda. Na organizaciju montažnog sustava utječe vrsta i kompleksnost proizvoda, ulazne informacije o broju dijelova, njihovih međuveza, materijala od kojih se sastoje, informacije o geometriji, dostupnosti onih dijelova koji trebaju biti naručeni kod dobavljača te rokovima isporuke.



Slika 3.2. Oblik kibernetičko-fizikalnog proizvodnog sustava (engl. Cyber-Physical Systems - CPS) [63]

Pravovremeno prikupljanje svih ulaznih informacija i njihova dostupnost određuju montažne zadatke koji se moraju integrirati u tekuću montažu. Mnogi istraživači primjenjuju različite načine prikaza dijelova za montažu i njihovu hijerarhiju. Često je u znanstvenoj literaturi raznolikost dijelova koji čine podsklopove proizvoda predstavljena poput vrhova u različitim tipovima grafova, a njihove međuveze prikazane kao bridovi grafova [64]. Ipak, u industriji je mnogo zastupljeniji općenitiji prikaz dijelova i montažnog procesa pomoću sastavnice proizvoda (engl. *Bill Of Materials - BOM*) [65]. BOM je prikaz hijerarhije montažnih dijelova pomoću stabla, gdje svaka razina hijerarhije ima pridijeljenu brojčanu oznaku radi jednostavnijeg snalaženja u hijerarhiji. Može se reći da je BOM već standardan alat za komunikaciju tijekom faze dizajna, nabave materijala, proizvodnje te isporuke, tim više što je integriran u CAD (engl. *Computer-Aided Design - CAD*) te ERP (engl. *Enterprise Resource Planning - ERP*) sustave. Dalje se predstavljanje montaže i dijelova razvija grupiranjem tih dijelova u familije proizvoda, gdje se što više želi prilagoditi već spomenutim zahtjevima koje nameće povećana raznolikost proizvoda [37, 38, 66]. Grupiranje se vrši prema sličnosti operacija kroz koje proizvod prolazi, modularnosti i trenutnoj potražnji. Kada se navedenim načinima predstavljanja dijelova za montažu pridodaju nove tehnologije za praćenje proizvoda, primjerice poput RFID (engl. *Radio Frequency Identification - RFID*) tehnologije, tada je moguće u bilo kojem trenutku pratiti svaki montažni korak te kretanja dijelova. Također se otvaraju mogućnosti za lakše planiranje montaže te uvođenje promjena i njihovo upravljanje.

Paralelnim razvojem načina prikaza montaže, prikaza sastavnica proizvoda i novih tehnologija, cilj je stvoriti „pametno“ okruženje koje će olakšati rad zaposlenicima te donošenje odluka menadžmentu uslijed pravovremene dostupnosti velikog broja informacija te izvještaja koji se iz prikupljenih informacija formiraju. Prema svim naznakama (razvoju strojeva, računalnih programa, robotike i sl.), globalne poslovne mreže će se formirati sve brže. One će udruživati svoje „pametne“ strojeve, sustave skladištenja i proizvodna postrojenja u oblik CPS, što će rezultirati autonomnim izmjenama informacija, pokretanjem aktivnosti i jednostavnim vršenjem kontrole, a sve kao rezultat spajanja informacijsko-komunikacijskih tehnologija i stvarnog svijeta [67].

3.2. Kompleksnost proizvoda

Kompleksnost proizvoda se može opisati kroz broj dijelova od kojih se proizvod sastoji, broj veza između dijelova te razine kompleksnosti izrade svakog dijela koji sačinjavaju proizvod. Jasno je da se kompleksnost proizvoda manifestira na različite načine u različitim proizvodnim i montažnim sustavima, pritom je poseban naglasak na broj radnih stanica kroz koje proizvod mora proći te broj pojedinačnih aktivnosti potrebnih da bi se montirali svi dijelovi na njemu. Prethodno navedena podjela na eksterne i interne pokretače kompleksnosti, prikazana slikom 2.4., uključuje u interne pokretače kompleksnost proizvoda. Izvor kompleksnosti zapravo leži u konfiguraciji strukture proizvoda i dizajna sustava [54].

3.2.1. Utjecaj kompleksnosti proizvoda na proces montaže

Osnova od koje počinje razmatranje i dizajn montažnog procesa je proizvod, analiza informacija o proizvodu te planiranoj količini. Podaci o proizvodu su najčešće sadržani u:

- nacrtima,
- 3D modelima,
- sastavnicama proizvoda (engl. *Bill Of Material - BOM*),
- uzorcima i prototipovima,
- procedurama za montažu
- procedurama za ispitivanje kvalitete te
- normama koje se moraju pritom poštivati.

Navedene informacije se koriste za definiranje i planiranje radnih zadataka u procesu montaže te za raspored radnih mjesta i resursa koji će biti dodijeljeni pojedinom radnom zadatku. Jezgra montaže su operacije, osnovne montažne funkcije. Mnogo je čimbenika koji utječu na oblikovanje procesa montaže, dok su najvažnije karakteristike proizvoda i njihov utjecaj na proces montaže prikazani Tablicom 3.1. Ako se kompleksnost proizvoda razmatra u okviru sustava, onda valja promatrati raznolikosti proizvoda koji se istovremeno proizvode unutar sustava, njihov broj te broj istih dijelova. Ranije spomenuta BOM i familija proizvoda olakšavaju definiciju potrebnih dijelova u montaži te redoslijed montaže, a ujedno i njihov prikaz.

Tablica 3.1. Karakteristike proizvoda koje utječu na proces montaže

Karakteristika	Utjecaj na proces montaže
Oblik, veličina, težina	Tehnološki parametri sredstava za montažu
Kompleksnost – broj dijelova i njihovih spojeva	Sredstva za montažu (vrsta i broj), kompleksnost procesa montaže
Struktura	Nezavisnost sklapanja i ispitivanja, upravljivost procesa
Kvalitativni zahtjevi	Primjena automatskih sustava radi ujednačene kvalitete
Planirana količina	Stupanj automatizacije
Broj različitih varijanti proizvoda	Stupanj fleksibilnosti

3.2.2. Primjeri razvoja mjera kompleksnosti proizvoda

Kompleksnost proizvoda i njegovog dizajna pažnju znanstvenika više usmjerava na probleme koje će ta kompleksnost prouzrokovati u proizvodnom ili montažnom sustavu, o čemu će biti više riječi u poglavlju o kompleksnosti procesa i cjelokupnog sustava koje slijedi. Međutim, važno je napomenuti gdje je polazište razvoju mjera koje su predstavljene u ovom radu. Polazište za sve mjere koje se spominju kroz znanstvenu literaturu je u kompleksnosti proizvoda kojeg je potrebno proizvesti i (ili) montirati. Danas se većina mjera za kompleksnost proizvoda, radnih stanica te cjelokupnog procesa prisutnih u literaturi temelji na informacijskoj teoriji, Shannonovoj entropiji, što je vidljivo u Tablici 1.1. Shannonova entropija je definirana kao količina informacija unutar sustava, potrebna za opisivanje neizvjesnosti ponašanja tog sustava. Ukoliko su određena stanja sustava poznata, manje je informacija potrebno za njegovo opisivanje, odnosno manja je neizvjesnost ponašanja tog sustava. U nastavku je pojašnjen izraz za entropiju o kojoj je bilo riječi u poglavlju 2.2.1., a koji glasi:

$$H = - \sum_i^S P_i \log_2 P_i \quad (3.1)$$

gdje je:

S – broj stanja sustava,

P_i – vjerojatnost da će se promatrani sustav naći u i -tom stanju.

Izvod navedene formule dan je u [23], formula potječe iz binomnog koeficijenta, koji je vrlo važan dio matematike, posebno u području kombinatorike. Binomni koeficijent daje broj različitih kombinacija k elemenata izabranih iz skupa od n elemenata. Nadalje se binomni koeficijent definira pomoću faktorijela te se dolazi do Shannonove entropije.

Park i Okudan [39] su definirali statičnu mjeru kompleksnosti dizajna kao:

$$DC_j = \sum_i I_{ij} = \sum_i (-\log_2 C_{ij}) \quad (3.2)$$

gdje je:

I_{ij} – informacijski sadržaj svake varijante dijela unutar familije proizvoda,

C_{ij} – vjerojatnost pojavljivanja zajedničkog dijela varijante i od proizvoda varijante j unutar familije proizvoda.

Vjerojatnost pojavljivanja zajedničkog dijela varijante i od proizvoda varijante j unutar familije proizvoda se može mjeriti „a priori“ ili „a posteriori“ načinom. „A priori“ pristup podrazumijeva da je familija proizvoda već dizajnirana i konstruirana, onda se zajednički dio varijante i promatra pomoću informacija o strukturi proizvoda. A kod „a posteriori“ pristupa se pripadnost zajedničkog dijela izračuna kao omjer (engl. *design ratio*):

$$C_{ij} = \frac{n_{ij}}{P} \quad (3.3)$$

gdje je:

n_{ij} – broj varijanti proizvoda koji dijele dio varijante i od proizvoda varijante j unutar familije proizvoda,

P – je ukupan broj varijanti proizvoda.

Navedeni omjer predstavlja zajednički dio određene varijante temeljen na sastavnici proizvoda (BOM) unutar svih mogućih varijanti proizvoda. Prema tome ovaj omjer predstavlja vjerojatnost da će se ta određena varijanta dijela naći unutar familije proizvoda. Ako je varijanta tog dijela korištena u svim varijantama proizvoda onda je $C_{ij} = 1$, u protivnom ako se varijanta dijela koristi samo u jednom proizvodu, njen $C_{ij} = 0$. Autori ističu da se već u ranoj fazi dizajna, na ovaj način razmatra pripadnost pojedinog dijela proizvodima u familiji proizvoda i ta pripadnost postaje kritični parametar dizajna. Cilj je prilagoditi dio, tako da se poveća njegova pripadnost većem broju varijanti. Izračunavanjem C_{ij} svakog dijela, zatim DC_j , statična mjera kompleksnosti varijante proizvoda se može transformirati u statičnu kompleksnost dizajna za narudžbu proizvoda, čime se uzima u obzir navedena kompleksnost unutar proizvodnog sustava, što će biti detaljnije pojašnjeno u poglavlju koje slijedi.

Drugi pristup [54] je orijentiran na aksiomatski dizajn, čija teorija definira kompleksnost kao mjeru neizvjesnosti o sposobnosti proizvoda da zadovolji zadane funkcionalne zahtjeve. Svaki sustav, ili u ovom slučaju promatrani proizvod, ima minimalan skup neovisnih zahtjeva koji predstavljaju njegove funkcionalne zahtjeve (engl. *Functional Requirements - FR*). Kao što je ranije spomenuto u definiciji aksiomatskog dizajna [29], proces dizajna je prezentiran u četiri domene: kupčeva, fizička, domena procesa i funkcionalna domena. Unutar hijerarhije dizajna, ovisnosti između funkcionalnih zahtjeva i parametara dizajna (engl. *Design Parameters - DP*) Modrak i Bednar prikazuju kao:

$$FR = [A]DP \quad (3.4)$$

gdje je svaki element matrice A izražen preko omjera funkcionalnog zahtjeva i određenog parametra dizajna. Kroz jednadžbu (3.4) se izabire odgovarajući skup parametara dizajna koji zadovoljavaju zadane funkcionalne zahtjeve. Svaki element matrice A označava ovisnost FR_m o DP_n dok m označava broj funkcionalnih zahtjeva, a n broj parametara dizajna unutar iste matrice. Ukoliko je vrijednost bilo kojeg elementa matrice A jednaka nuli, tada funkcionalni zahtjevi ne ovise o parametrima dizajna.

Još jedan bitno drugačiji pristup od prethodna dva se može naći u [64], gdje Alkan i ostali svoju procjenu kompleksnosti montaže industrijskih proizvoda temelje na Huckel-ovoj molekularno orbitalnoj teoriji (HMO). Cijeli rad je inspiriran doktoratom [68] koji primjenjuje upravo spomenutu teoriju, kako bi se opisala kompleksnost proizvoda te sustava, dok je orijentacija na poveznice među dijelovima, čije ponašanje može biti nepredvidljivo i time prouzrokovati

probleme kod korištenja proizvoda. Cjelokupna kompleksnost povezana sa unutrašnjom strukturom sustava se sastoji od tri vrste kompleksnosti, definirana je kao:

$$C = C_1 + C_2 C_3 \quad (3.5)$$

gdje je prva kompleksnost C_1 povezana sa individualnim kompleksnostima komponenti sustava, označenim sa α_i u formuli koja slijedi:

$$C_1 = \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (3.6)$$

Druga kompleksnost C_2 je važna zbog interakcija komponenti i definirana je kao:

$$C_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{ij} A_{ij} \quad (3.7)$$

pritom β_{ij} predstavlja vrstu interakcije, dok je A_{ij} definiran binarnom matricom susjedstva, predstavljajući tako poveznice unutar strukture promatranog sustava. Također C_2 predstavlja razinu složenosti povezane s razvojem i upravljanjem svake od poveznica te zahtijeva znanje o prirodi sustava te cjelokupnoj arhitekturi. Posljednja kompleksnost C_3 predstavlja globalni učinak kompleksnosti i zahtijeva znanja o cjelokupnoj arhitekturi sustava:

$$C_3 = \frac{E_A}{N} \quad (3.8)$$

gdje je E_A energija grafa, a N broj komponenti unutar sustava. Energija grafa potječe od Gutmana [69], koji je energiju grafova definirao matematički za sve vrste grafova. U ovom slučaju energija grafa je definirana kao suma svojstvenih vrijednosti matrice susjedstva, dok je Alkan i ostali definiraju kao sumu singularnih vrijednosti matrice strukture montaže određenog proizvoda, kako bi dobili energiju grafa za taj proizvod, a uz pomoć Lucasove metode [70] definiraju vrstu interakcije β_{ij} .

Modrak i Bednar te Alkan i ostali svoje pristupe zasnivaju na interakcijama unutar proizvoda, dok je informacijska teorija koju koriste Park i Okudan više usmjerena ka familiji proizvoda te vjerojatnosti ponavljanja određenog dijela unutar familije. Jedan i drugi način su vrlo važni za primjenu kod procesa montaže, posebno u ranim fazama dizajna proizvoda, gdje je moguć značajan utjecaj na cijeli proces montaže, donošenjem zaključaka o mogućim izmjenama komponenti, njihovog broja te međuodnosa, što će se u konačnici odraziti na vremena montaže te napor koji je potrebno uložiti.

3.3. Kompleksnost procesa

U znanstvenoj literaturi se nekoliko desetljeća razvijaju mjere kompleksnosti proizvodnog sustava kako bi se menadžmentu ustupile informacije trenutnog stanja u sustavu, a s ciljem prilagodbe zadanim strategijama. S obzirom da je proces montaže je onaj koji dovodi u odnos dijelove proizvoda, vrlo je osjetljiv na kompleksnosti proizvoda te samim time na pogreške i ponavljanje rada. Lean metodologija ističe važnost orijentacije na tok, koja se temelji na prevenciji zastoja te njihovog otklanjanja. Stoga se nije dovoljno osloniti na izvor

kompleksnosti, što nikako ne umanjuje njenu važnost istaknutu ranije, ali je potrebno jednako tako pratiti kako sustav može odgovoriti na zadane zahtjeve. Poznato je da se mapiranjem procesa, identifikacijom problema i gubitaka može doći u bolje stanje, ipak traga se za novim načinima otkrivanja uzročnika problema te kreiranja novih i bržih rješenja, na što je usmjeren i ovaj rad.

3.3.1. Problemi procesa montaže u znanstvenoj literaturi s pristupima rješavanja

U proizvodnim industrijama planiranje procesa montaže je jedan od značajnijih elemenata cjelokupnog planiranja. Definicija bilo koje vrste planiranja u proizvodnji upućuje na razinu složenosti te aktivnosti, a posebno kod planiranja montaže. Detaljan plan montaže označava aktivnost kreiranja plana za montažu cjelokupnog proizvoda iz pojedinačnih dijelova, pritom uzimajući u obzir geometriju cjelokupnog proizvoda te svih podsklopova (njihovu kompleksnost), dostupne resurse (broj zaposlenika, broj radnih stanica, raspoloživost alata, steznih i mjernih naprava, transportnih sredstava i ostalih pomoćnih sredstava) te raspoloživo vrijeme za izradu.

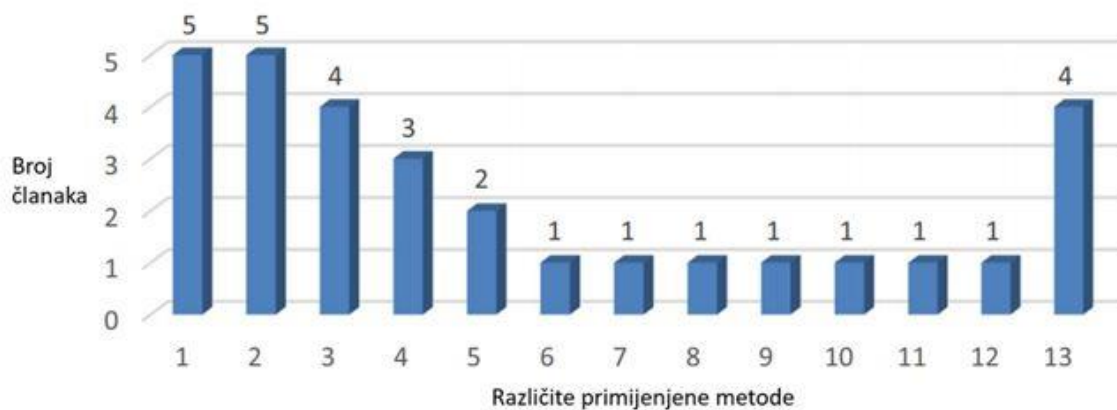
Prilikom planiranja i organizacije montaže proizvođači nailaze na mnogobrojne prepreke, koje se radi jednostavnosti promatranja mogu rasporediti u skupine, kako se često pojavljuju i promatraju u znanstvenoj literaturi:

- Planiranje redosljeda montaže (engl. *Assembly Sequence Planning - ASP*) – je usmjereno na izradu cjelokupnog plana montaže, obuhvaćajući sve zadatke u njihovom redosljedu vodeći pritom računa o dostupnosti potrebnih resursa. Planiranje dijeli narudžbu kupca na pojedine operacije te definira potrebne resurse i redosljed događaja koji moraju uslijediti da bi se montirao čitav proizvod.
- Raspoređivanje radnih zadataka montaže (engl. *Scheduling assembly tasks*) – je važno zbog ispunjavanja zadanih rokova jer je povezano sa određivanjem vremena kada točno se treba započeti određeni zadatak i kada treba biti dovršen. ASP ne pruža dovoljno informacija ukoliko ne uključuje usklađivanje vremena radnih zadataka po pojedinim resursima koji u određenom trenutku moraju biti spremni za prihvatanje zadatka.
- Balansiranje montažne linije (engl. *Assembly Line Balancing - ALB*) – na određeni način obuhvaća obe prethodne točke, uključujući pritom balansiranje i optimizaciju, kako bi se otklonili zastoji i čekanja, a porasla produktivnost. Pretežito uključuje minimiziranje broja radnih stanica te balansiranje radnog opterećenja među radnim stanicama, što može pomoći prilikom proizvodnje točno određenog broja jedinica proizvoda za zadovoljenje potražnje, posebno u slučajevima proizvoda koji se izrađuje prema zahtjevima kupca [71].
- Planiranje putanja tijekom montaže (engl. *Assembly Path Planning - APP*) – se sastoji od računanja mogućih putanja dijelova, podsklopova i sklopova za montažu, dok se kao ulazni podaci za izračun najpovoljnijih putanja koriste podaci o proizvodu, prethodnosti montažnih operacija, potrebnog vremena te mjesta na kojima će se one izvršavati [72].

Spomenuti problemi se svrstavaju u skupinu NP-teških i/ili NP-potpunih problema, u koje također spadaju brojni problemi kombinatorike i optimizacije. Radi ilustracije poteškoća s pristupom rješavanja većine problema takvih vrsta, spominje se često da do sada poznati algoritmi ne mogu dovesti do rješenja i kada bi vrijeme rješavanja bilo milijunima godina. Stoga se u literaturi često istražuju različiti pristupi rješavanju ovakvih vrsta problema te se nameće

pitanje kako ispitati dobivaju li se pritom zadovoljavajuća rješenja. Neki od primjera rješavanja optimizacijskih problema su problem trgovačkog putnika, problem raspoređivanja strojeva, problem određivanja rute vozila te problem naprtnjače. Međutim pored navedenih klasičnih problema koji imaju primjene u brojnim područjima, javljaju se i problemi optimiranja cjelokupnog proizvodnog procesa, kojima pripadaju i ranije spomenute prepreke prilikom planiranja i organizacije rada. U nastavku će biti ilustrirani pristupi pri rješavanju navedenih problema u literaturi podijeljeni pritom na dva dijela, oni koji istražuju balansiranje montažnih linija te pristupi koji istražuju optimalne putanje prilikom montaže. Isto tako bit će prikazane i funkcije cilja koje su pritom bile zadane, kao i ograničenja koja su zastupljena u radovima.

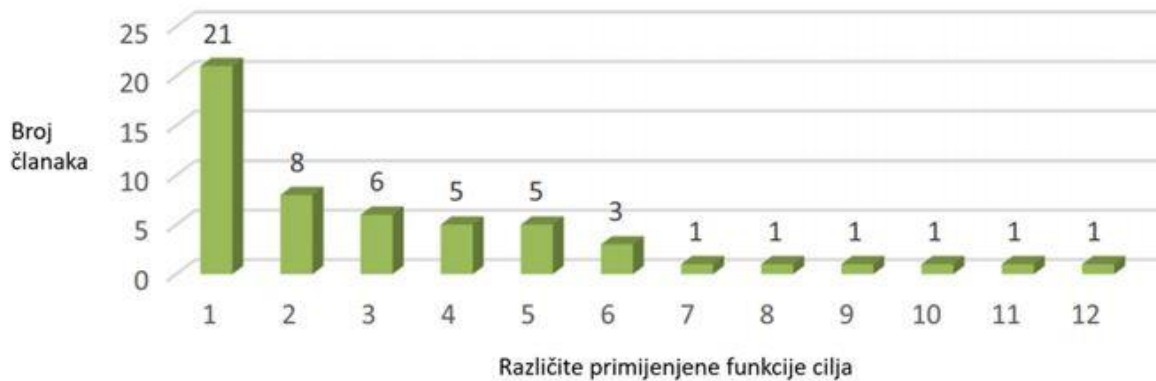
Kod problema balansiranja montažnih linija (ALB), zastupljenost pojedine metode u znanstvenim člancima je vidljiva na Slici 3.3. (Slika 3.3. do Slike 3.8. je izrada autora prema podacima iz [73] i [71]), gdje su autori usmjereni na dvostranu liniju za montažu, koja je nizana sa dvije stanice za paralelan rad, ali vrlo slično istraživanje sa sličnim rezultatima se može vidjeti i u [71], gdje se općenito istražuju problemi balansiranja linije, koja nije nužno dvostrana. Metode na Slici 3.3. su prikazane redom.



- 1 - Genetski algoritmi
- 2 - Mravlja kolonija
- 3 - Simulirano žarenje
- 4 - Optimizacija temeljena na roju pčela
- 5 - Optimizacija rojem čestica
- 6 - Traženje harmonije
- 7 - Optimizacija temeljem podučavanja i učenja
- 8 - Pareto optimizacija
- 9 - Leksikografska optimizacijska metoda
- 10 - Metoda grananja i granica
- 11 - Tabu pretraživanje
- 12 - Fuzzy logika
- 13 - druge heurističke metode

Slika 3.3. Zastupljenost pojedine metode u istraživanjima problema ALB

Kod oba autora jasno je vidljivo da su Genetski algoritmi i Mravlja kolonija najzastupljenije metode za rješavanje problema balansiranja montaže. Slika 3.4. koja slijedi, prikazuje različite funkcije cilja korištene prilikom istraživanja.



- 1 - minimalan broj radnih stanica
- 2 - minimalan broj dvostranih stanica
- 3 - minimalna duljina montažne linije
- 4 - minimalno ciklusno vrijeme
- 5 - raspoređivanje radnog opterećenja
- 6 - maksimalna povezanost rada
- 7 - minimalna varijacija proizvodnje
- 8 - minimalno vrijeme zastoja
- 9 - minimalno odstupanje u radu
- 10 - maksimalna stopa proizvodnosti
- 11 - minimalni troškovi
- 12 - optimalna specifična ograničenja

Slika 3.4. Različite funkcije cilja korištene u istraživanjima ALB

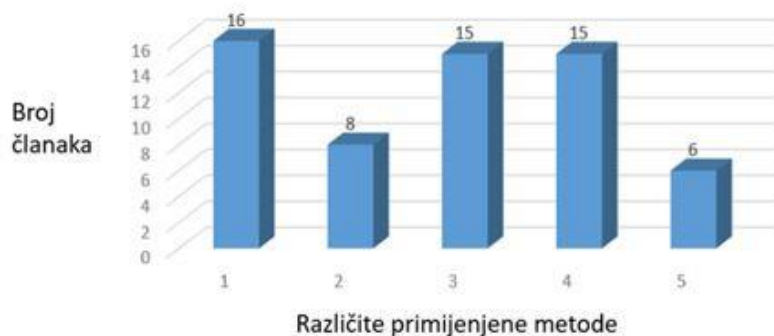
Najzastupljeniji cilj u istraživanjima je minimalan broj stanica montaže, koje su potrebne da bi se montirao proizvod, a također je orijentacija i na ciklusno vrijeme proizvodnje. Još preostaju vrste ograničenja koja su se koristila za istraživanja, Slika 3.5.



- 1 - ograničenje kroz dodjelu prednosti određenim zadacima na radnoj stanici
- 2 - ciklusno vrijeme
- 3 - redoslijed izvođenja operacije
- 4 - kapaciteti
- 5 - sinkronizirani zadaci
- 6 - radna stanica
- 7 - resursi
- 8 - događaji
- 9 - dodjeljivanje
- 10 - udaljenosti
- 11 - vjerojatnost završetka
- 12 - vrijeme trajanja zadatka

Slika 3.5. Različita ograničenja korištena u istraživanjima ALP

Kod problema planiranja putanja tijekom montaže (APP), prema [72] pristupi za njihovo rješavanje se mogu klasificirati na pet pristupa, čija je zastupljenost u literaturi prikazana Slikom 2.6.



- 1 - pristupi temeljeni na grafovima
- 2 - pristupi temeljeni na mrežama
- 3 - pristupi temeljeni na uzorkovanju
- 4 - pristupi temeljeni na dekompoziciji prostora
- 5 - interaktivni pristupi

Slika 3.6. Zastupljenost pojedine metode u istraživanjima problema APP

Metode temeljene na grafovima su veoma zastupljene u literaturi, poput blok dijagrama, I/ILI grafova, grafova veza te brojnih drugih. Većina metoda temeljenih na grafovima imaju osnovni način rada, gdje se prvo predstave individualni dijelovi ili grupa dijelova kao čvorovi i ukoliko postoji veza među njima, ona se naznači, zatim se konstruira graf na temelju geometrijskih značajki dijelova i traži se odgovarajući put montaže. Slika 3.7. prikazuje funkcije cilja pronađene u člancima.



- 1 - minimalna duljina puta
- 2 - maksimalna sigurnost puta
- 3 - maksimalan protok kroz put
- 4 - minimalan broj orijentacija dijelova tijekom montaže
- 5 - minimalan broj povezivanja unutar dijelova
- 6 - maksimalna udaljenost dijelova potrebnih za montažu

Slika 3.7. Različite funkcije cilja korištene u istraživanjima APP

Među funkcijama cilja minimiziranje duljine putanje je često upotrebljavano, dok je naglasak i na sigurnosti putanje te minimalnom broju orijentacije dijelova tijekom montaže. Ograničenja koja su korištena u literaturi su prikazana Slikom 3.7.



- 1 - geometrijska ograničenja
- 2 - geometrijska + fizička ograničenja
- 3 - geometrijska + mehanička ograničenja
- 4 - geometrijska + fizička + mehanička ograničenja

Slika 3.8. Različita ograničenja korištena u istraživanjima APP

3.3.2. Primjeri razvoja mjera kompleksnosti procesa

Jednako kao i u prethodnim poglavljima, mnogo literature koja prikazuje razvoj mjera kompleksnosti procesa se temelji na informacijskoj teoriji. Većina istražene literature otkriva određene spoznaje promatrajući sustav statično, što će biti pojašnjeno u nastavku. Također će biti prikazani primjeri kad se sustav promatra kroz izmjene njegovih stanja, što upućuje na dinamiku sustava te problemi s kojima se istraživači pritom susreću.

Park i Okudan [39] svoje istraživanje spomenuto u prethodnom poglavlju, vezano za razvoj mjera kompleksnosti proizvoda primjenjuju slično i na mjeru za kompleksnost procesa u familiji proizvoda, koju definiraju kao mjeru nesigurnosti ostvarenja sličnosti u proizvodnim procesima, kako bi se ostvarila proizvodnja familije proizvoda. Spomenuta definicija zapravo reflektira raznolikost procesa potrebnu da bi se proizvele sve zadane varijante proizvoda. Mjera statične kompleksnosti proizvodnje se dobiva putem ukupnog informacijskog sadržaja o raznolikosti procesa u svakoj pojedinoj varijanti:

$$MC_j = \sum_p I_{pj} = \sum_i (-\log_2 C_{pj}) \quad (3.9)$$

gdje je:

I_{pj} – informacijski sadržaj o raznolikosti procesa svake varijante proizvoda,

C_{pj} – vjerojatnost dijeljenja procesa p za proizvodnju varijante proizvoda j .

Vjerojatnost dijeljenja procesa je ustvari zajedničko pojavljivanje proizvoda u procesu, a računa se kao:

$$C_{pj} = \frac{n_{pj}}{n_j} \quad (3.10)$$

gdje je:

n_{pj} – broj varijanti dijelova u varijanti proizvoda j koji prolazi kroz proces p ,

n_j – je ukupan broj varijanti dijelova u varijanti proizvoda j .

Proizvodni proces koji je specijaliziran za izradu većeg broja varijanti proizvoda zahtijeva više informacija, kako bi se opisao proces, čime raste kompleksnost procesa proizvodnje.

Modrak i Soltysova, prema [55], su razvili mjeru operacijske kompleksnosti radi izbora optimuma među alternativama različitog rasporeda proizvodnih stanica (engl. *layout design*). Njihov pristup uzima u obzir broj strojeva, dijelova i operacija te je prema tome operacijska kompleksnost proizvodnih procesa:

$$PCI = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^O p_{ijk} \log_2 p_{ijk} \quad (3.11)$$

gdje je:

p_{ijk} – vjerojatnost da će dio j proći kroz operaciju k na stroju i prema slijedu rasporeda,

M – broj svih strojeva,

P – broj svih dijelova koje je potrebno proizvesti,

O – broj svih operacija za dijelove koje je potrebno proizvesti.

PCI mjera je osobito pogodna kod usporedbe dvaju ili više različitih tipova procesa.

ElMaraghy i ostali [49] su također usmjereni na strukturnu kompleksnost proizvodnog sustava koja potječe iz rasporeda radnih stanica, a temeljena je na teoriji grafova. S obzirom na stajalište da raspored radnih stanica oblikuje tokove materijala, ljudi i informacija, utječe značajno na troškove kroz dodjeljivanje dijelova različitim radnim stanicama na izradu, oni predlažu šest indeksa koji se naposljetku integriraju u sveukupni indeks kompleksnosti rasporeda. Tablica 3. prikazuje sve vrste indeksa te načine njihovog izračuna, dok formula (3.12) predstavlja sveukupni indeks kompleksnosti rasporeda:

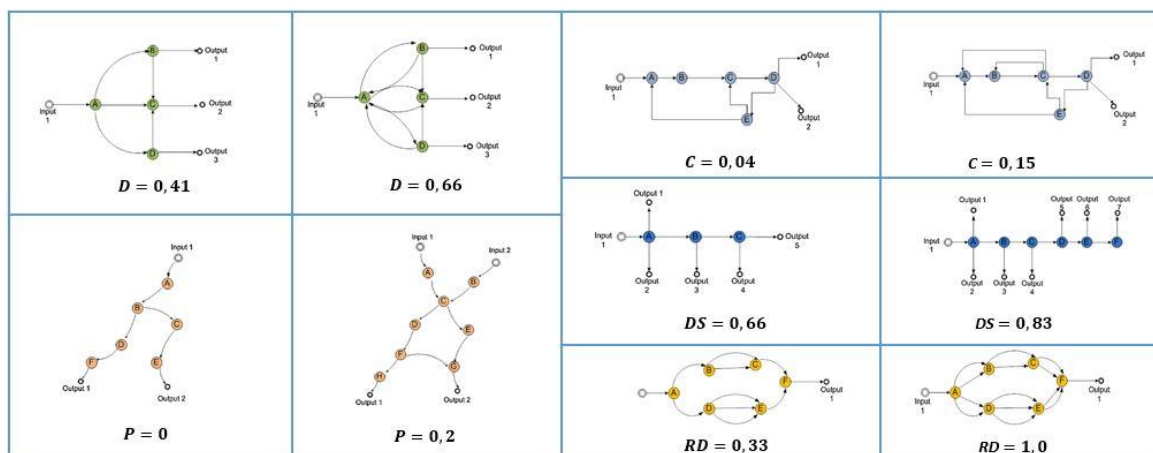
$$LCI = \left(\sum_{i=1}^n C_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n C_i^2 \quad (3.12)$$

gdje n predstavlja broj indeksa, dok je C_i vrijednost individualnog indeksa kompleksnosti, koji se računa prema Tablici 3.2.

Tablica 3.2. Indeksi za izračun kompleksnosti rasporeda u proizvodnji [49]

Vrsta indeksa	Formula za izračun	Značenja varijabli u formuli
Indeks gustoće	$D = \frac{k}{n(n-1)}$	k – stvaran broj poveznica čvorova u grafu n – broj čvorova u grafu
Indeks putanje	$Put = 1 - \frac{p}{MP}$	p – minimalni teoretski broj puteva MP – ukupan broj svih mogućih puteva
Indeks ciklusa	$CL = \frac{C}{MC}$	C – stvarni teoretski broj ciklusa MC – teoretski maksimalni broj ciklusa
Indeks točaka donošenja odluka	$DS = 1 - \frac{SP}{LP}$	SP – broj čvorova na najkraćem putu u grafu, što je minimalan broj točaka donošenja odluka LP – broj čvorova na najduljem putu u grafu, stvaran broj točaka donošenja odluka u jednom slijedu
Indeks distribucije poveznica	$RD = \frac{r}{a}$	r – broj mjesta na kojima se pojavljuje veći broj strelica u grafu (poveznica) a – je teoretski maksimum broja mjesta u grafu gdje postoji veći broj strelica
Indeks veličine poveznica	$RM = \frac{pr}{w}$	pr – ukupan broj paralelnih strelica na istom mjestu w – je teoretski maksimum broja strelica u grafu koje se mogu pojaviti na istom mjestu

Kako bi se dobili izračuni u različitim primjerima proizvodnje, ElMaraghy i ostali koriste algoritme koji pronalaze određene vrijednosti varijabli potrebnih za izračun određene vrste indeksa. Ulazni parametri za bilo koji od algoritama koji se koristi je matrica susjedstva za određenu vrstu proizvodnje. Slika 3.9. prikazuje primjere primjene indeksa navedenih u Tablici 3.2. na različitim grafovima kojima se opisuje raspored radnih stanica u proizvodnji.



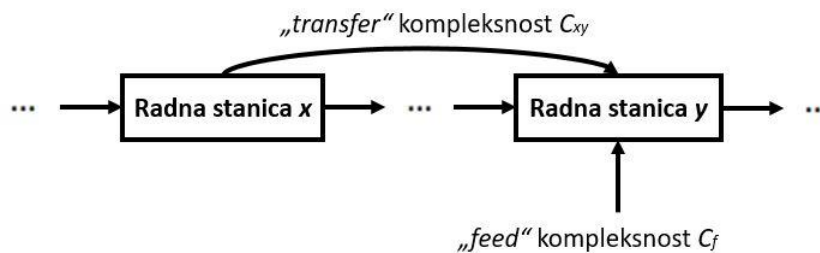
Slika 3.9. Razlike u primjeni indeksa kompleksnosti rasporeda [49]

Zhu [37] daje model za promatranje kompleksnosti radne stanice na linijama za montažu različitih varijanti proizvoda preko izbora ispravne procedure montaže za određenu vrstu proizvoda, uz ispravan izbor dijelova, steznih naprava i alata. Kompleksnost definira putem

indeksa kompleksnosti izbora, indeksa OCC (engl. *Operator Choice Complexity - OCC*). Kompleksnost izbora opisuje funkcijom $H(x)$:

$$H(p_1, p_2, \dots, p_M) = - \sum_{m=1}^M p_m \log_2 p_m \quad (3.13)$$

gdje je p_m vjerojatnost ishoda određenog događaja koja je definirana operaterovim izborom. Širenje kompleksnosti unutar sustava montaže opisuje kroz dvije vrste kompleksnosti koje se javljaju na stanici y . Prva je „*feed*“ kompleksnost koja se veže za kompleksnost izbora na određenoj stanici uslijed javljanja različitih proizvoda na istoj radnoj stanici, dok je druga „*transfer*“ kompleksnost uzrokovana značajkama varijanti proizvoda čija montaža se odvija na prethodnoj radnoj stanici x , Slika 3.10.



Slika 3.10. Širenje kompleksnosti od jedne radne stanice do druge [37]

Ukupna kompleksnost na radnoj stanici zbraja „*feed*“ kompleksnost na radnoj stanici te „*transfer*“ kompleksnost svih radnih stanica koje prethode:

$$C_{ws} = C_f + \sum_{\forall i:i < j} C_{xy} \quad (3.14)$$

gdje je C_f „*feed*“ kompleksnost na radnoj stanici, a C_{xy} „*transfer*“ kompleksnost sa x radne stanice prema y radnoj stanici.

3.4. Prednosti i nedostaci mjera za kompleksnost proizvoda i procesa montaže

3.4.1. Prednosti mjera za kompleksnost proizvoda i procesa montaže

Istražena literatura daje brojne različite poglede na kompleksnost, što doprinosi boljem razumijevanju problema u proizvodnji. Pregled literature pokazuje široku primjenu informacijske teorije kod razvoja mjera kompleksnosti bilo proizvoda ili procesa. Radi se o kvantifikaciji kompleksnosti koja se može povezati s potencijalnim problemima procesa koji mora montirati ili proizvesti zadani proizvod, a tim više ukoliko se radi o više različitih proizvoda istovremeno. Može se reći da u fazama pripreme proizvodnje ili pripreme montaže, mjere kompleksnosti imaju izniman doprinos u otvaranju brojnih pitanja o sličnosti dijelova proizvoda, kreiranju familije proizvoda, izboru alata i pribora, operaterovom opterećenju, vremenu trajanja rada te mogućim problemima pri radu. Sve navedene stavke su visoko na

ljestvici čimbenika koji imaju veliki udio u utjecaju na procese montaže (na kojoj je bio naglasak u ovom radu), dok isto vrijedi i za procese proizvodnje. Danas su visoki zahtjevi za fleksibilnošću proizvodnje, čijoj procjeni može pomoći kvantificiranje kompleksnosti i proizvoda i procesa.

3.4.2. Nedostaci mjera za kompleksnost proizvoda i procesa montaže

Ovisno kako se razvije mjera, pomoću koje teorije i kako se definiraju varijable¹ te mjere, a posebno kad je riječ o procesu, istraživanja proizvodnje iz statične perspektive kompleksnosti ne doprinose direktno razumijevanju proizvodnog sustava te se većinom ne povezuju sa performansama sustava, premda postoji literatura u kojoj se mogu naći pokušaji povezivanja. U literaturi nedostaje poveznica statičnog s dinamičnim dijelom, kako bi se opisala kompleksnost samog procesa, što ipak može rezultirati direktnim uvidom u performanse proizvodnog sustava, primjerice olakšavajući otkrivanje zastoja u proizvodnji i drugih potencijalnih problema. Također povezivanjem statičnog i dinamičnog dijela moguće je vršiti usporedbe kompleksnosti sustava u različitim vremenskim razmacima, u ovisnosti o vrstama proizvoda. Možda kao najveći nedostatak primjene teorije informacija u određivanju kompleksnosti proizvoda ili procesa se može istaknuti u situacijama kada se komponenta mjere zasniva na vjerojatnosti pojavljivanja određenog događaja, što u većini stvarnih slučajeva nije jednostavno za odrediti. Također, u literaturi se javlja pretpostavka da su varijable međusobno neovisne, što nije slučaj u stvarnosti. Trenutno se može reći da postoji nedostatak što veliki broj istraživača koristi numeričke primjere da bi pokazali na koji način funkcioniraju njihovi pristupi, što doprinosi boljem razumijevanju tematike, ali razmišljajući o potencijalnoj primjeni na stvarnim primjerima vidljivo je kako u određenoj fazi nije moguće pokazati pristup na stvarnom primjeru, čak ni uz određene pretpostavke jer nedostaje velik broj podataka, koje nije jednostavno prikupiti unutar promatranog sustava [74, 16]. Često su podaci iz numeričkih primjera iz određenog članka preuzeti iz nekog od prethodno objavljenih radova, kako bi se pokazala primjena [75].

¹ Svaki promatrani problem posjeduje specifičan skup varijabli, koje predstavljaju ulazne veličine tog problema. U ovom slučaju je potrebno odrediti njihove optimalne vrijednosti.

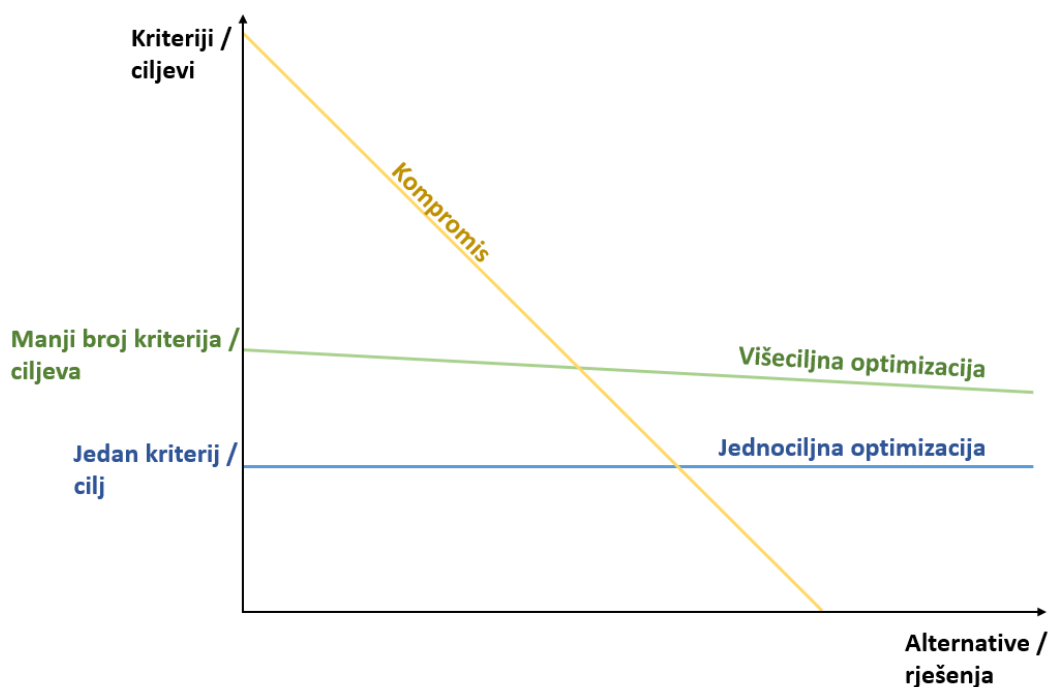
4. POTPORA DONOŠENJU ODLUKA KOD PROCESA MONTAŽE

Istraživanjem sve složenijih odnosa među čimbenicima koji utječu na proces montaže, nastoji se što bolje iskoristiti dohvatljive informacije, a sve u cilju analize radi potpore pri odlučivanju. Svemu navedenom značajno doprinosi brzi razvoj tehnologija i pojava novih trendova spomenutih u poglavlju 3.1. Paralelno razvoju tehnologija, razvijaju se i metode optimiranja, gdje se optimiranje može definirati kao postupak kojim se pri projektiranju ili planiranju, bilo u ekonomskim ili tehničkim znanostima, određuje najbolji mogući izbor ekonomskih i/ili tehničkih veličina na temelju prethodno određenih kriterija [76]. S obzirom na dostupne programske alate, važno je spomenuti da gospodarski subjekti primjenjuju ERP sustav kako bi pratili poslovanje te ostvarili optimalan rad unutar svog sustava. Ipak, njihov cilj nije blizu jer nailaze na brojne prepreke kod korištenja podataka iz gomile podataka koja se prikuplja ERP sustav. Izvještaji koji su im trenutno dostupni samo djelomično ispunjavaju njihova očekivanja glede pomoći pri donošenju odluka. Jedan od razloga je što su složeni odnosi među podacima te se javljaju brojni složeni sustavi za pohranu informacija, od kojih većina nema odgovarajuće programske podrške koje su kompatibilne s ERP sustavima. Potaknuta između ostalog i navedenim problemima, dio znanosti koji proučava podatke (engl. *data science*) pokazuje iznimno brz rast i razvoj. Osim dubinske analize podataka (engl. *data mining*) razvija se i dubinska analiza procesa (engl. *process mining*). Neovisno radi li se o velikoj količini podataka (engl. *big data*) ili manjoj, ključ je da su podaci esencijalni za ljude i organizacije te njihova važnost može samo nastaviti rasti i dalje. Dubinska analiza procesa želi premostiti jaz između tradicionalnih modela za analizu procesa, poput simulacije i drugih poslovnih tehnika za upravljanje procesima, i centralnih tehnika analize podataka, poput strojnog učenja (engl. *machine learning*) te dubinske analize podataka [77]. Spoj tehnika prikupljanja dohvatljivih podataka i metoda za njihovu analizu može dati odgovarajuće rezultate analize koji korisnicima pružaju odgovor na pitanja o kratkoročnim ili dugoročnim smjerovima djelovanja u konkretnim područjima njihovog interesa. Smjerovi djelovanja mogu biti na tri razine, strateškoj, taktičkoj i operativnoj, što odgovara i vremenskim intervalima dugoročno, srednjoročno te kratkoročno. Za vrste optimiranja koje se odnose i na spomenute probleme montaže, koji su поблиže definirani poglavljem 3.3.1., optimizacijski postupci ili metode primjenjive na tu strukturu problema će biti prikazani u nastavku.

4.1. Općenito o metodama za potporu donošenja odluka

U području operacijskih istraživanja, razvijajući matematičke alate za potporu subjektivnoj evaluaciji određenih kriterija donositelja odluke, znanstvenici kreiraju disciplinu koja se odnosi na metode višekriterijskog odlučivanja (engl. *Multi Criteria Decision Making methods - MCDM*). MCDM je disciplina koja spaja matematiku, menadžment, informatiku, psihologiju, sociologiju i ekonomiju kao znanstvena područja. Donositelj odluke, neovisno u kojem se području nalazio, ima svoj osobni proces donošenja odluke, tijekom kojeg se suočava s velikim brojem kriterija pri čemu mu MCDM može pomoći u potrazi za odgovarajućim rješenjem [78]. S obzirom da ne postoji „idealno“ rješenje, potražnja se usmjerava ka kompromisu. Dolazak do kompromisa koristeći bilo koju od MCDM metoda, što uključuju numeričku analizu alternativa, odvija se u tri koraka [79], utvrđivanje relevantnih kriterija i alternativa, pridruživanje numeričkih vrijednosti relativnim važnostima kriterija i utjecajima alternativa na kriterije te obrada numeričkih vrijednosti radi rangiranja alternativa. Optimizacijski problemi imaju jedan

ili više kriterija po kojima se ocjenjuju pojedina rješenja. U literaturi se kriteriji pojavljuju u obliku matematičkih funkcija koje se nazivaju i funkcije cilja definirane za skup ulaznih varijabli tog cilja. Ako se razmatra problem s jednim kriterijem, cilj koji se želi postići optimiranjem je dobivanje takvih vrijednosti varijabli, za koje će vrijednost funkcije cilja biti maksimalna ili minimalna, ovisno što je zadano. Dok je kod problema s većim brojem kriterija cilj ostvariti optimalne vrijednosti svih zadanih funkcija cilja, što zapravo predstavlja Pareto optimum ili kako se još naziva u literaturi Pareto skup. Prema [80], ako ne postoji rješenje koje je strogo bolje po jednom kriteriju, a da istovremeno jednako dobro po svim ostalim kriterijima, onda je ono Pareto optimalno. Glavne stavke višekriterijskog (višeatributivnog, višeciljnog) odlučivanja su određeni broj alternativa koje predstavljaju skup alternativa A , određeni broj kriterija koji predstavljaju skup kriterija G , vrijednosti (atributi) alternativa za svaki od kriterija koji predstavljaju skup vrijednosti F [81]. Među pojmovima višekriterijska i višeciljna optimizacija nema značajnijih razlika u značenju, međutim višekriterijska (engl. *Multi-Criteria*) se češće vezuje uz metode za višekriterijsko odlučivanje s konačnim i uglavnom manjim brojem alternativa, dok se višeciljna (engl. *Multi-Objective*) češće vezuje za višeciljnu optimizaciju s velikim brojem alternativa koji ponekad teži i beskonačnosti [82]. Svakako u oba slučaja je riječ o pronalaženju alternative koja predstavlja najbolji kompromis među više suprotstavljenih ciljeva ili kriterija. Slika 4.1. ilustrira područja koja zahvaća jednociljna i višeciljna optimizacija ukoliko promatramo broj kriterija/ciljeva te broj alternativa/rješenja, gdje se kod jednociljne optimizacije pojavljuje beskonačno mnogo rješenja, kod višeciljne optimizacije isto mnogo rješenja, dok je najprihvatljivije možda imati mogućnost uključivanja većeg broja kriterija/ciljeva, a pritom dobiti konačan broj alternativa/rješenja, koji će biti prihvatljiv za donošenje odluke, čemu u konačnici služi optimizacija u ovom slučaju.



Slika 4.1. Djelovanje vrste optimizacije i kompromis u odnosu na kriterije/ciljeve, alternative/rješenja

Tri su moguća pristupa rješavanja višeciljnog optimizacijskog problema [83]:

- „A priori“ pristup – preferencije donositelja odluke su poznate prije optimizacije.
- „A posteriori“ pristup – optimizacijski proces rezultira skupom Pareto optimalnih rješenja iz kojeg donositelj odluke odabire jedno rješenje kao optimum.
- „Interaktivni“ pristup – gdje postoji određena interakcija između optimizacijskog procesa i donositelja odluke, koji svoje preferencije definira na temelju informacija dobivenih tijekom optimizacijskog procesa.

Donošenje odluka, gdje se koristi neka od MCDM metoda se može podijeliti na četiri tipa [84]:

- Problem izbora, gdje se traži jedinstvena alternativa/rješenje ili redukcija na grupu alternativa/rješenja.
- Problem sortiranja, gdje su moguće alternative/rješenja sortirane i posložene u predefiniranim grupama, koje se kasnije ponovo grupiraju prema primjerice sličnom ponašanju, karakteristikama, organizacijskim razlozima i slično.
- Problem rangiranja, gdje se alternative/rješenja poredaju od najboljeg prema najlošijem.
- Problem opisa, gdje je cilj opisati opcije i njihove moguće posljedice.

Najviše zastupljene među MCDM metodama prikazane su Tablicom 4.1., gdje su poredani ovisno o tipu izbora gdje se koriste, dok tip odluke nije ograničenje primjene određenih metoda.

Tablica 4.1. MCDA metode i tipovi odluka, pregledano iz [78]

MCDA metoda / Vrsta problema	Problem izbora	Problem sortiranja	Problem rangiranja	Problem opisa
Analitički hijerarhijski proces odlučivanja - AHP	✓		✓	
Analitički hijerarhijski proces odlučivanja za sortiranje - AHPSort		✓		
Analitički mrežni proces - ANP	✓		✓	
Tok sortiranja (engl. FlowSort)		✓		
Višeatributna teorija korisnosti - MAUT	✓		✓	
Mjerenje privlačnosti na temelju evaluacije kategorija - MACBETH	✓		✓	
PROMETHEE	✓		✓	
Gaia				✓
FS – Gaia (engl. FlowSort - Gaia)				✓
ELECTRE I	✓			
ELECTRE III	✓		✓	
ELECTRE - Tri		✓		
TOPSIS	✓		✓	
Goal Programming	✓			
DEA – analiza podataka	✓		✓	
Multi metode koje podržavaju različite MCDA metode	✓	✓	✓	✓

4.2. Grafički prikazi korišteni kod montaže

Grafički prikazi su vrlo prikladni za vizualizaciju promatranog sustava kada u sustavu postoji mnogo komponenti koje ga sačinjavaju te njihovih međuveza. Kod vizualizacije montažnih sustava, najčešće se koriste prikazi temeljeni na teoriji grafova. Prema teoriji grafova [85], graf je uređeni par $G(V, E)$, gdje je $V = V(G)$ skup vrhova (engl. *vertex, nodes*), a $E = E(G)$ skup bridova (engl. *edge*) disjunkt s V , a svaki brid $e \in E$ spaja dva vrha u $v \in V$, koji se zovu krajevi od e . Usmjereni graf ili digraf (engl. *directed graph* ili *digraph*) D je usmjereni graf D u kojem svaki brid ima smjer od početka prema kraju. D se zove još i orijentacija od G i piše se $D = \vec{G}$. Brid s početkom u , a krajem v je uređeni par (u, v) i ponekad se piše $u \rightarrow v$. Na prikazima se stavlja strelica koja pokazuje od u prema v . Prema domeni korištenja Tablica 4.2. daje pregled određenih grafičkih prikaza, napravljena prema [72, 86].

Tablica 4.2. Grafički prikazi korišteni za prikaz montaže

Vrsta prikaza	Domena upotrebe	Način prikaza
„Scenograph“	Predstavljanje hijerarhije dizajna proizvoda	Vrhovi – dijelovi, podsklopovi, konačni proizvodi Bridovi – veze među dijelovima
Hijerarhijski strukturni model		
Hijerarhijski graf poveznica		
Model poveznica	Predstavljanje veza među dijelovima u proizvodu i njihovih značajki	Vrhovi – dijelovi i njihove značajke Bridovi – veze među dijelovima
Graf poveznica		
Graf prethodnosti	Svi mogući prikazi slijeda montaže	Vrhovi – dijelovi za montažu Bridovi – poveznice među dijelovima
„AND/OR“ graf		
Stablo dijelova		
Dijagram veza	Specifičan prikaz montaže s obzirom na povezanost među dijelovima	Vrhovi – dijelovi za montažu Bridovi – odnosi među dijelovima
Petrijeve mreže	Ponašanje procesa predstavljenih kao diskretni događaji	Vrhovi – radne stanice, podsustavi, zadaci, resursi (više vrsta vrhova) Bridovi – poveznice vrhova
Gantogrami	Planiranje vremena, rasporeda	Vrhovi – zadaci predstavljeni pravokutnikom i trajanjem Bridovi – poveznice zadataka

Osim navedenih načina prikaza montaže, mogu se upotrijebiti i tehnike mrežnog planiranja koje služe za planiranje, koordinaciju i kontrolu složenih projekata te pružaju podršku odlučivanju pri upravljanju [87]. Te tehnike se također temelje na činjenici da se svaki projekt može prikazati u obliku mrežnog dijagrama koji potječe iz teorije grafova, dok se u ovom slučaju montaža određenog sklopa može promatrati kao projekt. Najpoznatije su:

- Metoda kritičnog puta (engl. *Critical Path Method - CPM*),
- Metoda procjene i analize projekta (engl. *Project Evaluation and Review Technique - PERT*) te

- Precedence metoda (engl. *Precedence Diagram Method*).

Često se uslijed izrade grafova za prikaz montažnog procesa ili samo hijerarhije dizajna proizvoda upotrebljavaju i matični prikazi veza među njima, no matrice mogu biti prevelike i nezgodno ih je intuitivno čitati.

5. OTVORENI PROBLEMI I BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

5.1. Kritički osvrt na izazove otvorenih problema

Razvoj prikazanih teorija u ovom radu evoluirala i dalje, uključujući tako nove tehnologije. U konačnici je cilj dobiti sustave koji su sposobni samostalno kontrolirati stanje, vršiti pritom korekcije (engl. *self-adaptive collaboration systems*) i ostvarivati optimalne iznose ključnih indikatora uspješnosti u proizvodno-logističkim sustavima [88]. Mjere kompleksnosti su razvijane u smjeru kompleksnosti proizvoda ili proizvodnje, dok nije dovoljno pažnje posvećeno poveznici kompleksnosti proizvoda i njegovog utjecaja na proizvodnju te rezultate proizvodnje [39]. Iako se utjecaj kompleksnosti na performanse proizvodnje percipira kao negativan još uvijek je u literaturi nedorečeno koliko uistinu kompleksnost ima negativan utjecaj, a koliko pozitivan i gdje je odgovarajuća granica. Većina mjera spomenutih ovim radom je formirana za određenu svrhu, a potrebno je njihovo povezivanje posebno u kontekstu istraživanja montažnih sustava [22]. Određeni pristupi u istraživanju kombiniraju teoriju kompleksnosti sa teorijom grafova, ali pritom su zatvoreni u uskim okvirima primjerice istražujući kompleksnost proizvoda, dok istovremeno ističu potrebu za proširenjem istraživanja na procese montaže i optimiranja njihovih parametara [64]. Ghandi [72] ističe u svom pregledu problema montaže nedostatak snažnih alata koji mogu pomoći u rješavanju problema planiranja montaže ili demontaže. Kao što je ranije spomenuto u poglavlju o nedostacima mjera za kompleksnost proizvoda ili procesa, važna je primjena razvijenih teorija na stvarnim primjerima u praksi. Ovo je posebno važno kad je riječ o operacijskim istraživanjima te naporu da se razvijena teorija primijeni za rješavanje istih problema u različitim vrstama industrija.

5.2. Buduća istraživanja

Prema prikazanom pregledu literature kroz cijeli rad i prethodnom kritičkom osvrtu na navedenu literaturu, potreba za budućim istraživanjima se može istaknuti u nekoliko idućih točaka s pripadajućim smjernicama:

- Određivanje načina povezivanja teorije kompleksnosti proizvoda te njegovog utjecaja na kompleksnost montaže različitih proizvoda, koji se odražava na performanse sustava. Navedeno može biti učinjeno hibridnim pristupom, odnosno kombinacijom određenih teorija iz pregledane literature s naglaskom na otkrivanje međusobnih utjecaja komponenti promatranog sustava, kako bi se kontrolirali utjecaji na performanse.
- Definiranje odgovarajućeg načina za vizualizaciju komponenti sustava, njegovih poveznica, međusobnih utjecaja te raspoloživog vremena rada. Način vizualizacije treba biti primjenjiv na bilo koji sustav montaže, neovisno o kojem proizvodu se radi.
- Nakon vizualizacije uslijedit će istraživanje najboljeg načina određivanja odgovarajućih prethodno definiranih parametara rada sustava, što može uključivati neku od MCDA metoda ili njenu modifikaciju. Pritom valja voditi računa i o lean metodologiji te njenim načelima.
- Kreiranje smjernica za izradu softverskog rješenja, koje bi uz pomoć novih tehnologija, bilo u stanju prikupljati podatke iz ERP i drugih sustava te ih koristiti za izradu izvještaja koji će u stvarnom vremenu biti potpora donositelju odluke.

Mourtzis [13] u svom radu ističe pitanje odabira strategije rada te kreiranja novih poslovnih modela. Buduća istraživanja će biti usmjerena na visoko fleksibilne sustave, koji proizvode kompleksne proizvode te djeluju na vrlo promjenjivom tržištu, područje A na Slici 2.2. Za takvu vrstu sustava, cilj je dati fleksibilan okvir za planiranje i organizaciju montaže. U literaturi su trenutno proučavani zasebni problemi u montaži, koji mogu odgovarati određenoj proizvodnji, ali s obzirom na trenutni razvoj industrije i novih tehnologija koje se primjenjuju nije dovoljan fokus na zasebne probleme. Sve su veći zahtjevi za montažom raznolikih dijelova, gdje je imperativ imati što prilagodljiviji sustav, a kao potpora tom sustavu bi bila korisna metoda koja je u mogućnosti generirati rješenja koja bi dala optimalan rad montaže prema zadanim ulaznim podacima ukoliko se radi o seriji proizvoda ili pak pojedinačnoj montaži sličnih ili potpuno različitih proizvoda. Pritom će u obzir biti uzeti pokretači kompleksnosti u takvim sustavima poput tehnologije koja se koristi, rasporeda radnih stanica, zaposlenika, broja različitih dijelova te varijanti konačnih proizvoda koji iz njih nastaju i raspoloživog radnog vremena.

6. ZAKLJUČAK

Predstavljeni pregled literature u ovom radu jasno pokazuje napore istraživača da opišu kompleksnost koja se javlja u proizvodnim sustavima. Kompleksnost se svojom univerzalnošću javlja u različitim područjima ljudskog djelovanja, stoga je potrebna njena jasna definicija u području proučavanja. Neophodno je definirati i što se tim proučavanjem želi postići. Kompleksnost proizvoda ili proizvodnog sustava kao samostalna informacija ne doprinosi boljem razumijevanju proizvodnog sustava, njoj je potrebno pridodati povezivanje s konkretnim problemima unutar sustava. Kompleksnost je jedna od vrlo izazovnih intelektualnih, znanstvenih i tehnoloških tema, posebno u stoljeću vrlo brzog razvoja i primjene nove tehnologije.

Razvoj prikladnih metoda za kvantificiranje kompleksnosti je od primarnog značaja radi aktivnog upravljanja kompleksnošću. Pritom se ističe potreba za uzimanjem u obzir cijelog proizvodnog sustava, a ne samo proizvoda jer kompleksniji proizvod zahtijeva kompleksnije sustave za potporu prilikom njegove realizacije u proizvodnji. Kao što je prikazano u radu, kompleksnost ima brojne prednosti koje donosi proizvodnim sustavima, ali i trenutke u kojima sustav postaje ranjiv zbog nemogućnosti kontrole novonastalih situacija uzrokovanih prekomjernom kompleksnošću bilo proizvoda ili cijelog sustava. Cilj nije nužno redukcija kompleksnosti što je više moguće, već pronalazak optimalne razine kompleksnosti koja uzima u obzir prednosti kao i dodatne napore generirane uslijed njenog povećanja u bilo kojem dijelu.

Istraživanje kompleksnosti prouzrokovane uslijed povećanja broja varijanti proizvoda se može podijeliti na tri smjera u literaturi: upravljanje kompleksnošću, upravljanje varijantama proizvoda i procesa te donošenje odluka u procesu proizvodnje. Stoga će se buduća istraživanja baviti integracijom ovih triju smjerova, s ciljem kreiranja holističkog pristupa. Zamršene veze među elementima sustava, zajedno sa stohastičkom prirodom sustava, čine matematičko modeliranje proizvodnih ili montažnih sustava poprilično izazovnim, a pritom se potreba za razvijanjem povezanosti između performansi proizvodnog sustava i mjera kompleksnosti ističe kao glavna smjernica budućih istraživanja. Činjenica da se ni u znanstvenoj literaturi ne nalazi dovoljno primjena razvijenih mjera upravljanja kompleksnošću na stvarnim primjerima u industriji je razlog više da se u tom dijelu napravi novi doprinos.

LITERATURA

- [1] G. Schroeder, *Operations management*, New York: McGraw-Hill/Irwin, 2004.
- [2] E. Abele i G. Reinhart, »Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen,« Hanser, Munchen, 2011.
- [3] »Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland,« [Mrežno]. Available: https://www.bmbf.de/pub_hts/HTS_Broschure_Web.pdf. [Pokušaj pristupa 20.12. prosinac 2017].
- [4] D. Mourtzis, »Challenges and future perspectives for the life cycle of manufacturing networks in the mass customisation era,« *Logistics Research*, pp. 9(1), 2., 2016.
- [5] S. Hu, J. Ko, L. Weyand, H. ElMaraghy, T. Lien, Y. Koren, H. Bley, G. Chryssolouris, N. Nasr i M. Shipitalni, »Assembly system design and operations for product variety,« *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, pp. 1-19, 2011.
- [6] T. Ohno, *Toyota production system: beyond large-scale production*, crc Press., 1988.
- [7] J. Womack i D. Jones, *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation*, New York: Free Press., 2003.
- [8] »International Organization for Standardization,« [Mrežno]. Available: <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/en/iso9001-2015-process-appr.pdf>.
- [9] G. Probst i H. Ulrich, *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln.*, Bern: Haupt, 1988.
- [10] K. Bleicher, *Das Konzept Integriertes Management*, Frankfurt: New York: Camous Verlag, 1996.
- [11] Y. Koren, *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*, New York: John Wiley and Sons, 2010.
- [12] S. Badrous, *Complexity of products and their assembly systems*, doctoral dissertation, 2011.
- [13] D. Mourtzis i M. Doukas, »Design and planning of manufacturing networks for mass customization and personalization: Challenges and Outlook,« *Procedia CIRP - Robust Manufacturing Conference*, svez. 19, pp. 1-13, 2014.
- [14] H. Torbjorn, *Company specific production systems: Managing production improvement in global firms*, doctoral dissertation, 2013.
- [15] B. Brinzer, A. Banerjee i M. Haut, »Complexity Thinking and Cyber-Physical Systems,« *International Journal of Industrial Engineering*, svez. 4(1), pp. 14-20, 2017.

- [16] V. Modrak i Z. Soltysova, »Development of operational complexity measure for selection of optimal layout design alternative,« *International Journal of Production Research*, pp. 1-16, 2018.
- [17] C. Danne, Assessing the cost of assortment complexity in consumer goods supply chains by reconfiguration of inventory and production planning parameters in response to assortment changes, doctoral dissertation, 2009.
- [18] H. ElMaraghy, O. Kuzgunkaya i R. Urbanic, »Manufacturing systems configuration complexity,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 54(1), pp. 445-450, 2005.
- [19] C. Bliss, Management von Komplexität: ein integrierter, systemtheoretischer Ansatz zur Komplexitätsreduktion, Wiesbaden: Gabler, 2000.
- [20] S. Serdarasan, »A review of supply chain complexity drivers,« *Computers and Industrial Engineering*, svez. 66, p. 533–540, 2013.
- [21] W. Vogel i R. Lasch, »Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review.,« *Logistics Research*, svez. 9.1, pp. 1-66, 2016.
- [22] K. Efthymiou, D. Mourtzis, A. Pagoropoulos, N. Papakostas i G. Chryssolouris, »Manufacturing systems complexity analysis methods review,« *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 1025-1044, 2016.
- [23] C. Shannon, »A mathematical theory of communication,« *Bell system technical journal*, svez. 27(3), pp. 379-423, 1948.
- [24] G. Frizelle i Y. Suhov, »The measurement of complexity in production and other commercial systems,« *roceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Sves. %1 od %2Vol. 464, No. 2098, pp. 2649-2668, 2008.
- [25] G. Chryssolouris, K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis i A. Pagoropoulos, »Flexibility and complexity: is it a trade-off?,« *International Journal of Production Researc*, pp. 6788-6802, 2013.
- [26] S. Kellert, In the wake of chaos, Chicago: The University of Chicago Press., 1993.
- [27] A. Deshmukh, J. Talavage i M. Barash, »Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of,« *IIE Transactions*, svez. 30, pp. 645-655, 1998.
- [28] A. Amann, K. Peters, U. Parlitz, A. Wacker i E. Scholl, »A hybrid model for chaotic front dynamics: from semiconductors to water tanks,« *Physical review letters*, svez. 91(6), 2003.
- [29] N. Suh, Complexity: Theory and applications, Oxford: University Press., 2005.
- [30] T. Lee, Complexity Theory in Axiomatic Design, doctoral dissertation, 2003.

- [31] N. Papakostas, K. Efthymiou, D. Mourtzis i G. Chryssolouris, »Modelling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamic approaches,« *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, pp. 437-440, 2009.
- [32] L. Huaccho Huatuco, J. Efstathiou, A. Calinescu, S. Sivadasan i S. Kariuki, »Comparing the impact of different rescheduling strategies on the entropic related complexity of manufacturing systems,« *International Journal of Production Research*, pp. 4305-4325, 2009.
- [33] S. Cho, R. Alamoudi i S. Asfour, »Interaction-based complexity measure of manufacturing systems using information entropy,« *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 909-922, 2009.
- [34] K. Efthymiou, A. Pagoropoulos, N. Papakostas, D. Mourtzis i G. Chryssolouris, »Manufacturing systems complexity: an assessment of manufacturing performance indicators unpredictability,« *CIRP Journal of manufacturing science and technology*, Sves. %1 od %2Vol. 7, No. 4, pp. 324-334, 2014.
- [35] J. Smart, A. Calinescu i L. Huaccho Huatuco, »Extending the information-theoretic measures of the dynamic complexity of manufacturing systems,« *International Journal of Production Research*, pp. 362-379, 2013.
- [36] D. Mourtzis, M. Doukas i F. Psarommatis, »Design and operation of manufacturing networks for mass customisation,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 62(1), pp. 467-470, 2013.
- [37] X. Zhu, Modeling Product Variety Induced Manufacturing, doctoral dissertation, 2009.
- [38] H. Wang, X. Zhu, S. Hu, Z. Lin i G. Chen, »Product family design to minimize manufacturing complexity in mixed-model assembly systems,« *Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering conference*, pp. 1-10, 2009.
- [39] K. Park i G. Okudan Kremer, »Assessment of static complexity in design and manufactruing of a product family and its impact on manufacturing performance,« *International Journal of Production Economics*, pp. 215-232, 2015.
- [40] S. Mattson, P. Gullander i A. Davidsson, »Method for measuring production complexity,« *28th International Manufacturing Conference*, 2011.
- [41] P. Gullander, S. Mattsson, F. Tommy, H. Langeghem, L. Zeltzer, V. Limere i J. Stahre, »Comparing two methods to measure assembly complexity from an operator perspective,« *In Swedish Production Symposium (SPS12)*, 2012.
- [42] S. Mattsson, M. Karlsson, A. Fast-Berglund i I. Hansson, »Managing production complexity by empowering workers: six cases,« *Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing*, svez. Vol. 17, pp. 212-217, 2014.

- [43] S. Mattsson, M. Tarrar i A. Fast-Berglund, »Percieved production complexity-understanding more than parts of a system,« *International Journal of Production Research*, svez. 54, br. 20, pp. 6008-6016, 2016.
- [44] B. Alkan, D. Vera, M. Ahmad, B. Ahmad i R. Harrison, »A model for complexity assessment in manual assembly operations through predetermined motion time systems,« *6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, svez. 44, pp. 429-434, 2016.
- [45] B. Alkan, D. Vera, M. Ahmand, B. Ahmad i R. Harrison, »Design evaluation of automated manufacturing processes based on complexity of control logic,« *26th CIRP Design conference*, svez. 50, pp. 141-146, 2016.
- [46] L. Zeltzer, A. El-Houssaine i V. Limere, »Workload balancing and manufacturing complexity leveling in mixed-model assembly lines,« *International Journal of Production Research*, pp. 2829-2844, 2017.
- [47] K. Jenab i D. Liu, »A graph-based model for manufacturing,« *International Journal of Production*, pp. 3383-3392, 2010.
- [48] V. Espinoza, H. ElMaraghy, T. AlGeddaway i S. Samy, »Assessing the structural complexity of manufacturing systems layout,« *Proceedings of the 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, pp. 65-70, 2012.
- [49] H. ElMaraghy, T. AlGeddawy, S. Samy i V. Espinoza, »A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems,« *Journal of Manufacturing Systems*, svez. 33, pp. 51-64, 2014.
- [50] S. Samy i H. ElMaraghy, »A model for measuring complexity of automated and hybrid assembly systems,« *International Journal of Asvanced Manufacturing Technology*, pp. 813-833, 2012.
- [51] S. Samy, T. Algeddawy i H. ElMaraghy, »A granularity model for balancing the structural complexity of manufacturing systems equipment and layout,« *Journal of Manufacturing Systems*, svez. Vol. 36, pp. 7-19, 2015.
- [52] H. Liu, K. Xu i Z. Pan, »Modeling and application of mixed model assembly system complexity introduced by auto-body personalization,« *International Journal of Avanced Manufacturing Technology*, 2015.
- [53] A. Abad, Modeling and analysis of process complexity and performance in mixed model assembly systems, doctoral thesis, 2010.
- [54] V. Modrak i S. Berdnar, »Using Axiomatic Design and Entropy to Measure Complexity in Mass Customization,« *9th International Conference on Axiomatic Design*, svez. 34, pp. 87-92, 2015.
- [55] V. Modrak i Z. Soltysova, »Novel Complexity Indicator of Manufacturing Process Chains and Its Relations to Indirect Complexity Indicators,« *Hindawi Complexity*, pp. 1-15, 2017.

- [56] F. Schoettl, M. Paefgen i U. Lindemann, »Approach for measuring change-induced complexity based on the production architecture,« *Proceedings of the 4th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, pp. 1-6, 2014.
- [57] K. Windt, T. Philipp i F. Bose, »Complexity cube for the characterization of complex production systems,« *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, svez. 21(2), pp. 195-200, 2008.
- [58] H. Schleich, J. Schaffer i L. Scavarda, »Managing complexity in automotive production,« *19th International Conference on Production Research*, svez. 100, 2007.
- [59] P. Tsarouchi, S. Markis i G. Chryssolouris, »Human–robot interaction review and challenges,« *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, svez. 29:8, pp. 916-931, 2016.
- [60] S. Robla-Gomez, V. Becerra, J. Llata, E. Gonzalez-Sarabia, C. Torre-Ferrero i J. Perez-Oria, »Working Together: A Review on Safe,« *IEEE Access*, Sves. %1 od %2, 5., pp. 26754-26773., 2017.
- [61] X. Wang, S. Ong i A. Nee, »A comprehensive survey of augmented reality assembly research,« *Advances in Manufacturing*, svez. 4, br. 1, pp. 1-22, 2016.
- [62] A. Nee, S. Ong, G. Chryssolouris i D. Mourtzis, »Augmented reality applications in design and manufacturing,« *CIRP annals*, svez. 61, br. 2, pp. 657-679, 2012.
- [63] R. Anderl, »Industrie 4.0-advanced engineering of smart products and smart production,« *In Proceedings of International Seminar on High Technology*, svez. 19, 2014.
- [64] B. Alkan, D. Vera i B. Ahmad, »A method to assess assembly complexity of industrial products in early stage design phase,« *IEEE Access*, svez. 6, pp. 989-999, 2017.
- [65] C. Chatras, V. Giard i M. Sali, »Mass customisation impact on bill of materials structure and master production schedule development,« *International Journal of Production Research*, svez. 54, br. 18, pp. 5634-5650, 2016.
- [66] S. Hasan, A. Baqai, S. Butt i U. Zaman, »Product family formation based on complexity for assembly systems,« *International journal of advanced manufacturing technology*, svez. 95, pp. 569-585, 2018.
- [67] L. Monostori, B. Kadar, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn i K. Ueda, »Cyber-physical systems in manufacturing,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, pp. 621-641, 2016.
- [68] K. Sinha, Structural complexity and its implications for design of cyber physical systems, PhD dissertation, 2014.
- [69] I. Gutman, The energy of graph, Ber. Math. -Statist. Sect. Forsch. Graz, 1978.

- [70] V. Chan i F. Salustri, »DFA: The Lucas method,« 2005. [Mrežno]. Available: <http://deed.ryerson.ca/~fil/t/dfmlucas.html>. [Pokušaj pristupa 29 1 2019].
- [71] P. Sivasankaran i P. Shahabudeen, »Literature review of assembly line balancing problems,« *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 73, pp. 1665-1694, 2014.
- [72] S. Ghandi i E. Masehian, »Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches,« *Computer-Aided Design*, svez. 67, pp. 58-86, 2015.
- [73] M. Make, M. Rashid i M. Razali, »A review of two-sided assembly line balancing problem,« *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 89, pp. 1743-1763, 2017.
- [74] M. Ibl i J. Čapek, »Measure of uncertainty in process models using stochastic Petri nets and Shannon entropy,« *Entropy*, svez. 18, p. 33, 2016.
- [75] I. Kucukkoc i D. Zhang, »Integrating ant colony and genetic algorithms in the balancing and scheduling of complex assembly lines,« *International journal of advanced manufacturing technology*, svez. 82, pp. 265-285, 2016.
- [76] V. Anić i I. Goldstein, Rječnik stranih riječi, Zagreb: Novi Liber, 1999.
- [77] W. van der Aalst, Process Mining, Heidelberg: Springer, 2016.
- [78] A. Ishizaka i P. Nemery, Multi-criteria decision analysis: methods and software, New Delhi: John Wiley & Sons., 2013.
- [79] E. Triantaphyllou, B. Shu, S. Nieto Sanchez i T. Ray, »Multi-Criteria Decision Making,« u *Encyclopedia of Electrival and Electronics Engineering*, New York, John Wiley & Sons, 1998, pp. 175-186.
- [80] C. Coello Coello, »A short tutorial on evolutionary multiobjective optimization,« *Proceedings of the 1st International Conference on Evolutionaty Multi-Criterion Optimization*, 2001.
- [81] P. Nemery, On the use of multicriteria ranking methods in sorting problems, Bruxelles, Belgija: doctoral dissertation, 2008.
- [82] M. Mladineo, Fenomenološki pristup oblikovanju proizvodnih mreža, Split: doctoral dissertation, 2014.
- [83] E. Talbi, Metaheuristics - From Design to Implementation, New York: John Wiley & sons, 2009.
- [84] B. Roy, »The optimisation problem formulation: Criticism and overstepping,« *Journal of the Operational Research Society*, svez. 32, br. 6, pp. 427-436, 1981.
- [85] D. Veljan, Kombinatorna i diskretna matematika, Zagreb: Algoritam, 2001.

- [86] A. Salmi, Early phase assembly system design, automation alternatives description and optimization: A support to automation decision, doctoral dissertation, 2016.
- [87] I. Veža, B. Bilić, N. Gjeldum i M. Mladineo, Upravljanje projektima, Split: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [88] Z. Guo, Y. Zhang, X. Zhao i X. Song, »A timed colored Petri net simulation-based self-adaptive collaboration method for production-logistics systems,« *Applied Sciences*, svez. 7, br. 3, p. 235, 2017.

SAŽETAK

Kompleksnost je jedna od vrlo izazovnih intelektualnih, znanstvenih i tehnoloških tema, posebno u stoljeću vrlo brzog razvoja i primjene nove tehnologije. Ovaj rad je usredotočen na pregled literature upravljanja kompleksnošću kod montaže visoko varijabilnih proizvoda. Kompleksnost se može promatrati kroz dvije karakteristike koje se tiču proizvoda. Prva karakteristika je vezana za odlike proizvoda, a druga za njegovu povezanost. Nadalje se kompleksnost promatra i sa aspekta organizacije rada, gdje se prekomjerna kompleksnost u sustavu može promatrati kao gubitak kojim je potrebno upravljati. Kompleksnost proizvoda ili proizvodnog sustava kao samostalna informacija ne doprinosi boljem razumijevanju proizvodnog sustava, dok se ne poveže s konkretnim problemima unutar sustava. Ovim radom su istaknuti pokretači kompleksnosti i prikazane su do sada razvijene teorije kompleksnosti kroz klasifikaciju na temelju pregledane literature. Važnost primjene teorije kompleksnosti na problemima proizvodnje je prikazana općenito, dok je detaljnije posvećena pažnja procesu montaže te razvijenim mjerama kompleksnosti proizvoda i procesa montaže. Naglašene su prednosti, ali i nedostaci postojećih pristupa. Četvrto poglavlje ističe važnost metoda za potporu kod donošenja odluka i njihovo korištenje ovisno o vrsti problema montaže kojeg istražuju. Istaknuti su i grafički prikazi koji se često koriste za opisivanje tijeka montaže. Na kraju ovog rada dan je kratak kritički osvrt na izazove otvorenih problema područja kompleksnosti proizvoda i montažnog sustava, a također su istaknute smjernice za buduća istraživanja.

POPIS OZNAKA I KRATICA

Popis oznaka:

A_{ij}	binarna matrica susjedstva
α_i	individualna kompleksnost komponente sustava
a	je teoretski maksimum broja mjesta u grafu gdje postoji veći broj strelica
β_{ij}	vrsta interakcije među komponentama
C	stvarni teoretski broj ciklusa
C_f	„ <i>feed</i> “ kompleksnost na radnoj stanici
C_{xy}	„ <i>transfer</i> “ kompleksnost sa x radne stanice prema y radnoj stanici.
C_i	vrijednost individualnog indeksa kompleksnosti
C_{ij}	vjerojatnost pojavljivanja zajedničkog dijela varijante i od proizvoda varijante j unutar familije proizvoda
C_{ws}	ukupna kompleksnost radne stanice
C_{pj}	vjerojatnost dijeljenja procesa p za proizvodnju varijante proizvoda j
C_1	suma individualnih kompleksnosti komponenti sustava
C_2	kompleksnost interakcija komponenti
C_3	globalni učinak kompleksnosti
CL	indeks ciklusa
D	indeks gustoće
DC_j	statična mjera kompleksnosti dizajna
DP	parametri dizajna (engl. <i>Design Parameters</i>)
DS	indeks točaka donošenja odluka
E_A	energija grafa
FR	funkcionalni zahtjevi
H	entropija, kompleksnost
I_{ij}	informacijski sadržaj svake varijante dijela unutar familije proizvoda
I_{pj}	informacijski sadržaj o raznolikosti procesa svake varijante proizvoda
LCI	sveukupni indeks kompleksnosti rasporeda
LP	broj čvorova na najduljem putu u grafu, stvaran broj točaka donošenja odluka u jednom slijedu
MC	teoretski maksimalni broj ciklusa

MC_j	mjera statične kompleksnosti proizvodnje
M	broj svih strojeva
MP	ukupan broj svih mogućih puteva
n_{ij}	broj varijanti proizvoda koji dijele dio varijante i od proizvoda varijante j unutar familije proizvoda
n_j	je ukupan broj varijanti dijelova u varijanti proizvoda j
n_{pj}	broj varijanti dijelova u varijanti proizvoda j koji prolazi kroz proces p
N	broj komponenti unutar sustava
O	broj svih operacija za dijelove koje je potrebno proizvesti
P	je ukupan broj varijanti proizvoda
p	minimalni teoretski broj puteva
PCI	operacijska kompleksnost proizvodnog procesa
P_i	vjerojatnost da će se promatrani sustav naći u i -tom stanju
p_{ijk}	vjerojatnost da će dio j proći kroz operaciju k na stroju i prema slijedu rasporeda
p_m	vjerojatnost ishoda određenog događaja koja je definirana operaterovim izborom
pr	ukupan broj paralelnih strelica na istom mjestu
Put	indeks putanje
RD	indeks distribucije poveznica
r	broj mjesta na kojima se pojavljuje veći broj strelica u grafu (poveznica)
RM	indeks veličine poveznica
S	broj stanja sustava
SP	broj čvorova na najkraćem putu u grafu, što je minimalan broj točaka donošenja odluka
w	je teoretski maksimum broja strelica u grafu koje se mogu pojaviti na istom mjestu

Popis kratica:

AD	Aksiomatski dizajn
AHP	Analitički hijerarhijski proces odlučivanja (engl. <i>Analytic hierarchy process</i>)
AHPSort	Analitički hijerarhijski proces odlučivanja za sortiranje
ALB	Balansiranje linije za montažu (engl. <i>Assembly Line Balancing</i>)
ANP	Analitički mrežni proces (engl. <i>Analytic network process</i>)
APP	Planiranje putanja tijekom montaže (engl. <i>Assembly Path Planning</i>)
AR	Proširena stvarnost (engl. <i>Augmented Reality</i>)
ASP	Planiranje redoslijeda montaže (engl. <i>Assembly Sequence Planning</i>)
BOM	Sastavnica proizvoda (engl. <i>Bill Of Material</i>)
CAD	Dizajn podržan računalom (engl. <i>Computer-Aided Design</i>)
CPS	Kibernetsko-fizikalni sustav (engl. <i>Cyber-Physical System</i>)
CS	Sustav kodiranja (engl. <i>Coding System</i>)
DES	Simulacija diskretnih događaja (engl. <i>Discrete Event Simulation</i>)
DP	Parametri dizajna (engl. <i>Design Parameters</i>)
ELECTRE	engl. <i>Elimination and choice expressing reality</i>
ERP	Planiranje proizvodnih resursa (engl. <i>Enterprise Resource Planning</i>)
FR	Funkcionalni zahtjevi (engl. <i>Functional Requirements</i>)
HMO	Huckel-ova molekularno orbitalnoj teorija
ISO	engl. <i>International Standard Organization</i>
IT	Teorija informacija (engl. <i>Information Theory</i>)
LZ	Lempel Ziv algoritam
MACBETH	engl. <i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MAUT	Višeatributna teorija korisnosti (engl. <i>Multi-Attribute Utility Theory</i>)
ND	Nelinearna dinamika (engl. <i>Nonlinear Dynamics</i>)
OCC	Kompleksnost izbora operatora (engl. <i>Operator Choice Complexity</i>)
PROMETHEE	engl. <i>Preference Ranking Organization METHod for Enriched Evaluation</i>
RFID	engl. <i>Radio Frequency Identification</i>
TPS	Toyota proizvodni sustav (engl. <i>Toyota Production System</i>)