

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

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**KOMPLEKSNOST MONTAŽE KAO
KRITERIJ OPTIMIZACIJE PROMATRANOG
PROBLEMA**

Amanda Aljinović

Split, rujna 2021.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KOMPLEKSNOST U PROIZVODNIM SUSTAVIMA	3
2.1. Uzroci kompleksnosti	4
2.2. Klasifikacija kompleksnosti u proizvodnim sustavima	6
2.3. Taksonomija mjera fizičke kompleksnosti proizvodnog sustava	9
3. MODELIRANJE I MJERENJE STATIČKE (STRUKTURNE) KOMPLEKSNOSTI MONTAŽE U MMAL.....	17
3.1. Definiranje kompleksnosti montaže pomoću strukturne kompleksnosti proizvoda	18
3.1.1. Shannonova entropija.....	19
3.1.2. Hibridne metode.....	23
3.1.3. Kratak osvrt na mjere kompleksnosti proizvoda	27
3.2. Definiranje kompleksnosti montaže preko strukturne kompleksnosti montažnog sustava (linije)	29
3.2.1. Shannonova entropija.....	29
3.2.2. Hibridne metode.....	37
3.2.3. Kratak osvrt na mjere kompleksnosti montažne linije.....	39
4. STRUKTURNA KOMPLEKSNOST MONTAŽE KAO JEDAN OD KRITERIJA PRONALAZENJA NAJBOLJEG MOGUĆEG RJEŠENJA (OPTIMIZACIJE) PROMATRANOG PROBLEMA	46
4.1. Kompleksnost kao kriterij optimizacije unutar MMAL	47
4.2. Kompleksnost kao kriterij odabira dizajna različitih sustava	54
4.3. Osvrt na mjere kompleksnosti kao kriterije optimizacije različitih sustava	60
5. ZAKLJUČAK	66
6. LITERATURA	68
SAŽETAK	76
POPIS OZNAKA.....	77

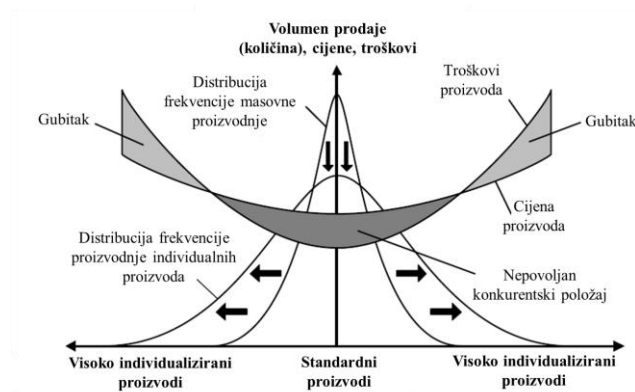
POPIS KRATICA.....	79
--------------------	----

1. UVOD

Utjecaj globalizacije tržišta praćen ekonomskim, tehnološkim i sociopolitičkim napretkom u kombinaciji s povećanom konkurencijom utjecali su na oblikovanje svih aspekata proizvodne industrije. Pored toga, težnja za različitošću i jedinstvenošću dobara, tj. proizvoda koju kupci danas zahtijevaju, dovela je do razvoja nove paradigme proizvodnje čija su glavna obilježja porast potražnje za visoko varijabilnim proizvodima, skraćenje životnog ciklusa proizvoda i masovna prilagodba proizvoda [1]. Masovna prilagodba proizvoda postala je neosporno ključan faktor širenja ili održavanja tržišnog udjela poduzeća s obzirom da ona osigurava podudaranje potreba kupaca i ponuđenog proizvoda. Spomenute promjene predstavljaju izazove za proizvođače te uvjetuju potrebu za kontinuiranim ulaganjima i poboljšavanjem proizvodnih sustava kako bi proizvođači opstali na tržištu i bili konkurentni. Kako bi održali ili povećali tržišni udio i izbjegli nepotrebne troškove, proizvodne organizacije nastoje prilagoditi postojeće proizvodne sustave za proizvodnju raznolikih prilagođenih proizvoda [2]. Obično je uvaženo mišljenje kako visoka raznolikost proizvoda (engl. *product variety*) koji se nude tržištu znači konkurentsku prednost poduzeća. Međutim, povećanje raznolikost proizvoda sa sobom povlači povećanje kompleksnosti proizvodnog sustava koje se može manifestirati kroz povećanje kompleksnosti u arhitekturi (dizajnu) proizvoda te kroz porast kompleksnosti proizvodnje, tj. proizvodnih procesa i montaže. Primjerice, Schleich i ostali [3] u svom radu istaknuli su kako oko 64 % ispitanika kompleksnost koja je uzrokovana raznolikošću proizvoda smatra značajnim čimbenikom povećanja troškova proizvodnje.

Kako bi prikazali utjecaj raznolikosti proizvoda na troškove proizvodnje i kompetitivnost poduzeća pri prijelazu s masovne proizvodnje, tj. proizvodnje velike količine standardnih proizvoda, na individualnu proizvodnju, autori Schuh i ostali [4] predstavili su model prikazan slikom 1.1. Prema predstavljenom modelu, prijelaz na pojedinačnu proizvodnju sa sobom povlači veću raznovrsnost proizvoda i manji volumen proizvodnje, sukladno tome krivulja učestalosti (frekvencije) proizvoda se mijenja i postaje šira, a postizanje ekonomije obujma karakterističnog za masovnu proizvodnju nije više moguće. Međutim, povećanju portfelja proizvoda, poduzeća trebaju postupati s oprezom kako bi izbjegla situaciju „gubitka“ u kojoj postojanje previše neprofitabilnih proizvoda uzrokuje veće stvarne troškove od prihoda. U tom slučaju većina poduzeća nastoje niski volumen individualnih proizvoda, koji donose niži profit od očekivanog, subvencionirati porastom cijena standardnih proizvoda. Međutim, širenje proizvodnog portfelja i nerazboritim dodavanje varijanti proizvoda dolaze u zonu gubitka

tržišne kompetitivnosti, područje „nepovoljnog konkurentskog položaja“ (engl. *competitive disadvantage*) [4, 5].



Slika 1.1. Prijelaz s masovne proizvodnje na individualnu [4]

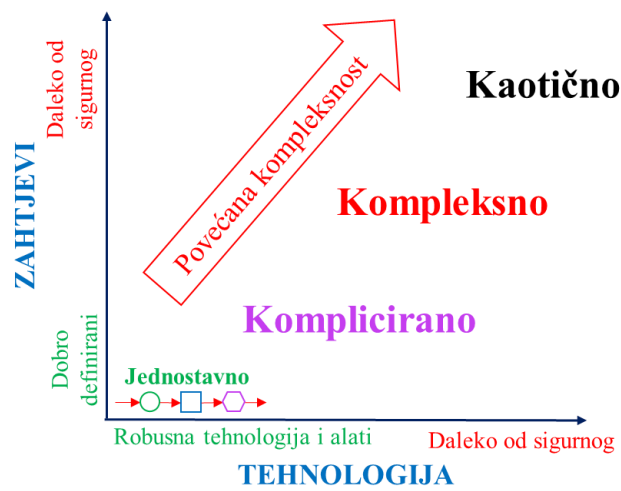
Linije za montažu različitih proizvoda (engl. *Mixed Model Assembly Lines*, MMAL) prepoznate su kao alat koji proizvodnim poduzećima omogućuje prilagodbu novonastaloj situaciji, tj. alat koji im omogućuje učinkovitu proizvodnju raznovrsnih proizvoda. S obzirom na to se montaža ističe kao proces od velike ekonomske važnosti za proizvodna poduzeća, čak i malene promjene unutar nje imaju direktan utjecaj na ključne indikatore uspješnosti (engl. *Key Performance Indicators*, KPI) proizvodnje [6]. U literaturi su prisutni različiti pokušaji kojim se nastoje poboljšati performanse montažnih procesa. Jedan od načina kojim se to može postići je i ublažavanje utjecaja kompleksnosti montaže na MMAL [7]. Stoga, uključivanje kompleksnosti montaže kao kriterija optimizacije montažne linije može utjecati na poboljšanje njezinih performansi. Međutim, unatoč tome što je kompleksnost montaže prihvaćena kao pojam koji utječe na performanse linije, njezina definicija i formalna kvantifikacija još uvijek su predmet rasprave u literaturi. Sukladno tome, u daljnjem dijelu kvalifikacijskog rada, kroz drugo poglavlje objasniti će se pojam kompleksnosti u proizvodnim sustavima te će se prikazati podjela mjera kompleksnosti s obzirom na metode koje se koriste za njen razvoj. U trećem poglavlju, fokus će se staviti na dosadašnje predložene mjere strukturne kompleksnosti montaže u MMAL koje su nastale upotrebom teorije informacija ili hibridnih metoda. Kroz četvrto poglavlje, dat će se osvrt na dostupnu literaturu koja je koristila kompleksnost kao jedini ili jedan od kriterija optimizacije MMAL te ostalih promatranih sustava. Zaključak rada i osvrt na buduća istraživanja dan je u posljednjem poglavlju.

2. KOMPLEKSNOST U PROIZVODNIM SUSTAVIMA

Kompleksnost je široko primjenjiv i popularan pojam koji je ušao u upotrebu u gotovo svim područjima znanosti i inženjerstva. Ovisno o području unutar kojeg se promatra i o kontekstu primjene, različiti autori predlažu različite definicije i pristupe za njezino mjerenje. Međutim, jedinstvena i općeprihvaćena interpretacija još uvijek nije usvojena. U proizvodnoj domeni, kompleksnost se upotrebljava kako bi se naglasak stavio na nesigurnost stanja i različitu međusobnu povezanost komponenti proizvoda ili procesa unutar proizvodnog sustava koji uvelike utječu na njegov ishod. Nesigurnost je sve ono što se o ponašanju sustava precizno ne zna / nije poznato, a definira se kao odstupanje sustava od planiranog [8]. Unatoč nedostatku formalne definicije, autori su usuglašeni u tome kako je porast kompleksnosti glavno obilježje modernih proizvodnih sustava čiji primarni uzrok pronalaze u činjenici da broj elemenata (komponenti) unutar proizvodnog sustava, kao i broj veza među, njima raste. Sukladno tome, kompleksni sustav može se definirati kao cjelina koja se sastoji od većeg broja međusobno povezanih komponenti čija povezanost uzrokuje složene uzročne odnose među komponentama. Stoga, ta cjelina uključuje određena svojstva koja nisu vidljiva iz svojstava individualnih komponenti [9, 10].

Riječ kompleksnost podrijetlo vuče iz latinske riječi *complexus* koja znači *složen*, a odnosi se na „*nešto što se sastoji od više dijelova koji su međusobno povezani*“ ili na „*nešto što nije jednostavno analizirati i razumjeti*“ [11]. Sam pojam kompleksnost u literaturi se često koristi kao sinonim riječi kompliciranost ili kaotičnost. Međutim, ElMaraghy i ostali [11] te Alkan i ostali [12] napominju kako postoje razlike među ovim pojmovima, slika 2.1. Komplicirani sustavi su oni koji se sastoje od velikog broja dijelova (elemenata), ali su funkcije svakog od njih, kao i interakcije među njima dobro definirane i shvatljive. Kompliciranost proizlazi iz razine detalja i veličine sustava koja je premašila granice razumijevanja pojedinca koji radi [10]. Unatoč velikom broju komponenti, ovakav sustav se ne ponaša na neočekivan način, odnosno daje predvidljiv ishod. Primjer jednog kompliciranog proizvoda je automobil jer on nije jednostavan proizvod, ali je razumljiv [11]. S druge strane kompleksan sustav odnosi se na sustav u kojem postoji određena doza nesigurnosti tijekom razvoja procesa ili u njegovom dizajnu što rezultira time da konačni ishod sustava nije u potpunosti predvidljiv ili upravljiv. Primjerice, proces razvoja automobila je kompleksan jer zahtijeva inženjersko znanje u nekoliko disciplina te kolaborativni rad u timovima [11]. Unatoč različitim definicijama ovih pojmova, bitno je napomenuti kako se shvaćanje sustava kao kompleksnog ili kompliciranog

odnosi na subjektivni doživljaj promatrača, odnosno uvelike ovisi o razini znanja osobe koja ga promatra i definira, stoga ni ne čudi što se ova dva pojma često poistovjećuju. Kaotični sustavi su sustavi koji su vrlo teško upravljivi i često nepredvidljivi, s obzirom na to što čak i malene promjene u početnim uvjetima uzrokuju vrlo raznolike ishode. Kompleksnost ima snažnu pozitivnu korelaciju s poteškoćama prilikom upravljanja sustavom, tj. kako sustav postaje kompleksniji, teže ga je razvijati, održavati i koristiti, zadaci postaju složeniji što znači da su podložniji pogreškama i iziskuju veće troškove [13].



Slika 2.1. Spektar rasta kompleksnosti procesa [11]

2.1. Uzroci kompleksnosti

Kompleksnost je jedan od najvećih izazova s kojim se proizvodna poduzeća danas susreću [11]. Uzroci porasta razine kompleksnosti mogu se pronaći u tzv. pokretačima kompleksnosti. Oni se u literaturi definiraju kao „fenomen koji potiče porast kompleksnosti sustava“ [14]. Različiti autori daju različite podjele pokretača kompleksnosti. Sveobuhvatnu podjelu prema podrijetlu pružili su Vogel i Lasch [15] te su ih podijelili na unutarnje i vanjske pokretače kompleksnosti [15, 16]. Vanjski pokretači kompleksnosti se definiraju kao „zrcalna slika zahtjeva tržišta“ [17, 18], što znači da proizlaze iz nestabilne (varijabilne) potražnje za proizvodom i zahtjeva koje on treba ispuniti. U njih se ubrajaju kompleksnost društva te kompleksnost tržišta (kompleksnost potražnje, kompetitivna kompleksnost, kompleksnost opskrbe, tehnološka kompleksnost, kompleksnost tržišta). Oni su konstantni i poduzeće na njih ne može utjecati, već im se može samo prilagoditi. Međutim, bitno je napomenuti kako je pogrešno ove dvije podjele promatrati kao odvojene cjeline s obzirom da su one međusobno

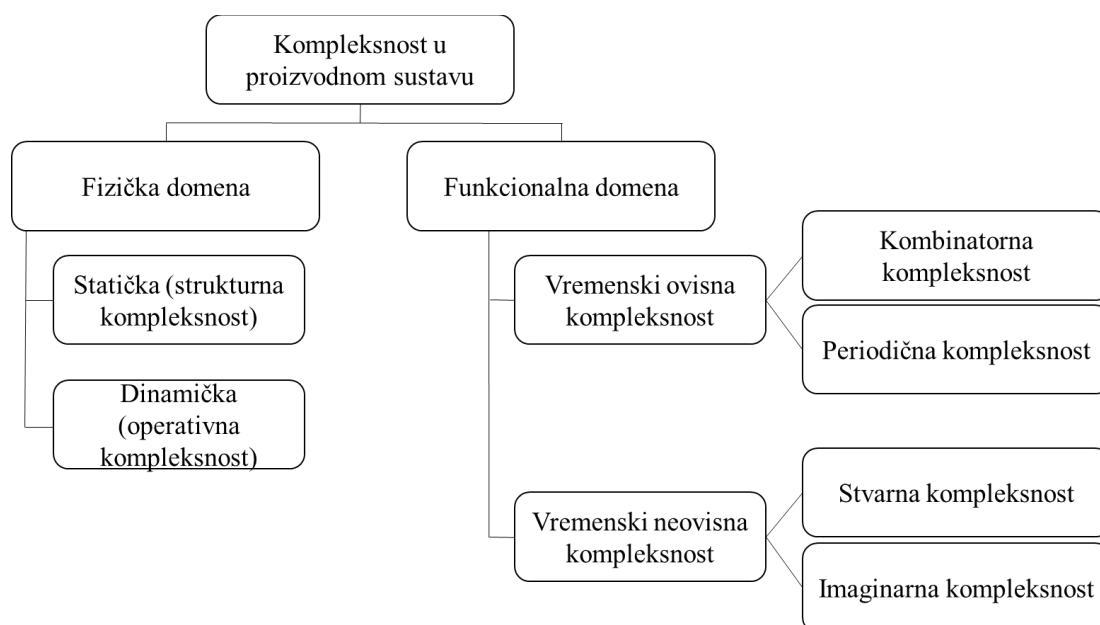
ovisne [15, 19]. Naime, unutrašnji pokretači kompleksnosti rezultat su reakcije sustava ili na vanjske podražaje (globalna konkurencija, varijabilnosti dobavljača, tehnološki napretka te nesigurnost i nestabilnost potražnje [20]) ili na vlastite podražaje poduzeća. Uzimajući u obzir ovisnost o vanjskim pokretačima, Bliss [16] razlikuje dvije vrste unutarnjih pokretača. Riječ je o pokretačima koji su direktna posljedica djelovanja vanjskih pokretača (engl. *correlated complexity drivers*) poput: kompleksnost kupca, kompleksnost ciljeva, kompleksnost proizvoda, kompleksnost razvoja proizvoda, kompleksnost lanca opskrbe, tehnološka kompleksnosti i slično. Druga vrsta, autonomni pokretači kompleksnosti (engl. *autonomous complexity drivers*) nisu pod utjecajem vanjskih faktora i u njih ubrajamo kompleksnost procesa, kompleksnost proizvodnje, kompleksnost resursa, organizacijsku kompleksnosti i ostale.

Pokretači kompleksnosti rezultiraju povećanjem nesigurnosti unutar proizvodnih sustava što dovodi do povećanog generiranja informacija i njegovog nepredvidljivog / nepoznatog ponašanja [5]. Kao glavni izvor porasta kompleksnosti u proizvodnim poduzećima, u literaturi se najčešće ističe raznolikost varijanti proizvoda [21, 22]. Ostali uzroci koji se najčešće razmatraju su struktura proizvoda, struktura postrojenja, tok informacija i tok materijala, nesigurnost okruženja i slično [21]. Nesigurnost povezana s raznolikošću proizvoda povezana je s kompleksnošću zadatka koju operateri moraju izvršiti. Porast kompleksnosti proizvodnog sustava uslijed povećane raznolikosti proizvoda negativno utječe na performanse proizvodnog sustava u pogledu proizvodnosti rada i kvalitete proizvoda koju doživljavaju kupci što je dokazano kroz empirijska istraživanja i simulacije u montažnim postrojenjima [23, 24]. Povezanost kompleksnosti i pogrešaka koje se javljaju u montaži istaknuli su Fast Berglund i ostali [25]. Autori su uočili pozitivnu korelaciju ovih pojmova, odnosno porast kompleksnosti uzrokuje i porast broja grešaka prilikom montaže. Jednaki zaključci doneseni su u radovima Falcka i ostalih [26, 27]. U njima su autori istaknuli i da porast kompleksnosti uzrokuje gubitak kvalitete proizvoda kojeg su izrazili kao porast troškova potrebnih za korektivne radnje procesa montaže. Negativan učinak kompleksnosti uočen je i na pouzdanost proizvodnje i nesigurnost [28] te na vrijeme proizvodnje [7, 12]. Unatoč negativnoj konotaciji koja se veže za kompleksnost proizvodnog sustava, proizvodna poduzeća ističu prednosti koje porast kompleksnosti sa sobom donosi. Porast kompleksnosti omogućuje ostvarivanje kompetitivne prednosti poduzeća, stjecanje novog tržišnog udjela i zadržavanje postojeće pozicije na tržištu te porast prihoda i profita [20].

U literaturi prevladava istraživanje unutarnje kompleksnosti proizvodnog sustava [19]. Unutarnja kompleksnosti povezana je s tokovima koji se odvijaju unutar samog proizvodnog sustava proizvođača (tokovi materijala i informacija), a posljedica je prevođenja zahtjeva kupaca u fizičke proizvode. Njena podjela predstavljena je sljedećim poglavljem. S druge strane, vanjska kompleksnost povezana je s tokovima unutar lanca opskrbe. Ona uključuje i druge sudionike, a ne samo proizvođača.

2.2. Klasifikacija kompleksnosti u proizvodnim sustavima

Kompleksnost proizvodnih sustava definira se unutar dviju domena, fizičke i funkcionalne domene, slika 2.2. Koncept kompleksnosti u obje domene promatra se ovisno o protoku vremena i ovisno o elementima (fizički elementi ili funkcije) proizvodnog sustava na koje je stavljen naglasak. Ukoliko je naglasak stavljen na fizičke komponente sustava, riječ je o fizičkoj domeni. S druge strane, ukoliko je naglasak stavljen na potrebu za postizanjem funkcionalnih zahtjeva, riječ je o funkcionalnoj domeni. Osim ovih dviju domena, u literaturi se često ističu još dvije podjele kompleksnosti, objektivna i subjektivna kompleksnost. Objektivna kompleksnost fokus stavlja na mjerljive parametre sustava, dok subjektivna kompleksnost podrazumijeva da se isti proizvodni sustav, ovisno o individualnim vještinama, sposobnostima i iskustvu osobe koja definira kompleksnost, može iskusiti, tj. spoznati na drugačiji način [29, 30].

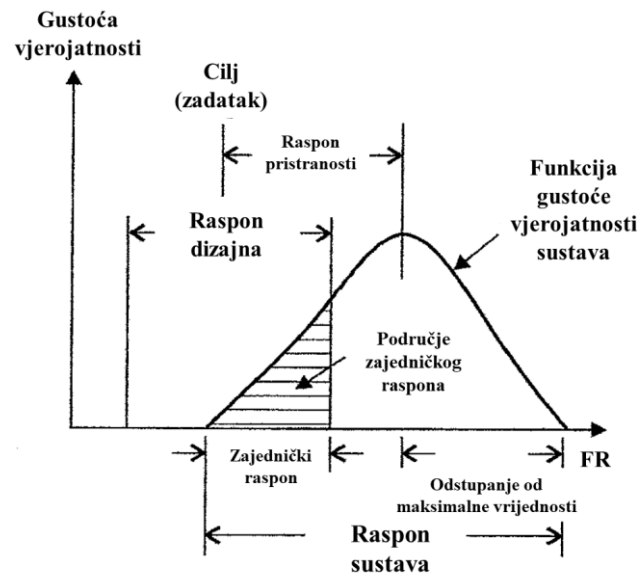


Slika 2.2. Podjela kompleksnosti [11]

Fizička domena kompleksnosti oslanja se na elemente proizvodnog sustava te se može klasificirati na statičku i dinamičku kompleksnost. Statička ili strukturna kompleksnost bavi se strukturom sustava i njegovom konfiguracijom, raznolikošću proizvoda te brojem različitih komponenti sustava (radnici, strojevi, međuskladišta, transportni mehanizmi) i njihovim međuovisnostima i vezama [11]. S obzirom na to da se ova vrsta kompleksnosti bavi strukturom proizvoda ili sustava i vremenski je neovisna, pojednostavljuvanjem dizajna sustava ili strukture proizvoda ili procesa može se utjecati na njezino reduciranje. S druge strane, dinamička ili operativna kompleksnost povezana je s neizvjesnošću ponašanja sustava tijekom određenog vremenskog perioda, ali i s vjerojatnošću da će sustav biti pod kontrolom [1]. Nužan preduvjet za razumijevanje i upravljanje kompleksnošću proizvodnog sustava podrazumijeva definiranje kvantitativnih mjera koje ju opisuju. Za definiranje statičke i dinamičke kompleksnosti, u literaturi se mogu uočiti različiti pristupi koji se mogu klasificirati s obzirom na teoretsko podrijetlo. Prema teoretskom podrijetlu, mjere kompleksnosti mogu se podijeliti u sedam skupina, poglavlje 2.3.

Funkcionalna domena je povezana s dizajnom proizvoda, procesa ili sustava. Kompleksnost se u njoj definira kao mjera nesigurnosti u postizanju definiranih funkcionalnih zahtjeva (engl. *functional requirements*). Pri tome, uzrok nesigurnosti u postizanju funkcionalnih zahtjeva predstavlja loš dizajn ili nedostatak znanja / razumijevanja o promatranom elementu. Ova interpretacija kompleksnosti uporište pronalazi u teoriji aksiomatskog dizajna (engl. *Axiomatic Design*, AD) iz kojeg je i usvojena definicija funkcionalnih zahtjeva kao minimalnog skupa neovisnih zahtjeva koji u potpunosti opisuju funkcionalne potrebe proizvoda (softvera, organizacije, sustava, itd.) u funkcionalnoj domeni. Drugim riječima, prema teoriji AD, ono što želimo postići (cilj) izražava se preko funkcionalnih zahtjeva u funkcionalnoj domeni, dok odgovor na pitanje kako ćemo u fizičkoj domeni postići funkcionalne zahtjeve, daju parametri dizajna (fizički parametri). Nesigurnost u postizanju funkcionalnih zahtjeva, tj. kompleksnost, promatra se kao funkcija povezanosti promatranog raspona dizajna (engl. *design range*) i raspona sustava (engl. *system range*), slika 2.3. Raspon dizajna predstavlja željenu vrijednost funkcionalnih zahtjeva. Raspon sustava predstavlja ono što stvarni sustav koji treba ispuniti funkcionalne zahtjeve može pružiti, tj. koliko dobro odabrani sustav može zadovoljiti tražene funkcionalne zahtjeve, a izražava se preko funkcije gustoće vjerojatnosti (engl. *System Probability Distribution Function*, *System pdf*). Ukoliko se raspon sustava u potpunosti nalazi unutar raspona dizajna, kompleksnost je nula, s obzirom da sustav tijekom vremena uvijek može dati željeni rezultat. Međutim, ukoliko

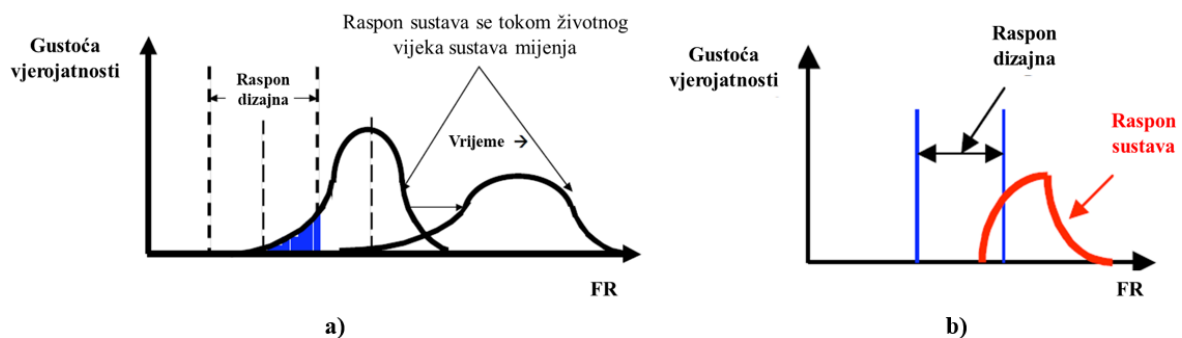
se ova dva raspona samo djelomično podudaraju, što je na slici 2.3. prikazano zajedničkim područjem (engl. *common area*), postoji nesigurnost da se traženi funkcionalni zahtjevi neće ispuniti stoga, kompleksnost postoji i može se kvantitativno izraziti. Ako se spomenuti rasponi uopće ne podudaraju kompleksnost je beskonačna. Prema tome, može se reći da odnosi između raspona dizajna i raspona sustava određuju kompleksnost [31].



Slika 2.3. Funkcija gustoće vjerojatnosti funkcionalnih zahtjeva [31]

Jednako kao i kod fizičke domene, kompleksnost može i ne mora biti funkcija vremena. Ovisno o tome, razlikuju se dvije primarne kategorije kompleksnosti, vremenski ovisna i vremenski neovisna kompleksnost. Vremenski ovisna kompleksnost podrazumijeva kompleksnost koja raste s porastom vremena i nije predvidljiva. Ovisno o tome raste li nesigurnost konstantno ili se pak periodično u određenoj točki vraća u početno stanje, ova vrsta kompleksnosti pojavljuje se u obliku kombinatorne i periodične kompleksnosti. Kombinatorna kompleksnost rezultat je stalnog porasta broja mogućih kombinacija stanja tijekom vremena, što znači da se raspon sustava tokom vremena sve više udaljava od raspona dizajna, slika 2.4a. Iz toga proizlazi da se ona može spriječiti ukoliko se otkrije način kako spriječiti udaljavanje raspona sustava od raspona dizajna. Primjer vremenski ovisne kombinatorne kompleksnosti je raspored leta aviona kada je vrijeme nepogodno za let jer zrakoplovna poduzeća neće biti u mogućnosti zadovoljiti funkcionalne zahtjeve slanja aviona prema rasporedu, a nastavi li se vrijeme i dalje pogoršavati tokom vremena, situacija će se sve više pogoršavati [32]. Ili

primjerice oštećenje materijala koje nastaje zbog širenja pukotine [11]. Periodična kompleksnost postoji ograničeno vremensko razdoblje i nju karakterizira ograničeni broj mogućih kombinacija stanja. Primjerice, kada je avion spriječen za let zbog neočekivanih okolnosti kao što su loše vrijeme ili mehanički kvar, pri čemu se raspored odlazaka i dolazaka određuje periodično, tj. za 24 sata. Nesigurnost koja se tada pojavljuje traje samo određeno vrijeme i ne prenosi se na sljedeći dan (svaki dan novi raspored, stoga su nesigurnosti iz prethodnog dana nebitne) [32]. Vremenski neovisna kompleksnost ne uzima u obzir faktor vremena. Ona ostaje konstantna sve dok ne dođe do promjene dizajna. Razlikuju se stvarna (engl. *real complexity*) i imaginarna (engl. *imaginary complexity*) kompleksnost. Stvarna kompleksnost rezultat je nezadovoljavanja funkcionalnih zahtjeva u svakom trenutku (javlja se kada raspon sustava nije unutar raspona dizajna) [31], slika 2.4b, dok se imaginarna kompleksnost razmatra kao nesigurnosti koja nastaje zbog nedostatka razumijevanja i neznanja dizajnera o određenom dizajnu, tj. povezanosti funkcionalnih zahtjeva i parametara dizajna [33].

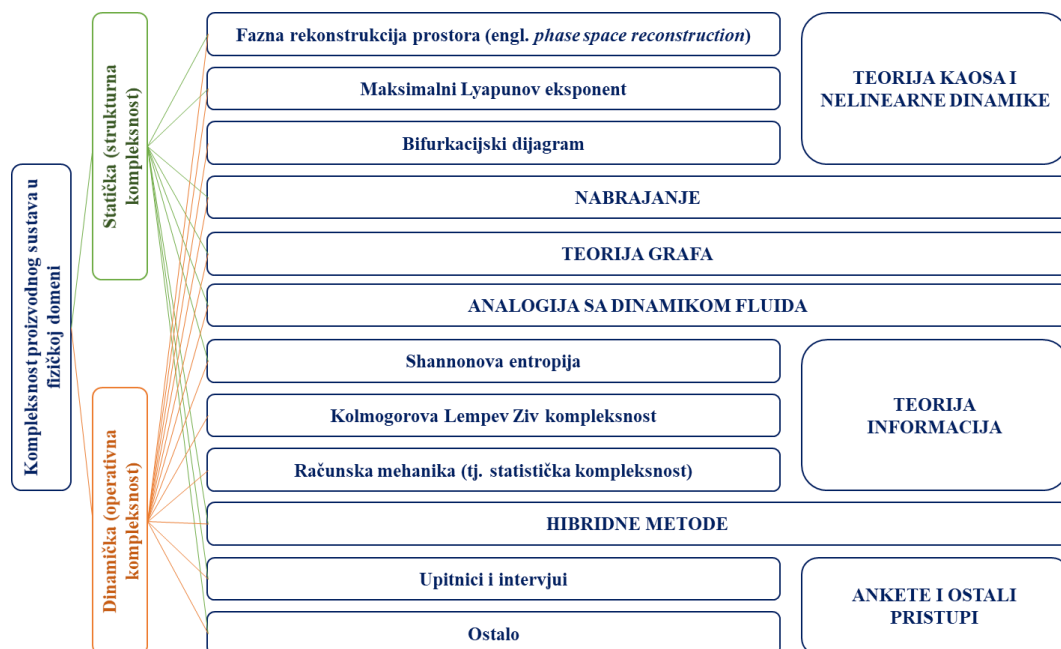


Slika 2.4. a) Kretanje raspona sustava tokom vremena; b) Raspon sustava ne nalazi se u potpunosti u rasponu dizajna (konačna vrijednost kompleksnosti) [32]

2.3. Taksonomija mjera fizičke kompleksnosti proizvodnog sustava

Prilikom razvoja mjera kompleksnosti, većina istraživanja svoje napore usmjerava k njihovom definiranju unutar fizičke domene. U svrhu povećanja razumijevanja i upravljanja kompleksnošću proizvodnih sustava, posljednjih godina korišteni su različiti pristupi za njenu analizu. Prema teoretskom podrijetlu, oni se mogu svrstati u sedam kategorija [1, 34]. Prva kategorija podrazumijeva metode i koncepte koji proizlaze iz teorije kaosa i teorije nelinearne dinamike. Druga kategorija kompleksnost definira preko količine različitih elemenata proizvodnog sustava koji se promatra. Treća kategorija podrazumijeva korištenje teorije

grafova i mreža. Četvrta kategorija uporište pronalazi u teoriji dinamike, a peta u teoriji informacija, a njezina temeljna mjera je Shannonova entropija. Šesta kategorija odnosi se na hibridne metode koje definiraju kompleksnost proizvodnog sustava kombiniranjem metoda iz teorija kompleksnosti i različitih područja znanosti. Posljednja kategorija podrazumijeva metode anketiranja, odnosno provođenje upitnika i odrađivanje intervjua te pristupe koji ne spadaju u prethodno spomenute kategorije. Metode anketiranja nastoje definirati percipiranu kompleksnost (engl. *perceived complexity*), odnosno nastoje pružiti uvid u to kako kompleksnost proizvodnje utječe na performanse ljudi, dok se ostale mjere koriste za razvoj objektivnih mjera kompleksnosti. Taksonomija koja uključuje prethodno nabrojane pristupe shematski je prikazana slikom 2.5.

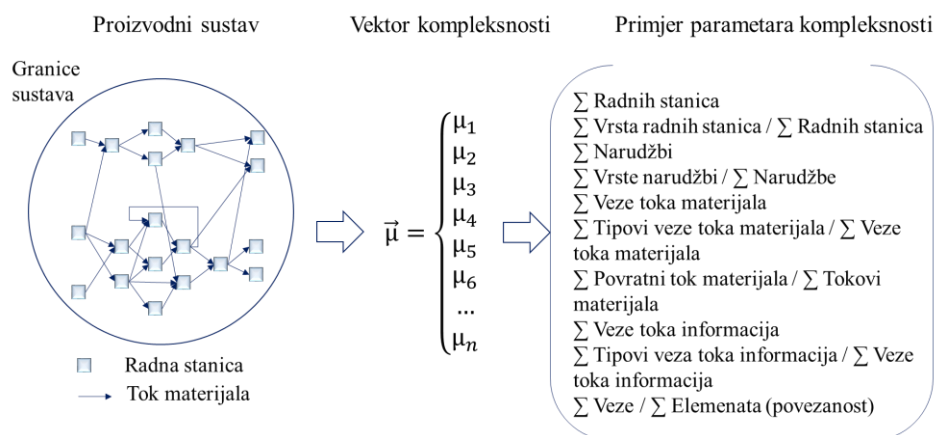


Slika 2.5. Podjela pristupa za definiranje kompleksnosti [1, 34]

Teorija kaosa i nelinearne dinamike pruža teoretski okvir za razumijevanje nelinearnosti, nesigurnosti i nestabilnosti unutar proizvodnog sustava. U proizvodnji, koristi se prilikom istraživanja dinamičkog ponašanja sustava. Ova teorija temelji se na upotrebi triju metoda: fazna rekonstrukcija prostora, bifurkacijski dijagram te maksimalan Lyapunov eksponent. Fazna rekonstrukcija prostora nastoji razviti model stanja sustava prikupljanjem i analizom povijesnih podataka značajnih obilježja sustava koji ga opisuju, kako bi pružila dublje razumijevanje ponašanja sustava i faktora koji na njega utječu. Njome se nastoje identificirati uzorci (obilježja) koji ukazuju na prisutnost dinamičke kompleksnosti proizvodnog sustava te

rezultiraju kaotičnim, nepredvidljivim ponašanjem sustava [1, 34]. Lyapunov eksponent koristi se za kvantitativno mjerenje osjetljivosti i ovisnosti dinamičkog sustava o njegovim inicijalnim uvjetima. U proizvodnim sustavima većinom se koristi za identificiranje njegovog kaotičnog ponašanja pri čemu se sustavi koji imaju barem jedan pozitivan Lyapunov eksponent smatraju osjetljivima i kaotičnima [1]. Bifurkacijski dijagrami predstavljaju grafički prikaz očekivanog ponašanja proizvodnog sustava i olakšavaju identifikaciju onih parametara sustava čije fluktuacije dovode do njegovog nestabilnog ponašanja [1, 35]. Od predloženih metoda jedino Lyapunov koeficijent služi za kvantifikaciju kaosa. Preostale dvije metode podrazumijevaju shematsku analizu, tj. grafički prikaz dinamičkog ponašanja sustava.

Metode nabiranja kompleksnost povezuju se s brojem elemenata od koji se proizvod, proces ili proizvodni sustav sastoji. Primjerice, Windt i ostali [36] u svom radu kompleksnost proizvodnog sustava definiraju pomoću triju dimenzija kompleksnosti. Prva dimenzija odnosi se na dimenziju vremena, druga na organizacijsku kompleksnost dok posljednja dimenzija definira kompleksnost u odnosu na granice proizvodnog sustava. Ukoliko su tokovi procesa, elementi sustava i njihove veze i svojstva dodijeljeni sustavu, riječ je o unutarnjoj kompleksnosti. Ukoliko se oni pak odnose na elemente van proizvodnog sustava, riječ je o vanjskoj kompleksnosti. Ovisno o povezanosti triju aspekata (tri vrste kompleksnosti), svaki proizvodni sustav može se definirati vektorom kompleksnosti koji obuhvaća niz različitih mjera kompleksnosti. Svaka mjera kompleksnosti predstavlja različite elemente proizvodnog sustava koji se promatraju, npr. radne stanice, proizvodni procesi i slično, a temelje se na njihovom prebrojavanju. Primjer vektora kompleksnosti kada je riječ o strukturalnoj statičkoj unutarnjoj kompleksnosti prikazan je slikom 2.6.



Slika 2.6. Primjer vektora za strukturalnu unutarnju kompleksnost proizvodnog sustava [36]

Zanimljiv pristup definiranju kompleksnosti montaže uzimajući u obzir upotrebu istih komponenti među različitim varijantama proizvodima (sličnost proizvoda) unutar promatrane familije proizvoda pružili su Mesa i ostali [37]. Oni su promatrali familiju proizvoda koju karakterizira otvorena arhitektura proizvoda¹, a kompleksnost su definirali s gledišta sličnosti preobrazbe, tj. rekonfiguracije jednog proizvoda unutar familije proizvoda u drugi. Sukladno tome, kompleksnost proizvoda i kompleksnost familije proizvoda definirali su kao kompleksnost rekonfiguracije čiji su razvoj temeljili na broju i vrsti montažnih / demontažnih zadataka koja je potrebna da bi se jedna varijanta proizvoda modificirala u drugu. Kompleksnost proizvoda izražena preko *SRCI* indeksa (engl. *Specific Reconfiguration Complexity Index, SRCI*) povezana je s brojem i kompleksnošću montažnih / demontažnih zadataka promatrane varijante proizvoda s obzirom na zahtjev prelaska s određene inačice proizvoda na drugu pomoću istih osnovnih konstruktivnih komponenti [37]. Kompleksnost na razini familije proizvoda izražena preko *TRCI* indeksa (engl. *Total Reconfiguration Complexity Index, TRCI*) predstavlja ukupnu rekonfiguracijsku kompleksnost za skup promatranih varijanti proizvoda dobivenih iz definiranog skupa modula.

Posljednjih godina teorija grafova i mrežna teorija postala je aktualno područje za istraživanje entiteta proizvodnog sustava i veza među njima. Chrysolouris i ostali [35], ElMaraghy i ostali [38], Jenab i Liu [39] samo su neki od autora koji su u posljednjem desetljeću ovu teoriju koristili za procjenu fizičkog aspekta kompleksnosti proizvodnog sustava. Chrysolouris i ostali [35] predlažu mjeru kompleksnosti mreže (engl. *network complexity*) kojom procjenjuju statičku strukturu proizvodnog sustava. Teoriju grafova koriste za generiranje matrica prethodnosti koje prikazuju ovisnosti triju elemenata proizvodnog sustava: proizvoda, procesa i resursa. ElMaraghy i ostali [40] koristili su se teorijom grafova kako bi definirali ukupnu strukturnu kompleksnost proizvodnog sustava koja proizlazi iz rasporeda radnih stanica. Kompleksnost je definirana ukupnim indeksom kompleksnosti koji u sebi integrira šest razvijenih mjera kompleksnosti koje opisuju karakteristike rasporeda radnih stanica. Ukupni indeks kompleksnosti predstavlja informacijski sadržaj sustava. Jenab i ostali [39] koristili su teoriju grafova kako bi dobili grafički prikaz relativne kompleksnosti i relativne sličnosti proizvoda koji su dio familije proizvoda. Kompleksnost i sličnost proizvoda

¹ Otvorena arhitektura proizvoda (engl. *open architecture products*) predstavlja klasu proizvoda koji se sastoje od fiksne platforme i modula koji se na nju mogu dodati ili zamijenjeni. Svrha ovih proizvoda je omogućiti personalizaciju proizvoda [41].

promatrane su s obzirom na vrijeme obrade i potrebne vještine radnika potrebnih za proizvodnju svakog promatranog proizvoda.

U proizvodnom sustavu, mjere kompleksnosti koje vuku analogiju s dinamikom fluida koriste se za analizu turbulencije proizvodnog toka. Međutim, njihova primjena je tek u začetku i zahtijeva daljnja istraživanja, stoga kvantitativne mjere statičke ili dinamičke kompleksnosti još uvijek su u fazi razvoja.

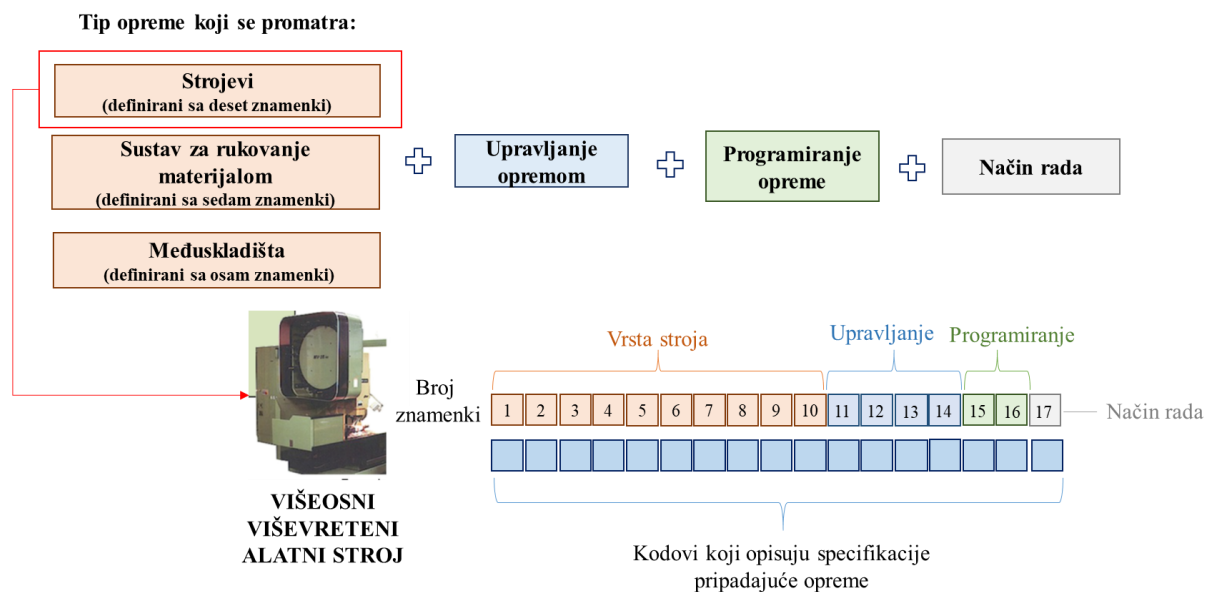
Teorija informacija je grana primijenjene matematike koja se bavi kvantificiranjem informacija. U proizvodnom sustavu, ova teorija pruža teoretske osnove za definiranje kompleksnosti kao informacijskog sadržaja stanja resursa i konfiguracije sustava te nepredvidljivosti njegovog ponašanja. Najpoznatiji pristup teorije informacija, čija je upotreba dominantna i prilikom razvoja mjera kompleksnosti proizvodnog sustava, je Shannonova entropija. Osim nje, za procjenu kompleksnosti u proizvodnom sustavu u literaturi su zastupljeni i drugi modeli iz domene teorije informacija, ali u smanjenom obujmu. Riječ je o Kolmogorovoj Lempev Ziv kompleksnosti te o računskoj mehanici. Shannonova entropija predstavlja temelj teorije informacija, a zasniva se na teoriji vjerojatnosti i statistike. Definirao ju je Shannon u svom radu [42] kao stupanj dvosmislenosti koji je povezan sa izlazom slučajnog eksperimenta, odnosno kao stupanj nereda unutar sustava. Jedan od prvih radova koji je uveo koncept Shannonove entropije te time pružio teoretske osnove za kvantificiranje statičke i dinamičke kompleksnosti proizvodnje je rad Desmukha i ostalih [43]. Osnovna ideja ove teorije informacija je: što je više raznolikih informacija koje opisuju sustav, sustav je kompleksniji i zahtijeva više informacija koje su potrebne za opisivanje njegovog stanja. Ova teorija informacija široko je primijenjen pristup u literaturi za kvantifikaciju i opisivanje kompleksnosti. U kontekstu procjene kompleksnosti proizvodnog sustava, Shannonova entropija koristi se za kvantificiranje nesigurnosti informacija koje su potrebne za definiranje stanja proizvodnog sustava ili za opisivanje njegovih komponenti. To znači da se funkcija vjerojatnosti ulaznih informacija definira kao stanje resursa koji se promatraju u proizvodnom sustavu. U tom kontekstu, stanje resursa može se definirati subjektivno. Primjerice ako se promatraju strojevi u proizvodnji, vjerojatnosti ulaznih informacija (stanja resursa) mogu se interpretirati kao stanje strojeva (zauzet, u mirovanju ili u kvaru), ili stanje raznolikosti proizvoda koji se na strojevima obrađuju ili pak na temelju vremena čekanja za obradu na stroju [1]. Pri tome, vjerojatnosti stanja se mogu promatrati na temelju dostupnih informacija o planiranom redosljedu proizvodnje (statička kompleksnost) ili na temelju informacija koje se prikupljaju promatranjem u stvarnom vremenu (dinamička kompleksnost). U svom radu Zhu i

ostali [44] predlažu mjeru kompleksnosti koja podrazumijeva kvantificiranje ljudskih karakteristika prilikom procesa montaže odabranih proizvoda iz familije proizvoda uzimajući u obzir odabir potrebnih dijelova proizvoda i sukladno njemu odabir alata, stezne naprave i ispravne procedure montaže. Park i Okudan [45] predstavili su mjeru strukturne kompleksnosti dizajna i strukturne kompleksnosti proizvodnje za familiju proizvoda. Razvoj mjera temelji se na kombiniranju koncepta sličnosti (engl. *commonality*) proizvoda / procesa te teorije informacija. Osvrt na radove koji razvoj mjera kompleksnosti temelje na Shannonovoj entropiji dan je u poglavljima 3 i 4.

Kolmogorova kompleksnost i računska mehanika koriste se za definiranje mjera dinamičke kompleksnosti. Kolmogorova kompleksnost dinamičku kompleksnost izražava kao nepredvidljivost indikatora performansi proizvodnog sustava, dok se računska mehanika bavi predviđanjem učinkovitosti stanja resursa i pronalaženjem optimalnog uzročnog modela stohastičkih procesa [35, 40].

Hibridne metode za razvoj mjera kompleksnosti proizvodnje podrazumijevaju kombinaciju dviju ili više metoda iz teorija kompleksnosti i drugih područja znanosti. Dosada, u literaturi su uglavnom prisutna istraživanja koja kombiniraju Shannonovu entropiju / teoriju s heurističkim indeksima. ElMaraghy i ostali u svom radu [46] uveli su mjeru kompleksnosti proizvodnog sustavu uzimajući u obzir kompleksnost proizvoda i procesa. Kompleksnost proizvoda prikazana je kao funkcija entropije informacija te indeksa kompleksnosti proizvodnje proizvoda. Entropija informacija ovisi o ukupnoj količini informacije, dok se indeks kompleksnosti računa na temelju dostupnih informacija o količini značajki i potrebnom broju provjera specifikacija proizvoda. Ova kompleksnost predstavlja kompleksnost proizvoda povezanu s materijalom, dizajnom, specifikacijama i komponentama [46]. Kompleksnost procesa je funkcija kompleksnosti proizvoda i indeksa kompleksnosti procesa. Indeks kompleksnosti procesa u obzir uzima vrste alata i strojeva koji se koriste prilikom obrade. Predloženi pristup, autori su koristili i za definiranje operativne kompleksnosti [47]. Operativnu kompleksnost definirali su kao fizički i kognitivni napor ljudskog operatera povezan s raznolikošću značajki proizvoda, alata i zadataka [47]. Na temelju prethodno spomenutih radova, ElMaraghy i ostali [48] predložili su mjeru za mjerenje strukturne kompleksnosti proizvodnog sustava. U spomenutom radu, autori su principe dizajna za montažu (engl. *Design for Assembly*, DFA) integrirali u predložene mjere informacijske entropije kako bi predstavili metodu kodiranja i klasificiranja proizvodnog sustava (engl. *Structural Classification and Coding System*, SCC). Predložena mjera kodiranja vremenski

neovisne kompleksnosti sustava podrazumijeva kodiranje njegovih sastavnih elemenata: strojeva, sustava za rukovanje materijalom te međuskладиšta, slika 2.7. Sustav kodiranja temelji se na omjeru raznolikosti i na informacijskom sadržaju koji se izražava preko Shannonove entropije. Svaki kod sastoji se od niza znamenki (stringa) koji služi kao informacija za opisivanje strukture, načina upravljanja i složenost rada određene opreme [38].



Slika 2.7. Primjer klasificiranja i kodiranja opreme [38]

U ovu podjelu spadaju i mjere kompleksnosti koje svoj razvoj temelje na teorijama koje se mogu pronaći u biologiji. Primjerice, Sinha [10] je u svom doktoratu razvio teoretski okvir za procjenu strukturne kompleksnosti inženjerskog sustava primjenom Huckleove molekularne orbitalne teorije i heuristike. Kasnije, Alkan i ostali [49] usvojili su razvijeni koncept i prilagodili ga za definiranje kompleksnosti u MMAL.

Upitnici i intervjui se unutar proizvodnog sustava koriste za prikupljanje podataka o subjektivnoj percepciji kompleksnosti radnog mjesta. Mattsson i ostali [50] su se koristili upitnicima i intervjuima kako bi razvili metodu mjerenja kompleksnosti radne stanice naziva CXI (engl. *Complexity Index*, CXI) kojim su subjektivno procijenili kompleksnost proizvodnog sustava. Pri tome, parametri koje su uzeli u razmatranje su varijante proizvoda, sadržaj rada, raspored na radnoj stanici, alati, upute za rad te općenito mišljenje operatera koji radi na toj radnoj stanici. Ovisno o dobivenoj vrijednosti CXI indeksa, autori su rezultate podijelili u tri kategorije na temelju kojih predlažu hitnost promjena. S druge strane, Zeltzer i ostali [51] upotrijebili su upitnike u pet različitih proizvodnih poduzeća kako bi identificirali

pokretače kompleksnosti pomoću kojih su kasnije predložili uzročne modele, tj. statističke modele koji pronalaze korelaciju između identificiranih pokretača, za predviđanja kompleksnosti ručnih radnih stanica u MMAL. U ovom slučaju autori su na temelju identificiranih pokretača kompleksnosti nastojali razviti modele za mjerenje objektivne kompleksnosti prikupljanjem potrebnih podataka iz sustava, tzv. CXC (engl. *CompleXity Calculator*, CXC) metoda mjerenja. Predviđanje kompleksnosti podrazumijevalo je statističkim modelom predvidjeti imaju li radne stanice visoku ili nisku kompleksnost. Osim ovog izlaza (dvije vrijednosti), određeni modeli sposobni su i izvršiti gradaciju radnih stanica po kompleksnosti. Rezultati su uspoređeni s podacima dobivenim iz upitnika te je uočeno da predloženi modeli imaju visoku sposobnost predviđanja. U svom daljnjem radu, Mattsson i ostali u radu [52] predložili su uzajamno korištenje ovih dviju metoda. Odnosno, autori tvrde da se ove dvije metode međusobno nadopunjuju, u smislu da se metoda CXC koristi za identifikaciju problematičnih stanica (stanice visoke kompleksnosti), a potom da se pomoću CXI metode dalje istražuju uzroci problema. Kako bi procijenili kompleksnost montažnog zadatka, Falck i ostali predložili su CXB (engl. *Basic compleXity Criteria*, CXB) metodu [27]. Spomenuta metoda podrazumijeva korištenje upitnika u kojem se od operatera traži da procijeni ispunjava li ili ne ručni montažni zadatak šesnaest kriterija kompleksnosti koji se promatraju, a koji u procjenu kompleksnosti uključuju kognitivne i fizičke aspekte ergonomije montaže. Broj kriterija koje montažni zadatak ispunjava se zbraja, te se ovisno o rezultatima zadatak svrstava u jednu od pet kategorija kompleksnosti. Ostali pristupi u literaturi ne slijede nijednu od prethodno spomenutih podjela.

Prema opsežnim pregledima literatura koje su dali Vidal i Hernández [19] te Alkan i ostali [34], u posljednjih pet godina uočljiv je trend porasta istraživanja koji se bave definiranjem kompleksnosti i razvoja njenih mjera unutar proizvodnog sustava.

Kompleksnost u proizvodnim procesima i sustavima može se razmatrati s obzirom na tri područja (kategorije) [11]: kompleksnost proizvodnje kompleksnih dijelova, kompleksnost u montaži te troškovi kompleksnosti uslijed raznolikosti proizvoda. Montaža predstavlja ključni proces proizvodnog sustava. Tome u prilog govori činjenica da 50 % ukupnog proizvodnog vremena i 20 % ukupnih jediničnih troškova proizvodnje otpada na ovaj proces. Štoviše, pretpostavlja se da je montaža radno intenzivan proces te da zahtijeva oko trećine radne snage proizvodnog poduzeća [7]. Sve ovo upućuje na prednosti (potencijalne uštede) koje proizvodni sustav može imati poboljšanjem montažne linije. Stoga će se daljnja poglavlja ovog rada dalje osvrnuti na MMAL.

3. MODELIRANJE I MJERENJE STATIČKE (STRUKTURNE) KOMPLEKSNOSTI MONTAŽE U MMAL

Kompleksnost proizvodnog sustava smatra se jednim od uzroka nelinearnog ponašanja proizvodnog sustava. U svrhu njenog upravljanja i boljeg razumijevanja u literaturi se mogu pronaći različiti pristupi za razvoj mjera kompleksnosti. U prethodnom poglavlju prikazana je podjela pristupa s obzirom na njihovo teoretsko podrijetlo te je dan kratak osvrt o svakoj podjeli. U ovom poglavlju pozornost će se usmjeriti na principe koji su u literaturi najviše zastupljeni prilikom modeliranja i razvoja mjera strukturne kompleksnosti montaže u MMAL. Fokus će se staviti na upotrebu teorije informacija u kojoj se nesigurnost stanja iskazuje preko Shannonove entropije te na upotrebu hibridnih metoda. Spomenuti pristupi pružaju kvantitativne i analitičke temelje za razumijevanje kompleksnosti montaže. Oni će biti obrađeni s obzirom na dva široka područja koja se koriste za opisivanje strukturne kompleksnosti montaže: strukturna kompleksnost proizvoda te kompleksnost arhitekture montažnog sustava (linije).

Visoka raznolikost proizvoda posljedica je porasta raznolikosti potražnje kupaca na današnjem tržištu. Kao jedan od načina prilagodbe rastućim potrebama kupaca, proizvodna poduzeća prebacila su se s linije za montažu jednog proizvoda (masovna proizvodnja) na MMAL koja omogućuje proizvodnju širokog spektra prilagođenih proizvoda koji čine familiju proizvoda. Prisutnost velikog broja različitih mogućih odabira koji su posljedica raznovrsnosti proizvoda unutar MMAL uzrokuje visoku razinu nesigurnosti. Kako bi kvantitativno opisali nesigurnost i kako bi njome mogli upravljati, autori vrlo često koriste Shannonovu entropiju. Shannonova entropija znana i kao informacijski pristup jedna je od najrasprostranjenijih i najčešće prihvaćenih teorija koje se koriste za razvijanje mjera koje opisuju kompleksnost montaže. U Shannonovoj entropiji, informacija se koristi kao mjera nesigurnosti u komunikacijskom kanalu, a definira se kao prosječna količina informacija po poruci (bita/poruci) [42]. U kontekstu kompleksnosti montaže, Shannonova entropija upotrebljava se za kvantifikaciju nesigurnosti koja opisuje montažni sustav, odnosno za kvantifikaciju informacija koje su potrebne za opisivanje stanja elemenata promatranog sustava. Definirana je sljedećim izrazom:

$$H(p_1, p_2, \dots, p_m) = - \sum_{m=1}^M p_m \log_2 p_m \quad (3.1)$$

gdje je:

M broj stanja odabrane varijable (elementa) promatranja,

p_m je vjerojatnost da će se promatrana varijabla (element) naći u m -tom stanju.

Veća količina nesigurnosti unutar promatranog sustava podrazumijeva veću količinu informacija koje su potrebne za njegov opis. Porastom nesigurnosti, kompleksnost sustava također raste. Što su vjerojatnosti uravnoteženije, tj. što su njihove vrijednosti sličnije, vrijednost entropije H je veća. Najveća vrijednost entropije je postignuta kada su vjerojatnosti svih stanja jednake, tj. kada je $p_m = 1/M$. Vrijednost entropije tada je jednaka logaritmu broja ukupnih stanja, $\log_2 M$. Općenito, što je nesigurnost veća, veća je i kompleksnost.

Hibridni pristup mjere kompleksnosti definira kombiniranjem dviju ili više metoda iz teorija kompleksnosti, heuristike, prirodnih znanosti te ostalih područja znanosti. Dosada, u literaturi koja se bavi kompleksnošću montaže najčešće je prisutna kombinacija Shannonove entropije s metodama koje su temeljene na heurističkim indeksima. Pod pojmom heuristike, podrazumijevaju se mjere koje su temeljene na osobnim iskustvima [7]. Primjerice, riječ je o mjerama koje su razvijene imajući na umu jednostavnost sastavljanja (montaže) proizvoda poput DFA te Lucasove metode.

3.1. Definiranje kompleksnosti montaže pomoću strukturne kompleksnosti proizvoda

Kompleksnost proizvoda u literaturi rezultat je utjecaja broja komponenti, broja modula, broja gotovih dobara u portfelju poduzeća, broja i raznolikosti veza među komponentama te sličnosti proizvoda unutar familije proizvoda [53]. Veliki broj istraživanja fokusirao se na definiranje kompleksnosti proizvoda upotrebom Shannonove entropije te hibridnih metoda. Pod pojmom hibridnih metoda, u literaturi o kompleksnosti montaže proizvoda dosada je korištena ili kombinacija Shannonove entropije s heurističkim indeksima kojeg su pružili Samy i ElMaraghy [7] ili kombinacija molekularne teorije s heurističkim indeksima koju su koristili Alkan i ostali [49].

3.1.1. Shannonova entropija

Koncept sličnosti komponenti proizvoda izražen preko Shannonove entropije za definiranje kompleksnosti montaže upotrijebili su Park i Okudan [45] te Busogi i ostali [54]. Park i Okudan [45] fokusirali su se na razvoj mjere strukturne kompleksnosti dizajna varijante proizvoda unutar familije proizvoda kombiniranjem koncepta sličnosti proizvoda (engl. *commonality*) i Shannonove entropije. Koncept sličnosti proizvoda podrazumijeva definiranje stupnja sličnosti koje promatrani proizvod ima s obzirom na familiju unutar koje se nalazi, sličnosti u smislu upotrebe istih dijelova (modula, komponenti) sa ostalim pripadnicima familije. Sličnost proizvoda autori su definirali informacijskim sadržajem svake varijante komponente od koje se promatrana varijanta proizvoda sastoji. Predložena mjera strukturne kompleksnosti dizajna varijante proizvoda j , DC_j , prikazana je sljedećim izrazom:

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

gdje je:

I_{ij} informacijski sadržaj varijante dijela i varijante proizvoda j

C_{ij} stupanj sličnosti svake varijante komponente unutar familije proizvoda, odnosno vjerojatnost pojavljivanja zajedničke varijante dijela i varijante proizvoda j unutar familije proizvoda

Vjerojatnost pojavljivanja zajedničke varijante dijela unutar familije proizvoda, C_{ij} , može se izraziti omjerom dizajna (engl. *design ratio*) kada je familija proizvoda već poznata i dizajnirana, što podrazumijeva da su informacije o strukturi proizvoda koji joj pripadaju poznate i mogu se lako iščitati iz sastavnice materijala (engl. *Bill of Materials, BOM*). *A posteriori* pristupom, C_{ij} izražava se kao:

$$C_{ij} = n_{ij}/N \quad (3.3)$$

gdje je:

n_{ij} broj proizvoda unutar familije proizvoda koji dijele istu varijantu komponente i proizvoda j

N ukupan broj proizvoda

Ukoliko se određena varijanta dijela koristi u svim proizvodima od kojih se sastoji familija proizvoda, kompleksnost će biti nula, odnosno stupanj sličnosti poprimit će maksimalnu vrijednost, tj. jedan, što će upućivati na savršenu sličnost proizvoda unutar familije proizvoda. S druge strane, ukoliko se varijanta dijela ne koristi ni u jednom proizvodu koji pripada familiji proizvoda, njen stupanj sličnosti će iznositi nula čime će upućivati na nepostojanje sličnosti, odnosno nekorištenje promatrane komponente u promatranoj familiji proizvoda.

Također, upotrebom Shannonove entropije i koncepta sličnosti, Busogi i ostali [54] definirali su kompleksnost montaže kao kompleksnost odabira operatera na razini radne stanice koja je uzrokovana sličnošću vizualnih karakteristika (svojstava) komponenti proizvoda koji se sastavlja. Naime, autori polaze od činjenice da fizička sličnost među sastavnim komponentama proizvoda povećava nesigurnost odabira operatera, a time i mogućnost nastanka pogreške, što su i dokazali u svom radu. Sličnost komponenti autori iskazuju kao eksponencijalnu funkciju raspadanja² udaljenosti promatranih svojstava komponenti, pri čemu svojstva predstavljaju značajke po kojima se promatrane komponente razlikuju. Primjerice, vijak se može opisati sljedećim svojstvima (dimenzijama): promjer, boja, duljina, oblik glave i vrsta vijka [54]. Ukoliko se određeno svojstvo ne može promatrati kao geometrijska veličina (npr. izgled glave vijka, vrsta vijka), udaljenost među njima se definira kao binarna vrijednost. Što znači da međusobnom usporedbom svih parova komponenti, vrijednost jedan dodjeljuje kada dvije komponente imaju jednako promatrano svojstvo, a vrijednost nula ukoliko promatrane komponente nemaju jednako promatrano svojstvo. Kao ulaz (engl. *input*) za izračun kompleksnosti odabira komponente proizvoda služi ukupna matrica sličnosti svih svojstava.

Ukupna kompleksnost odabira operatera na razini radne stanice računa se sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned}
 H(Y_{rs}^k | X_{rs}^k = v_{it}^k) &= - \sum_{j'=1}^N p_{Y_{rs}^k | X_{rs}^k} (v_{ij'}^k | v_{it}^k) \log_2 p_{Y_{rs}^k | X_{rs}^k} (v_{ij'}^k | v_{it}^k) \\
 &= - \sum_{j'=1}^N \frac{S_{j'it}}{\theta_{v_{it}^k}} \log_2 \frac{S_{j'it}}{\theta_{v_{it}^k}}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

gdje je:

² Eksponencijalno propadanje/raspadanje – postupak smanjenja iznosa konzistentnim postotkom u određenom vremenskom periodu [55].

Y_{rs}^k slučajna varijabla koja opisuje stvarni odabir operatera,

X_{rs}^k slučajna varijabla koja opisuje željeni izlaz (ciljanu varijantu komponente, v_{it}^k),

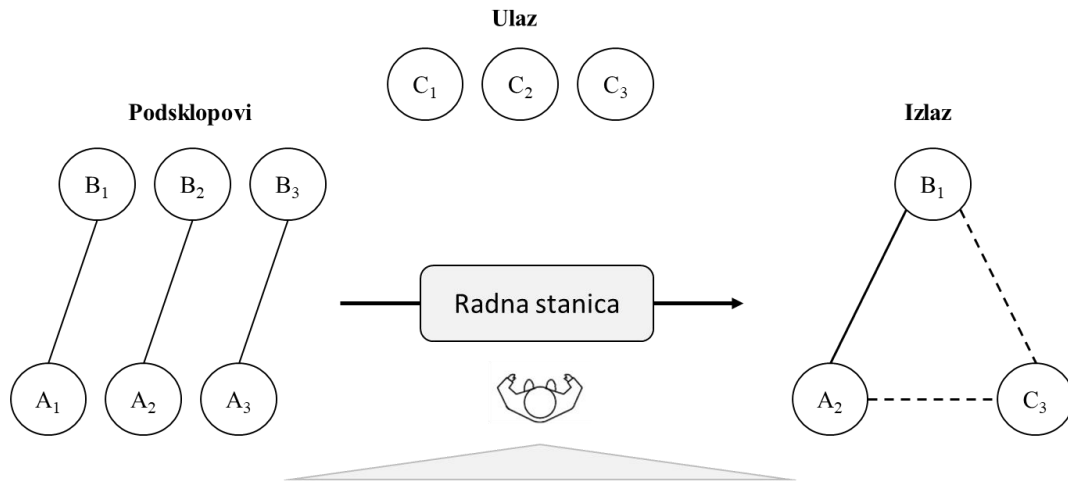
$p_{Y_{rs}^k|X_{rs}^k}(v_{ij'}^k|v_{it}^k)$ vjerojatnost da je operator odabrao varijantu $v_{ij'}^k$ nakon što je primio nalog koji zahtjeva odabir varijante v_{it}^k ,

s_{jt} ukupna sličnost ciljne komponente t i komponente j' ,

N ukupni broj komponenti koje se uspoređuju ($j'=1,2,\dots,N$),

$\theta_{v_{it}^k}$ ukupna razina uočene sličnosti povezane s ciljnom varijantom v_{it}^k (u odnosu na sve alternative).

Kompleksnost odabira operatera na razini radne stanice promatran iz perspektive dizajna proizvoda poslužio je kao inspiracija Oh i ostalima [56] za definiranje kompleksnosti montaže na razini radne stanice. Modifikacijom indeksa kompleksnosti odabira operatera (engl. *Operator Choice Complexity, OCC*) koji je predstavljen u poglavlju 3.2.1., autori su kompleksnost izrazili kao mjeru nesigurnosti odabira varijante ulazne komponente, varijante podsklopa te prikladne fizičke veze među njima uzimajući u obzir i višestruki broj mogućih fizičkih veza između ulazne komponente i modula podsklopa (element koji se sastoji od više komponenti). Drugim riječima, autori su definirali aktivnosti odabira kroz fizičke elemente dizajna proizvoda, a ne kroz objekte koji su nužni za odvijanje procesa montaže poput odabira alata, stezne naprave i procedure montaže. Pod pojmom fizičkih elemenata dizajna proizvoda podrazumijevaju se sastavne komponente proizvoda nad kojima se na promatranoj radnoj stanici vrši montaža. Autori ističu tri vrste komponenti: ulazna komponenta (engl. *input module*), podsklop (engl. *subassembly module*) te element preko kojeg se ostvaruje fizička veza među spomenutim komponentama (engl. *interface module*). Definicije montažnih zadataka, kao i njihovi opsezi, prikazani su slikom 3.1.



Zadaci koji se odnose na odabir ulazne komponente (engl. *Input tasks*):

- Odabir ulazne varijante modula
- Povezivanje fizičke veze sa odabranom ulaznom komponentom

Zadaci koji se odnose na odabir podsklopa (engl. *Subassembly tasks*):

- Odabir varijante podsklopa za montažu
- Povezivanje fizičke veze sa odabranim podsklopom

Zadaci koji se odnose na odabir fizičke veze (engl. *Interfaces tasks*):

- Odabir vrste fizičke veze

Slika 3.1. Montažni zadaci na radnoj stanici [56]

Promatrajući radnu stanicu, slika 3.1., ulazna komponenta predstavlja komponentu koju je potrebno sklopiti na stanici (C_1 , C_2 , C_3). Komponenta podsklopa definira se kao skup komponenti koje su sklopljene na prethodnoj stanici (podsklopovi A_1-B_1 , A_2-B_2 i A_3-B_3). Dok „*interfaces*“ predstavljaju fizičke veze između ulazne komponente i podsklopa na stanici. Svakom od nabrojanih fizičkih elemenata pripada odgovarajući montažni zadatak. Sukladno tome, kompleksnost na razini radne stanice definirana je kao suma kompleksnosti triju vrsta aktivnosti: aktivnosti povezane s ulazima, aktivnosti povezane s odabirom podsklopa te aktivnosti povezane s odabirom vrste fizičke veze. U predloženoj mjeri, vrijednost entropije definira se vjerojatnošću pojavljivanja promatranih elemenata montaže. Vjerojatnost pojavljivanja rezultat je udjela promatranog elementa montaže (varijante komponente) u volumenu proizvodnje svih proizvoda iz familije proizvoda.

Analogija sa Zhuovom mjerom dana je tablicom 3.1.

Tablica 3.1. Analogija indeksa OCC i nove mjere kompleksnosti

KOMPLEKSNOŠT NA RAZINI RADNE STANICE				
	AKTIVNOSTI ODABIRA			
OCC indeks [44]: kompleksnost kao mjera nesigurnosti odabira aktivnosti operatera	Odabir komponente	Odabir alata	Odabir stezne naprave	Odabir procedure montaže
	VJEROJATNOST ODABIRA OPERATERA MEĐU RAZLIČITIM ALTERNATIVAMA AKTIVNOSTI U OVISNOSTI O ODABRANOJ KOMPONENTI			
Kompleksnost montaže iz perspektive dizajna proizvoda: kompleksnost kao mjera nesigurnosti odabira elemenata dizajna proizvoda [56]	Odabir ulazne komponente i modula podsklopa	Odabir vrste fizičke veze	Odabir vrste podsklopa	Odabir vrste podsklopa ili fizičke veze
	VJEROJATNOST ODABIRA VARIJANTI ELEMENATA (komponenta, modul podsklopa, fizička veza) PROIZVODA DOBIVENA IZ UKUPNOG PROIZVODNOG VOLUMENA FAMILIJE PROIZVODA			

3.1.2. Hibridne metode

Pioniri u definiranju kompleksnosti montaže proizvoda upotrebom hibridnih metoda zasigurno su Samy i ElMaraghy koji u svom radu [7] predlažu model kompleksnosti montaže proizvoda koji je razvijen proširenjem prethodno predstavljenog modela kompleksnosti dijelova koji se obrađuju [46] principima DFA. Razvijena mjera kompleksnosti definira se kao stupanj do kojeg individualni dijelovi / podsklopovi sadrže geometrijske / fizičke attribute koji uzrokuju poteškoće prilikom procesa rukovanja i ugradnje u ručnoj ili automatiziranoj montaži [7]. Sukladno tome, ukupna kompleksnost montaže proizvoda prikazana je sljedećom relacijom:

$$C_{product} = \left[\frac{n_{part}}{N_p} + CI_{product} \right] [\log_2(N_p + 1)] + \left[\frac{n_s}{N_s} \right] [\log_2(N_s + 1)] \quad (3.5)$$

gdje je:

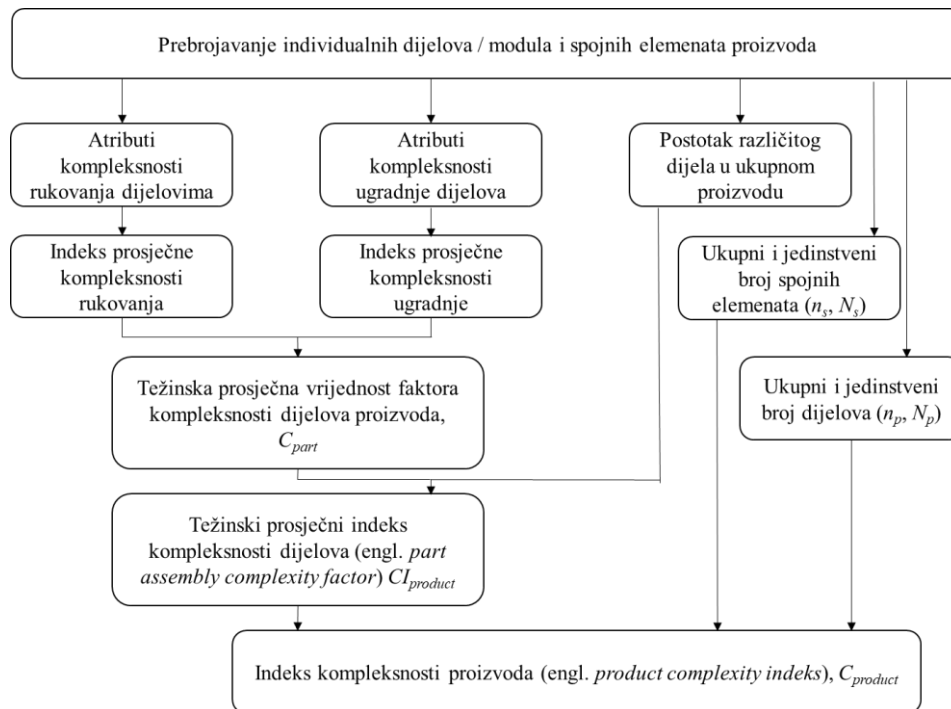
$C_{product}$ kompleksnost montaže proizvoda,

N_{part} i N_s ukupan broj dijelova i ukupan broj spojnih elemenata (engl. *fasteners*),

n_{part} i n_s broj jedinstvenih dijelova i broj jedinstvenih spojnih elemenata,

$CI_{product}$ ukupni indeks kompleksnosti proizvoda koji se sastavlja.

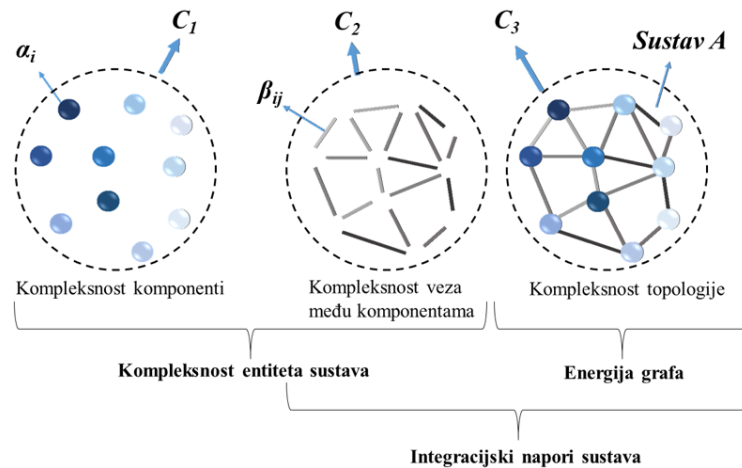
Predložena mjera kompleksnosti, jednađba 3.5., rezultat je raznolikosti i količine informacija povezanih sa osnovnim komponentama proizvoda (individualni dijelovi te spojni elementi) te sadržaja informacija preko kojeg su integrirati atributi montaže proizvoda prema DFA metodologiji, $CI_{product}$. Riječ je o atributima rukovanja (engl. *handling attribute*) u koje se ubraja: simetrija, veličina, fleksibilnost, debljina, težina, jednostavnost hvatanja i manipulacije, zapetljanost / zaglavljenost, potreba optičkog povećanja te atributima ugradnje (engl. *insertion attribute*) koji se procjenjuju s obzirom na otpornost prilikom ugradnje, potrebom za pridržavanjem, metodom spajanja, putanjom ugradnje te pozicioniranja proizvoda. Vrijednosti kompleksnosti spomenutih atributa autori su izračunali pomoću empirijskih podataka iz DFA dijagrama za ručnu i automatiziranu montažnu liniju. Shematski prikaz izračuna ukupnog indeksa kompleksnosti proizvoda, $CI_{product}$, kao i kompleksnosti montaže proizvoda, $C_{product}$, prikazan je slikom 3.2.



Slika 3.2. Izračun kompleksnosti montaže proizvoda [57]

Drugačiji pristup definiranja strukturne kompleksnosti proizvoda u ručnoj MMAL pružili su Alkan i ostali [49]. Svoj rad temeljili su na Sinhinom istraživanju [10] koji je prilagodbom Huckleove molekularne orbitalne teorije opisao strukturnu kompleksnost inženjerskog sustava. Naime, u Huckleovom modelu, konfiguracijska energija atomskih orbitala izražena je kao

funkcija samoenergije individualnih atoma u izolaciji, energije interakcije između povezanih atoma te utjecaja molekularne topologije sustava [12]. Sukladno tome, inženjerski sustav može se promatrati kao skup komponenti koje su povezane na različite načine. Pri tome, svaka komponenta odgovara atomu u molekularnoj strukturi, a veze među komponentama prikazane su vezama među atomima. Analogija spomenutog molekularnog modela s inženjerskim sustavom prikazana je slikom 3.3.



Slika 3.3. Analogija molekularne strukture s inženjerskim sustavom [49]

Alkan i ostali [49] predloženu mjeru kompleksnosti ukupnog inženjerskog sustava prilagodili su primjeni u montaži pri čemu su proizvod promatrali kao sustav. Kompleksnost montaže proizvoda izrazili su kao funkciju kompleksnosti njegovih entiteta, tj. individualnih komponenti i interakcije među svakim parom komponenti te topologije sustava. Za razliku od dosada predstavljenih mjera kompleksnosti, ova mjera kompleksnost definira kao funkciju triju elemenata proizvoda: komponenti (α_i), veza među komponentama (β_{ij}) i topologije proizvoda. Na taj način ova mjera omogućuje lakše uočavanje korijena kompleksnosti. Formula za izračun kompleksnosti proizvoda koji se sastavlja, $C_{product}$, prikazana je sljedećim izrazom:

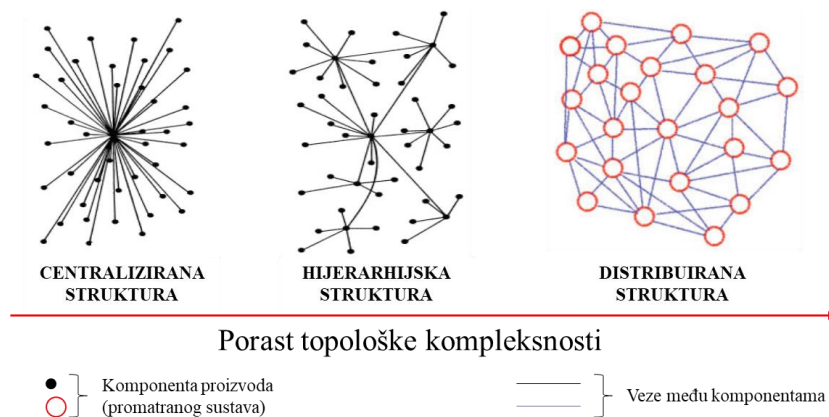
$$C_{product} = C_1 + C_2 C_3 = \sum_{i=1}^N \alpha_i + \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{ij} A_{ij} \right) \left(\frac{E_A}{N} \right) \quad (3.6)$$

gdje je:

C_1 ukupna kompleksnost individualnih komponenti proizvoda,

- C_2 ukupna kompleksnost svake interakcije u paru,
- C_3 kompleksnost topologije proizvoda,
- N ukupan broj komponenti od kojih se proizvod sastoji,
- α_i kompleksnosti komponente proizvoda i ,
- β_{ij} kompleksnost interakcije para i - j ,
- A_{ij} binarna matrica veza među komponentama,
- E_A energija grafa.

Prema izrazu 3.6, ukupna kompleksnost komponenti proizvoda, C_1 , jednaka je sumi kompleksnosti individualnih komponenti promatranog sustava (tj. proizvoda). Kompleksnost individualnih komponenti proizvoda, α_i , definirana je kao ergonomska / tehnička poteškoća prilikom rukovanja komponentom te je izražena pomoću normalizirane vrijednosti indeksa rukovanja (engl. *handling index*). Indeks rukovanja podatke o prosječnoj težini rukovanja komponentama izražava uzimajući u obzir fizičke faktore komponenti poput veličine komponente, težine komponente, težine rukovanja komponentom te njenu orijentaciju. Kompleksnost fizičkih veza, β_{ij} , definirana je pomoću normalizirane vrijednosti indeksa ugradnje (engl. *fitting index*). Oba indeksa rezultat su empirijskih istraživanja koje je proveo Lucas (Lucasova metoda). Topolojska kompleksnost, C_3 , izražena je pomoću energije grafa, E_A . Prema [58], ona potječe iz interakcija među komponentama sustava i ovisi o prirodnoj strukturi povezanosti, a raste kako se arhitektura sustava mijenja od centralizirane prema distribuiranoj, slika 3.4.



Slika 3.4. Porast topološke kompleksnosti na temelju unutarnje strukture proizvoda [58]

3.1.3. Kratak osvrt na mjere kompleksnosti proizvoda

Jedan od načina na koji su autori definirali kompleksnost montaže je preko kompleksnosti proizvoda. Međutim, unatoč upotrebi jednakih koncepata, tj. teorija za razvoj mjere kompleksnosti, uočljivo je da i dalje u literaturi postoje različita viđenja istog promatranog problema. Različite definicije koje autori predlažu, ovisno o stajalištu s kojeg su pristupili problemu, prikazan je tablicom 3.2.

Tablica 3.2. Kompleksnost montaže izražena preko strukturne kompleksnosti proizvoda

	Godina objave	Autori	Teorija (koncept) za razvoj mjere kompleksnosti	Naziv predložene mjere strukturne kompleksnosti	Definicija kompleksnosti
SHANNONOVA ENTROPIJA	2015	Park i Okudan [45]	Shannonova entropija	Strukturna kompleksnost proizvoda u familiji proizvoda	Mjera nesigurnosti u postizanju sličnosti strukture pojedinog proizvoda u odnosu na strukturu (dizajn) familije proizvoda. Pri tome, sličnost se definira kao upotreba istih dijelova (komponenti) od kojih se proizvod sastoji u odnosu na dijelove unutar familije proizvoda.
	2017	Busogi i ostali [54]	Shannonova entropija	Kompleksnost odabira operatera na radnoj stanici	Mjera nesigurnosti odabira ispravne komponente proizvoda na temelju fizičke sličnosti komponenti.
	2020	Oh i ostali [56]	Shannonova entropija (modifikacija OCC indeksa)	Kompleksnost radne stanice iz perspektive dizajna proizvoda	Mjera nesigurnosti odabira varijante ulazne komponente, varijante podsklopa te prikladne fizičke veze među njima. Ova mjera uzima u obzir i višestruki broj mogućih fizičkih veza između ulazne komponente i podsklopa. Pri tome, vjerojatnost pojavljivanja određenog elementa dobivena je iz ukupnog proizvodnog volumena svih varijanti promatranog elementa unutar familije proizvoda.
HIBRIDNI PRISTUP	2010	Samy i ElMaraghy [7]	Shannonova entropija + heuristika (DFA principi)	Kompleksnost montaže proizvoda	Stupanj do kojeg individualni dijelovi / podsklopovi sadrže geometrijske / fizičke attribute koji uzrokuju poteškoće prilikom procesa rukovanja i ugradnje u ručnoj ili automatiziranoj montaži [7].
	2016	Alkan i ostali [49]	Huckleova molekularna orbitalna teorija + heuristika (Lucasova metoda) + energija grafa	Kompleksnost montaže proizvoda	Mjera kompleksnosti entiteta proizvoda (tj. komponenti proizvoda i veze među komponentama) i njihove topološke povezanosti. Pri tome, kompleksnost entiteta proizvoda definira se kao stupanj do kojeg entiteti proizvoda sadrže strukturne karakteristike koje dovode do izazova prilikom operacije rukovanja ili ugradnje [49].

3.2. Definiranje kompleksnosti montaže preko strukturne kompleksnosti montažnog sustava (linije)

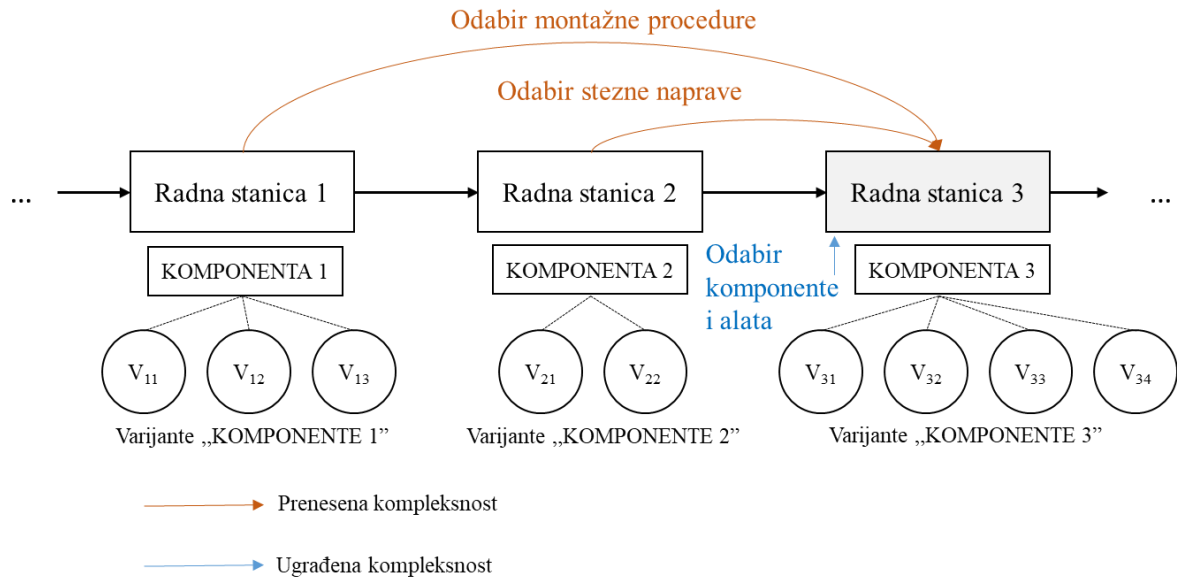
U ovom radu pojam kompleksnost montažne linije rezultat je promatranja cijele montažne linije (montažnog sustava), a ne samo strukture proizvoda / familije proizvoda. Ona proizlazi iz kompleksnosti proizvoda, ali i iz kompleksnosti proizvodnih procesa koji se na njoj odvijaju. Sukladno tome, u literaturi se opisuje preko rasporeda radnih stanica te kompleksnosti koja proizlazi iz broja i raznolikosti komponenti proizvoda i procesa montaže koji se na njima odvijaju.

3.2.1. Shannonova entropija

Zhu i ostali [44] predložili su novu mjeru kompleksnosti naziva kompleksnost izbora operatera (*OCC* indeks) kojom definiraju kompleksnost na razini radne stanice kvantificiranjem ljudskih karakteristika prilikom procesa donošenja odluka. Autori promatraju raznolikost proizvoda (engl. *product variety*) kao glavni čimbenik nastanka kompleksnosti. Veći izbor varijanti proizvoda znači više potrebnog vremena i mentalnog napora operatera za pronalaženje i odabir ispravnog dijela i njegovu ugradnju slijedeći odgovarajuću montažnu proceduru. Drugim riječima, kako raznolikost proizvoda raste, raste i broj izbora s kojima se operater susreće, a time raste i njegova nesigurnost. Odnosno, kompleksnost je pozitivno monotona funkcija količine nesigurnosti [22].

OCC indeks temelji se na Shannonovoj entropiji, a definiran je kao mjera nesigurnosti odabira raznih montažnih aktivnosti s kojima se operateri suočavaju prilikom rada na MMAL. Montažne aktivnosti izbora podrazumijevaju izbor tražene varijante, tj. alternative komponente proizvoda (engl. *part choice*), izbor prikladnog alata (engl. *tool choice*), stezne naprave (engl. *fixture choice*) te izbor ispravne procedure montaže (engl. *assembly procedures*). Predložena mjera kompleksnosti radne stanice odraz je raznolikosti proizvoda te informacija o montažnom procesu. Izbor odgovarajuće varijante montažnih aktivnosti (izbor alata, stezne naprave i procedure montaže) na trenutnoj radnoj stanici *rs* može biti pod utjecajem varijante komponente koja je na njoj odabrana, ili pak može biti pod utjecajem varijante komponente koja je odabrana na uzvodnoj stanici. Kako bi naglasili dvojaki uzrok nastanka kompleksnosti izbora, autori naglašavaju dvije vrste kompleksnosti koje se pojavljuju na radnoj stanici *rs*. Prva kompleksnost naziva se ugrađena kompleksnost (engl. *feed complexity*) i ona je isključivo

rezultat odabira varijante dijela na trenutnoj stanici, dok se druga vrsta naziva prenesena kompleksnost (engl. *transfer complexity*) i ona je rezultat utjecaja odabira komponente na prethodnim stanicama. Grafički prikaz spomenutih kompleksnosti u montažnoj liniji dan je slikom 3.5.



Slika 3.5. Primjer prikaza ugrađene i prenesene kompleksnosti za radnu stanicu tri [44]

Sukladno tome, kompleksnost izbora na razini radne stanice, C_{rs} , definirana je kao suma spomenutih kompleksnosti:

$$C_{rs} = C_f + \sum_{\forall x:x < y} C_{xy} \quad (3.7)$$

gdje je:

C_f ugrađena kompleksnost,

C_{xy} prenesena kompleksnost.

Prethodno prikazan izraz za C_{rs} može se zapisati i kao težinska suma kompleksnosti svih montažnih aktivnosti koje su joj pridružene:

$$C_{rs} = \sum_{k=1}^K \alpha_{rs}^k H_{rs}^k, \quad \alpha_{rs}^k > 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3.8)$$

gdje je:

α_{rs}^k procijenjena težina k -te montažne aktivnosti na promatranoj radnoj stanici rs ,

H_{rs}^k entropija izbora povezana s omjerom raznolikosti varijante k -te aktivnosti na radnoj stanici rs . Računa se prema jednadžbi 3.1., a vjerojatnost p_m definira se kao vjerojatnost operaterova izbora m -te varijante promatrane k -te aktivnosti na trenutnoj stanici. Funkcija H računa prosječno vrijeme reakcije operatera prilikom odabira aktivnosti,

K montažna aktivnost: izbor varijante komponente, izbor alata, izbor stezne naprave i/ili izbor odgovarajuće procedure montaže.

Kako bi u predloženu mjeru kompleksnosti uključili utjecaj fleksibilnosti sustava montaže, autori su predložili definiranje binarne matrice odnosa „varijante komponenti-montažne aktivnosti“, $\Delta_{rs',rs}^k$. U montažnom sustavu fleksibilnost se definira kao korištenje jednakih alata, steznih naprava ili montažnih procedura za različite varijante komponenti. Na taj način, alternative mogućih izbora se smanjuju čime se smanjuje i kompleksnost izbora s kojom se operater susreće [44]. Stupci binarne matrice predstavljaju moguća stanja (alternative) promatrane aktivnosti k , dok se redci odnose na broj varijanti komponente, m , koja se bira na trenutnoj radnoj stanici rs . Spomenuta binarna matrica odnosa prikazana je sljedećim izrazom:

$$\Delta_{rs',rs}^k = \begin{bmatrix} \delta_{1,1} & \cdots & \delta_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n,1} & \cdots & \delta_{n,m} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

gdje je:

$$\delta_{s,t} = \begin{cases} 1, & \text{varijanta } s \text{ na prethodnoj stanici } rs' \text{ zahtjeva da } k - \text{ta aktivnost na stanici } rs \\ & \text{bude u stanju } t \\ 0, & \text{inače} \end{cases}$$

Množenjem binarne matrice s matricom vjerojatnosti odabira određene varijante aktivnosti, vjerojatnost p_m se modificira.

OCC indeks poslužio je kao osnova za definiranje indeksa relativne kompleksnosti, RC , kojeg su predložili Wang i ostali [59], kako bi odredili optimalan podskup proizvoda iz familije proizvoda koji će se nuditi na tržištu. Relativna kompleksnost predstavljena je kao omjer kompleksnosti montažne linije i njene maksimalno moguće kompleksnosti. Drugim riječima, RC se definira kao stupanj kompleksnosti MMAL odabrane familije proizvoda u usporedbi s njegovom najvećom mogućom vrijednošću, a prikazan je jednadžbom 3.10.

$$RC = \frac{C}{C_{max}} \quad (3.10)$$

gdje je:

C kompleksnost danog omjera raznolikosti varijanti proizvoda unutar odabranog podskupa familije proizvoda koji se nudi na tržištu,

C_{max} maksimalna moguća kompleksnost MMAL.

Vrijednost ove mjere kompleksnosti kreće se u rasponu od nula do jedan, pri čemu nula podrazumijeva da se proizvodi samo jedna varijanta proizvoda iz familije, dok vrijednost jedan podrazumijeva da je dosegnuta maksimalna kompleksnost linije. Maksimalno moguća kompleksnost postiže se kada su zadovoljena sljedeća tri uvjeta: cijela familija proizvoda nudi se tržištu, nema sličnosti među aktivnosti u montažnoj liniji (ne koristi se zajednički stezni pribor, fleksibilni alati) te kada su sve vjerojatnosti odabira različitih varijanti na promatranjoj stanici jednake [59]. Vrijednost entropije slučajne aktivnosti određena je potražnjom tržišta (promatranih tržišnih segmenata) za varijantama modula promatranog podskupa familije proizvoda koja se nudi na promatranim tržišnim segmentima.

Sun i Fan [60] također su koristili Shannonovu entropiju kako bi kompleksnost montažne linije definirali kao mjeru nesigurnosti odabira varijanti triju vrsta značajki, tj. triju skupina komponenti koje su promatrali kao izvor kompleksnosti radnih stanica unutar MMAL. Riječ je o neovisnim značajkama (engl. *independent features*), utjecajnim značajkama (engl. *influential features*) te o značajkama koje dolaze u paketu (engl. *bundled features*). Kao što se iz naziva značajki može zaključiti, neovisne značajke su značajke čiji odabir opcije ne ovisi o odabiru opcije neke druge značajke, skupne značajke odnose se na pakete značajki koje proizvođači nude (značajke koje dolaze zajedno i ne mogu se odabrati jedna bez druge), dok su utjecajne značajke one koje određuju odabir opcije značajki i montažnih operacija na nizvodnim stanicama [60]. Prva grupa značajki može se poistovjetiti s ugrađenom kompleksnošću kod Zhua, dok se preostale dvije skupine značajki mogu promatrati kao prenesena kompleksnost s obzirom da one uzrokuju kompleksnost na nizvodnim stanicama. Mjera entropije za svaku od spomenutih značajki, reflektira nesigurnost radnog sadržaja radne stanice za ugradnjom određene varijante značajke. Koristeći mjere entropije za ove tri vrste značajki unutar proizvodne sekvence, autori su uvođenjem binarne varijable definirali mjeru kompleksnosti promjena (engl. *changeover complexity*) koja se pojavljuje unutar proizvodne sekvence MMAL.

Definiranje kompleksnosti montaže na razini radne stanice korištenjem koncepta entropije bavili su se i Zeltzer i ostali [30]. Novu mjeru kompleksnosti montaže na razini radne stanice, $Complexity_{AZrs}$, definirali su kao mjeru nepredvidljivost zadataka dodijeljenih radnoj stanici tijekom procesa montaže, uključujući i varijabilnost trajanja svakog zadatka na njoj. Varijabilnost vremena trajanja zadatka rezultat je proizvodnje različitih varijanti proizvoda koji pripadaju promatranoj familiji proizvoda unutar MMAL. Formula za izračun kompleksnosti, dana je izrazima 3.11 i 3.12.

$$COMPLEXITY_{AZrs} = H(AZ_{rs}) + \sum_{z \in AZrs} \sigma_z \quad (3.11)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{|M| - 1} \sum_{m \in M} (t_{zm} - \mu_z)^2} \quad (3.12)$$

gdje je:

μ_z prosječno vrijeme obrade zadatka z kod svih modela koji se sklapaju na montažnoj liniji i zahtijevaju zadatak z

$H(AZ_{rs})$ kompleksnost radne stanice rs tijekom montaže

AZ_{rs} skup montažnih zadataka dodijeljenih radnoj stanici rs

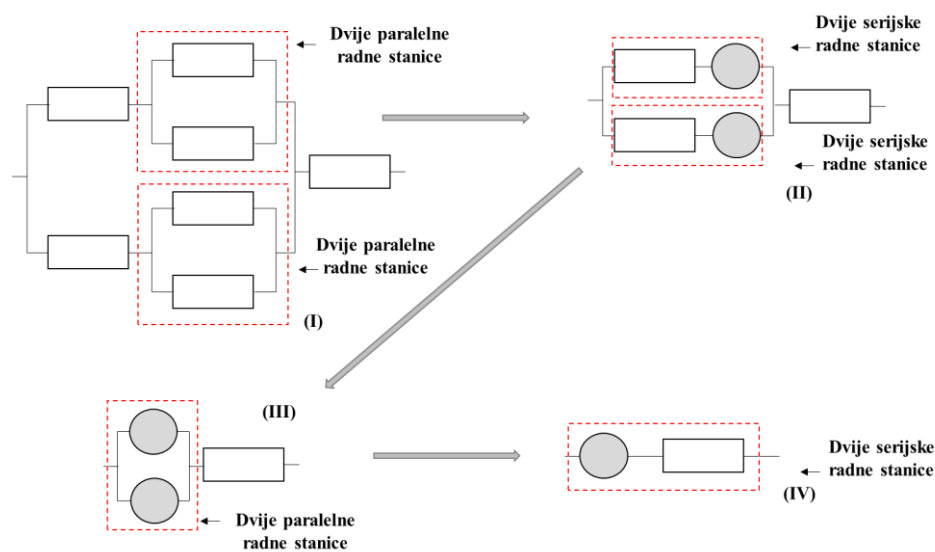
σ_z varijabilnost vremena trajanja obrade zadatka z

M broj različitih modela koji se montiraju na montažnoj liniji

t_{zm} vrijeme izvršenja zadatka z za varijantu proizvoda m

Dosada predstavljeni radovi [44, 59, 30] bavili su se kvantificiranjem kompleksnosti uz pretpostavku uz pretpostavku da se na svakoj radnoj stanici MMAL odvija sklapanje točno određenog elementa (komponente) proizvoda (svaka komponenta ima nekoliko varijanti odabira na toj radnoj stanici). To znači, ukoliko se proizvod sastoji od primjerice četiri komponente, MMAL se sastoji od četiri radne stanice. Wang i Hu [61] ovakvu vrstu MMAL nazvali su serijskom MMAL. U svom radu [61] autori su proširili model kompleksnosti od Zhua [44] na montažne linije koje karakteriziraju „paralelne i hibridne konfiguracije“. Pod pojmom paralelnih konfiguracija autori podrazumijevaju postojanje više identičnih radnih stanica. Pri tome, na svakoj radnoj stanici može se izvršiti montaža bilo kojeg od više mogućih elementa (komponenti) proizvoda. Primjerice, na „paralelnim“ radnim stanicama vrši se montaža četiriju komponenti proizvoda. Ovisno o potražnji odabire se jedna varijanta

komponente koja se sastavlja i koja dalje postaje podsklop / sklop za sljedeću radnu stanicu. S obzirom da svaka „paralelna“ radna stanica vrši jednaki posao, potražnja za određenim varijantama različitih komponenti proizvoda od mogućih ponuđenih, jednako se dijeli na sve „paralelne“ radne stanice. Kompleksnost hibridnih konfiguracija izrazili su preko iterativnog agregacijskog algoritma koji postupno identificira je li riječ o paralelnoj ili serijskoj konfiguraciji, računa kompleksnost prve uočene konfiguracije i potom je promatra kao jednu montažnu stanicu. Postupak se ponavlja dok ne preostane ili jedna serijska ili jedna paralelna konfiguracija. Ilustrativni primjer rada algoritma prikazan je sljedećom slikom.



Slika 3.6. Primjer ilustrativnog algoritma objedinjavanja za izračun kompleksnosti MMAL s hibridnim konfiguracijama

Osim za definiranje strukturne kompleksnosti montažne linije, Shannonova entropija i prethodno razvijene mjere korištene su i prilagođene za definiranje strukturne kompleksnosti na razini proizvodnog sustava te na razini lanca opskrbe montaže (engl. *assembly supply chain*, ASC). Definiranjem informacijskog sadržaja kao sličnosti procesa koji su potrebni za proizvodnju individualne varijante proizvoda unutar pripadajuće joj familije, Park i Okudan [45] predložili su mjeru kompleksnosti proizvodnje naziva strukturna kompleksnost proizvodnje familije proizvoda. Strukturna kompleksnost proizvodnje familije proizvoda definirana je kao mjera nesigurnosti ugrađena u postizanje sličnosti proizvodnih procesa koji su potrebni za nju. Sličnost procesa podrazumijeva koliko različitih varijanti komponenti korištenih za proizvodnju varijante proizvoda dijeli određeni proizvodni proces [45]. Drugim riječima, ova mjera reflektira raznolikost potrebnih procesa za proizvodnju varijante proizvoda.

Ukupni informacijski sadržaj raznolikosti procesa u svakoj varijanti proizvoda, MC_j , iskazan je sljedećim izrazom:

$$MC_j = \sum_p I_{pj} = \sum_p (-\log_2 C_{pj}) \quad (3.13)$$

$$C_{pj} = n_{pj}/n_j \quad (3.14)$$

$$I_{pj} = -\log_2 C_{pj} \quad (3.15)$$

gdje je:

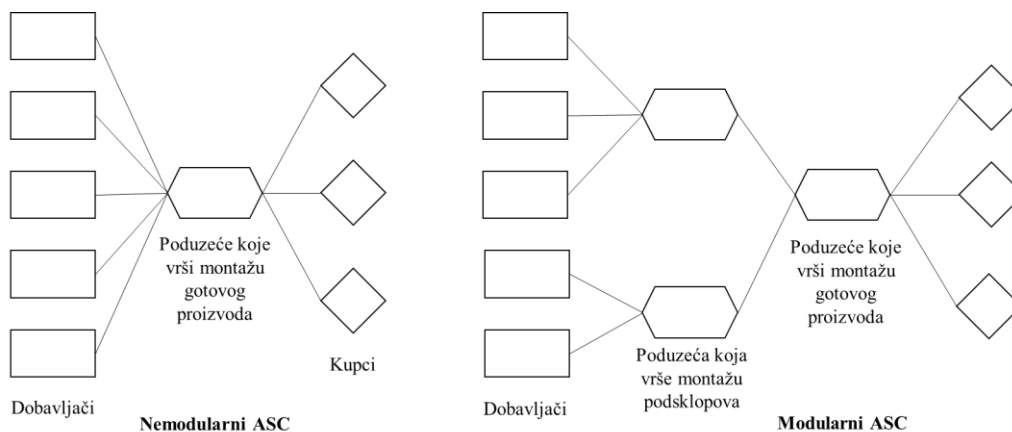
C_{pj} nesigurnost dijeljenja procesa p za proizvodnju varijante proizvoda j ,

n_{pj} broj varijanti komponenti (dijela) u proizvodu j koja prolazi kroz proces p ,

n_j ukupan broj varijanti komponenti u proizvodu j ,

I_{pj} informacijski sadržaj, tj. količina informacija potrebna za opisivanje sličnosti svakog procesa.

ASC mreža obično se sastoji od različitih proizvodnih entiteta od kojih svaki može koristiti nekoliko proizvodnih inputa kako bi proizveo traženi izlaz [62]. Pri tome, značajni proizvodni entitet za proizvodnju proizvoda predstavljaju montažne aktivnosti. Stoga se strukturalna kompleksnost lanca opskrbe montaže u sljedećim radovima promatra kao funkcija broja proizvoda (raznovrsnosti proizvoda), broja elemenata, tj. sudionika ASC mreže (montažne linije i dobavljači) te njihovih veza unutar lanca opskrbe. Danas, većina poduzeća orijentirana je k modularnom tipu ASC mreže koji se odlikuje većom fleksibilnošću u odnosu na tradicionalni nedomularni dizajn mreže [63]. Struktura modularne i nedomularne ASC mreže dana je slikom 3.7.



Slika 3.7. Struktura modularne i nedomularne ASC mreže [64]

Tradicionalni lanac opskrbe podrazumijeva da sve montažne aktivnosti obavlja isto poduzeće. Modularni lanac opskrbe montaže predstavlja mrežu koja se sastoji od određenog broja međusobno povezanih modula. U ovom slučaju, moduli predstavljaju dvije vrste subjekata: dobavljače i poduzeća koja vrše montažu podsklopova/gotovih proizvoda. Sukladno tome, karakteristika ovog lanca opskrbe je alokacija operacija montaže na više poduzeća: poduzeća koja vrše montažu podsklopova (engl. *intermediate sub-assemblers*) te poduzeća koja vrše montažu gotovog proizvoda (engl. *final assembler*). Kompleksnost ASC-a Hu i ostali [62] definirali su kao kompleksnost odnosa (veza) između njegovih elemenata (dobavljač-poduzeće koje vrši operacije montaže). Mjeru su razvili modifikacijom *OCC* indeksa. Svaki element lanca opskrbe promatrali su kao MMAL koji pruža određeni broj varijanti. Predložena mjera kompleksnosti određena je konfiguracijom mreže lanca opskrbe, nesigurnošću potražnje svakog čvora unutar lanca opskrbe kao i razinom raznolikosti proizvoda svakog čvora. Pod pojmom konfiguracije mreže, autori podrazumijevaju definiranje broja čvorova (dobavljač ili poduzeće koje vrši operacije montaže) od kojih se mreža sastoji te veza među njima. Odnosi među čvorovima integrirani su u mjeru kompleksnosti pomoću binarne matrice susjedstva. Ukupna kompleksnost mreže lanca opskrbe montaže rezultat je zbroja vrijednosti kompleksnosti svih uspostavljenih veza između elemenata lanca opskrbe. Kompleksnost veza (*C*) predstavljena je Shannonovom entropijom u kojoj se vjerojatnost definira kao proizvodna rata određene varijante komponente proizvoda koju promatrani čvor treba od prethodnog čvora za proizvodnju vlastitog podsklopa ili finalnog proizvoda. Proizvodne rate među čvorovima definirane su matricama prethodnosti i matricama omjera raznolikosti proizvoda. Proširenje ovog rada pružili su Hamta i ostali [64]. Ukupnu strukturnu kompleksnost montažnog sustava definirali su razmatrajući odnose među čvorovima, kao Hu i ostali [62], ali i kompleksnost koja se pojavljuje unutar montažnih linija koje pripadaju lancu opskrbe. Formula kojom je ukupna strukturna kompleksnost ASC mreže definirana, prikazana je sljedećim izrazom:

$$TC = WF_{network} * C + WF_{assembly} * AC \quad (3.16)$$

gdje je:

TC ukupna kompleksnost promatrane ASC mreže

WF_x težinski faktori kompleksnosti (ovisi o donosiocu odluke)

AC kompleksnost montažnih linija koje pripadaju lancu opskrbe

C kompleksnost veza ASC mreže (definirana je potražnjom svakog čvora za potrebnim varijantama komponenti proizvoda)

Kompleksnost montažne linije autori [64] su definirali korištenjem *OCC* indeksa. *OCC* indeks definira kompleksnost radne stanice kao nesigurnost odabira operatera između skupa montažnih aktivnosti od kojih svaka aktivnost ima nekoliko mogućih varijanti.

3.2.2. Hibridne metode

Prethodni rad [7] Samy i ElMaraghy proširili su u istraživanju [65] u kojem su predložili *Metodu mapiranja* (engl. *mapping base method*) kojom su kompleksnost montažne linije izrazili preko kompleksnosti montažne opreme koju promatraju kao funkciju kompleksnosti komponenti proizvoda. Kompleksnost montažne opreme definirana je kao umnožak dviju matrica. Prva matrica je matrica odnosa atributa montaže proizvoda (atributi rukovanja i ugradnje) i različitih funkcija montaže (funkcija opskrbe, engl. *feeding*; funkcija rukovanja, engl. *handling*; funkcija spajanja, engl. *joining*; funkcija transporta, engl. *transportation*). Druga matrica je matrica kompleksnosti atributa montaže svih individualnih dijelova proizvoda. Ova metoda koristi se za procjenu prosječne kompleksnosti opreme montažne linije kada njegova točna struktura nije unaprijed poznata (nisu poznati podaci o montažnoj opremi i njene karakteristike), ali su poznati podaci o proizvodu i njegovim komponentama. Predloženom metodom je lako uočiti da porastom kompleksnosti komponente, raste i kompleksnost opreme koja je potrebna za njenu montažu. Druga metoda koju autori spominju je *Metoda kodiranja* (engl. *code-based method*). Ona podrazumijeva da je poznat proizvod koji se sastavlja, ali i da je određen tip i vrsta opreme od kojih će se montažni sustav sastojati. Metoda kodiranja kompleksnost montaže definira kao funkciju informacijskog sadržaja, količine i raznolikosti opreme, dok je utjecaj prostornog rasporeda opreme na kompleksnost montažnog sustava zanemaren. Pod pojmom raznolikosti opreme, autori polaze od toga da se oprema montažnog sustava dijeli na tri kategorije: strojevi (engl. *machines*, *M*), oprema za rukovanje materijalom (engl. *material handling equipment*, *MHS*) te međuskladišta (engl. *buffers*, *B*). Svaka od ovih kategorija, ovisno o trenutnom montažnom sustavu koji se promatra (automatizirani ili ručni), opisuje se kodom koji opisuje njihovu strukturnu (statičku) kompleksnost. Kod sadrži podatke o vrsti i općenitoj strukturi opreme, o načinu upravljanja opremom, njenom programiranju te samog rada na njoj. Definirani kod se koristi za izračun vrijednosti indeksa kompleksnosti opreme, I_e . Formula za izračun kompleksnosti pojedinačne opreme prikazana sljedećim izrazom:

$$C_e = \left[\frac{n_e}{N_e} + I_e \right] [\log_2(N_e + 1)], \quad e = \text{vrsta opreme } (M, MHS, B) \quad (3.17)$$

gdje je:

C_e	kompleksnost opreme e
N_e	ukupan broj određene opreme e koja se promatra na radnoj stanici
n_e	količina jedinstvene opreme e na promatranoj radnoj stanici,
I_e	indeks kompleksnosti opreme (temelji na strukturnoj statičkoj kompleksnosti svojstvenoj pojedinim dijelovima opreme na temelju njihove vrste i karakteristika komponenata); predstavlja informacijski sadržaj,
n_e/N_e	indeks raznolikosti informacija,
$\log_2(N_e+1)$	količina informacija.

Kompleksnost montaže definirana je kao suma kompleksnosti promatrane opreme i njima pridruženih težinskih faktora. U spomenutom radu autori su zanemarili raspored radnih stanica na strukturnu kompleksnost montažnog sustava. Utjecajem prostornog rasporeda radnih stanica na strukturnu kompleksnost proizvodnog sustava autori su se bavili u radu [38]. Razvoj ukupnog indeksa strukturne kompleksnosti prostornog rasporeda proizvodnog sustava temeljili su na integraciji šest indeksa kompleksnosti (indeks gustoće, indeks putanje, indeks ciklusa, indeks točaka donošenja odluka, indeks distribucije poveznica te indeks paralelnih poveznica) koje su definirani pomoću teorije grafova.

Kompleksnošću montaže koja proizlazi iz kompleksnosti montažnog sustava (linije), bavili su se i Liu i ostali [66]. Autori su predstavili model integrirane kompleksnosti radne stanice za zavarivanje unutar MMAL koja nastaje uslijed personalizacije karoserije automobila (engl. *auto-body product*). Na temelju predloženog modela, uzimajući u obzir utjecaj koji personalizirani proizvodi imaju na odabir opreme na nizvodnim stanicama, autori su predstavili i model toka kompleksnosti na razini sustava primjenom „*state space theory*“. Model toka kompleksnosti sličan je definiranju prenesene kompleksnosti kod Zhua jer se preko njega kompleksnost odabira vrste opreme na radnoj stanici povezuje s odabirom personaliziranih dijelova proizvoda na prethodnim radnim stanicama. Dok je model integrirane kompleksnosti sličan kao i ugrađena kompleksnost s obzirom da on govori o ugrađenoj kompleksnosti na radnoj stanici koja se promatra, a koja je rezultat odabira komponente proizvoda na njoj.

Integrirana kompleksnost na razini radne stanice, C_{rs}^{In} , definirana je kao vektor kompleksnosti opreme i kompleksnosti odabira podsklopa proizvoda.

$$C_{rs}^{In} = C_{rs} + C_e = [H, C_M, C_{MHS}, C_B] \quad (3.18)$$

gdje je:

- C_{rs} kompleksnost koju uzrokuje raznolikost proizvoda stanici rs , definirana je entropijom informacija H ,
- C_e ukupna kompleksnost opreme E na razini stanice rs ,
- C_M kompleksnost opreme za zavarivanje,
- C_{MHS} kompleksnost opreme za rukovanje materijalom,
- C_B kompleksnost međuskладиšta.

Kao temelj za opisivanje informacijskog sadržaja i strukturne kompleksnosti različite opreme na radnoj stanici, autori su koristili model kompleksnosti opreme koji su predložili Samy i ElMaraghy [7], a koji je prikazan izrazom 3.17. Utjecaj raznolikosti podsklopova proizvoda na kompleksnost autori su definirali pomoću Shannonove entropije, točnije preko nesigurnosti operatera prilikom odabira različitih podsklopova (modifikacija *OCC* indeksa).

3.2.3. Kratak osvrt na mjere kompleksnosti montažne linije

Drugi način na koji autori definiraju kompleksnost montaže je preko kompleksnosti montažne linije. Glavni uzrok nastanka i ove vrste kompleksnosti proizlazi iz raznolikosti sastavnih dijelova proizvoda koji se na montažnoj liniji sastavljaju. Prema predstavljenim radovima, može se uočiti da se u literaturi više autora bavi definiranjem kompleksnosti preko strukturne kompleksnosti montažnog sustava (linije) nego samo preko strukturne kompleksnosti proizvoda. Također, vidljivo je da je Shannonova entropija daleko zastupljeniji koncept od hibridnih metoda, što možemo uočiti iz priložene tablice 3.3. Tablica 3.3. također sadrži i različite definicije kompleksnosti koje autori predlažu, ovisno o stajalištu s kojeg su pristupili problemu. Većina autora koja definira kompleksnost montaže u MMAL pretpostavljaju da je broj radnih stanica jednak broju modula budući da se montaža svakog modula odvija na njemu pripadajućoj radnoj stanici. Ograničeni broj autora u obzir je uzelo mogućnost da se na više radnih stanica sastavljaju jednake komponente proizvoda.

Glavnina radova koji su analizirani u literaturi u poglavlju 3 svoju mjeru kompleksnosti primijenili su na studiji slučaja. Određeni autori svoj rad temelji su na promatranju industrijske studije slučaja [30, 66], dok su se drugi autori koristili primjerima iz literature [12, 45, 7, 65]. Također, određen broj autora nije proveo studije slučaja već su primjer primjene razvijene mjere kompleksnosti pokazali na ilustrativnom primjeru [44, 54, 60, 61, 64]. Zaključci doneseni na temelju promatranih studija slučaja sažeti su u tablici 3.4. Radovi koji su proučeni u poglavlju 3, a ne nalaze se u tablici 3.4. su radovi u kojima se promatra optimizacija pa će o njima više biti riječ u sljedećem poglavlju.

Tablica 3.3. Kompleksnost montaže izražena preko strukturne kompleksnosti montažne linije

SHANNONOVA ENTROPIJA	Godina objave	Autori	Teorija (koncept) za razvoj mjere kompleksnosti	Naziv predložene mjere strukturne kompleksnosti	Definicija kompleksnosti
	2008	Zhu i ostali [44]	Shannonova entropija	Kompleksnost odabira operatera (<i>OCC</i> indeks) na razini radne stanice	Mjera nesigurnosti operaterova izbora m -te varijante promatrane k -te aktivnosti na trenutnoj stanici rs . Aktivnosti: odnose se na raznovrsnost dijelova (odabir dijela proizvoda) te informacija o montažnim procesima (odabir prikladnog alata, odabir stezne naprave i odabir ispravne procedure montaže).
				Kompleksnost odabira operatera (<i>OCC</i> indeks) na razini montažne linije	Suma kompleksnosti svih radnih stanica od kojih se montažna linija sastoji.
	2011	Wang i ostali [59]	Shannonova entropija	Kompleksnost na razini stanice	Mjera nesigurnosti potražnje tržišta za određenom varijantom modula na promatranoj radnoj stanici.
Relativna kompleksnost montažne linije				Stupanj kompleksnosti u usporedbi s najvećom mogućom kompleksnošću montažne linije. Kompleksnost montažne linije je suma kompleksnosti svih radnih stanica od kojih se montažna linija sastoji.	
2016	Zeltzer i ostali [30]	Shannonova entropija	Kompleksnost na razini radne stanice	Mjera koja povezuje entropiju radne stanice s dodjelom zadataka radnim stanicama. Mjera koja se definira kao suma nesigurnosti pojavljivanja određenog zadatka na radnoj stanici i varijabilnosti trajanja zadataka (isti zadaci za različite modele imaju različita vremena trajanja)	

Tablica 3.3. (nastavak) Kompleksnost montaže izražena preko strukturne kompleksnosti montažne linije

Godina objave	Autori	Teorija (koncept) za razvoj mjere kompleksnosti	Naziv predložene mjere strukturne kompleksnosti	Definicija kompleksnosti
2018	Sun i Fan [60]	Shannonova entropija	Kompleksnost montaže na razini radne stanice	Mjera nesigurnost radnog sadržaja radne stanice za ugradnjom svake od varijanti značajki.
			<i>Kompleksnost promjene</i> na razini montažne linije	Kompleksnost montaže povezane s varijantama značajki s više opcija koju doživljavaju svi operateri prilikom montaže. Značajke proizvoda odnose se na module, svaki modul ima svoju radnu stanicu. <i>Kompleksnost promjena</i> definira se statičkim i dinamičkim aspektom. Statički aspekt odnosi se na odabir operatera na radnoj stanici i definira se preko <i>OCC</i> indeksa, dinamički aspekt uključuje promatranje promjene značajki unutar proizvodne sekvence.
2015	Park i Okudan [45]	Shannonova entropija	Strukturna kompleksnost proizvodnje proizvoda u familiji proizvoda	Mjera nesigurnosti ugrađena u postizanje sličnosti proizvodnog procesa za proizvodnju familije proizvoda. Pri tome, sličnost se definira na kao upotreba istih procesa za proizvodnju različitih komponenti od kojih se proizvod sastoji u odnosu na različite procese unutar familije proizvoda.
2008	Hu i ostali [62]	Shannonova entropija	Kompleksnost montaže na razini montažne linije	Jednako kao Zhu [44].
			Kompleksnost mreže ASC-a	Definirana je kao kompleksnost odnosa između njenih elemenata (dobavljač, poduzeće koje vrši montažu). Kompleksnost odnosa definira se kao mjera nesigurnosti potražnje koju jedan čvor ima za varijantama koje nudi drugi čvor, a sve kako bi se zadovoljila potražnja kupaca. Pri tome, čvorovi su elementi ASC-a.

SHANNONOVA ENTROPIJA

Tablica 3.3. (nastavak) Kompleksnost montaže izražena preko strukturne kompleksnosti montažne linije

Godina objave	Autori	Teorija (koncept) za razvoj mjere kompleksnosti	Naziv predložene mjere strukturne kompleksnosti	Definicija kompleksnosti
2018	Hamta i ostali [64]	Shannonova entropija	Kompleksnost mreže ASC-a	Jednako kao Hu [62].
			Kompleksnost montažne linije	Jednako kao Zhu [44].
			Ukupna strukturna kompleksnost ASC mreže	= suma prethodnih dviju kompleksnosti
2012	Samy i ElMaraghy [65]	Shannonova entropija + DFA principi	Kompleksnost montaže izražena je preko mapiranja kompleksnosti opreme montažne linije, 1. mjera	Funkcija je ovisnosti atributa montaže (indeks rukovanja i indeks ugradnje) komponenti proizvoda i funkcija montažnog sustava (autor razlikuje četiri funkcije) te pripadajućih vrijednosti atributa montaže svih dijelova proizvoda.
			Kompleksnost montaže izražena je preko kompleksnosti opreme montažne linije, 2. mjera	Funkcija je ukupnog broja opreme, broja jedinstvene opreme i indeksa strukturne kompleksnosti opreme (računa se preko atributa montaže: indeksa rukovanja i ugradnje).
2017	Liu i ostali [66]	Shannonova entropija + kompleksnost opreme od Samy [65]	Integrirana kompleksnost radne stanice za zavarivanje	Nesigurnost potražnje varijante podsklopa na radnoj stanici + kompleksnost montažnog sustava kao funkcije informacijskog sadržaja, količine i raznolikosti opreme. Definirana je preko vektora.
			Tok kompleksnosti na razini montažne linije	Razvijen je preko „state space theory“ i u obzir uzima integriranu kompleksnost radnih stanica za zavarivanje te kompleksnost odabira opreme na proizvodnim stanicama zbog utjecaja odabira komponenti personaliziranih proizvoda na prethodnim stanicama.

HIBRIDNI PRISTUP

Tablica 3.4. Provođenje studije slučaja

Godina objave	Autori	Sustav koji promatraju	Studija slučaja	Zaključak studije slučaja	Usporedba s drugim mjerama
2008	Zhu i ostali [44]	Ručna MMAL	DA*	Porastom varijanti komponenti raste i kompleksnost.	NE
2008	Hu i ostali [62]	Ručna MMAL	NE	-	NE
2010	Wang i ostali [61]	Ručna MMAL	DA*	Veća kompleksnost = veći umor operatera (izražavaju ga kao funkciju entropije) = niža učinkovitost operatera = niža pouzdanost radne stanice = manji izlaz MMAL. Kompleksnost raste kako se konfiguracija mijenja od serijske preko hibridne do paralelne. Kod maksimalne razine umora, najbolja je serijska konfiguracija jer umor najmanje utječe na izlaz.	DA (usporedba rezultata s različitim konfiguracijama MMAL preko ilustrativnog primjera)
2010	Samy i ElMaraghy [7]	Ručna i automatska MMAL	DA	Porast kompleksnosti proizvoda rezultira porastom vremena montaže.	NE
2012	Samy i ElMaraghy [65]	Ručna i automatska MMAL	DA*	Porast kompleksnosti proizvoda raste i kompleksnost montažnog sustava. Porast kompleksnosti dijelova raste i kompleksnost opreme potrebne za njegovu montažu.	NE
2015	Park i Okudan [45]	Proizvodni sustav	DA	Porast kompleksnosti dizajna proizvoda ili proizvodnog sustava uzrokuje: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Porast prosječnog vodećeg vremena, ➤ Porast ukupnog troška proizvodnje. 	NE
* ilustrativni (numerički) primjer primjene predložene metode odnose se na primjere koji nisu preuzeti iz literature već su osmišljeni samo za primjenu predloženog pristupa, bez * su studije slučaja koje su ili preuzete iz literature ili koje se odnose na industrijske studije slučaja					

Tablica 3.4. (nastavak) Provođenje studije slučaja

Godina objave	Autori	Sustav koji promatraju	Studija slučaja	Zaključak studije slučaja	Usporedba s drugim mjerama
2017	Busogi i ostali [54]	Ručna MMAL	DA*	Veća fizička sličnost dijelova = duže vrijeme reakcije operatera prilikom odabira.	DA (bolje predviđanje vremena reakcije operatera od OCC indeksa)
2017	Liu i ostali [66]	Polu-automatizirana MMAL	DA	Uočavanje izvora kompleksnosti radne stanice (oprema ili odabir podsklopa).	NE
2018	Alkan i ostali [12]	Ručna MMAL	DA	Porast kompleksnosti proizvoda rezultira porastom vremena montaže. Manji broj komponenti rezultira manjom kompleksnošću proizvoda.	DA (s kompleksnošću proizvoda od Samy i ElMaraghy [7], jednaki zaključci o vremenu montaže uočeni; približno jednake vrijednosti kompleksnosti)
* ilustrativni (numerički) primjer primjene predložene metode odnose se na primjere koji nisu preuzeti iz literature već su osmišljeni samo za primjenu predloženog pristupa, bez * su studije slučaja koje su ili preuzete iz literature ili koje se odnose na industrijske studije slučaja					

4. STRUKTURNA KOMPLEKSNOŠĆ MONTAŽE KAO JEDAN OD KRITERIJA PRONALAZENJA NAJBOLJEG MOGUĆEG RJEŠENJA (OPTIMIZACIJE) PROMATRANOG PROBLEMA

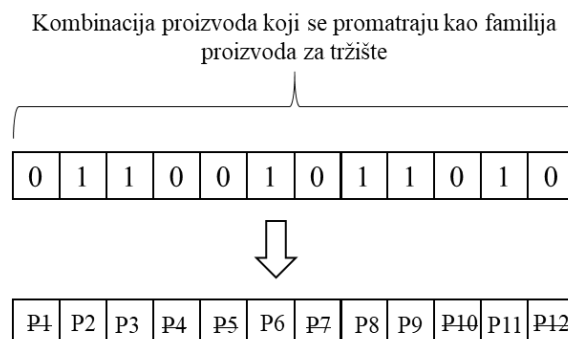
Optimiranje se može definirati kao postupak kojim se prilikom projektiranja ili planiranja u raznim granama znanosti (ekonomija, prirodne i tehničke znanosti) na temelju prethodno postavljenih kriterija određuje najbolji mogući izbor tehničkih i / ili ekonomskih veličina [67]. Ukoliko je problem optimizacije definiran jednim kriterijem, cilj optimizacije podrazumijeva pronalaženje jednoznačno definiranog globalnog optimuma. S druge strane, ukoliko je problem optimizacije određen s nekoliko kriterija, on se svodi na pronalaženje Pareto skupa nedominantnih rješenja (niz ekvivalentnih rješenja, tj. rješenja koja nude dobar kompromis među kriterijima) [68]. Kroz literaturu su prisutni različiti problemi optimiranja koji na precizno definirani problem primjenjuju pripadajući skup optimizacijskih postupaka (algoritama). Neovisno o tome odnosi li se postupak optimizacije na jednokriterijske ili višekriterijske probleme, za svaki kriterij potrebno je specificirati konačni cilj pripadne funkcije cilja (minimalizacija ili maksimalizacija).

Brojni izazovi s kojima se proizvodna poduzeća susreću tijekom procesa proizvodnje i montaže rezultat su povećane raznolikosti proizvoda koji je posljedica promjene porasta potražnje i želja kupaca za jedinstvenim dobrima uslijed čega je došlo do potrebe za prilagodbom i promjenama proizvodnih sustava. Kao što je već ustanovljeno, porast raznolikosti proizvoda sa sobom povlači i porast kompleksnosti montaže. Sukladno tome, proizvodna poduzeća danas su suočena sa izazovom smanjenja kompleksnosti montažnog sustava uz istovremeno održavanje prikladne raznolikosti proizvoda. Zbog ekonomske važnosti montaže, poduzeća ulažu značajne napore kako bi poboljšala proizvodnost i ekonomsku učinkovitost montažnih procesa. Jedan od načina kojim se to može postići je upravljanje kompleksnošću montaže i njenim glavnim pokretačima [7]. Stoga, možemo ustanoviti da se definiranjem strukturne kompleksnosti montažnog sustava i njegovim minimiziranjem, može utjecati na performanse kako montažnog sustava, tako i proizvodnog sustava u cjelini. Tome u prilog idu i prethodne studije koje su pokazale da visoka raznolikost proizvoda koja je jedan od glavnih uzroka kompleksnosti unutar montaže, negativno utječe na performanse montažnog sustava o čemu je više bila riječ u poglavlju 2.

Ovo poglavlje fokusira se na upotrebu strukturne kompleksnosti kao jednog od ili jedinog kriterija optimizacije promatranog problema unutar MMAL (potpoglavlje 4.1) ili pak dizajna različitih sustava (potpoglavlje 4.2) u kojima se nastoji pronaći kompromis između modularnosti promatranog sustava i kompleksnosti montaže.

4.1. Kompleksnost kao kriterij optimizacije unutar MMAL

Kompleksnost montaže važan je problem unutar MMAL koji utječe na performanse proizvodnog sustava, primjerice na vrijeme proizvodnje, produktivnost, troškove proizvodnje te na kvalitetu proizvoda. Kako bi ublažili negativan utjecaj kompleksnosti na MMAL, različiti autori tijekom godina predložili su različite pristupe u kojima je jedan od kriterija bila minimalizacija kompleksnosti montaže. Wang i ostali [59] predložili su višeciljni optimizacijski pristup unutar serijske ručne MMAL kojim su nastojali pronaći podskup proizvoda iz familije proizvoda (raznolikost proizvoda) koji će se nuditi na promatranom tržišnom segmentu, a koji će predstavljati najbolji kompromis dvaju promatranih ciljeva. Optimizacijski model formuliran je kao problem balansiranja tržišnog udjela podskupa proizvoda i kompleksnosti montažnog sustava, a rješava se primjenom genetskog algoritma. U ovoj primjeni, kromosom predstavlja jedno moguće rješenje problema, odnosno potencijalni podskup proizvoda koji će se nuditi tržištu. Duljina kromosoma odgovara broju svih mogućih varijanti proizvoda koji se nude unutar familije proizvoda. Vrijednosti kromosoma izražene su preko binarnih varijabli. Vrijednost jedan označava da određeni proizvod iz familije pripada potencijalnom podskupu proizvoda koji će se nuditi tržištu, dok vrijednost nula označava nepripadanje potencijalnom podskupu. Primjer kodiranja kromosoma prikazan je slikom 4.1.



Slika 4.8. Primjer kodiranja kromosoma [59]

Kompleksnost montažne linije izražena je preko relativne kompleksnosti, RC , koja je detaljnije opisana u poglavlju 3.2.1. Opisani pristup pronalaženja najprikladnijeg podskupa proizvoda koji se nudi na tržištu, Wang i ostali proširili su uzimajući u obzir mogućnost postojanja više radnih stanica koje dijele jednake poslove montaže (montaža jednakih podsklopova) [69]. Pomoću spomenutih istraživanja, autori su pokazali da diferencijacija (različitost) proizvoda utječe na kompleksnost montažne linije, te da se ispravnim odabirom podskupa proizvoda koji će se nuditi na tržištu, može utjecati na smanjenje kompleksnosti montaže. Štoviše, uočeno je da porast kompleksnosti uzrokovane raznolikošću proizvoda negativno utječe na pouzdanost radne stanice što se u konačnici reflektira i na smanjenu produktivnost montažne linije. Prethodna dva rada zanemarila su utjecaj slijeda izvođenja zadataka montaže (engl. *assembly task sequencing*) koji se smatra jednim od glavnih izvora kompleksnosti unutar MMAL [70]. Proučavanjem utjecaja kompleksnosti montaže na slijed izvođenja zadataka montaže bavili su se Zhu i ostali [71]. U svom istraživanju, autori su predložili strategiju pronalaženja najprikladnije sekvence montažnih zadataka minimiziranjem vrijednost prenesene kompleksnosti montaže unutar serijske MMAL. Prenesena kompleksnost definirana je kao kompleksnost montaže (odabir alata, stezne naprave i montažne procedure) na trenutnoj radnoj stanici koju uzrokuje odabir varijante komponente proizvoda na prethodnoj radnoj stanici. Svakoj radnoj stanici pridijeljen je skup zadataka koji je povezan sa sastavljanjem jednog modula (varijante komponente), sukladno tome, duljina montažne linije, tj. broj radnih stanica ovisan je o broju modula koje je potrebno sastaviti. Kompleksnost montaže na radnim stanicama i kroz cijelu montažnu liniju definirana je preko OCC indeksa koji indirektno mjeri ljudske performanse prilikom donošenja odluke. Zanemarivanjem vrijednosti ugrađene kompleksnosti, tj. postavljanjem njene vrijednosti na nulu s obzirom da je ona nepromjenjiva, algoritam je pojednostavljen te je vrijeme njegovog izvršenja kraće. Kako bi odredili najprikladniju sekvencu zadataka, autori problem formuliraju kao problem protoka mreže (engl. *network flow*) uzimajući u obzir ograničenja prethodnosti modula. Kasnije, predloženi problem prevode u problem pronalaženja Hamiltonian puta. Na taj način, on je sveden na problem trgovačkog putnika s ograničenjima prethodnosti koji se rješava upotrebom dinamičkog programiranja. Za razliku od Zhua i ostalih [71], Sun i Fan [60] uzeli su u obzir i vremenski horizont planiranja unutar MMAL, primjerice jedan dan ili jednu smjenu. Pošli su od pretpostavke da česte promjene montažnih zadataka uzrokovane čestim promjenama modela proizvoda unutar promatranog vremenskog horizonta, rezultiraju porastom nesigurnosti operatera prilikom montaže, odnosno porastom kompleksnosti montažne linije. Stoga, autori su kroz svoje istraživanje predložili metodu određivanja

najprikladnije sekvence sastavljanja modela unutar MMAL korištenjem višeciljne metode optimizacije mravljom kolonijom (engl. *Multiple Objective Ant Colony Optimization method, MOACO*) u kojoj se najbolje rješenje nastoji postići optimiziranjem dvaju ciljeva leksikografskim pristupom. Leksikografski pristup podrazumijeva određivanje prioriteta promatranih kriterija. Kriterij koji ima veći prioritet prvi se optimizira. Optimizacija drugog kriterija vrši se samo na ona rješenja koja su rezultat optimizacije kriterija većeg prioriteta [60]. Prvi, primarni cilj podrazumijeva minimiziranje radnog opterećenja radnih stanica, dok se drugi cilj odnosi na minimiziranje *kompleksnosti promjena* unutar proizvodne sekvence. *Kompleksnost promjena* je pojam koji odražava kompleksnost montaže unutar MMAL koju uzrokuje različit odabir varijanti komponenti u dvama uzastopnim proizvodnim ciklusima koji se promatraju. Pri tome, svaki proizvodni ciklus pripada jednom modelu proizvoda, a R proizvodnih ciklusa čini jednu proizvodnu sekvencu.

S druge strane, Zeltzer i ostali [30] bavili su se problemom balansiranja radnog opterećenja uz istovremeno jednoliku raspodjelu kompleksnosti montaže kroz MMAL. Kompleksnost montaže autori su izrazili kao mjeru nepredvidljivosti zadataka dodijeljenih radnoj stanici pomoću entropije uzimajući u obzir i varijabilnost vremena trajanja svakog zadatka na radnoj stanici. Budući da je entropija izražena u ovisnosti o vremenu trajanja zadatka, vrijednost ukupne kompleksnosti montažne linije je konstantna, što znači da je moguće jedino mijenjati način po kojem se ona širi po radnim stanicama (balansiranje kompleksnosti). Kako bi postigli željeno balansiranje radnog opterećenja i jednoliku raspodjelu kompleksnosti među radnim stanicama unutar montažne linije, autori su uveli koncept supermodela kojim su problem balansiranja MMAL sveli na SALB (engl. *Simple Assembly Line Balancing, SALB*) problem. Koncept supermodela podrazumijeva definiranje tekućeg trajanja zadatka (engl. *flowing task duration*), odnosno jedinstvene vrijednosti trajanja zadatka kroz montažnu liniju koja u obzir uzima potražnju svih varijanti proizvoda (npr. različiti modeli automobila) i varijacije tog istog zadatka kroz sve varijante proizvoda. Predloženi pristup balansiranja temelji se na dvostupanjskom hibridnom heurističkom algoritmu. Prvi hibridni heuristički algoritam pronalazi početno rješenje balansiranja radnog opterećenja (raspodjela zadataka na radne stanice i operatere) i jednolike raspodjele kompleksnosti za supermodel, uzimajući u obzir ograničenja prethodnosti i težinu zadatka. Potom slijedi evaluacija rješenja, tj. uočava se postoji li ili ne radno preopterećenje radnih stanica. U slučaju da postoji, slijedi algoritam rebalansiranja. Za razliku od algoritma balansiranja koji određuje početno rješenje na temelju supermodela (jedinstvena vrijednost trajanja svakog zadatka i njemu pripadajuće balansiranje),

algoritam rebalansiranja djeluje na radno preopterećenje svih varijanti proizvoda na svakoj radnoj stanici. To znači da se ukupno preopterećenje radne stanice definira kao suma preopterećenja svih varijanti proizvoda koji su na njoj prisutni. Stoga, prvi korak (prvi stupanj) ovog algoritma podrazumijeva primjenu rješenja balansiranja na svaki proizvod koji se sastavlja unutar MMAL te izračun ukupnog radnog preopterećenje svake radne stanice uzimajući u obzir sve proizvode. Formula za izračun radnog preopterećenja radne stanice kada se varijanta proizvoda m sastavlja na radnoj stanici rs i ukupnog preopterećenja radne stanice dana je sljedećim izrazom:

$$Overload_{rs,m} = \max(0, \sum_{z \in AZ_{rs}} t_{zm} - c) \quad (4.1)$$

$$Total\ Overload(rs) = \sum_{m \in M} Overload_{rs,m} \quad (4.2)$$

gdje je:

$Overload_{rs,m}$ radno preopterećenje na radnoj stanici rs kada se sastavlja model m ,

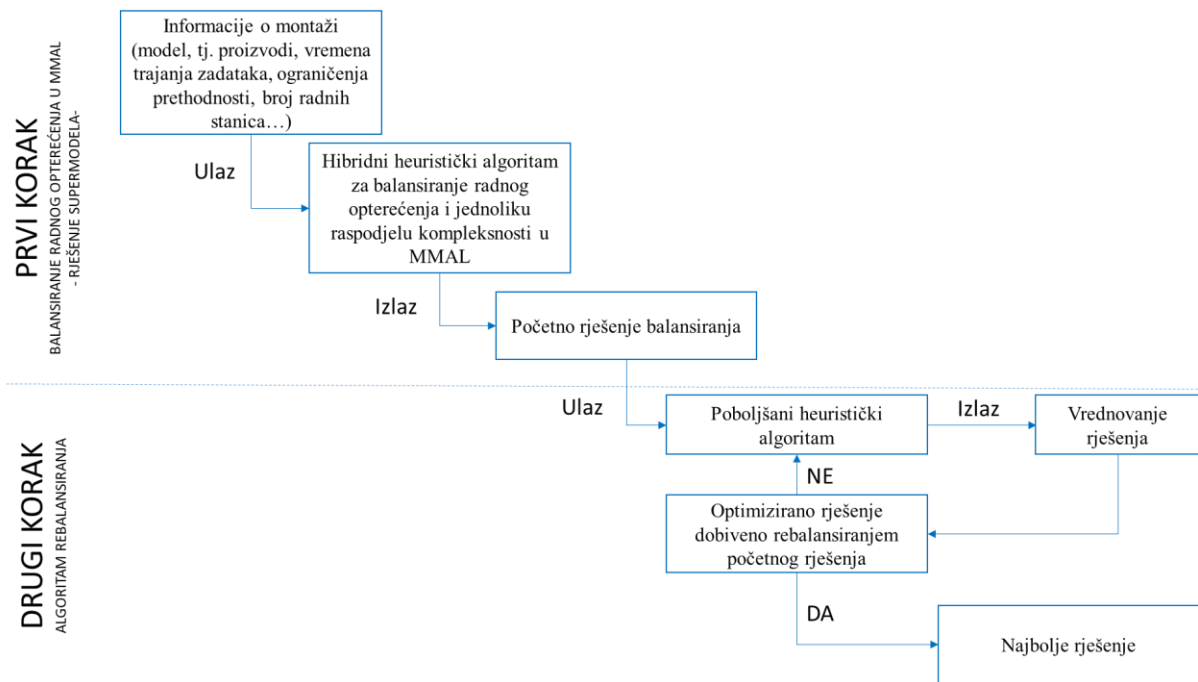
t_{zm} procesno vrijeme (vrijeme obrade) zadatka j za model m ,

c željeno ciklusno vrijeme linije,

AZ_{rs} skup zadataka dodjeljenih radnoj stanici rs ($j= 1,2,\dots, AZ_{rs}$),

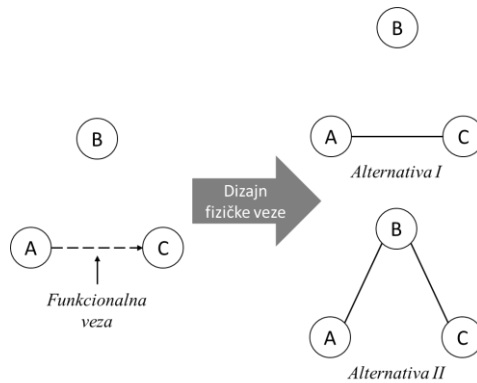
M skup svih varijanti proizvoda ($m=1,2,\dots,M$).

Na temelju dobivene vrijednosti radnog preopterećenja radnih stanica, poštujući ograničenja prethodnosti te ciljeve optimizacije (minimiziranje radnog preopterećenja i jednolika raspodjela kompleksnosti montaže), ovaj algoritam vrši iterativnu razmjenu zadataka među radnim stanicama sve dok ne dođe do najboljeg rješenja. Shematski prikaz predložene metodologije dan je na slici 4.9.



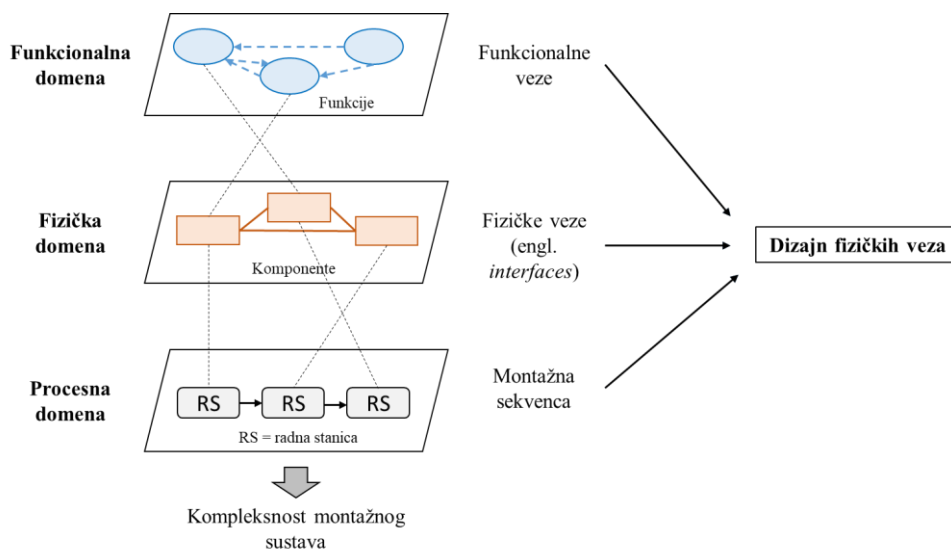
Slika 4.9. Okvir predloženog pristupa optimiranja [30]

Za razliku od prethodno spomenutih radova [30, 59, 60, 69], Oh i ostali [56] u svom radu promatraju kompleksnost montaže kao jedini kriterij optimizacije. Kompleksnost montaže familije proizvoda unutar MMAL definirana je iz perspektive dizajna fizičkih veza među komponentama proizvoda (engl. *product interface design*). Predložena mjera kompleksnosti nastala je definiranjem aktivnosti odabira preko elemenata dizajna proizvoda modifikacijom *OCC* indeksa. Više o ovoj mjeri kompleksnosti rečeno je u poglavlju 3.1.1. Svrha predloženog pristupa je odabrati najprikladniju strukturu fizičkih veza među komponentama proizvoda (direktnim ili indirektnim vezama) za familiju proizvoda i njoj pripadajuću sekvencu montaže koja će minimizirati kompleksnost montaže. Pri tome, odabir strukture fizičkih veza podrazumijeva odabir najprikladnije alternative koja slijedi iz funkcionalnih zahtjeva proizvoda. Slika 4.10. prikazuje način ostvarivanja funkcionalnih zahtjeva među komponentama direktnim (*Alternativa 1*) ili indirektnim (*Alternativa 2*) putem.



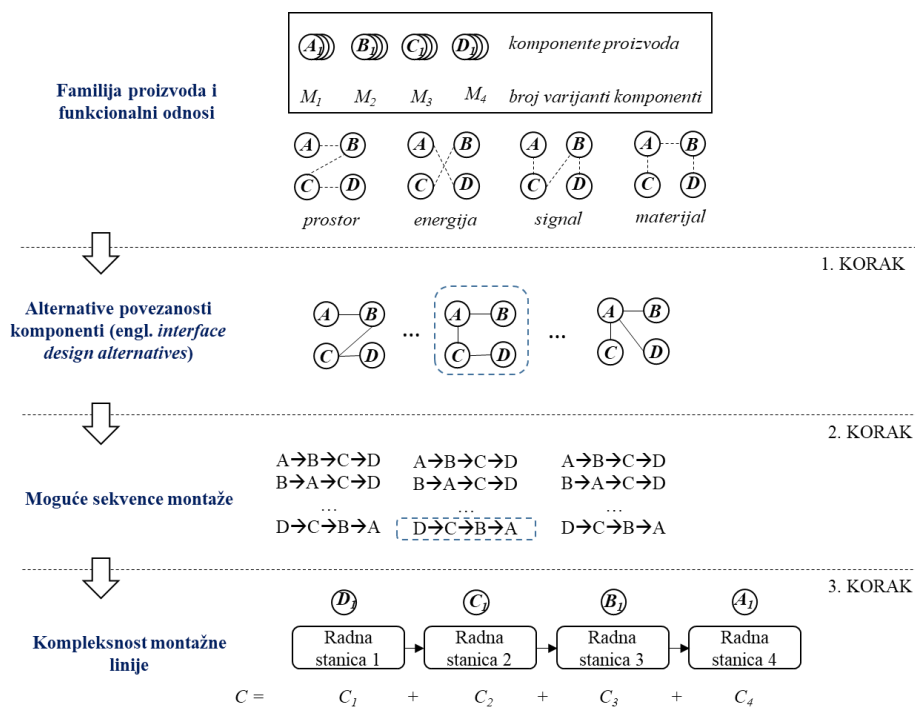
Slika 4.10. Moguće alternative dizajna fizičkih veza s obzirom na funkcionalne odnose među komponentama [56]

Sekvenca montaže definirana je kao lista komponenti koje se sastavljaju u određenom redosljedju unutar montažne linije (svaka komponenta ima svoju radnu stanicu na kojoj se sastavlja). Funkcionalni odnosi, tj. veze, definiraju se kao interakcije među dvjema komponentama u funkcionalnoj domeni. Ove veze razmatraju četiri vrste interakcija. Riječ je o interakcijama koje podrazumijevaju da su dvije komponente u neposrednom fizičkom kontaktu (prostorna veza), da razmjenjuju informacije, signale (signalna veza) ili materijal među sobom (veza preko materijala) ili pak da se ostvaruje prijenos energije među dvjema komponentama (energetska veza). Fizičke veze koje se javljaju u fizičkoj domeni, direktnim ili indirektnim vezama među komponentama, moraju omogućiti proizvodu ostvarivanje svih potrebnih funkcija. U isto vrijeme te fizičke veze ograničavaju redosljed (sekvencu) montaže u procesnoj domeni [56]. Odnosi između ovih domena se mogu uočiti na slici 4.11.



Slika 4.11. Problem dizajna fizičkih veza [56]

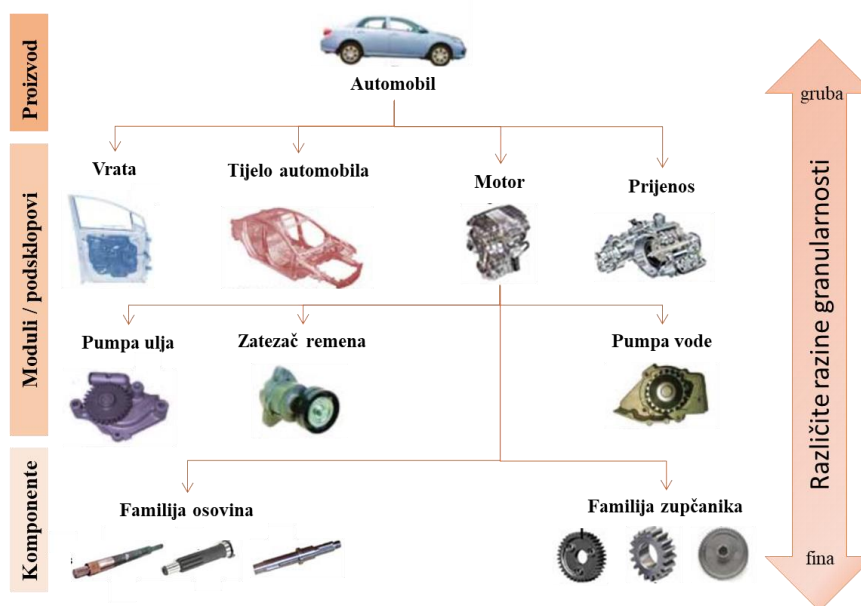
Ovo istraživanje [56] predstavlja samo konceptualni okvir za identificiranje najprikladnijeg rješenja koje minimizira kompleksnost montažne linije. Pretpostavke koje su autori usvojili podrazumijevaju da proizvod karakterizira modularna arhitektura te da se svaki proizvod unutar familije proizvoda sastoji od jednakog broja komponenti, kao i da sve proizvode unutar familije proizvoda karakterizira jednaka funkcionalna struktura. Predloženi konceptualni okvir obuhvaća tri koraka, a prikazan je slikom 4.12. Prvi korak odnosi se na generiranje svih mogućih alternativa strukture fizičkih veza poštujući ograničenja funkcionalnih zahtjeva familije proizvoda. Drugi korak za svaku generiranu alternativu pronalazi skup svih izvodljivih montažnih sekvenci poštujući ograničenja prethodnosti među komponentama proizvoda. Naposljetku, svaka montažna sekvenca vrednuje se pomoću razvijene mjere kompleksnosti. Montažna sekvenca koja ima minimalnu kompleksnost proglašena je najboljom. U ovom istraživanju, autori su za generiranje spomenutih alternativa rješenja koristili metodu potpunog nabiranja s obzirom da su svoju predloženu strategiju prikazali na jednostavnom primjeru, tj. na primjeru koji se sastoji od malog broja komponenti. Riječ je o proizvodu plazma zaslon (engl. *plasma display panel*) u kojem promatraju devet sastavnih dijelova proizvoda (svaki dio ima određeni broj varijanti). Međutim, ukoliko se ovaj okvir želi primijeniti i na proizvode koji imaju veći broj sastavnih dijelova (komponenti) potrebno je razviti pripadajuće algoritme generiranja alternativa povezanosti i sekvenci montaže kako bi se odredilo najprikladnije rješenje.



Slika 4.12. Okvir za optimalan dizajn fizičkih veza [56]

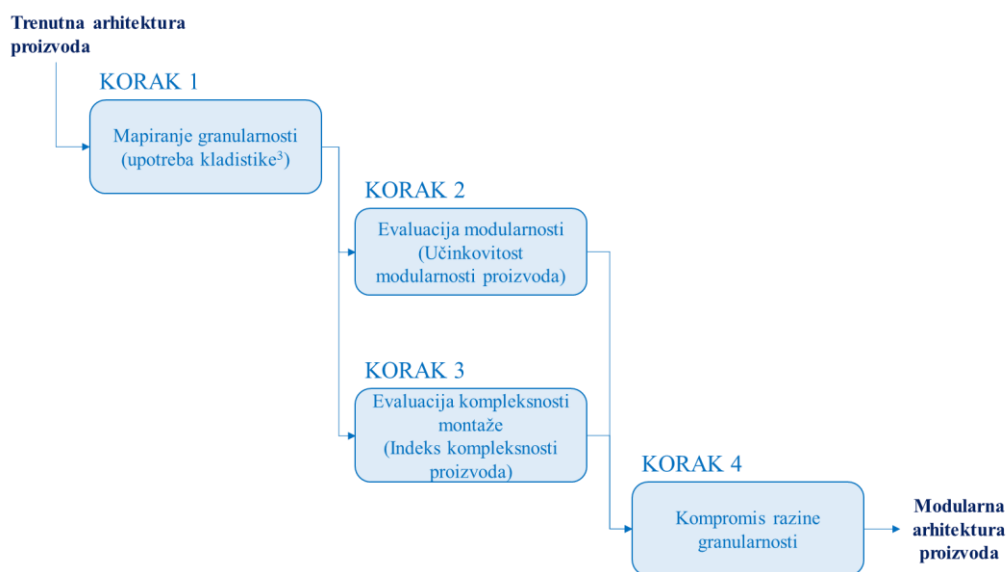
4.2. Kompleksnost kao kriterij odabira dizajna različitih sustava

U literaturi se vrlo često strukturna kompleksnost montaže koristi kao kriterij odabira dizajna sustava. Pod pojmom odabira dizajna, podrazumijeva se određivanje najprikladnije razine detalja modularnog sustava, tj. razine njegove granularnosti ili zrnatosti (engl. *system granularity*). Što je razina granularnosti veća, detaljnija je razina dekompozicije (razgradnje) razmatranih modula sustava. Naime, svaki sustav, neovisno o tome bio on složen ili ne, može se prikazati kao skup međusobno povezanih modula. Modul se može definirati kao „*relativno neovisan komad sustava koji je labavo povezan sa ostatkom sustava*“, pri čemu komad može predstavljati podsustav ili pak pojedinačni element (komponentu) [57]. Stoga, najniža razina granularnosti odnosi se na potpuno integrirani sustav. Porastom razine granularnosti povećava se broj komponenti sustava koji se promatraju kao pojedinačni elementi (komponente). Razina detalja sustava ovisi o vrsti sustava koji se promatra [72]. Pod pojmom sustava, može se podrazumijevati dio proizvoda, proizvod, složeni inženjerski sustav, proizvodni sustav, poduzeće, lanac opskrbe poduzeća i slično, ovisno o tome što određeni autor definira kao sustav. Primjerice, razina detalja proizvoda može uključiti različite varijante dizajna, module proizvoda, komponente proizvoda, korištene materijale te sve što je povezano sa sastavnicom materijala [73]. Porastom razine granularnosti proizvoda, raste broj dijelova i podsklopova što utječe na vrijeme montaže proizvoda. Primjer prikaza granularnosti automobila na podsklopove, module i komponente dan je slikom 4.13.



Slika 4.13. Razine granularnosti automobila [57]

Određivanjem najprikladnije razine granularnosti, tj. modularnosti proizvoda bavili su se AlGeddawy i ostali [57]. U svom radu predložili su metodu određivanja razine granularnosti koja podrazumijeva pronalaženje kompromisa između kompleksnosti montaže proizvoda te njegove modularnosti. Kao mjeru za procjenu kompleksnosti montaže proizvoda, autori su koristili svoj prethodni rad [7], odnosno mjeru koja kompleksnost montaže proizvoda izražava kao funkciju raznolikosti broja dijelova i spojnih elemenata, količine informacija te indeksa kompleksnosti montaže dijelova koji se računa preko indeksa rukovanja i umetanja, jednadžba 3.5. Modularnost su izrazili preko indeksa učinkovitosti modularnosti. Veća učinkovitost modularnosti podrazumijeva veći broj modula proizvoda. Promatrajući, s jedne strane, koncept DFA koji nastoji integrirati komponente kako bi se smanjilo njihovo vrijeme montaže i modularnosti s druge strane, koja promiče dijeljenje strukture proizvoda na što više komponenti ili modula, autori su naišli na suprotstavljene ciljeve. Kako bi pronašli najbolji kompromis između dvaju suprotstavljenih ciljeva, predstavili su pristup koji se sastoji od četiri koraka, slika 4.14.



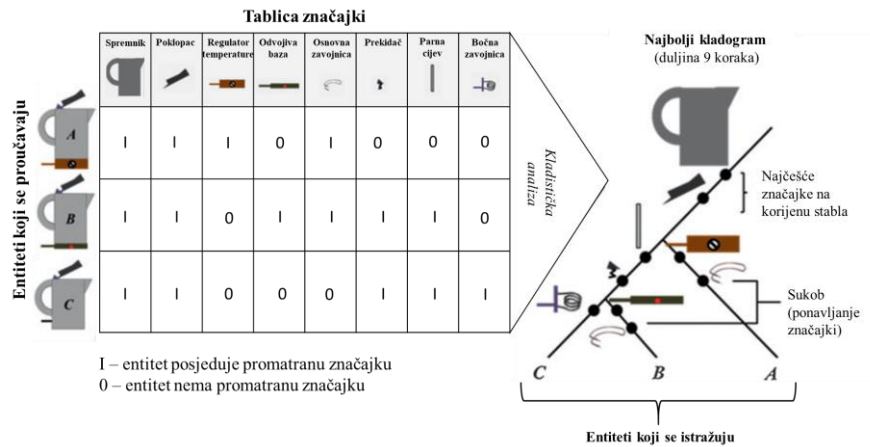
Slika 4.14. Predloženi optimizacijski okvir pronalaženja najprikladnije modularnosti proizvoda [57]

Prvi korak podrazumijeva dekompoziciju proizvoda i prikaz svih razina njegove granularnosti. Ovaj korak ostvaruje se upotrebom kladistike³ koja koristi DSM⁴ (engl. *Design Structure*

³ Kladistika je jednostavna tehnika hijerarhijskog grupiranja koja je nastala u biologiji. Kao rezultat daje dijagram stabla koji se naziva „kladogram“. Kladogram povezuje različite entitete i pridjeljuje im odgovarajuće mjesto na granama stabla. Najbolji kladogram ima najkraću duljinu (broj pojavljivanja entiteta na stablu) [57].

⁴ DSM matrice je matrica koja pokazuje veze među komponentama proizvoda i moguće klastere.

Matrix, DSM) matricu kao osnovu za konstruiranje kladograma (stablo dijagram) proizvoda. Kladogram prikazuje različite razine granularnosti (mogući moduli) strukture proizvoda. Primjer kladograma prikazan je na familiji proizvoda kuhala za vodu na slici 4.15.

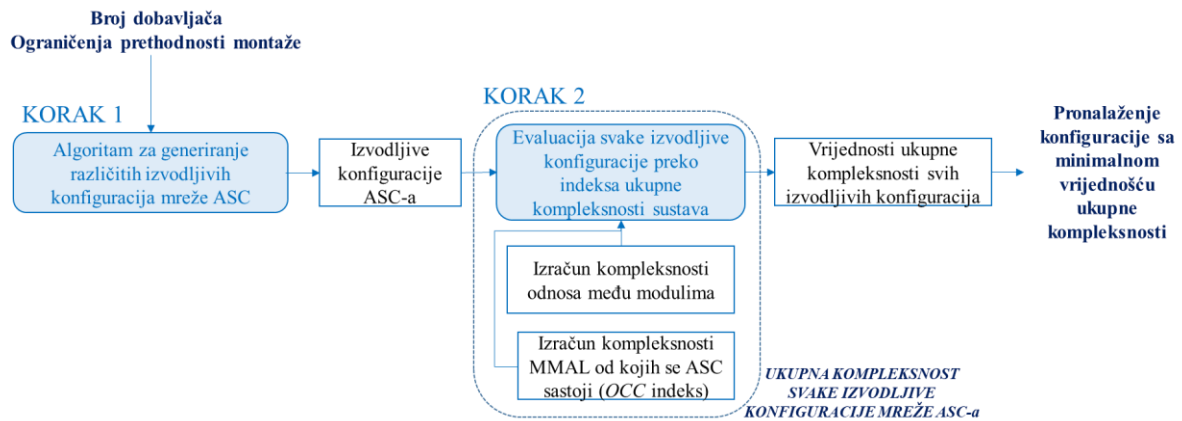


Slika 4.15. Kladistička analiza za familiju proizvoda kuhala za vodu [57]

Nakon konstruiranja kladograma, sljedeći korak podrazumijeva procjenu učinkovitosti modularnosti i izračun kompleksnosti montaže proizvoda na svakoj razini granularnosti. Kako bi se pronašao kompromis između dvaju suprotstavljenih ciljeva, minimalizacije kompleksnosti montaže te maksimalizacije modularnosti, definiran je indeks granularnosti (engl. *Granularity Index, GI*) koji u sebi integrira oba cilja. Manja vrijednost indeksa znači bolji rezultat.

Pronalaženjem najprikladnije razine granularnosti šireg koncepta sustava, tj. modularnog lanca opskrbe montaže proizvoda ili familije proizvoda, bavili su se Hamta i ostali [64] te Alkan i ostali [74]. U spomenutim radovima, svako poduzeće promatra se kao jedna montažna linija. Pri tome, broj dobavljača u najzuvodnijoj grani odgovara broju komponenti koje su potrebne za proizvodnju familije proizvoda, dok broj radnih stanica unutar svake MMAL odgovara broju komponenti koje se na njoj moraju sklopiti. Hamta i ostali [64] najprikladniju konfiguraciju ASC-a definirali su kao onu konfiguraciju koja daje najbolji kompromis između dvaju kriterija, minimalizacije kompleksnosti veza među modulima ASC mreže i ukupne kompleksnosti montažnih linija. Kako bi pronašli kompromis, autori su ova dva indeksa ujedinili u jedan, u indeks ukupne strukturne kompleksnosti promatranog sustava kojeg nastoje minimalizirati. Obe vrste kompleksnosti izrazili su preko Shannonove entropije. Više o njima kazano je u poglavlju 3.2.1. Kroz svoje istraživanje autori su predstavili algoritam za generiranje različitih

konfiguracija ASC mreže koji na temelju određenog broja dobavljača u najuzvodnijoj grani i ograničenja prethodnosti montaže daje sve moguće izvodljive konfiguracije ASC mreže. Predloženi okvir za pronalaženje najprikladnije konfiguracije ASC-a koja minimizira ukupnu kompleksnost promatranog lanca opskrbe montaže prikazan je slikom 4.16.



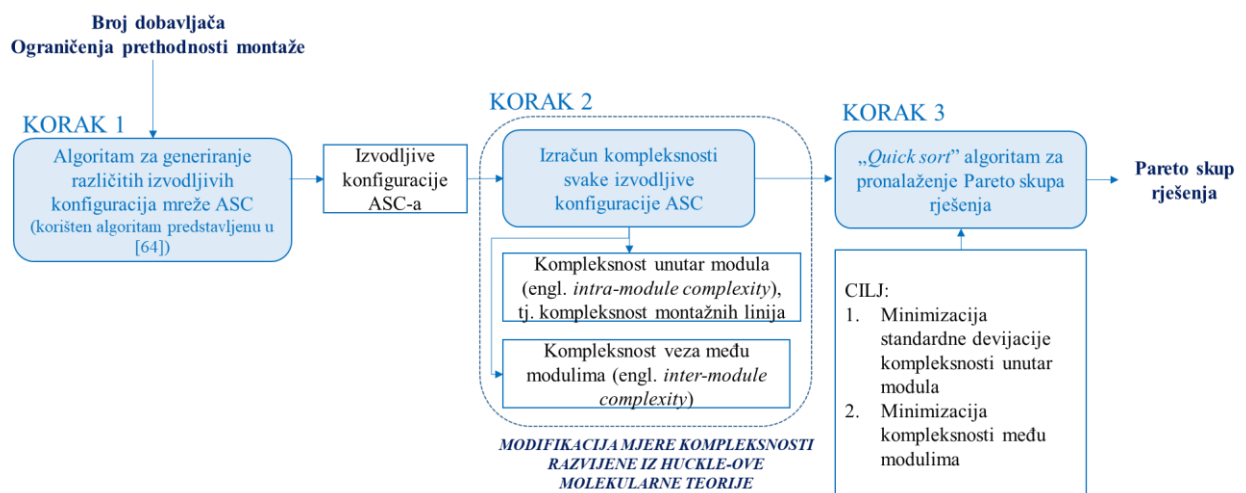
Slika 4.16. Predloženi okvir optimizacije pronalaženja najprikladnije konfiguracije ASC mreže

Sličan pristup definiranju mjera kompleksnosti mreže ASC-a kao Hamta i ostali [64] predložili su i Alkan i ostali [74]. Naime, autori su razvili mjeru kompleksnosti ASC-a tako da su prilagodili prethodno predstavljen model kompleksnosti, jednadžba 3.6, za upotrebu u lancu opskrbe. Kompleksnost ASC-a definirali su kao funkciju:

- i. kompleksnosti individualnih modula, tj. montažnih linija (tzv. kompleksnost unutar modula), α_i
- ii. kompleksnosti odnosa, tj. veze među modulima ASC mreže, C_2
- iii. kompleksnost topologije ASC mreže, C_3

Prve dvije kompleksnosti analogne su predloženim mjerama kod Hamte i ostalih [64]. Odnosno, kompleksnost individualnih elemenata (montažne linije), procijenili su korištenjem OCC indeksa, dok su kompleksnost veze među elementima izrazili preko broja varijanti koju svaka montažna linija proizvodi i nesigurnosti potražnje za određenom varijantom komponente (Shannonova entropija). Utjecaj topologije mreže lanca opskrbe povezan je sa strukturnim rasporedom ASC mreže i on je iskazan preko energije grafa. Posljednje dvije vrste kompleksnosti (C_2C_3), u kontekstu promatranog sustava lanca opskrbe, su sveukupni pokazatelj integracijskih napora sustava [74].

Problem pronalaženja najprikladnije konfiguracije, tj. modularnosti ASC mreže, Alkan i ostali [74] formulirali su kao problem minimiziranja standardne devijacije kompleksnosti individualnih modula i minimiziranja ukupne kompleksnosti veza među modulima. Međutim, ova dva cilja su međusobno suprotstavljena. Naime, ukoliko pretpostavimo da je kompleksnost promatranog sustava konstantna, niska kompleksnost veza među modulima vrlo često je povezana s visokom kompleksnošću unutar modula i obratno [58]. Stoga, autori su predložili pronalaženje Pareto skupa nedominantnih rješenja korištenjem modificiranog „Quick-sort“ algoritma. Jednom, kada je Pareto skup određen, dodavanjem određenih kriterija (indikatori performanse) i njihovom analizom, najbolje rješenje može se odrediti korištenjem višekriterijskog donošenja odluke (engl. *Multi-Criteria Decision-Making, MCDM*). Međutim, MCDM nije tema ovog rada već prijedlog daljnjih istraživanja. Predloženi okvir pronalaženja najprikladnije konfiguracije ASC mreže prikazan je slikom 4.17.



Slika 4.17. Predloženi optimizacijski okvir

Strukturna kompleksnost promatranog sustava koristila se i kao jedan od kriterija pronalaženja najprikladnije razine granularnosti složenog inženjerskog sustava te proizvodnog sustava. Pri tome, mjera strukturne kompleksnosti složenog sustava definirana je na drugačiji način, tj. ona nije opisana uzimajući u obzir proces montaže. Sinha i Suh [75] svoje istraživanje usmjerili su na problem dizajniranja arhitekture složenog inženjerskog sustav (složeni proizvod). Složeni inženjerski sustav odnosio se na sustav koji se sastojе od velikog broja podsustava (modula) koji se pak sastoje od velikog broja međusobno povezanih komponenti. Primjerice, vučno okretno postolje vlaka (engl. *train bogie system*), kojeg autori uzimaju kao industrijski primjer primjene predložene metode, predstavlja složeni sustav koji se sastoji od

sveukupno 153 komponente koje su u trenutku razmatranja činile 24 modula. Problem dizajniranja arhitekture (strukture) složenog sustava autori su predstavili kao višekriterijski optimizacijski problem (engl. *multi-objective optimization framework*) pronalaženja najprikladnijeg broja modula (podsustava) koji minimizira varijacije (standardne devijacije) strukturne kompleksnosti među modulima sustava uz istovremeno maksimiziranje ukupnog stupnja modularnosti sustava. Za definiranje strukturne kompleksnosti modula, autori su koristili prethodno razvijenu mjeru kompleksnosti [10] koja je prikazana jednadžbom 3.6. Za razliku od Bugre i ostalih [12], autori su strukturnu kompleksnost komponente opisali kao težinu dizajniranja određene komponente preko ljestvice ocjene od jedan do pet, gdje jedan označava komponentu koju je najjednostavnije dizajnirati, a pet označava onu koju je najteže dizajnirati. Ukupni stupanj modularnosti sustava izražen je preko indeksa modularnosti koji je usvojen od autora Blondela i ostalih [76]. Prema njemu, najveća vrijednost indeksa modularnosti podrazumijeva maksimalizaciju broja veza unutar modula (engl. *intra-module*), te redukciju broj veza među modulima (engl. *inter-module*). Kao rješenje problema, autori su predložili adaptivni višeciljni algoritam simuliranog žarenja (engl. *Adaptive Multi Objective Simulated Annealing Approach, AMOSA*) pomoću kojeg su dobili Pareto skup rješenja (Pareto frontu).

Na kompleksnost proizvodnog sustava fokusirali su se Samy i ostali [72]. U svom istraživanju nastojali su pronaći optimalnu razinu granulacije proizvodnog sustava uzimajući u obzir dva kriterija. Pošli su od pretpostavke da je strukturna kompleksnost proizvodnog sustava prvenstveno rezultat kompleksnosti pripadajuće mu opreme i njenog rasporeda. Sukladno tome, kompleksnost rasporeda opreme definirali su preko indeksa kompleksnosti opreme, *LCI* (engl. *Layout Complexity Index, LCI*). *LCI* podrazumijeva procjenu kompleksnosti rasporeda uzimajući u obzir šest indeksa kompleksnosti koje su predložili ElMaraghy i ostali [38]. Kompleksnost opreme autori su definirali pomoću strukturnog klasifikacijskog koda, *SCC*, kojeg je razvio ElMaraghy [77]. Integriranjem spomenutih mjera u jednu, autori su razvili novu mjeru granulacije kompleksnosti sustava (engl. *System Granularity Complexity Index, SGCI*). Na taj način problem pronalaženja najprikladnije granulacije proizvodnog sustava sveli su na problem određivanja minimalne vrijednosti predloženog indeksa. Niža vrijednosti indeksa znači prihvatljiviju granulaciju sustava s obzirom na opremu i njen raspored u prostoru, tj. niža vrijednost predstavlja bolji kompromis.

4.3. Osvrt na mjere kompleksnosti kao kriterije optimizacije različitih sustava

U literaturi su prisutne različite definicije kompleksnosti i njima pripadajuće mjere kojima se kvantitativno nastoji opisati kompleksnost ovisno o percepciji autora koji se njome bavi. Najveći dio literature koji se bavi upravljanjem kompleksnošću smatra da je njezin glavni izvor raznolikost proizvoda i varijanti komponenti proizvoda [20]. Naime, kompleksnost montaže u MMAL raste s porastom broja varijanti komponenti proizvoda koje su nužan preduvjet ostvarivanja šarolike palete proizvoda koje kupci potražuju. Drugim riječima, iz dosada proučenih studija uočljivo je da visoki stupanj varijabilnosti montažne raznolikosti popraćen velikim količinama informacija koje se moraju obraditi prilikom procesa montaže, uzrokuje porast kompleksnosti montaže. Zbog uočenog negativnog utjecaja kompleksnosti montaže na performanse MMAL, o čemu je bilo više riječi u potpoglavlju 2.1. i tablici 3.4., u posljednjih deset godina u istraživanjima su vidljivi naponi koji nastoje ublažiti utjecaj kompleksnosti montaže na MMAL, a time i na proizvodni sustav. Sukladno tome, upravljanje kompleksnošću prepoznato je kao bitan izazov s kojim se poduzeća moraju suočiti ukoliko žele osigurati visoku varijabilnost proizvoda uz istovremeno održavanje učinkovitosti proizvodnje. Stoga, prilikom optimizacije MMAL kao jedan od kriterija bitno je uzeti i kompleksnost montaže.

Upotreba kompleksnosti montaže kao kriterija optimizacije još uvijek je u početnoj fazi, čemu u prilog govori i malen broj radova koji su trenutno dostupni. Međutim, rezultati studija slučaja proizašlih iz tih radova su ohrabrujući i ukazuju na njezine prednosti. Primjerice, Zeltzer i ostali [30] su prilikom balansiranja radne linije u obzir, osim radnog opterećenja, uzeli i kompleksnost montaže koju su izrazili kao nesigurnost pojavljivanja određenog zadatka na radnoj stanici te su uočili da je raspodjela opterećenja, ali i kompleksnosti ujednačenija ukoliko se kompleksnost razmatra kao kriterij. Wang i ostali [59] uočili su kako se promatranjem kompleksnosti kao jednog od kriterija odabira familija proizvoda koja će se nuditi tržištu, može odrediti familija proizvoda koja minimizira kompleksnost montaže, a maksimizira tržišni udio. Kompleksnost montaže u spomenutom radu izražena je preko Shannonove entropije, a povezana je s nesigurnošću potražnje tržišta za određenim proizvodom. Zhu i ostali [71] minimizirali su kompleksnost kako bi dobili najprikladnije rješenje sekvence zadataka unutar MMAL. Na taj način minimizirali su napore radnika kroz sekvencu montaže s obzirom da predložena mjera kompleksnosti minimizira ljudske performanse prilikom donošenja odluka vezanih za montažni proces. Zaključak istraživanja koja kompleksnost montaže koriste kao jedan od kriterija optimizacije, dan je tablicom 4.1.

Tablica 4.1. Pregled dostupne literature objavljene od 2011-2021 s obzirom na provođenje studije slučaja

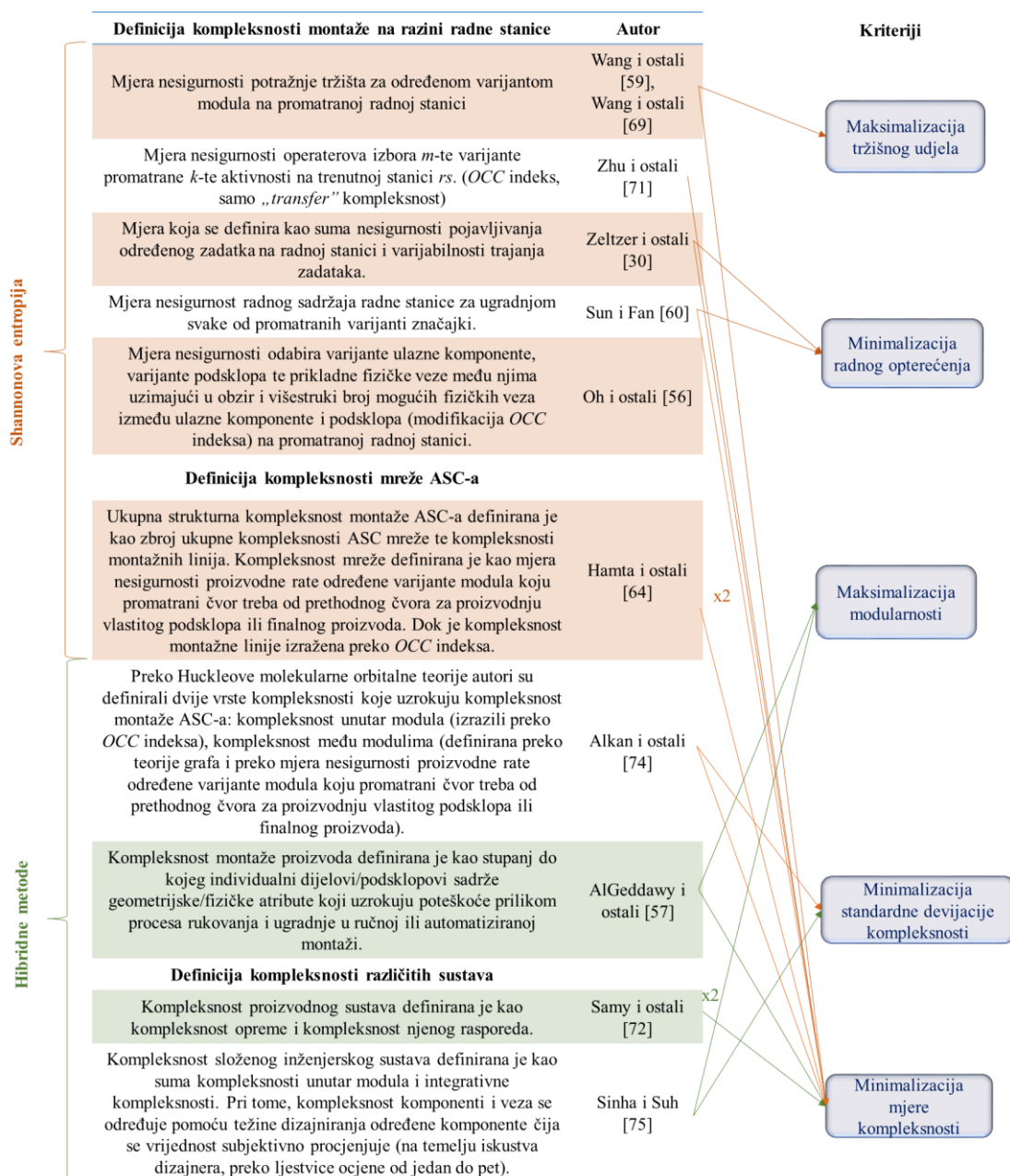
Godina objave	Autori	Studija slučaja	Zaključak studije slučaja	Usporedba rezultata prije i nakon provedene metode	Usporedba sa ostalim metodama iz literature
2011	Wang i ostali [59]	DA*	Kompetitivnost proizvoda i volatilnost tržišta utječu na odabir raznolikosti proizvoda: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Visoka kompetitivnost proizvoda daje bolje rezultate u pogledu visokog tržišnog udjela i niske kompleksnosti montaže (nudi se manji broj varijanti proizvoda), ➤ Visoka volatilnost tržišta rezultira visokim tržišnim udjelom, ali i visokom kompleksnošću montaže (potrebno nuditi veći broj varijanti proizvoda). 	NE (usporedba mogućih rješenja dobivenih optimizacijom)	NE
2011	Zhu i ostali [71]	DA*	Predložena strategija pronalazi najprikladnije rješenje sekvence montažnih zadataka minimiziranjem vrijednosti kompleksnosti.	NE	NE
2013	Wang i ostali [69]	DA*	Predloženi pristup pronalazi najprikladnije rješenje koje minimizira vrijednost mjere kompleksnosti uz maksimalizaciju tržišnog udjela.	NE	NE
2015	Samy i ElMaraghy [72]	DA	Predloženi pristup pronalazi najprikladnije rješenje (granularnost proizvodnog sustava) minimiziranjem predloženog <i>SGCI</i> indeksa.	NE	NE
2016	Zeltzer i ostali [51]	DA	Predloženi algoritam daje ujednačeniju raspodjelu radnih opterećenja kompleksnosti montaže (izražena preko kompleksnosti zadataka) po radnim stanicama. Na balansiranje radnog (pre)opterećenja utječe raznolikost proizvoda, broj montažnih zadataka te korištenje mjere kompleksnosti.	DA	NE
2017	AlGeddawy i ostali [57]	DA	Najprikladnija granularnost strukture (dizajna) proizvoda osjetljivija je na kompleksnost montaže proizvoda nego na učinkovitost modularnosti.	DA	NE
2018	Hamta i ostali [64]	DA*	Predloženi pristup daje najprikladniju konfiguraciju ASC mreže.	NE	NE

* ilustrativni (numerički) primjer primjene predložene metode odnose se na primjere koji nisu preuzeti iz literature već su osmišljeni samo za primjenu predloženog pristupa; bez * su studije slučaja koje su ili preuzete iz literature ili koje se odnose na industrijske studije slučaja

Tablica 4.1. (nastavak) Pregled dostupne literature objavljene od 2011-2021 s obzirom na provođenje studije slučaja

Godina objave	Autori	Studija slučaja	Zaključak studije slučaja	Usporedba rezultata prije i nakon provedene metode	Usporedba sa ostalim metodama iz literature
2018	Sun i Fan [60]	DA*	<p>Predloženi algoritam daje bolje rezultate kompleksnosti promjena za ista radna preopterećenja nego kada kriterij kompleksnosti nije uzet u obzir. Kod smanjenog broja radno intenzivnih opcija, ukupan broj proizvoda koji se montiraju ne utječe na sekvencu montaže.</p> <p>Povećanje radnog intenziteta radnika (tj. odabirom opcija koje zahtijevaju veći intenzitet rada) dolazi do pojave preopterećenja na radnim stanicama, a time i do porasta kompleksnosti promjena.</p> <p>Porast kompleksnosti promjena autori objašnjavaju smanjenjem broja mogućih sekvenci porastom radnog intenziteta u kojima je radno preopterećenje minimalno.</p>	DA	NE
2018	Sinha i Suh [75]	DA	<p>Smanjenjem broja modula proizvoda dolazi do:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ porasta kompleksnosti unutar samog modula (jer se modul sastoji od većeg broja komponenti), ➤ porasta standardne devijacije kompleksnosti modula, ➤ smanjenja integrativne kompleksnosti (tj. kompleksnosti veza među modulima). 	DA	NE
2020	Oh i ostali [56]	DA	Kompleksnost montažne linije primjenom ovog pristupa može se smanjiti (ili odabirom nove sekvence montaže ili odabirom nove strukture fizičkih veza za promatranu familiju proizvoda).	DA	NE
2021	Alkan i ostali [74]	DA	Porast modularnosti ASC, tj. veći broj MMAL znači smanjenje standardne devijacije kompleksnosti među MMAL.	NE	NE
<p>* ilustrativni (numerički) primjer primjene predložene metode odnose se na primjere koji nisu preuzeti iz literature već su osmišljeni samo za primjenu predloženog pristupa; bez * su studije slučaja koje su ili preuzete iz literature ili koje se odnose na industrijske studije slučaja</p>					

Kompleksnost kao kriterij najčešće je uziman prilikom određivanja najprikladnije sekvence ili balansiranja MMAL. Osim za MMAL, kriterij kompleksnost uzet je i prilikom određivanja dizajna ASC-a te proizvoda. Popis dostupne literature koje kompleksnost koriste kao kriterij optimizacije dan je tablicom 4.2. Od dostupnih radova, više radova kompleksnost je definiralo korištenjem Shannonove entropije nego preko hibridnog pristupa. Definicije kompleksnosti i kriteriji koje određeni autori razmatraju prilikom optimizacije prikazani su slikom 4.18.



Slika 4.18. Definiranje mjera kompleksnosti i kriterija u dostupnim radovima

Tablica 4.2. Pregled literature objavljene od 2011-2021 gdje se kompleksnost koristi kao kriterij optimizacije

Godina objave	Autori	Područje primjene	Broj kriterija	Problem koji se razmatra	Metoda rješavanja
2011/2013	Wang i ostali [59, 69]	Ručna MMAL	2	Određivanje familije proizvoda za tržište	Genetski algoritam
2012	Zhu i ostali [71]	Ručna MMAL (ASP)	1	Određivanje redoslijeda montažnih zadataka	Dinamičko programiranje
2015	Samy i ostali [72]	Proizvodni sustav	2*	Određivanje najprikladnije razine granularnosti proizvodnog sustava	Balansiranje kompleksnosti opreme i rasporeda opreme proizvodnog sustava pomoću hibridnog strukturnog indeksa kompleksnosti
2016	Zeltzer i ostali [30]	Ručna MMAL	2	Balansiranje radnog opterećenja i niveliranje kompleksnosti montaže u MMAL	Dvostupanjski hibridni heuristički algoritam
2017	AlGeddawy i ostali [57]	Proizvod	2*	Određivanje najprikladnije razine granularnosti proizvoda	Minimiziranje razvijenog indeksa granularnosti
2018	Sun i Fan [60]	Ručna MMAL (ASP)	2	Pronalaženje optimalne sekvence modela (redoslijeda sastavljanja modela)	MOACO algoritam
2018	Hamta i ostali [64]	ASC; Ručna MMAL	2*	Određivanje najprikladnije razine granularnosti ASC-a	Minimiziranje razvijenog indeksa ukupne kompleksnosti
2018	Sinha i Suh [75]	Kompleksni sustav (modul složenog proizvoda)	2	Određivanje najprikladnije razine granularnosti kompleksnog sustava	AMOSa algoritam

* autori promatraju dvije mjere kompleksnosti; kako bi jednostavnije pronašli njihov kompromis, integriraju ih u jednu mjeru čijom minimalizacijom lako uočavaju najprikladnije kompromisno rješenje

Tablica 4.2. (nastavak) Pregled literature objavljene od 2011-2021 gdje se kompleksnost koristi kao kriterij optimizacije

Godina objave	Autori	Područje primjene	Broj kriterija	Problem koji se razmatra	Metoda rješavanja
2020	Oh i ostali [56]	Ručna MMAL (ASP)	1	Odabir najprikladnijeg dizajna fizičkih veza familije proizvoda preko	Razvijen je samo konceptualni okvir, ne i algoritam (odabir dizajna preko odabira sekvence montaže koja minimizira kompleksnost)
2021	Alkan i ostali [74]	ASC; Ručna MMAL	2	Određivanje najprikladnije razine granularnosti ASC-a	Pronalaženje kompromisa između standardne devijacije kompleksnosti unutar modula i kompleksnosti među modulima
* autori promatraju dvije mjere kompleksnosti; kako bi jednostavnije pronašli njihov kompromis, integriraju ih u jednu mjeru čijom minimalizacijom lako uočavaju najprikladnije kompromisno rješenje					

5. ZAKLJUČAK

Glavni razlog procjene kompleksnosti montaže podrazumijeva shvaćanje utjecaja koje raznolikost proizvoda ima na performanse montažnog sustava, a time i proizvodnog sustava u cjelini. S jedne strane, u literaturi se kompleksnost većinom navodi kao posljedica raznolikosti proizvoda koja negativno utječe na performanse (KPI) promatranog sustava, međutim s druge strane autori naglašavaju kako jasna veza između performansi sustava i kompleksnosti još uvijek nije u potpunosti razjašnjena te da ovisi o sustavu koji se promatra, ali i definiciji kompleksnosti koju autor usvoji. Različite definicije kompleksnosti montaže rezultat su različitog subjektivnog shvaćanja i interpretacije osobe koja kompleksnost definira. Međutim, unatoč nedostatku formalne definicije, autori su usuglašeni u tome kako je kompleksnost glavno obilježje modernih montažnih sustava koje se ne smije ignorirati, kao i da je njena kvantitativna procjena potrebna za bolje shvaćanje, predviđanje i upravljanje sustavom.

Najzastupljenija teorija kojom se definira kompleksnost montaže zasigurno je Shannonova entropija. U većini dostupne literature kompleksnost montaže definirana je preko kompleksnosti cijele montažne linije koja je rezultat promatranja proizvoda i procesa koji se na njoj odvijaju. Ova kompleksnost uglavnom je definirana korištenjem OCC indeksa ili njegovom modifikacijom. Ograničeni broj autora kompleksnost montaže definira samo preko kompleksnosti proizvoda i u tom slučaju upotrebljavaju hibridne metode. Za validaciju mjera kompleksnosti uglavnom se koriste ilustrativnim primjerima, tj. primjerima koji su osmišljeni kako bi objasnili predloženi koncept. Nedostatak unutar literature zasigurno je činjenica da ograničeni broj autora, točnije samo dva autora iz dostupne literature, predložene mjere kompleksnosti montaže uspoređuju s mjerama drugih autora. Također, većina autora definira mjeru kompleksnosti kao mjeru koja daje jednu vrijednost za cijeli sustav. Na taj način, nije moguće uočiti izvor kompleksnosti unutar sustava i fokusirati se na njegovu optimizaciju.

Zbog uočenog negativnog utjecaja kompleksnosti montaže na performanse MMAL (proizvodnost rada, kvaliteta proizvoda, vrijeme proizvodnje), a time i proizvodnog sustava, u posljednjem desetljeću u literaturi su vidljivi naponi koji nastoje ublažiti utjecaj kompleksnosti montaže na proizvodni sustav. Ublažavanje utjecaja kompleksnosti ostvaruje se upotrebom kompleksnosti kao jednog od kriterija pronalaženja najprikladnijeg rješenja promatranog problema. Kada je riječ o MMAL, autori su promatrali probleme balansiranja, odabira familije proizvoda te sekvence sklapanja komponenti proizvoda vodeći računa da minimizacija

kompleksnosti bude jedan od kriterija koji se mora uzeti u obzir. Veći broj literature bavio se odabirom najprikladnijeg dizajna različitih sustava (proizvod, proizvodni sustav, ASC mreža) promatrajući kompleksnost kao kriterij koji je potrebno minimizirati. Najveći broj kriterija koji autori istovremeno optimiziraju je dva, uključujući i kriterij kompleksnosti. Jedan od nedostataka literature koja se bavi optimizacijom zasigurno je nedostatak usporedbe razvijenih koncepata s već postojećima u literaturi, ali i usporedba performansi sustava prije i nakon provedenog postupka optimizacije koju ne rade svi autori, a nužna je za provjeru predloženog koncepta. Također, nužno je prilikom optimizacije uzeti u obzir i ostale performanse poput troškova, grešaka koje se pojavljuju u proizvodnji / na montažnoj liniji, održivosti proizvodnje, energetske potrošnje, pravilne raspodjele resursa i ostalih KPI.

Sukladno napravljenom istraživanju i zaključcima koji su iz njega proizašli, daljnje istraživanje fokusirat će se na pronalaženje načina razvoja mjere kompleksnosti koja će omogućiti identifikaciju izvora kompleksnosti na radnim stanicama. Na taj način bit će moguće identificirati izvor kompleksnosti kako bi se njegov utjecaj na performanse radne stanice, ali i montažne linije mogao ublažiti. Također, proučavat će se različiti načini optimizacije koji će kao kriterij promatrati kompleksnost. Istraživat će se i mogućnost upotrebe MCDM optimizacijskog okvira koji će koristiti širi skup kriterija odluke. Buduća područja istraživanja uključit će i istraživanja utjecaja mjera kompleksnosti montaže na KPI kako bi se utvrdili postojeće ovisnosti (linearna, kvadratna, logaritamska...) kompleksnosti i KPI.

6. LITERATURA

- [1] Efthymiou, K.; Mourtzis, K.; Pagoropoulos, A.; Papakostas N.; Chryssolouris, G.: „Manufacturing systems complexity analysis methods review“, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 29, No. 9, pp. 1025-1044, 2016.
- [2] Hamta, N.; Akbarpour Shirazi N.; Fatemi Ghomi, S. M. T.: „A bi-level programming model for supply chain network optimization with assembly line balancing and push-pull strategy“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 230, No. 6, pp. 1127-1143, 2015.
- [3] Schleich, H.; Schaffer J.; Scavarda, L.F.: „Managing complexity in automotive production“, 19th International Conference on Production Research, ICPR-19, Valparaiso, Chile, 2007.
- [4] Schuh, G.; Klocke, F.; Brecher C.; Schmitt, R.: „Excellence in Production“, Apprimus Verlag, Aachen, 2007.
- [5] ElMaraghy, H.; Schuch, G.; ElMaraghy, W.; Piller, F.; Schönsleben, P.; Tseng, M.; Bernard, A.: „Product variety management“, CIRP Annals, Vol. 62, No. 2, pp. 629-652, 2013.
- [6] Nof, S. Y. ; Wilhelm W.; Warnecke, H.: „Industrial assembly“, Springer US, 2012.
- [7] Samy, S. N.; ElMaraghy, H.: „A model for measuring products assembly complexity“, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 23, No. 11, pp. 1015-1027, 2010.
- [8] Deshmukh, A. V.; Talavage J. J.; Barash, M. M.: „Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity“, IIE Transactions, Vol. 30, No. 7, pp. 645-655, 1998.
- [9] Jianbo, G.: „Complex systems and emergence: How meets reality“, Advances in Mechanics, Vol. 43, No. 4, pp. 359-389, 2013.

- [10] Sinha, K.: „Structural Complexity and its Implications for Design of Cyber-Physical Systems“, doktorska disertacija, 2014.
- [11] ElMaraghy, W.; ElMaraghy, H.; Tomiyama, T.; Monostori, L.: „Complexity in engineering design and manufacturing“, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 61, pp. 793-814, 2012.
- [12] Alkan, B.: „A Complexity Modelling Approach to Support Early Life-cycle Phases of Assembly Automation Systems“, doktorska disertacija, 2018.
- [13] Rechtin, E.: „Creating and Building Complex Systems“, USA: Prentice-Hall, New York, 1991.
- [14] Piller, F. T.; Waringer, D.: „Modularisierung in der Automobilindustrie - neue Formen und Prinzipien - Modular Sourcing, Plattformkonzept und Fertigungssegmentierung als Mittel des Komplexitäts managements“, Shaker Verlag, Aachen, 1999.
- [15] Vogel, W.; Lasch, R.: „Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review“, Logistics Research, Vol. 9, No. 1, pp. 1-66, 2016.
- [16] Bliss, C.: „Management von Komplexität: ein integrierter, systemtheoretischer Ansatz zur Komplexitätsreduktion“, Betriebswirtschaftlicher Verlag, Wiesbaden, 2000.
- [17] Piller, F.: „Mass customization: Ein wettbewerbsstrategisches“, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [18] Wiendahl, H. P.; Scholtissek, P.: „Management and control of complexity in manufacturing“, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 43, No. 2, pp. 533-540, 1994.
- [19] Götzfried, M.: „Managing complexity induced by product variety in manufacturing companies: complexity evaluation and integration in decision-making“, doktorska disertacija, 2013.
- [20] Mattsson, M.; Tarrar, M.; Fast-Berglund, A.: „Perceived production complexity – understanding more than parts of a system“, International Journal of Production Research, Vol. 54, No. 20, pp. 6008-6016, 2016.

- [21] Orfi, N.; Terpenney, J.; Sahin-Sariisik, A.: „Harnessing Product Complexity: Step 1 - Establishing Product Complexity Dimensions and Indicators“, *The Engineering Economist*, Vol. 56, No. 1, pp. 59-79, 2011.
- [22] MacDuffie, J. P.; Sethuraman, K.; Fisher, M. L.: „Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study“, *Management Science*, Vol. 42, No. 3, 1996.
- [23] Fisher, M. L.; Ittner, C. D.: „The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis“, *Management Science*, Vol. 45, No. 6, 1999.
- [24] Fast-Berglund, A.; Fässberg, T.; Hellman, F.; Davidsson, A.; Stahre, J.: „Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly“, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 32, pp. 449-455, 2013.
- [25] Falck, A. C.; Örtengren, R.; Rosenqvist, M.; Söderberg, R.: „Proactive assessment of basic complexity in manual assembly: development of a tool to predict and control operator-induced quality errors“, *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 15, pp. 4248-4260, 2016.
- [26] Falck, A. C.; Örtengren, R.; Rosenqvist M.; Söderberg, R.: „Basic complexity criteria and their impact on manual assembly quality in actual production“, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 58, pp. 117-128, 2017.
- [27] Grote, G.: „Uncertainty management at the core of system design“, *Annual Reviews in Control*, Vol. 28, No. 2, pp. 267-274, 2004.
- [28] Vidal, G. H.; Hernández, J. C.: „Complexity in manufacturing systems: a literature review“, *Production Management*, Vol. 15, pp. 321-333, 2021.
- [29] Gullander, P.; Davidsson, A.; Dencker, K.; Fasth, A.; Fässberg, T.; Harlin, U.; Stahre, J.: „Towards a Production Complexity Model that Supports Operation, Re-balancing and Man-hour Planning“, *Proceedings of 4th Swedish Production Symposium, SPS11, Lund, Sweden*, 2011.

- [30] Zeltzer, L.; Aghezzaf, E. H.; Limère, V.: „Workload balancing and manufacturing complexity levelling in mixed-model assembly lines“, *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 10, pp. 2829-2844, 2016.
- [31] Suh, N.: „Complexity: Theory and applications“, University Press, Oxford, 2005.
- [32] Suh, N. P.: „Complexity in Engineering“, *CIRP Annals*, Vol. 54, No. 2, pp. 46-63, 2005.
- [33] Lee, T.: „Complexity Theory in Axiomatic Design“, doktorska disertacija, 2003.
- [34] Alkan, B.; Vera, A. V.; Ahmad, M.; Ahmad, B.; Harrison, R.: „Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review“, *European Journal of Industrial Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 116-150, 2018.
- [35] Chryssolouris, G.; Efthymiou, K.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Pagoropoulos, A.: „Flexibility and complexity: is it a trade-off?“, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 23-24, pp. 6788-6802, 2013.
- [36] Windt, K.; Philipp, T.; Böse, F.: „Complexity cube for the characterization of complex production systems“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 21, No. 2, pp. 195-200, 2008.
- [37] Mesa, J. A.; Esparragoza, I.; Maury, H.: „Development of a metric to assess the complexity of assembly/disassembly tasks in open architecture products“, *International Journal of Production Research*, Vol. 56, No. 24, pp. 7201-7219, 2018.
- [38] ElMaraghy, H.; AlGeddawy, T.; Samy, S. N.; Espinoza, V.: „A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems“, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 33, No. 1, pp. 51-64, 2014.
- [39] Jenab, K.; Liu, D.: „A graph-based model for manufacturing complexity“, *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No. 11, pp. 3383-3392, 2010.
- [40] Efthymiou, K.; Pagoropoulos, A.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G.: „Manufacturing systems complexity : An assessment of manufacturing performance indicators unpredictability“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 324-334, 2014.

- [41] Koren, Y.; Hu, S. J.; Gu, P.; Shpitalni, M.: „Open-architecture products“, CIRP Annals, Vol. 62, No. 2, pp. 719-729, 2013.
- [42] Shannon, C.: „A mathematical theory of communication“, Bell system technical journal, Vol. 27, No. 3, pp. 379-423, 1948.
- [43] Desmukh, A.; Talavage, J.; Barash, M.: „Complexity in Manufacturing Systems - Part 1: Analysis of Static Complexity“, IIE Transactions, Vol. 30, pp. 645-655, 1998.
- [44] Zhu, X.; Hu, S. J.; Koren, Y.; Marin, S. P.: „Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines“, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130, No. 5, 2008.
- [45] Park, K.; Okudan Kremer, G. E.: „Assessment of static complexity in design and manufacturing of a product family and its impact on manufacturing performance“, International Journal of Production Economics, Vol. 169, pp. 215-232, 2015.
- [46] ElMaraghy, W. H.; Urbanic, R. J.: „Modelling of Manufacturing Systems Complexity“, CIRP Annals, Vol. 55, No. 1, pp. 363-366, 2003.
- [47] ElMaraghy, W. H.; Urbanic, R. J.: „Assessment of Manufacturing Operational Complexity“, CIRP Annals, Vol. 53, No. 1, pp. 401-406, 2004.
- [48] ElMaraghy, H. A.; Kuzgunkaya, O.; Urbanic, R. J.: „Manufacturing Systems Configuration Complexity“, CIRP Annals, Vol. 54, No. 1, pp. 445-450, 2005.
- [49] Alkan, B.; Vera, D.; Ahmad, B.; Harrison, R.: „A Method to Assess Assembly Complexity of Industrial Products in Early Design Phase“, Industrial Products in Early Design Phase, Vol. 6, pp. 989-999, 2017.
- [50] Mattsson, S.; Gullander, P.; Harlin, U.; Bäckstrandb, G.; Fastha, A.; Davidsson, A.: „Testing complexity index – a method for measuring perceived production complexity“, Procedia CIRP, Vol. 3, pp. 394-399, 2012.
- [51] Zeltzer, L.; Limère, V.; Landeghem, H. V.; Aghezzaf, E.; Stahre, J.: „Measuring complexity in mixed-model assembly workstations“, International Journal of Production Research, Vol. 51, No. 15, pp. 4630-4643, 2013.

- [52] Mattsson, S.; Karlsson, M.: „Comparing quantifiable methods to measure complexity in assembly“, *International Journal of Manufacturing Research*, Vol. 9, No. 1, 2014.
- [53] Trattner, A.; Hvam, L.; Forza, C.; Lee Herbert-Hansen, Z. N.: „Product complexity and operational performance: A systematic literature review“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 25, pp. 69-83, 2019.
- [54] Busogi, M.; Ransikarbum, K.; Oh, Y. G.; Kim, N.: „Computational modelling of manufacturing choice complexity in a mixed-model assembly line“, *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 20, pp. 5976-5990, 2017.
- [55] Thoughtco: „Eksponencijalno propadanje: definicija i funkcija“, s Interneta, <https://hr.peopleperproject.com/posts/10292-exponential-decay-definition-and-function>, 13.04.2021.
- [56] Oh, K.; Kim, H. W.; Kim, D.; Lee, J.; Lee J.; Hong, Y. S.: „Product Interface Design for Complexity Management in Assembly Systems“, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 225491-225506, 2020.
- [57] AlGeddawy, T.; Samy, S. N.; ElMaraghy, H.: „Best design granularity to balance assembly complexity and product modularity“, *Journal of Engineering Design*, Vol. 28, No. 7-9, pp. 457-479, 2017.
- [58] Sinha, K.; De Weck, O. L.: „Structural complexity quantification for engineered complex systems and implications on system architecture and design“, *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2013*, Portland, Oregon, USA, 2013.
- [59] Wang, H.; Zhu, X.; Wang, H.; Hu, S. J.; Lin, Z.; Chen, G.: „Multi-objective optimization of product variety and manufacturing complexity in mixed-model assembly line“, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 30, pp. 16-27, 2011.
- [60] Sun, H.; Fan, S.: „Car sequencing for mixed-model assembly lines with consideration of changeover complexity“, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 46, pp. 93-102, 2017.

- [61] Wang, H.; Hu, S. J.: „Manufacturing complexity in assembly systems with hybrid configurations and its impact on throughput“, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59, pp. 53-56, 2010.
- [62] Hu, S. J.; Zhu, X.; Wang, H.; Koren, Y.: „Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains“, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 45-48, 2008.
- [63] Modrak, V.; Marton, D.: „Modelling and Complexity Assessment of Assembly Supply Chain Systems“, Procedia Engineering, Vol. 48, pp. 428-435, 2012.
- [64] Hamta, N.; Shiraza, M. A.; Behdad, S.; Fatemi Ghomi, S. M.: „Modeling and measuring the structural complexity in assembly supply chain networks“, Journal of Intelligent Manufacturing , Vol. 29, pp. 259-275, 2018.
- [65] Samy, S. N.; ElMaraghy, H.: „Complexity mapping of the product and assembly system“, Assembly Automation, Vol. 32, No. 2, pp. 135-151, 2012.
- [66] Liu, H.; Xu, K.; Pan, Z.: „Modeling and application of mixed model assembly system complexity introduced by auto-body personalization“, International Journal of Advanced Manufacturing Technology , Vol. 93, pp. 43-54, 2017.
- [67] Anić, V.; Goldstein, I.: „Rječnik stranih riječi“, Novi Liber, Zagreb, 1999.
- [68] Vanjak, Z.: „Okruženje za rješavanje optimizacijskih problema“, doktorska disertacija, 2006.
- [69] Wang, H.; Wang, H.; Hu, S. J.: „Utilizing variant differentiation to mitigate manufacturing complexity in mixed-model assembly systems“, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 32, No. 4, pp. 731-740, 2013.
- [70] Busogi, M.; Song, D.; Kang, S. H.; Kim, N.: „Sequence Based Optimization of Manufacturing Complexity in a Mixed Model Assembly Line“, IEEE Access, Vol. 7, pp. 22096-22106, 2019.

- [71] Zhu, X.; Hu, S. J.; Koren, Y.; Huang, N.: „A complexity model for sequence planning in mixed-model assembly lines“, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 31, No. 2, pp. 121-130, 2012.
- [72] Samy, S. N.; AlGeddawy, T.; ElMaraghy, H.: „A granularity model for balancing the structural complexity of manufacturing systems equipment and layout“, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 36, pp. 7-19, 2015.
- [73] ElMaraghy, H. A.: „Changing and Evolving Products and Systems – Models and Enablers“, *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, Springer, London 2009.
- [74] Alkan, B.; Bullock, S.; Galvin, K.: „Identifying Optimal Granularity Level of Modular Assembly Supply Chains based on Complexity-Modularity Trade-off“, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 57907-57921, 2021.
- [75] Sinha, K.; Suh, E. S.: „Pareto-optimization of complex system architecture for structural complexity and modularity“, *Research in Engineering Design* volume, Vol. 29, pp. 123-141, 2018.
- [76] Blondel, V. D.; Guillaume, J. L.; Lambiotte, R.; Lefebvre, E.: „Fast unfolding of communities in large networks“, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 2008, No. 10, 2008.
- [77] ElMaraghy, H. A.: „Complexity Code for Manufacturing Systems“, *ASME International Conference on Manufacturing Science & Engineering (MSEC), Symposium on Advances in Process & System Planning*, Ypsilanti, MI, USA, 2006.

SAŽETAK

Promjena paradigme proizvodnje s masovne na individualnu proizvodnju popraćena je zahtjevima za visokom kvalitetom proizvoda, kratkim vremenima proizvodnje, kao i povećanom raznolikošću proizvoda koja je posljedica fluktuacije potražnje i želja kupaca za jedinstvenim dobrima. Sve ovo podrazumijeva da je nužna prilagodba proizvodnog sustava poduzeća kako bi ono moglo opstati i biti konkurentno na tržištu. U posljednjem desetljeću uočljiv je trend porasta istraživanja koji kompleksnost montaže unutar MMAL promatraju kao posljedicu povećane raznolikosti proizvoda. Naime, raznolikost proizvoda nužan je preduvjet zadovoljavanja širokog raspona zahtjeva kupaca. Međutim, jedinstvena definicija kompleksnosti proizvodnog sustava ili montaže još uvijek nije jednoznačno određena, stoga različiti autori predlažu različite definicije kompleksnosti i njima pripadajuće kvantitativne mjere. Pristupi (teorije) kojima autori nastoje opisati kompleksnost proizvodnog sustava, te kojim nastoje definirati i kvantitativno iskazati strukturnu kompleksnost montaže MMAL primjenom Shannonove entropije ili hibridnih metoda opisani su kroz poglavlja dva i tri.

Unatoč nedostatku formalne definicije, literatura koja se bavi kompleksnošću montaže suglasna je u tome da se ublažavanjem, tj. reduciranjem utjecaja kompleksnosti montaže, uz istovremeno održavanje prikladne raznolikosti proizvoda, mogu poboljšati performanse montažne linije, ali i proizvodnog sustava u cjelini budući da je montaža prepoznata kao ključni proces proizvodnog sustava s gledišta i ekonomičnosti i produktivnosti. Sukladno tome, vidljiv je trend porasta istraživanja koji strukturnu kompleksnost montaže uzimaju kao jedan od ili jedini kriterij optimizacije montažne linije (MMAL) kao i dizajna različitih sustava. Literatura koja se bavi pronalaženjem najprikladnijeg rješenja promatranog problema uzimajući u obzir kriterij strukturne kompleksnosti montaže, opisana je u posljednjem poglavlju ovog rada.

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
A_{ij}	binarna matrica susjedstva
AZ_{rs}	skup montažnih zadataka dodijeljenih radnoj stanici rs
α_i	kompleksnost komponente proizvoda i
α_{rs}^k	procijenjena težina k -te montažne aktivnosti na radnoj stanici
AC	ukupna kompleksnost montažnih linija ASC-a
β_{ij}	kompleksnost interakcije para komponenti
c	ciklusno vrijeme
C	ukupna kompleksnost
C_B	kompleksnost međuskladišta
C_e	kompleksnost opreme e na razini radne stanice
C_f	„feed“ kompleksnost
C_{ij}	vjerojatnost pojavljivanja zajedničkog dijela varijante i od proizvoda varijante j unutar familije proizvoda
C_{max}	maksimalna kompleksnosti MMAL
C_M	kompleksnost stroja
C_{MHS}	Kompleksnost opreme za rukovanje materijalom
C_{pj}	Nesigurnost dijeljenja procesa p za proizvodnju varijante proizvoda j
$C_{product}$	kompleksnost montaže proizvoda
C_{rs}^{In}	Integrirana kompleksnost radne stanice
$CI_{product}$	indeks kompleksnosti proizvoda
C_{xy}	„transfer“ kompleksnost
C_1	suma individualnih kompleksnosti komponenti sustava
C_2	kompleksnost interakcije komponenti
C_3	kompleksnost topologije sustava
DC_j	strukturna mjera kompleksnosti dizajna proizvoda j
E_A	energija grafa
H	entropija, kompleksnost
I_e	Indeks kompleksnosti opreme e
I_{ij}	informacijski sadržaj svake varijante dijela unutar familije proizvoda
I_{pj}	informacijski sadržaj o raznolikosti procesa svake varijante proizvoda
n_e	Količina jedinstvene opreme e

n_{ij}	broj proizvoda unutar familije proizvoda koji dijele istu varijantu komponente i proizvoda j
n_j	Ukupan broj varijanti komponenti u varijanti proizvoda j
n_{part}	broj jedinstvenih dijelova sustava
n_{pj}	broj varijanti dijelova u varijanti proizvoda j koji prolaze kroz proces p
n_s	broj jedinstvenih spojnih elemenata
N	ukupan broj komponenti sustava
N_e	ukupan broj opreme e
N_{part}	ukupan broj dijelova sustava
N_s	ukupan broj spojnih elemenata za pričvršćivanje sustava
μ_z	prosječno vrijeme obrade zadatka z kod svih modela koji se sklapaju na montažnoj liniji i zahtijevaju zadatak z
M	broj stanja odabrane varijable (elementa) promatranja
MC_j	mjera strukturne kompleksnosti proizvodnje
$Overload_{rs,m}$	radno preopterećenje na radnoj stanici rs kada se sastavlja model m
$\theta_{v_{it}^k}$	ukupna razina uočene sličnosti povezane s ciljnom varijantom v_{it}^k
p_m	vjerojatnost ishoda određenog događaja koja je definirana operaterovim izborom
$p_{Y_{rs}^k X_{rs}^k}(v_{ij'}^k v_{it}^k)$	vjerojatnost operaterovog odabira varijante $v_{ij'}^k$ nakon što je primio nalog koji zahtjeva odabir varijante v_{it}^k
RC	relativna kompleksnost
$s_{j't}$	ukupna sličnost ciljne komponente t i komponente j'
σ_z	varijabilnost vremena trajanja obrade zadatka z
TC	ukupna strukturna kompleksnost ASC mreže
t_{zm}	vrijeme izvršenja zadatka z za varijantu proizvoda m
v_{it}^k	ciljana varijanta odabira
WF_x	težinski faktori kompleksnosti
X_{rs}^k	slučajna varijabla koja opisuje željeni izlaz
Y_{rs}^k	slučajna varijabla koja opisuje stvarni odabir operatera

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AD	Aksiomatski dizajn (engl. <i>Axiomatic Design</i>)
AMOSA	Prilagodljivi višeciljni pristup simulacijskog žarenja (engl. <i>Adaptive Multi Objective Simulated Annealing Approach</i>)
ASC	Lanac opskrbe montaže (engl. <i>Assembly Supply Chain</i>)
ASP	Planiranje sekvence montaže (engl. <i>Assembly Sequence Planning</i>)
B	Međuškadišta (engl. <i>Buffers</i>)
BOM	Sastavnica materijala (engl. <i>Bill of Materials</i>)
CXB	Osnovni indeks kompleksnosti (engl. <i>Basic complexXity Index</i>)
CXC	Kalkulator kompleksnosti (engl. <i>ComplexXity Calculator</i>)
CXI	Indeks kompleksnosti (engl. <i>ComplexXity Index</i>)
DFA	Dizajn za montažu (engl. <i>Design for Assembly</i>)
DSM	Matrica strukture dizajna (engl. <i>Design Structure Matrix</i>)
GI	Indeks granularnosti (engl. <i>Granularity Index</i>)
KPI	Ključni indikatori uspješnosti (engl. <i>Key Performance Indicators</i>)
LCI	Indeks kompleksnosti rasporeda (engl. <i>Layout Complexity Index</i>)
M	Strojevi (engl. <i>Machines</i>)
MCDM	Višekriterijsko donošenje odluka (engl. <i>Multi Criteria Decision Making</i>)
MHS	Oprema za rukovanje materijalom (engl. <i>Material Handling Equipment</i>)
MMAL	Linija za montažu različitih proizvoda (engl. <i>Mixed Model Assembly Line</i>)
MOACO	Višeciljna optimizacija mravljom kolonijom (engl. <i>Multiple Objective Ant Colony Optimization</i>)
OCC	Kompleksnost odabira operatera (engl. <i>Operator Choice Complexity</i>)
SALB	Balansiranje jednostavne montažne linije (engl. <i>Simple Assembly Line Balancing</i>)
SCC	Strukturni klasifikacijski sustav kodiranja (engl. <i>Structural Classification and Coding System</i>)
SGCI	Indeks kompleksnosti granularnosti sustava (engl. <i>System Granularity Complexity Index</i>)
SRCI	Specifični indeks kompleksnosti rekonfiguracije (engl. <i>Specific Reconfiguration Complexity Index</i>)

System pdf	Funkcija raspodjele vjerojatnosti sustava (engl. <i>System Probability Distribution Function</i>)
TRCI	Ukupni indeks kompleksnosti rekonfiguracije (engl. <i>Total Reconfiguration Complexity Index</i>)