

# MODELIRANJE I SIMULACIJA STRUKTURA KOMPLEKSNIH PROIZVODNIH SISTEMA

## MODELING AND SIMULATION OF STRUCTURE OF COMPLEX MANUFACTURING SYSTEMS

*Elvis Hozdić, Emine Hozdić*

Stručni članak

**Sažetak:** Proizvodni sistem je kompleksna struktura koja se sastoji od niza povezanih elemenata, kao što su pripremak, izradak, alati, strojevi i opreme ili radnih resursa, operatera, entiteta odlučivanja i proizvodnih procesa. Proizvodni sistemi sa svojim strukturama u vremenu četvrte industrijske revolucije sve su kompleksniji. Modeliranjem struktura kompleksnih proizvodnih sistema teži se obvladavanju kompleksnošću unutar kompleksnih proizvodnih sistema, koja nastaje prije svega uslijed interakcije proizvodnog sistema sa okolinom i sve zahtjevnijim tržištem. U ovom radu prikazane su metode modeliranja kompleksnih proizvodnih sistema, kao i različiti pristupi modeliranju preko razvijenog modelirnog okvira ADMO do modeliranja agentima u kompleksnim mrežama. Modeliranje proizvodnih sistema samo za sebe nije dovoljno, pa je potrebno kontinuirano raditi na razvijanju metoda i oruđa te njihovom učinkovitom djelovanju tijekom cjelokupnog životnog ciklusa proizvodnog sistema. Za to je potrebno razvijanje i usvajanje novog znanja iz područja modeliranja i simulacije kompleksnih proizvodnih sistema.

**Ključne riječi:** ADMO, kompleksni proizvodni sistemi, kompleksne mreže, modeliranje, simulacija,

Professional paper

**Abstract:** Manufacturing system is a complex structure which comprises of several connected elements, such as preparation, construction, tools, machines and equipment, or working resources, operators, deciding entities and production processes. Production systems, with their structures in the time of the fourth industrial revolution, are more and more complex. Structure modeling of complex production systems strives towards overcoming the complexity within the complex production systems, caused primarily by the interaction of the production system with the environment and increasingly demanding market. This paper presents modeling methods of complex production systems, as well as different approaches to modeling through developed modeling ADMO frame and agent modeling within complex networks. Modeling of production systems is not sufficient on its own, and it is necessary to work continuously on the methods and tools development for their efficient action throughout the entire lifecycle of the production system. This requires the development and obtaining new knowledge in the area of modeling and complex production systems simulation.

**Key words:** ADMO, complex production systems, complex networks, modeling, simulation.

### 1. UVOD

Osnovna je svrha modeliranja definiranje matematičkih modela i drugih prikaza koji su neophodni za optimizaciju, simulaciju, revitalizaciju i upravljanje procesima i sistemima. Prema tome, osnovna je svrha modeliranja procesa i sistema izgradnja matematičkih modela, koji će u odgovarajućem stupnju točnosti adekvatno opisati proces ili sistem, u cilju:

- Simulacije varijantnih rješenja, analize i prognoziranja stanja procesa još u fazi projektiranja,
- definiranja matematičkih modela koji su neophodni za optimizaciju procesa i iznalaženje optimalnih rješenja,
- izgradnje modela upravljanja za dati sistem, odnosno objekt optimizacije,

- znanstvenih istraživanja i praktične primjene u realnim procesima.

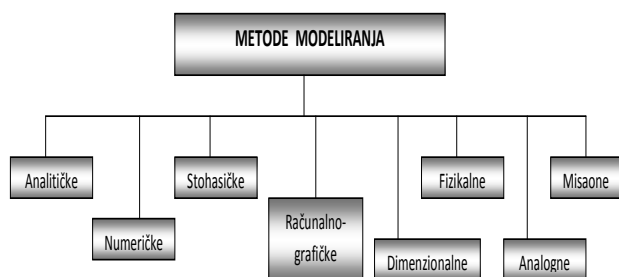
Prema tome, krajnji cilj modeliranja i optimizacije obradnih procesa i sistema je jeftinija, kvalitetnija i profitabilna proizvodnja. Model predstavlja pojednostavljen ili idealiziran opis sistema, situacija ili procesa, često u matematičkom obliku, radi olakšanja proračuna ili predviđanja nekih događaja.

### 2. METODE MODELIRANJA

Jedan od glavnih faktora koji doprinosi kompleksnosti međudjelovanja između elemenata sistema je mijenjanje nekih parametara s vremenom. Metode modeliranja usavršavane su razvojem

primijenjene matematike, matematičke statistike, operacijskih istraživanja, eksperimentalnih i informatičkih metoda. Danas postoji više različitih metoda modeliranja. Koja će od postojećih metoda biti korištena ovisi o objektu modeliranja, zahtijevanom stupnju pouzdanosti modela, vrsti procesa, odnosno sistema, raspoloživoj opremi, potrebi automatizacije i izgradnji sistema upravljanja. Osnovne metode modeliranja mogu biti determinističke i stohastičke [1]. U analizi i istraživanju procesa i sistema mogu biti primijenjene neke od slijedećih metoda modeliranja, kako pokazuje slika 1.

Moćan razvoj informacionih tehnologija, odnosno digitalnih računala, je učinio da je računar, u posljednje vrijeme, postao veoma korisno sredstvo u svim fazama istraživanja, razvoja, projektiranja, konstruiranja, proizvodnje, korištenja i održavanja proizvoda, uopće, i upravljačkih komponenti i sistema različite fizičke prirode (mehaničke, fluidne, termo, električne, elektronske i kombinirane) posebno [2],[3],[4]. Među najuspješnijim simulacijskim metodama danas je korištenje softverskih agenata. Svaki je agent zasebni softverski entitet čije ponašanje ovisi o unutrašnjoj strukturi i zadanim ciljevima. Sposoban je ponašati se autonomno i biti svjestan dostupnih opcija prilikom donošenja odluka [5].



Slika 1. Klasifikacija metoda modeliranja [1]

Osnovi cilj teorije kompleksnih sistema je proučavanje obrazaca pravilnosti na makroskopskoj razini odnosno pojava koje se javljaju u kompleksnom sistemu iz decentraliziranih, lokalnih interakcija između skupa entiteta sistema. Holtzer i De Meer dali su pregled metoda matematičkog modeliranja u svrhu proučavanja ponašanja samoorganizirajućih i kompleksnih sistema koje su klasificirali u modeliranje na makrorazini (engl. *macro-level modelling*) i modeliranje na mikrorazini [6]. Koristeći model na mikrorazini potrebno je opisati ponašanja svih entiteta sistema i interakcije između njih, dok je kod modeliranja na makrorazini potrebno opisati samo ponašanje varijable od interesa. Boccara je dao opsežan pregled metoda za modeliranje kompleksnih sistema [7]. Većina metoda za modeliranje kompleksnih sistema tradicionalno je bila korištena s ciljem stvaranja jednostavnih matematičkih reprezentacija sistema dinamičkim sistemima (skupom jednačbi čije rješenje opisuje evoluciju stanja sistema u vremenu) kao što je korištenje diferencijalnih jednačbi i rekurentnih (rekurzivnih) relacija (npr. logistička mapa) ili Monte Carlo simulacija.

Za podršku pri modeliranju adaptivnih distribuiranih proizvodnih sistema razvijen je adaptivni distribuirani modelirni okvir (ADMO)[8].

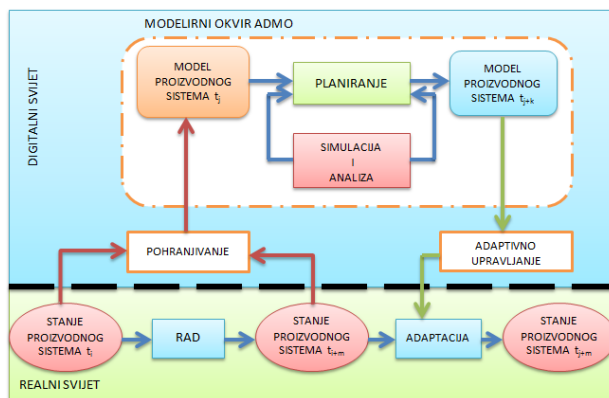
### 3. ADAPTIVNI DISTRIBUIRANI MODELIRNI OKVIR – ADMO

Adaptivni distribuirani modelirni okvir je cjelokupno okruženje za potporu adaptivnim distribuiranim proizvodnim sistemima. ADMO se sastoji od nekoliko sistema kako bi se osigurala provedba različitih procesa da podrže planiranje i kontrolu proizvodnih sistema. To su dinamične strukture koje su u suprotnosti s konvencionalnim proizvodnim sistemima, kratkog životnog ciklusa. Prilagođenost za realizaciju određenog proizvoda i ispunjenje zadatka ne postoji. ADMO okvir se sastoji od građevnih blokova i alata za rad u distribuiranom i suradničkom okruženju, što zahtijeva stalnu dinamičku prilagodbu potrebama kupca i nastalih promjena u okruženju ili u samom sistemu. Rješavanje pitanja međuovisnosti, integracije, razumijevanja i razmjene informacija se odvija u stvarnom vremenu unutar okvira ADMO sa zajedničkim informacijsko-komunikacijskog sistemima s potrebnom infrastrukturom za obavljanje tih procesa.

Cilj modelirnog okvira ADMO je zadovoljiti generična, sistematična i adaptivna okruženja za potrebe modeliranja proizvodnih sistema sa nasljednim funkcijama:

- podržati opisnu logiku građevnih blokova proizvodnog sistema,
- osigurati neovisnost blokova i mogućnost njihove integracije,
- pružiti metode dizajna,
- pružiti alate za planiranje i olakšati njihovu integraciju,
- imati bazu modela,
- podržati praćenje i prilagodbu realnog proizvodnog sistema u realnom vremenu,
- očuvati znanja proizvodnih sistema.

Na slici 2. je prikazan model ADMO.



Slika 2. Pozicija ADMO okruženja u realnom i digitalnom okruženju [9]

ADMO predstavlja sistemске i metodološke korake vođene dizajna proizvodnih sistema, koji uključuju različite metode za identificiranje, planiranje, simulacije, analizu i kontrolu. Koraci planiranja mogu biti sekvencijalni, paralelni, koji uključuje donošenje odluka u petlji (optimizacije procesa), a često su u provedbi aktivnosti koje mogu biti podržane od strane nekoliko metoda (provjerite ista stvar na različite načine). Same metode moraju se realizirati za uporabu u obliku alata. ADMO okvir, pružiti generičkih sučelja za pristup tim alatima, a time i njihova integracija u svakoj fazi planiranja. Podrška za nove proizvodne koncepte u obliku mrežnih vremenskih struktura proizvodnje zahtijeva suradnju i interakciju autonomnih blokova koji će biti aktivno uključeni u njihov razvoj. ADMO je u tu svrhu ukupan prostorni model za kolaborativno planiranje i kontrolu proizvodnog sistema, u koji moraju biti uključeni stručnjaci u pojedinim sistemima rada. Model prostora mora biti kompaktilan s vanjskim informacijskim sistemima i uslugama. Integracijom novih ADS i prezentacijom njihovih modela dobiva se funkcionalno bogat zajednički okvirni model, dok neki dijelovi (lokalne baze podataka, unutrašnji radni modeli autonomnih sistema, itd.) ostaju u skrbištvu i na upravljanje svakom pojedinačnom sudioniku [8].



Slika 3. Komponente modelirajućeg okvira ADMO [10]

Na slici 3. prikazane su nezavisne komponente koje oblikuju ADMO. To su reference proizvoda, koncepti modeliranja, metodologije i metode, ontologija, parcijalni referentni modeli radnih sistema, referentni modeli radnih sistema, modeli proizvodnih sistema i modelirni alati koji omogućuju prilagodbu i integraciju postojećih, kao i razvoj, podršku i provedbu novih distribuiranih proizvodnih sistema [10].

ADMO okvir treba osigurati mogućnost ponovne upotrebe blokova za izgradnju, te prikupljanje i sastavljanje povezanih znanja. To znanje bi trebao biti dostupno kao dio planiranja i podrške novim proizvodnim sistemima.

Unutar ADMO okvira povezani su modelirni sistemi, informacijsko – komunikacijski sistemi i kolaborativni radni sistemi. Modelirani sistem implementira procese

opisujući građevne blokove, modelira i sintetizuje modele proizvodnog sistema i njegove simulacije, analize, i pruža podršku za kontrolu. Informacijsko-komunikacijski sistem omogućuje procese integracije različitih sistema i pohranu podataka i strukturiranju znanja, interakcijska modeliranja i sistema stručnjaka i njihove integracije u sistemu. Sistem podržava kolaborativno upravljanje procesima rada, zajednički prostor za sastanke stručnjaka, identificiranje i rješavanje sukoba u kolektivnom odlučivanju [8].

#### 4. MODELIRANJE I SIMULACIJA ZASNOVANI NA AGENTIMA

Metode koje se danas uobičajeno koriste za proučavanje kompleksnih sistema su modeliranje zasnovano na agentima (engl. *Agent-Based Modelling*; modeliranje ABM) za razvoj računalnih modela simulacije ponašanja sistema te razvoj modela kompleksnih mreža (engl. *complex networks*) za analizu interakcija entiteta sistema iz stvarnih ili umjetno stvorenih podataka. Niaz je u svom doktorskom radu pokazao potrebu za povezivanjem agentskih modela i kompleksnih mreža te predložio jedinstveni okvir za razvoj formalnih, mrežnih i agentskih modela sistema CAS [11].

Model zasnovan na agentima je model koji predstavlja skup pojedinih agenta i njihovo ponašanje. Shalizi definira agenta kao entitet koji ima stanje vrijedno reprezentacije i koji ostvaruje interakcije s drugim agentima uzrokujući promjenu njihovih stanja [12]. Sastavnice modela zasnovanog na agentima su skup agenata i njihovih stanja, pravila koja uređuju interakcije agenata i okolina unutar koje se agenti nalaze. Na temelju drugih agenata, stanja i pravila, agent će izvesti (ili neće) neku akciju. Akcija može utjecati na druge agente, njegovo stanje ili pravilo i okolinu.

Bitno je istaknuti kako interpretacija pojma agent ima drugačije značenje u kontekstu modeliranja ABM u odnosu na ono u višeagentskim sistemima (engl. *Multi-Agent System*; sustav MAS). U kontekstu sistema MAS, agent se najčešće definira kao računalni sistem, smješten u okolini, sposoban za autonomno djelovanje u svrhu ispunjenja zadanih ciljeva koji ima svojstva reaktivnosti, proaktivnosti i društvene sposobnosti [13].

U kontekstu modeliranja ABM, agent opisuje metaforu načina razmišljanja za modeliranje ponašanja određenih aktera sistema. Modeliranjem ABM stvara se model u svrhu *simulacije* stvarnog sistema gdje su agenti modeli samostalnih donositelja odluka u sistemu koji se proučava. Dok s druge strane, sistem MAS uključuje *izradu* raspodijeljenih donositelja odluka za obavljanje određenog zadatka kao što je primjerice raspodijeljeni sistem upravljanja. Sukladno tome, agentske tehnologije u računarstvu zasnovanom na agentima (engl. *agent-based computing*) mogu se razmatrati iz tri perspektive [14]: agenti kao metafora za oblikovanje sistema (npr. agentska paradigma nudi razvojnom programeru način strukturiranja programskih sistema oko autonomnih komponentni), agenti kao izvor tehnologija (npr. agenti se koriste kao ključni elementi algoritma za rješavanje

nekeg problema kao što raspodjela resursa) i konačno agenti za simulaciju sistema (npr. Agenti predstavljaju domene u stvarnome svijetu zato što je primjerice domena presložena da bi se opisala drugačije).

Modeliranje ABM omogućuje simulaciju entiteta kompleksnog sistema i njihove međusobne interakcije, tako omogućujući prirodno pojavljivanje izranjajućih kompleksnih svojstava sistema. To je u suprotnosti s tradicionalnim metodama modeliranja diferencijalnim jednadžbama u kojima su svojstva sistema na puno višoj razini osnovni elementi modela (npr. gustoća populacije) radije nego pojedinačni entiteti sistema. Osnovne pogodnosti modeliranja ABM su te što može otkriti izranjajuće pojave u sistemu i nudi prirodan i fleksibilan način njegovog opisa. Detaljan pregled mogućnosti, ograničenja i problema u primjeni modeliranja zasnovanog na agentima opisan je u [15]. Cilj modeliranja ABM je oblikovanje modela koji su dovoljno jednostavni kako bi se mehanizam izranjanja mogao razumjeti, a ipak dovoljno detaljni kako bi mogli pokazati zanimljivo ponašanje. Modeliranje ABM uspješno se koristilo za empirijsko ispitivanje specifičnih pojavljivanja izranjanja [16] i za otkrivanje izranjanja u kompleksnim sistemima [17]. Modeliranje ABM prepoznato je kao osnovna paradigma modeliranja kompleksnih sistema, no u osnovi ono ima značajno ograničenje jer se isključivo zasniva na paradigmi modeliranja odozdo prema gore (engl. *bottom-up*). To znači da se ponašanjem agenata, koji su opisani na mikroskopskoj razini, modelira opće ponašanje sistema na makroskopskoj razini. U nekim slučajevima korisno je uvesti dvosmjerne relacije između razina ili uvesti nove među-razine (npr. različite prostorno / vremenske skale ili domene interesa) [18].

Modeliranje zasnovano na agentima u više razina (engl. *multi-level agent-based modelling*) proširuje klasičnu paradigmu modeliranja ABM omogućavanjem interakcije i dijeljenja zajedničke okoline između više modela predstavljajući različite razine istog sistema (npr. organizacije, znanosti, analize). Ova vrsta modeliranja najčešće se koristi za modeliranje uzajamnih interakcija između različitih razina sistema (npr. upravljanje povratnom spregom odozgo prema dolje) i dinamičke prilagodbe razine detalja simulacija (npr. korištenje najbolje dostupnog modela u danom kontekstu).

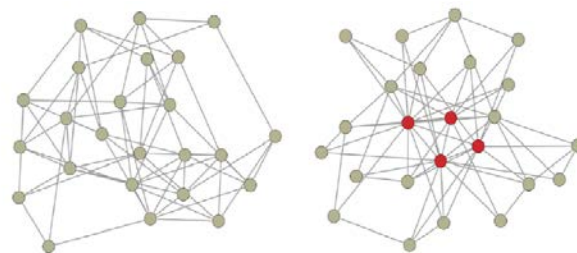
## 5. KOMPLEKSNE MREŽE

Kompleksna mreža je reprezentacija kompleksnog sistema korištenjem skupa čvorova međusobno povezanih skupom veza. Čvorovi predstavljaju entitete kompleksnog sistema (npr. računala, osobe, proteine), a veze povezanost ili interakcije između čvorova. Mreža stoga pruža prigodan formalni opis kompleksnog sistema kojim se pokušavaju pojednostaviti detalji entiteta sistema i istodobno zadržati složenost njihovih interakcija. Formalni koncept mreža i njihova terminologija pretežito potječu iz matematičkog područja teorije grafova.

Teorija mreža postaje sve istaknutija u istraživanju kompleksnih sistema [19][20]. Cilj teorije mreža u području kompleksnih sistema je razumjeti nastajanje i

karakteristike mreža koje opisuju različite kompleksne sisteme.

Mnoge mreže tehnoloških, društvenih i bioloških sistema okarakterizirane su netrivialnim svojstvima svojih topologija kao što su mala srednja duljina puta između čvorova (dobra povezanost između čvorova) – mreže malog svijeta (engl. *small world networks*) [21],[22] raspodjela bez skale stupnja čvora – mreže bez skale (engl. *scale-free networks*) [23] te visoki stupanj grupiranja i modularna struktura – postojanje zajednica [24]. Za prve je karakterističan zakon ovlasti, ali za druge, udaljenost između dva nasumce odabrana čvorova varira proporcionalno logaritmu veličine mreže. Za male mreže karakterističan je zakonu moći. Raspodjela tih oblika se može naći u velikom broju pojava u rasponu od veličine gradova, snaga potresa, kratera na mjesecu, solarne baklje, računalnih datoteka, ratova, učestalost riječi u bilo kojem ljudskom jeziku, broj citata znanstvenih radova itd [25]. Kod malih mreža zakon moći opisuje broj priključaka od svakog elementa. To znači da postoji veliki broj labavo povezanih komponenti i mali broj snažno povezanih komponenti [26]. Elementi sa značajno nadprosječnim povezivanjem naziva središte mreže. Primjer čvorišta mreže u slobodnoj okolini i usporedbi sa slučajnim mrežama prikazan je na slici 4.



a) Slučajna mreža

b) Mreže bez mjerila

**Slika 4.** Prikaz slučajeva mrežnog povezivanja [26]

Opisane osobine omogućuju da su mreže bez mjerila robusne. Ako pretpostavimo slučajnu pojavu smetnji kod najslabije povezani čvorova vjerojatnost će doći do poremećaja u središtu je povezanost vrlo mala. S druge strane, poremećaj ili uništavanje ključnih čvorišta može dovesti do raspada mreže na više labavo povezanih pod-mreža.

Za područje mreža vrijedi zakon potencije koji je opisan u slijedećoj jednadžbi:

$$p(x) = C \cdot x^{-\alpha} \quad (1)$$

Odnosno

$$1 = \int_{x_{min}}^{\infty} p(x) dx = C \cdot \int_{x_{min}}^{\infty} x^{-\alpha} dx = \frac{C}{1-\alpha} [x^{1-\alpha}]_{x_{min}}^{\infty} \quad (2)$$

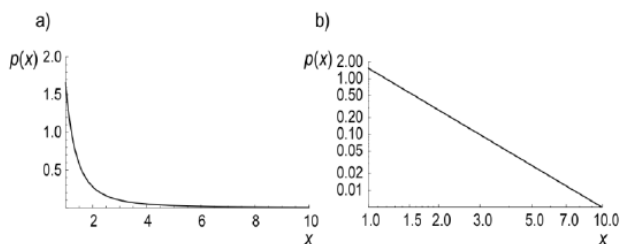
Pa iz tog slijedi da je konstanta C

$$C = (\alpha - 1)x_{min}^{\alpha-1} \quad (3)$$

Uvrštavanjem dobivenog u početnu jednadžbu dobivamo normalni oblik zakona potencije:

$$p(x) = \frac{\alpha-1}{x_{min}} \cdot \left(\frac{x}{x_{min}}\right)^{-\alpha} \quad (4)$$

Na sljedećoj slici prikazan je zakon potencije na linearnoj i logaritamskoj skali [27].



**Slika 5.** Zakon potencije na linearnoj (a) i logaritamskoj skali (b)

$$P(x|\alpha) = \prod_{i=1}^n \frac{\alpha-1}{x_{min}} \cdot \left(\frac{x_i}{x_{min}}\right)^{-\alpha} \quad (5)$$

Primjenom Bayesovog obrazca dobivamo:

$$P(\alpha|x) = P(x|\alpha) \frac{P(\alpha)}{P(x)} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ln P(x|\alpha) &= \sum_{i=1}^n \left[ \ln(\alpha-1) - \ln x_{min} - \alpha \ln \frac{x_i}{x_{min}} \right] \\ &= n \ln(\alpha-1) - n \ln x_{min} - \alpha \sum_{i=1}^n \ln \frac{x_i}{x_{min}} \end{aligned} \quad (7)$$

U konačnom dobivamo vrijednost eksponenta  $\alpha$ :

$$\alpha = 1 + n \left[ \sum_{i=1}^n \ln \frac{x_i}{x_{min}} \right]^{-1} \quad (8)$$

Stanje čvorova (npr. mišljenje osobe ili pozicija senzora) u mreži uobičajeno se mijenja kroz vrijeme. Ta promjena ne ovisi samo o intrinzičnoj dinamici samog čvora već i o jačini njegove povezanosti s najbližim susjedima. Jačina povezanosti čvorova povećava kompleksnost zajedničkog ponašanja što dovodi do potrebe za modeliranjem, analizom i predviđanjem ponašanja brojnih dinamičkih procesa na mrežama kao što su greške, napadi, kaskadni ispadi ili proces širenja (npr. zaraza, informacija, mišljenje) [28][29]. U zadnjem desetljeću došlo se do brojnih saznanja o utjecaju strukture topologije na ponašanje dinamičkih procesa na statičkim ili sporo promjenjivim mrežama u odnosu na dinamički proces [30] [31]. Strukturna svojstva kompleksnih mreža proučavana su iz perspektive stvarnih komunikacijskih mreža Interneta i WWW-a [32]. Osim toga, predstavljena je potreba i za proučavanjem strukturnih i evolucijskih svojstava bežičnih mreža osjetila [33].

Doduše, veze u stvarnim mrežama su mnogo promjenjivije. Čak i ako postoji fiksna topološka struktura, veze između čvorova mogu biti aktivne ili neaktivne prilagođavanjem kroz vrijeme [34]. Novi trend istraživanja postaje proučavanje mreža s vremenski promjenjivom topologijom (engl. temporal networks). Pošto neka pretpostavljena svojstva statičkih mreža, kao što je tranzitivnost između veza, ne vrijede uvijek kod mreža s vremenski promjenjivom topologijom, pristup

proučavanju njihovih svojstva i dinamičkih procesa na njima moraju se promijeniti u odnosu na pristupe statičkim mrežama. Holme i Saramäki daju pregled dosadašnje literature o mrežama s promjenjivom topologijom. Proširivanje analize mreže na dinamičku topologiju moglo bi imati konkretnu primjenu u društveno-tehničkim sistemima od ad-hoc mrežnog povezivanja (tj. mrežno povezivanje u jako promjenjivim usmjerničkim mrežama) do oblikovanja masivnih raspodijeljenih sustava [35] ili analize velikih komunikacijskih sistema kao što su pokretni uređaji.

Općenito, model kompleksne mreže može imati dva tipa promjenjivosti u vremenu: dinamiku stanja čvorova (tj. dinamički proces na mreži) i promjenu topologije same mreže (tj. dinamika same mreže). U mnogo slučajeva oba tipa dinamike pojavljuju se neovisno. Adaptivna mreža (engl. adaptive network) povezuje dinamički proces na mreži s dinamikom same mreže. Povezivanje ta dva tipa dinamike posebice je važno kada su vremenske skale dinamičkih procesa na mreži usporedive s dinamikom mreže. U tim slučajevima može se primijetiti dvostruka povratna sprema jer topologija mreže utječe na dinamičke procese na čvorovima u mreži i istodobno, stanja čvorova (rezultat dinamičkih procesa) posljedično izazivaju novo oblikovanje mreže. U takvim mrežama, lokalne dinamike stanja čvora ovisne su o topologiji mreže i razvoj veza u mreži ovisan je o stanju čvorova u mreži. Sukladno tome može se reći kako stanje čvorova u mreži i topologija mreže zajedno međusobno evoluiraju (engl. state-topology coevolution). Nekoliko tipova mreža na Webu (npr. informacijske, društvene i kolaborativne) okarakterizirane su kao adaptivne mreže u svrhu razumijevanja Weba kao kompleksnog adaptivnog sistema [19].

Između strukturnih i dinamičkih svojstava kompleksnih mreža postoje zanimljive veze. Upravljujivost kompleksne mreže očituje se u mogućnosti dovođenja mreže iz bilo kojeg početnog stanja u bilo koje željeno stanje u konačnom vremenu nametanjem odgovarajućih vanjskih signala na podskup njezinih čvorova (upravljački čvorovi), gdje se mreža promatra kao dinamički sistem kroz dinamiku njezinih čvorova [36] ili njezinih veza. Mogućnost upravljanja kompleksnim sistemom daje osnovni dokaz njegovog potpunog razumijevanja i predstavlja važno sredstvo za donositelje odluka. Razumijevanje glavnih faktora upravljivosti mreža stoga predstavlja i osnovni korak za oblikovanje robusnih i sigurnih tehnoloških sistema [33].

Prethodna istraživanja usredotočuju se na ograničeni slučaj nezavisne pojedinačne mreže koja ne djeluje međusobno s drugim mrežama. Međutim, kompleksni sistemi su najčešće međusobno povezani i trebali bi se modelirati međuzavisnim mrežama (engl. interdependent networks). Buldyrev i suradnici pokazali su kako komunikacijska mreža izmada elektrana utječe na stabilnost električne mreže te su uveli matematički alat zasnovan na teoriji perkolacije za proučavanje robusnosti mreža formiranih iz međuzavisnih mreža [37], [38].

U društveno-tehničkim sistemima prirodno je očekivati da su društvene i tehničke mreže strogo povezane (npr. povezivanje društva ovisi o izvorima električne energije). Dodatno, mreže je bitno analizirati i na drugačijim skalama. Primjerice, kod širenja zaraza gdje zaraženi



ljudi mogu prelaziti udaljenosti na različitim skalama koristeći različite prijelaze: duge i brze prijelaze letovima između zračnih luka ili kraća i češća putovanja javnim prijevozom. U tome slučaju transportne mreže na različitim skalama imaju utjecaj jedne na druge.

Iz prethodnog je primjetno da je jedna od osnovnih poteškoća u modeliranju kompleksnih sistema modelom mreže odrediti i prikupiti bitne podatke za njegovu ispravnu i potpunu izgradnju. Cjelovita struktura mreža stvarnih kompleksnih sistema često nije dostupna zbog ekonomskih, pravnih ili tehničkih razloga ili, kao što je spomenuto u prethodnom primjeru, jedna mreža možda nije dovoljna za reprezentaciju cijelog sistema. U takvim situacijama koriste se zamjenski podaci od srodnih sistema, metode zaključivanja o strukturi mreže ili sintetički generirane mreže sa željenim strukturnim svojstvima [19].

## 6. ZAKLJUČAK

Proučavajući enormno brz razvoj industrijskih proizvodnih sistema, novih sistema koji se pojavljuju, kao i njihovu kompleksnost uočavamo da je neophodno usporedo s njihovim razvojem proučavati i razvijati metode i alate za modeliranje i simulaciju takvih sistema kako bi bili u korak s vremenom. U implementaciji novih cyber – physical sistema, koji povezuju realni i digitalni proizvodni svijet neizbježno je povećanje kompleksnosti kao nužne osobine kompleksnih proizvodnih sistema. Kako bi smo se nosili s tom osobinom kompleksnih proizvodnih sistema, obvladavali je i bolje razumjeli neophodno je razvijati nove metode za modeliranje i simulaciju cyber – physical proizvodnih sistema u distribuiranom proizvodnom okruženju. U ovom radu pregledno su prikazani neki od modela i date smjernice za daljnja istraživanja.

## 7. LITERATURA

[1] M. Jurković, *Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema*. Bihać: Mašinski fakultet Bihać, 1999.

[2] M. Kalajdžić, *Proizvodne tehnologije - nosilac razvoja industrijskog privrednog kompleksa*. Kraljevo, 2000.

[3] R. Gatala, "Primjena vještačke inteligencije u projektovanju proizvoda," 2000.

[4] N. Nedić and D. Pršić, *Računarsko modeliranje i simulacija u savremenoj tehnologiji*. Kraljevo: Mašinski fakultet Kraljevo, 2001.

[5] J. Dale and E. Mamdani, "Open Standards for Interoperating Agent - based Systems," *Foundation for Intelligent Physical Agents Organisation*. [Online]. Available: [www.fipa.org](http://www.fipa.org).

[6] R. Holzer and H. De Meer, "Modeling and Application of Self-Organizing Systems," *2011 IEEE Fifth Int. Conf. Self-Adaptive Self-Organizing Syst.*, pp. 235–243, Oct. 2011.

[7] N. Boccara, *Modeling Complex Systems*. Chicago, 2010.

[8] V. Zelatelj, *Modelirno okolje za gradnju distribuiranih proizvodnih sistemov*, Doktorsko . Ljubljna: Fakulteta za strojništvo Ljubljana, 2008.

[9] E. Westkämper, "Digital Manufacturing in the global Era," pp. 1–11, 2006.

[10] V. Zaletelj, a. Sluga, and P. Butala, "A Conceptual Framework for the Collaborative Modeling of Networked Manufacturing Systems," *Concurr. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 103–114, Mar. 2008.

[11] M. A. K. Niazi, *Towards a novel unified framework for developing formal, network and validated agent - based simulation models of complex adaptive systems*. Disertacija, Sveučilište Stifling, 2011.

[12] C. R. Shalizi, *Methods and techniques of complex systems science: An overview*. arXiv:nlin/0307015v4, 2006.

[13] N. R. Jennings, "On Agent-Based Software Engineering," *Artif. Intell.*, vol. 177, pp. 277–296, 2000.

[14] Luck.M. et.al., *Agent Technology: Computing as Interaction. A Roadmap for Agent Based Computing*. AgentLink III, 2005.

[15] D. Helbing and S. Baliotti, "How to do agent-based simulations in the future: from modeling social mechanisms to emergent phenomena and interactive systems design," *neobjavljen*, 2011.

[16] O. Paunovski, G. Eleftherakis, and A. J. Cowling, "Disciplined exploration of emergence using multi-agent simulation framework," *J. Comp. Info.*, vol. 28, pp. 369 – 391, 2009.

[17] M. A. K. Niazi and A. Hussain, "Sensing Emergence in Complex Systems," *IEEE Sensors*, vol. 11, pp. 2479 – 2480, 2011.

[18] T. Lipić, "Modeliranje i oblikovanje kompleksnih sustava," *Centar za informatiku i računarstvo, Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Zagreb*.

[19] T. Lipić, "Modeliranje i oblikovanje kompleksnih sustava."

[20] A. L. Barabasi, "The network takeover," *Nat. Phys.*, vol. 8, pp. 14 – 16, 2012.

[21] D. J. Watts and S. H. Strogatz, "Collective dynamics of small world network," *Nature*, vol. 393, no. 440, 1998.

[22] R. Albert, J. H., and A. L. Barabasi, "Diameter of the world wide web," *Nature*, vol. 401, pp. 130 – 131, 1999.

[23] A. L. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science (80- )*, vol. 286, no. 5439, pp. 509 – 512, 1999.

[24] S. Fortunato, "Community detection in graphs," *Phys. Rep.*, vol. 486, no. 3–5, pp. 75 – 174, 2010.

[25] M. E. J. Newman, "Power Laws, Pareto Distributions and Zipfs Law," *Contemp. Phys.*, vol. 46, no. 5, pp. 323 – 351, 2005.

[26] R. Vrabič, "Krmljenje avtonomnih obdelovalnih sistemov v proizvodnem okolju." Fakulteta za strojništvo Ljubljana, Ljubljana, 2012.

[27] R. Vrabič, D. Husejnagić, and P. Butala, "Discovering autonomous structures within complex networks of work systems," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 423–426, Jan. 2012.

- [28] A. Barrat, M. Barthelemy, and A. Vespignani, *Dynamical processes on complex networks*. Cambridge UP, 2008.
- [29] A. Vespignani, "Modelling dynamical processes in complex socio-technical systems," *Nat. Phys.*, vol. 8, pp. 32 – 39, 2012.
- [30] M. E. J. Newman, "The structure and function of complex networks," *SIAM Rev.*, vol. 45, no. 2, pp. 167 – 256, 2003.
- [31] S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez, and D.-U. Hwang, "Complex networks: Structure and dynamics," *Phys. Rep.*, vol. 424, no. 4–5, pp. 175 – 308, 2006.
- [32] P. Antoniou and A. Pitsillides, *Understanding Complex Systems: A Communication Networks Perspective*. Teh.izv., 2007.
- [33] P. Antoniou and A. Pitsillides, *Wireless Sensor Networks Control: Drawing Inspiration from Complex Systems*. MedHocNet, 2007.
- [34] S. A. Hill and D. Braha, "Dynamic model of time-dependent complex networks," *Phys. Rev. E*, vol. 82, no. 4, 2010.
- [35] R. Pfitzner, *Time-Explicit graphs: A framework for dynamic network analysis*. Wurzburg: Modeling and Analysis of Novel Mechanisms in Future Internet Applications, 2012.
- [36] Y.-Y. Liu, J.-J. Slotine, and A. L. Barabasi, "Controllability of complex networks," *Nature*, vol. 473, pp. 167 – 173, 2011.
- [37] S. V. Buldyrev, R. Parshani, G. Paul, H. E. Stanley, and S. Havlin, "Catastrophic cascade of failures in interdependent networks," *Nature*, vol. 464, pp. 1025 – 1028, 2010.
- [38] J. Gao, S. V. Buldyrev, H. E. Stanley, and S. Havlin, "Networks formed from interdependent networks," *Nat. Phys.*, vol. 8, pp. 40 – 48, 2012.

Kontakt autora:

**Elvis Hozdić, univ. dipl. inž. strojništva**

Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Aškarčeva 6, Ljubljana

ehozdic@yahoo.com

**Emine Hozdić, apsolvent mašinskog fakulteta**

Tehnički fakultet Bihać

Ul. Irfana Ljubijankića bb Bihać

emine\_hozdic@yahoo.com