

## Veštačka inteligencija u konceptijskom projektovanju inteligentnih tehnoloških sistema – pregled stanja u oblasti istraživanja

MILICA M. PETROVIĆ, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

Pregledni rad

ZORAN Đ. MILJKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

UDC: 007.52:658.5

BOJAN R. BABIĆ, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

*Inteligentni tehnološki sistemi (ITS) predstavljaju najvišu klasu fleksibilnih tehnoloških sistema, koji su zahvaljujući tehnikama veštačke inteligencije u mogućnosti da se prilagode promenama u zahtevima tržišta. U ovom radu je dat detaljan pregled stanja u oblasti istraživanja ITS-a, sa posebnim osvrtom na sledeće funkcije: (i) planiranje i optimizacija tehnoloških procesa, (ii) terminiranje i optimizacija tehnoloških procesa, (iii) integrisano planiranje tehnoloških procesa i terminiranje proizvodnje i (iv) terminiranje transportnih sredstava u unutrašnjem transportu materijala. Istraživanja predstavljena u ovom radu pokazuju da se poboljšanje performansi ITS-a ostvaruje primenom biološki inspirisanih tehnika veštačke inteligencije (neuronske mreže, genetički algoritmi, inteligencija mravljih kolonija i inteligencija roja), kao i metaheurističkim algoritmima (metodi simuliranog kaljenja i tabu pretrage).*

**Ključne reči:** *inteligentni tehnološki sistemi, konceptijsko projektovanje, veštačka inteligencija, planiranje proizvodnje, terminiranje proizvodnje, optimizacija, mobilni robot, pregled stanja*

### 1. UVOD

Inteligentni tehnološki sistem - ITS (engl. Intelligent Manufacturing System) je najviša klasa fleksibilnih tehnoloških sistema koja je ostvarila sinergiju veštačke inteligencije i kompjuterski integrisanih tehnologija, sa ciljem da sistem ima mogućnost realizacije aktivnosti u neodređenom tehnološkom okruženju, uz permanentan porast verovatnoće uspešnog ponašanja. U inicijalnoj fazi projektovanja ITS-a (faza konceptijskog projektovanja) najzastupljenije su metodologije bazirane na aksiomatskoj teoriji projektovanja (engl. axiomatic design theory) [1], teoriji inventivnog rešavanja problema TRIZ (engl. theory of inventive problem solving) [2] i biološki inspirisanim tehnikama veštačke inteligencije [3], [4], [5], [6], [7].

Kada je reč o konceptijskom projektovanju ITS-a, bilo da je reč o sistemu za obradu rezanjem, ili o sistemu gde se delovi dobijaju obradom plastičnim deformisanjem, prema [8], treba voditi računa o sledećim funkcijama:

- projektovanje (engl. design) obuhvata projektovanje dispozicionog plana tehnološkog sistema (engl. layout-a), projektovanje grupne tehnologije, projektovanje tehnologije montaže, itd.;
- planiranje (engl. planning) podrazumeva sledeće klase problema: planiranje tehnoloških procesa (engl. process planning), određivanje redosleda operacija (engl. operation sequencing), planiranje proizvodnje, uravnoteženje tehnoloških linija za montažu;
- proizvodnja (engl. manufacturing) ima svoje dve kategorije: terminiranje (engl. scheduling) i rutiranje (engl. routing) sa sledećim podkategorijama: mašinska obrada, montaža, rukovanje i transport materijala i druge proizvodne funkcije;
- distribucija materijala (engl. distribution) tj. projektovanje unutrašnjeg transporta materijala podrazumeva proces projektovanja disitributivnog sistema, planiranje logistike sistema, planiranje transporta materijala, planiranje transportnih tokova materijala, određivanje putanje i terminiranje transportnih sredstava (AGV kolica (engl. Automated Guided Vehicle), ili mobilni robot, itd.).

Projektovanje optimalnih tehnoloških procesa, optimalno terminiranje proizvodnje i terminiranje transportnih sredstava u okviru inteligentnog tehnološkog sistema su neke od ključnih funkcija neophodnih

---

Adresa autora: Milica Petrović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16

Rad primljen: 22.05.2013.

Rad prihvaćen: 27.05.2013.

za gradnju ITS-a. Iako su, tradicionalno, ove funkcije razmatrane dekoplovano, tj. za svaku od funkcija su razvijani nezavisni modeli, brojna istraživanja u ovoj oblasti pokazuju da integrisano projektovanje pomenutih funkcija najviše doprinosi poboljšanju performansi ITS-a. Integrisane funkcije stvaraju jedinstveni prostor rešenja problema planiranja i terminiranja, iako je obično takav prostor složeniji od prostora rešenja svake od funkcija pojedinačno, i obezbeđuju brže prilagodavanje promenljivim zahtevima tržišta, smanjenje proizvodnih troškova, povećanje efektivnosti proizvodnih sistema, kao i bolje iskorišćenje proizvodnih resursa.

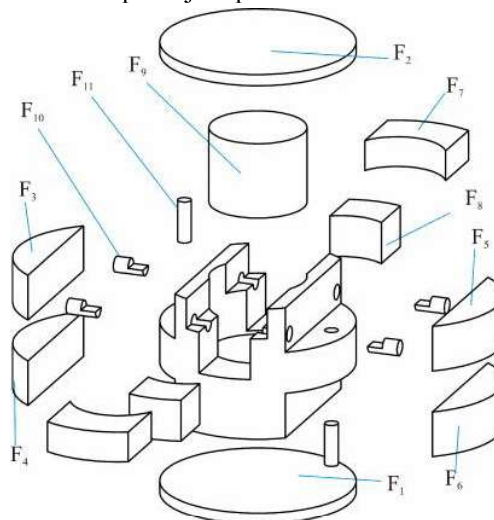
Predmet razmatranja u ovom radu predstavlja pregled stanja u oblasti istraživanja ITS-a sa fokusom na sledeće funkcije: planiranje i optimizacija tehnoloških procesa (predstavljeno u poglavlju 2), optimalno terminiranje proizvodnje (prikazano u poglavlju 3), integrisano planiranje tehnoloških procesa i terminiranje proizvodnje (dato u poglavlju 4), kao i terminiranje transportnih sredstava pri izvršavanju zadataka unutrašnjeg transporta materijala (poglavlje 5). U poslednjem poglavlju rada (poglavlje 6) dat je zaključak.

## 2. PLANIRANJE I OPTIMIZACIJA TEHNOLOŠKIH PROCESA

Projektovanje tehnoloških procesa – CAPP (engl. Computer Added Process Planning) je nastalo krajem devedesetih godina 20. veka sa ciljem da spoji i integriše Kompjuterski podržano projektovanje CAD (engl. Computer – Aided Design) i Kompjuterski podržanu proizvodnju – CAM (engl. Computer – Aided Manufacturing). Ovaj sistem ima za cilj da sistemski odredi detaljne metode kojima se delovi ili sklopovi (u slučaju montaže) mogu proizvesti ekonomično i konkurentno, od inicijalne faze (radionički crtež gotovog dela), preko međufaza (sirov materijal, pripremak, obradak), do završne faze (željeni oblik gotovog dela). Ulazi za projektovanje tehnološkog procesa su projektni podaci, podaci o sirovom materijalu, podaci o obradnom sistemu (podaci o mašini alatki, alatima, steznim priborima), podaci o zahtevima kvaliteta i podaci o tipu proizvodnje (pojedinačna, maloserijska, velikoserijska, masovna). Izlaz iz projektovanja tehnološkog procesa je tehnološki postupak, kojim se definiše redosled odvijanja svih aktivnosti (operacija) potrebnih da se od polaznog materijala (sirovine ili polufabrikata) oblikuje gotov deo (proizvod). Ključni cilj (engl. objective) procesa planiranja proizvodnje je pronalaženje optimalnog tehnološkog procesa za mašinsku obradu dela, koji zadovoljava zahteve kupca, uz minimalnu cenu proizvoda.

Formulacija problema projektovanja tehnoloških procesa za izabran deo 1 iz literature [9] prikazana je

na slici 1. Izradak se identifikuje preko 11 tipskih tehnoloških formi (engl. feature), a zatim dobija od priprema cilindričnog oblika uklanjanjem zapremina mašinskom obradom, koristeći pristup zasnovan na metodi dekompozicije zapremina.



Slika 1 – Deo 1 sa 11 tehnoloških formi ( $F_1$ - $F_{11}$ )

Predstavljanje tehnoloških procesa obrade dela se, radi lakšeg kodiranja pri optimizaciji, može izvršiti korišćenjem neke od sledećih metoda: predstavljanje tabelama, predstavljanje pomoću grafova, predstavljanje mrežama, itd. Odgovarajući tehnološki proces, zasnovan na metodi dekompozicije zapremina, za deo 1 prikazan je u tabeli 1, gde su za svaku tehnološku formu dati broj i tip operacije (na primer glodanje, bušenje itd.), alternativne mašine za svaku operaciju, vremena trajanja svake operacije, kao i ograničenja vezana za prethodjenje svake od operacija. Metod predstavljanja tehnološkog procesa putem grafova za deo 1 prikazan je na slici 2, a za primer predstavljanja putem mreža sa karakterističnim čvorovima za deo 2 [10] prikazan je na slici 3.

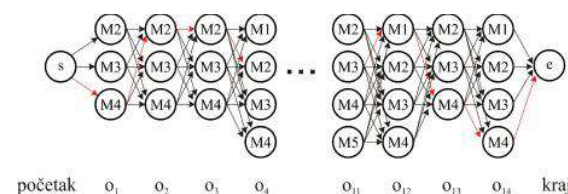
Optimizacija tehnoloških procesa podrazumeva pronalaženje optimalnog ili približno optimalnog redosleda tehnoloških operacija uzimajući u obzir i alternativna rešenja. Kako ovaj problem pripada klasi nedeterminističkih polinomnih problema tzv. NP-hard optimizacionih problema (engl. non deterministic polynomial optimization problems), to se vreme potrebno za njegovo rešavanje eksponencijalno povećava sa povećanjem dimenzije problema, tj. povećanjem broja delova, mašina i operacija. Konvencionalne neheurističke metode nisu u stanju da efikasno reše ovaj tip problema pa zato ovakvi problemi „traže“ algoritme bazirane na heurističkim metodama.

Heuristički algoritmi mogu da se podele na konstruktivne, koji daju neko povoljno početno rešenje i metaheurističke, kojima se iterativnim postupcima

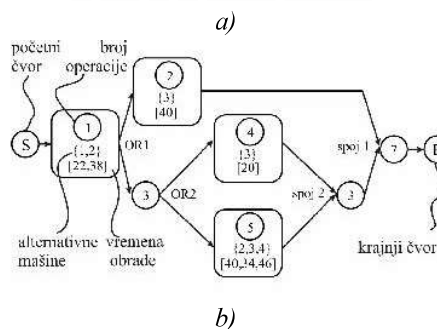
poboljšava početno rešenje. Poznate heurističke metode poboljšanja, kao što su genetički algoritmi GA (engl. Genetic Algorithms), genetičko programiranje GP (engl. Genetic Programming), simulirano kaljenje SA (engl. Simulated Annealing), tabu pretrage TS (engl. Tabu Search), metode inteligencije kolonija, kao što su optimizacija primenom sistema mravljih kolonija ACO (engl. Ant Colony Optimization), ili optimizacija primenom teorije (inteligencije) roja PSO (engl. Particle Swarm Optimization) i drugi hibridni algoritmi, mogu da se primene i na rešavanje problema optimizacije tehnoloških procesa.

Tabela 1. Fleksibilni tehnološki proces za odabrani deo 1 [9]

Tehno-Loška forma	Operacije	Alternativne mašine	Vremena obrade	Ograničenja
F <sub>1</sub>	O <sub>1</sub> (glodanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	20, 20, 15	o <sub>1</sub> je prva operacija
F <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> (glodanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	20, 20, 15	o <sub>2</sub> je pre o <sub>3</sub> -o <sub>14</sub>
F <sub>3</sub>	O <sub>3</sub> (glodanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	15, 15, 11.25	o <sub>3</sub> je pre o <sub>12</sub> -o <sub>14</sub>
F <sub>4</sub>	O <sub>4</sub> (glodanje)	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	15, 15, 11.25, 18	o <sub>4</sub> je pre o <sub>12</sub> -o <sub>14</sub>
F <sub>5</sub>	O <sub>5</sub> (glodanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	15, 15, 11.25	o <sub>5</sub> je pre o <sub>12</sub> -o <sub>14</sub>
F <sub>6</sub>	O <sub>6</sub> (glodanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	15, 15, 11.25	o <sub>6</sub> je pre o <sub>12</sub> -o <sub>14</sub>
F <sub>7</sub>	O <sub>7</sub> (glodanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	15, 15, 11.25	o <sub>7</sub> je pre o <sub>8</sub>
F <sub>8</sub>	O <sub>8</sub> (glodanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	15, 15, 11.25	
F <sub>9</sub>	O <sub>9</sub> (bušenje)	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	25, 25, 18.75	o <sub>9</sub> pre o <sub>7</sub> , o <sub>8</sub> , o <sub>10</sub>
	O <sub>10</sub> (razvrtanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	30, 25, 25, 18.75	o <sub>10</sub> pre o <sub>7</sub> , o <sub>8</sub> , o <sub>11</sub>
	O <sub>11</sub> (proširivanje)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub> , M <sub>5</sub>	20, 20, 15	o <sub>11</sub> pre o <sub>7</sub> , o <sub>8</sub>
F <sub>10</sub>	O <sub>12</sub> (glodanje)	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	20, 20, 15, 24	o <sub>12</sub> pre o <sub>13</sub>
	O <sub>13</sub> (urez. navoja)	M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	9.6, 8, 8, 6	
F <sub>11</sub>	O <sub>14</sub> (bušenje)	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub>	6, 5, 5, 3.75	



Slika 2 - Primer dekodiranja tehnoloških procesa izrade izabranog dela 1 na alternativnim mašinama M<sub>1</sub>-M<sub>5</sub>



Slika 3 – a) deo 2; b): primer mreže alternativnih tehnoloških procesa izrade izabranog dela 2 [10]

U radu [11] je predstavljena primena GA kao strategije globalnog pretraživanja za brzu identifikaciju optimalnih ili približno optimalnih redosleda operacija tehnoloških procesa u dinamičkom okruženju. Kriterijum za odabir optimalnog redosleda operacija je minimalna cena proizvodnje, a za određivanje funkcije cilja koristi se matrica troškova formirana za svaki par tehnoloških formi koje se dobijaju tehnološkim operacijama. Generisanje rešenja mogućih redosleda operacija se obavlja, na analogan način kao i poznati optimizacioni problem trgovačkog putnika (engl. Traveling Salesman Problem) iz domena teorije grafova, kombinacijom različitih izbora iz seta alternativnih mašina, alata, pribora za datu operaciju, kao i ograničenja u pogledu zahtevanih tolerancija, redosleda obrade, pogodnosti obrade. Na osnovu ovih ograničenja, redosled mogućih operacija se grafički predstavlja grafom, a moguć tj. regularan redosled je onaj koji ne narušava nijedno od zadatih ograničenja.

Korišćenje GA za određivanje redosleda operacija prizmatičnih delova predstavljeno je radu [12]. Četiri tipa pravila su predložena za računanje funkcije cilja za alternativne tehnološke operacije: (1) pravila o redosledu (pravila za definisanje primarnih i sekundarnih površina, pri čemu primarne površine imaju prioritet pri obradi); (2) pravila grupisanja (engl. clustering) operacija tako da se deo dobije uz minimalan broj pozicioniranja i stezanja obratka, kao i minimalan broj izmena alata; (3) pravilo za raspoređivanje termičkih obrada, kontrola i specijalnih operacija; (4) pravilo o formiranju kriterijuma za određivanje fun-

kcije cilja (u ovom radu su korišćeni troškovi obrade i proizvodno vreme). Prednost GA se ogleda u mogućnosti pronalaženja optimalnog rešenja redosleda operacija primenom strategije globalnog pretraživanja bazirane na nizu bioloških operacija, kao što su kodiranje gena, reprodukcija, selekcija, ukrštanje i mutacija. Predloženi algoritam se pokazao efikasnim pri određivanju optimalnog redosleda operacija prizmatičnih delova, uzimajući pri tome u obzir inkorporaciju za različita proizvodna okruženja.

Prizmatični delovi se mogu identifikovati preko određenog broja tehnoloških formi, a svaka od formi se, prema radu [13], dobija različitim rasporedom mašina. Ključni doprinos ovog rada ogleda se u sinteznom pristupu (sinteza podrazumeva selekciju rasporeda mašina i optimizaciju redosleda) za dobijanje optimalnih ili približno optimalnih tehnoloških procesa na osnovu različitih kombinatornih šema za dobijanje tehnoloških formi. Selekcija mašina, iz seta alternativnih mašina, obavlja se na osnovu pravila fazi logike (engl. fuzzy logic) i neuronskih mreža NN (engl. Neural Networks), pri čemu se na osnovu tzv. membership funkcija i veličine serije bira mašina iz seta alternativnih za datu operaciju. Dva su pristupa za selektovanje mašina: (1) rulet (engl. roulette wheel selection) bira rasporede mašina za svaku operaciju na osnovu membership funkcije i (2) pristup maksimalne vrednosti membership (engl. highest membership approach) gde se selektuju šeme sa najvećom vrednosti membership funkcije. Na osnovu vrednosti membership-a za svaku od operacija dobija se membership za celokupno posmatran raspored mašina.

Projektovanje tehnoloških procesa primenom GA je u radu [14] izvršeno u dve faze, primarnoj i sekundarnoj. Prva faza je faza preliminarnog projektovanja, gde se veliki prostor inicijalnih kombinatornih rešenja redosleda operacija generiše pomoću GA na bazi različitih ograničenja u pogledu redosleda i pravila grupisanja. Redukovan broj dobijenih rezultata iz prve faze se koristi u drugoj fazi detaljnog planiranja gde se, takođe korišćenjem GA, generiše optimalan redosled operacija kao i odabir optimalnih mašina alatki, alata i pribora. Kriterijum za optimizaciju je minimalana cena proizvodnje, koja se dobija na osnovu cene promene mašine, cene promene pribora i cene promene podešavanja.

Novi evolucionni algoritam za optimizaciju fleksibilnih tehnoloških procesa zasnovan na GP prikazan je u radu [15]. Za opisivanje fleksibilnosti tehnoloških procesa najpre je usvojena reprezentacija putem mreža tehnoloških procesa, a zatim se u cilju zadovoljavanja forme GP mreža transformiše u „drvo“. Algoritam je testiran na nekoliko primera, a rezultati upoređeni sa rezultatima dobijenim pomoću GA po-

kazuju da se optimalna ili približno optimalna rešenja dobijaju za kraće vreme nego što je slučaj sa GA.

U referenci [16] prikazan je algoritam baziran na metodi simuliranog kaljenja SA, koji se koristi za generisanje optimalnih i/ili približno optimalnih tehnoloških procesa, istovremeno razmatrajući redosled operacija i odabir alternativnih mašina alatki, alternativnih alata i alternativnih pribora. Uzimajući u obzir različite alternative i postavljena tehnološka ograničenja, algoritam najpre generiše čitav prostor mogućih rešenja, a zatim na osnovu određenog kriterijuma (ukupna cena koja se dobija na osnovu cene mašine alatke, cene alata, cena promene mašine alatke, cena promene alata i cena postavljanja) bira optimalni tehnološki proces. Eksperimentalni rezultati, prikazani u radu, su pokazali da je, u poređenju sa genetičkim algoritmima, SA algoritam efikasniji i da za kraće vreme generiše optimalne i/ili približno optimalne tehnološke procese.

U radu [17] takođe je predstavljen pristup baziran na metodi simuliranog kaljenja SA. Funkcija cilja pri optimizaciji redosleda operacija tehnoloških procesa se dobija korišćenjem matrice troškova (engl. the precedence cost matrix) i matrice „nagrada-kazna“ (engl. reward-penalty matrix). Za svaki par tehnoloških formi koje se dobijaju određenim operacijama, na osnovu prioriteta izrade i različite vrednosti cena (cena promene mašine alatke, cena promene alata, cena promene podešavanja), generisana je matrica troškova. Robustnost i efikasnost predloženog algoritma testirana je kroz nekoliko studija na referentnim „benchmark“ primerima, a rezultati su pokazali da je u pogledu robustnosti, konvergencije, izbegavanja lokalnog minimuma i brzine rada algoritma SA superiorniji u poređenju sa GA i ACO algoritmima.

Hibridni GA-SA algoritam opisan je u radovima [18] i [19]. U prvoj fazi hibridnog algoritma [18], GA strategijom globalne pretrage generiše nekoliko povoljnih inicijalnih rešenja tehnoloških procesa, dok se dalje u drugoj fazi, za nekoliko odabranih tehnoloških procesa korišćenjem Hamming-ovih rastojanja i strategijom lokalne pretrage SA algoritma, dobijaju optimalna i/ili približno optimalna rešenja tehnoloških procesa za prizmatične delove. Na taj način se sinergijom pomenutih algoritama u hibridni algoritam, koji zapravo ima snagu i lokalne i globalne pretrage, dobija uspešna i efektivna globalna optimizacija. Kriterijum optimizacije je, kao i u radu [19], kombinovana snaga sledećih cena (cena promene mašine alatke, cena promene alata, cena promene pozicioniranja). U poređenju sa rešenjima dobijenim samostalnim GA i SA algoritmima, hibridni algoritam je pokazao bolje performanse i u pogledu kvaliteta rešenja i u pogledu efikasnosti.



U cilju postizanja globalno optimalnih rešenja, procesi kao što su odabir resursa, određivanje planova postavljanja i određivanje redosleda operacija dela se moraju posmatrati simultano [20]. U ovom radu se razmatra TS tehnika pretraživanja za generisanje optimalnih rešenja tehnoloških procesa kod prizmatičnih delova. Ovim algoritmom se, korišćenjem tzv. „memorijskih struktura“, obezbeđuje izbegavanje lokalnog minimuma pri procesu pretraživanja, tako što se rešenja za koja su „prekršena pravila i ograničenja“, zabranjuju (engl. taboo) i algoritam ih više ne uzima u razmatranje. Šest kriterijuma korišćenih za sprovođenje optimizacije su cena korišćenja mašine alatke, cena korišćenja pribora, promena mašine alatke, promena alata, promena podešavanja i broj prekršenih ograničenja kao kaznena funkcija. Ovakvim pristupom se uzima u obzir i dinamika okruženja u kojima postoje alternative za mašine alatke i alate, kao i kvar mašina alatki i pribora.

Metaheuristika zasnovana na mravljim kolonijama ACO pokazala se kao efikasna tehnika za globalnu pretragu i brzu identifikaciju optimalnog redosleda operacija, uzimajući u obzir zadata ograničenja, data je u radovima [21] i [22]. Ta ograničenja su prikazana tzv. Grafom prethođenja (engl. operation precedence graph). Kao i u literaturi [17], matrica cena (engl. precedence matrix) je formirana za svaki par tehnoloških formi. Alternativne sekvence se biraju na osnovu ukupne cene koju čine cene promene parametara obrade, alata, podešavanja, mašine alatke.

Moderan modifikovan evolucioni algoritam PSO je takođe korišćen za rešavanje kombinatorno optimizacionog problema određivanja redosleda tehnoloških procesa, što je predstavljeno u radovima [23] i [24]. Autori rada [23] su pokazali da se efikasnost algoritma može povećati modifikacijom tradicionalnog PSO algoritma uvođenjem operatora mutacije, ukrštanja i premeštanja, koji doprinose boljim rezultatima u odnosu na tradicionalne PSO algoritme. Formiranje i kodiranje tehnoloških procesa u čestice PSO algoritma odvija se u inicijalnoj fazi algoritma. U cilju verifikacije performansi i efikasnosti predloženog algoritma, korišćena su tri prizmatična dela, a dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim GA i SA algoritmom. Zaključeno je da PSO i SA, za razliku od GA, daju bolje rezultate u srednjoj i završnoj fazi optimizacije, pri čemu je PSO robustniji od SA algoritma. Takođe, zaključeno je da GA konvergira nakon manjeg broja iteracija, dok PSO i SA daju još bolja rešenja. U radu [24] su predloženi novi način kodiranja i dekodiranja, novi metod slučajne pretrage baziran na operatoru mutacije, kao i novi način ažuriranja položaja čestica u cilju izbegavanja „zarobljavanja“ u lokalnom minimumu. Izbegavanje se ostvaruje korišćenjem „tabu“ memorijske popula-

cije, gde se čuvaju dobra rešenja, kao i korišćenjem operatora ukrštanja. Poređenje sa GA i SA algoritmi- ma je izvršeno za sedam primera, pri čemu je PSO pokazao bolje performanse u pogledu najboljeg rezultata rešenja, srednjeg najboljeg rešenja i srednje konvergencije generacije.

Hibridni PSO algoritam, koji uključuje i strategiju lokalne pretrage u rešavanju NP kombinatornog optimizacionog problema planiranja tehnoloških procesa, prikazan je u radu [25]. Dva koraka u rešavanju problema su sledeća: (1) reprezentacija (predstavljaj- nje rešenja); imajući na umu da je originalan PSO projektovan za rešavanje kontinualnih optimizacionih problema, treba rešiti implementaciju ovog algoritma na razmatrani diskretni optimizacioni problem i (2) PSO je poznat kao dobar algoritam za globalnu pre- tragu, a „mana“ mu je loša lokalna pretraga; u cilju prevazilaženja ovog ograničenja u algoritam je uklju- čena i lokalna pretraga. Matrica prioriteta (engl. pre- cedence matrix) je korišćena za generisanje mogućih rešenja, a za najbolje rešenje se bira ono sa minimal- nom cenom proizvodnje.

Neki od razvijenih hibridnih algoritama za reša- vanje problema su [26], [27], [28], [29] i [30]. Hop- field-ove mreže zajedno sa GA predloženi su u radu [26]. Hibridni pristup koji podrazumeva inkorporaciju GA, NN i analitički hijerarhijski proces koristi se kao strategija za globalnu optimizaciju baziranu na više- kriterijumskim funkcijama cilja [27]. Dalje, doprinos rada [28] se ogleda u simultanom korišćenju strategije inteligentnog pretraživanja za generisanje inicijalnih sekvenci u preliminarnoj fazi projektovanja i GA za optimalan odabir alternativnih mašina alatki. U radu [29], hibridni pristup baziran na teoriji grafova i GA predložen je za rešavanje problema optimizacije teh- noloških procesa za cilindrične delove, istovremeno uzimajući u obzir proizvodne resurse, redosled ope- racija i planove podešavanja. Hibridni GA-SA algo- ritam prikazan je u radu [30].

### 3. TERMINIRANJE I OPTIMIZACIJA TEHNOLOŠKIH PROCESA

Terminiranje predstavlja proces „dodeljivanja“ operacija za svaki od delova odgovarajućoj mašini alatki, uz istovremeno vremensko raspoređivanje. Cilj ovog procesa je određivanje redosleda operacija de- lova na odgovarajućim mašinama, minimizujući pri tome određene performanse (srednje vreme provede- no u sistemu, proizvodno vreme, poštovanje rokova), koje utiču na zadovoljstvo kupca. Problem termina- nja se može klasifikovati u više kategorija na osnovu sledeća četiri parametra:

- modeli za dolazak delova u tehnološki sistem,
- broj mašina alatki u tehnološkom sistemu,

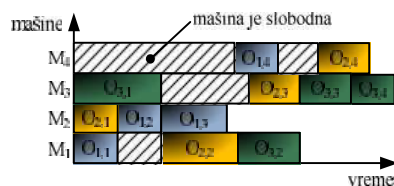
- tok materijala u tehnološkom sistemu,
- kriterijumi na osnovu kojih se terminiranje vrši.

Istraživanja u oblasti terminiranja su primarno bila fokusirana na pronalaženje efikasnih algoritama koji su imali za cilj da reše različite tipove terminiranja i generišu optimalne planove terminiranja za različite konfiguracije proizvodnih resursa:

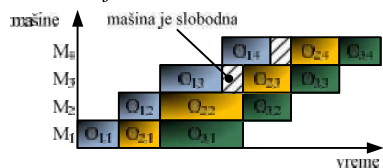
- terminiranje jedne mašine alatke (engl. single machines scheduling);
- paralelno terminiranje više mašina alatki (engl. parallel machines scheduling).
- terminiranje se vrši tako da se delovi kroz tehnološki sistem kreću shodno izabranom alternativnom tehnološkom procesu, pri čemu jedan deo može više puta posetiti istu mašinu alatku (engl. job-shop scheduling), slika 4;
- terminiranje operacija za delove koji svaku od mašina alatki mogu da posete samo jednom (engl. flow shop scheduling), slika 5;

Od prethodno navedena četiri tipa terminiranja, u literaturi je najzastupljeniji job-shop tip terminiranja. Ovaj tip terminiranja se može definisati na sledeći način: dato je  $n$  delova koji se obrađuju na  $m$  mašina alatki, uz definisana tehnološka ograničenja za operacije svakog od delova; potrebno je odrediti redosled obrade tj. redosled izvršavanja operacija datih delova na datim mašinama, tako da su zadovoljena tehnološka ograničenja, a dobijene sekvence optimalne prema zadatim kriterijumima performansi.

Kao i optimizacija tehnoloških procesa i optimalno terminiranje proizvodnje za odabrane tehnološke procese pripada grupi problema koji se nazivaju nedeterministički polinomni problemi ili tzv. NP-hard optimizacioni problemi. Iz razloga što problem terminiranja predstavlja jedan od najtežih kombinatorno optimizacionih problema, razvoj heurističkih algoritama koji efikasno rešavaju ovaj problem (na primer problem  $10 \times 10$  podrazumeva obradu 10 delova na 10 mašina alatki) već godinama predstavlja izazov u ovoj oblasti istraživanja.



Slika 4 – Primer Gantt-ove mape za job-shop tip terminiranja



Slika 5 – Primer Gantt-ove mape za flow shop tip terminiranja

Tabela 2. Primer terminiranja potpuno fleksibilnog  $3 \times 5$  (za 3 dela na 5 mašina alatki) job-shop problema sa 9 operacija

Deo	Operacije	Mašine alatke				
		$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$
1	$o_{1,1}$	3	2	3	4	1
	$o_{2,1}$	1	3	4	1	5
	$o_{3,1}$	3	8	2	1	6
2	$o_{1,2}$	2	5	4	7	8
	$o_{2,2}$	5	6	9	8	5
	$o_{3,2}$	5	1	2	1	2
3	$o_{1,3}$	2	5	4	2	4
	$o_{2,3}$	1	3	2	6	1
	$o_{3,3}$	9	8	6	7	2

Tabela 3. Primer terminiranja delimično fleksibilnog  $3 \times 5$  (za 3 dela na 5 mašina alatki) job-shop problema sa 9 operacija

Deo	Operacije	Mašine alatke				
		$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$
1	$o_{1,1}$	3	-	5	-	2
	$o_{2,1}$	-	3	4	-	5
	$o_{3,1}$	5	8	-	1	-
2	$o_{1,2}$	-	3	6	2	5
	$o_{2,2}$	1	7	-	3	-
	$o_{3,2}$	-	4	3	1	5
3	$o_{1,3}$	2	-	4	-	1
	$o_{2,3}$	1	3	2	4	5
	$o_{3,3}$	-	3	-	-	4

Za razliku od planiranja tehnoloških procesa, terminiranje je mnogo više povezano sa trenutnim stanjem u proizvodnom pogonu. Fiksni tehnološki procesi često obezbeđuju rasporede terminiranja koji dovedu do neuravnoteženog korišćenja resursa, stvaranja uskih grla u proizvodnom procesu i smanjenja performansi vremena isporuke. Iz tog razloga je često neophodno originalni tehnološki proces modifikovati da bi se prilagodio novonastalim promenama u proizvodnom pogonu.

Potpuno fleksibilni job-shop problemi (tabela 2), kao posebna kategorija job-shop problema terminiranja (tabela 3), imaju svoje dve kategorije: problem rutiranja, gde se određuje redosled operacija na mašinama i problem terminiranja, gde se određuje vreme početka svake od operacija.

Kao i job-shop terminiranje, fleksibilno job-shop terminiranje pripada klasi NP optimizacionih problema, pri čemu se za optimizaciju koriste sledeća ograničenja:

- sve mašine alatke su dostupne u početnom, nul-tom trenutku ( $t_0=0$ );
- na svakoj mašini alatki može da se vrši operacija samo jednog dela u jednom trenutku tj. nijedna mašina ne može da obrađuje više od jednog dela istovremeno;
- da bi se operacija izvršila, neophodno je da se odabere jedna mašina alatka iz seta alternativnih mašina za tu operaciju;
- operacije se ne mogu prekidati dok se ne završe;
- sva pripremna vremena pomoćnih procesa su uključena u vremena obrade;
- operacije jednog dela se ne mogu obavljati simultano (istovremeno) na više od jedne mašine (dok se ne završi operacija  $o_{ij}$ , ne može početi operacija  $o_{ij+1}$   $i$ -tog dela).

Metod za terminiranje proizvodnje u dinamičkim uslovima proizvodnje primenom principa samoorganizacije (engl. self-organization) razmatran je u radu [31]. Samoorganizacija u proizvodnji u domenu terminiranja se ogleda u sledećim doprinosima: (1) samoorganizacija u projektovanju dispozicionog plana (engl. layout) gde su tehnološke jedinice i transporter pokretni i raspoređuju se tako da minimizuju transportne tokove materijala tj. minimizuju rastojanja predviđena za transport, (2) dinamičko terminiranje podrazumeva izmenu plana terminiranja preusmeravanjem tokova materijala ukoliko dođe do otkaza mašine alatke ili transportera, (3) prilagođavanje proizvodnim zahtevima u smislu reorganizacije proizvodnih linija, povećanje ili smanjenje tehnoloških jedinica i transportnih sredstava i modifikacijom njihovih kapaciteta, (4) prilagođavanje obradnih sistema u skladu sa zahtevima za promenu delova i (5) mehanizam adaptivno-višeslojnih mreža za organizaciju kompleksnih sistema. Autori su se u radu osvrnuli i na prednosti dinamičkog terminiranja u odnosu na optimalno terminiranje sa aspekta obezbeđivanja „real time“ planova proizvodnje u najčešće turbulentnim dimaničkim proizvodnim okruženjima.

U radu [32] je prikazana primena GA za rešavanje fleksibilnog job-shop problema terminiranja integracijom različitih strategija za selekciju jedinki, reprodukciju jedinki, reprodukciju novih jedinki, kao i procedura za generisanje inicijalne populacije. Integracijom pomenutih strategija ostvaruju se bolji rezultati nego rezultati dobijeni primenom TS algoritma.

Efikasan GA algoritam za rešavanje fleksibilnog job-shop problema terminiranja minimizujući makespan predložen je u radu [33]. Globalna i lokalna selekcija su primenjene da generišu kvalitetnu inicijalnu populaciju u početnoj fazi terminiranja. Takođe, primenjena je unapređena šema predstavljanja hromozoma, uz korišćenje operatora ukrštanja i mutacije.

Za razliku od prethodnih istraživanja gde se pri optimizaciji PSO algoritmom razmatra samo jedan kriterijum, u radu [34] se koristi PSO algoritam za višekriterijumsku optimizaciju job-shop planova terminiranja. Pošto je ovaj problem diskretne prirode, autori su predložili modifikaciju PSO algoritma u pogledu predstavljanja pozicije čestica, kretanja čestica i brzinu kretanja čestica. Makespan, ukupno kašnjenje i ukupno slobodno vreme su kriterijumi korišćeni za minimizaciju. Prednost ovog algoritma u poređenju sa ostalim algoritmima za terminiranje ogleda se u jednostavnoj strukturi, lakoj implementaciji, kratkom vremenu pretraživanja i robustnosti algoritma.

U radu [35] je predloženo softversko rešenje zasnovano na ACO metodologiji za terminiranje tehnoloških procesa u job-shop okruženjima. Uzeta su u obzir fleksibilnost rutiranja, podešavanja na mašini alatki koja zavise od prethodne operacije na toj mašini i vreme transporta. Cilj optimizacije je bio minimizacija makespan-a.

Hibridni algoritmi za rešavanje problema terminiranja su prikazani u radovima [36], [37] i [38]. U radu [36] je GA kombinovan sa iterativnom globalnom pretragom koja koristi najduže putanje modela disjunktivnih grafova. Takođe, pokazano je da efektivnost algoritma ne zavisi od načina na koji su kodirani hromozomi, kao što je bio slučaj u prethodnim istraživanjima. Hibrid ACO-TS predstavljen je u radu [37], a hibrid PSO-SA u radu [38].

#### 4. INTEGRISANO PLANIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA I TERMINIRANJE PROIZVODNJE

Tokom poslednjih godina, integracija proizvodnih funkcija kao što su planiranje i terminiranje proizvodnje privlači sve veću pažnju istraživača. Iako su ove oblasti tradicionalno najčešće razmatrane i istraživane nezavisno, što je obezbeđivalo dekoplovane modele za rešavanje optimizacije ovih funkcija, zahtevi za smanjenjem proizvodnih troškova, povećanjem efektivnosti proizvodnih sistema, kao i boljim iskorišćenjem proizvodnih resursa dovode do formiranja integrisanih modela za ove funkcije. Prema podeli datoj u radu [39], postoje dva tipa modela sa aspekta načina integracije:

- međusobno povezani modeli (engl. interrelated models) - modeli za samo jednu proizvodnu funkciju, uzimajući u obzir drugu komponentu kao ograničenje, kao i ograničenja vezana za druge funkcije;
- integrisani modeli (engl. integrated models) gde se modeliranje dve ili više proizvodnih funkcija vrši simultano.

Poznato je da nezavisni modeli za proizvodne funkcije mogu obezbediti optimalne performanse na ni-

vou tih specifičnih funkcija, iako zasebna optimalna rešenja ne moraju da znače i optimalan rad celog inteligentnog tehnološkog sistema. Nezavisno modeliranje i optimizacija pomenutih funkcija takođe može dovesti i do konflikta između funkcija. Iz tog razloga, globalni optimum i sprečavanje konflikta se može postići integracijom različitih proizvodnih funkcija. Za razliku od konvencionalnog pristupa gde se za terminiranje koriste fiksni tehnološki procesi, korišćenjem alternativnih tehnoloških procesa (jedna operacija se može izvoditi na različitim alternativnim mašinama) se obezbeđuje generisanje optimalnih planova terminiranja.

Problem integracije se može definisati na sledeći način: za svaki od  $n$  delova, koji se dobijaju alternativnim tehnološkim procesima obrade na  $m$  mašina alatki, uz poštovanje zadatih tehnoloških ograničenja, potrebno je naći odgovarajuće optimalne ili približno optimalne tehnološke procese izrade delova, kao i redoslede obrade datih delova na datim mašinama, tako da su zadovoljena tehnološka ograničenja, a dobijene sekvence optimalne prema zadatim kriterijumima performansi.

U radovima [40] i [41] je naglašeno i da se kroz ostvarenje karakterističnih ciljeva terminiranja, kao što su:

- minimizacija srednjeg vremena transporta (engl. minimizing the average flow time),
- minimizacija ukupnog vremena potrebnog da se završi obrada svih delova (engl. minimizing the makespan),
- minimizacija srednjeg kašnjenja (engl. minimizing the average tardiness),
- maksimizacija verovatnoće ispunjenja krajnjeg roka proizvodnje (engl. maximizing the probability of meeting the due date),
- maksimizacija iskorišćenja proizvodne opreme (engl. maximizing equipment utilization),

bitno poboljšavaju performanse sistema kada su funkcije planiranja i terminiranja modelirane integrisano.

Najviše objavljenih radova za rešavanje problema integrisanog optimalnog projektovanja tehnoloških procesa i terminiranja proizvodnje IPPS (engl. Integrated process planning and scheduling) u literaturi je bazirano na primeni GA algoritama. Cena obrade i broj škartova razmatrani su u radu [42]. Višekriterijumska optimizacija podrazumeva minimiziranje makespan-a, minimiziranje ukupnog škarta i minimiziranje cene proizvodnje. Pri određivanju alternativnih mašina alatki analizirani su kako vremenski parametri, tako i ograničenja vezana za tolerancije.

U radu [43] se uzimaju u obzir pripremna vremena i veličina serije, kao i detaljna ograničenja pri terminiranju. Integrisani problem je formulisan i mo-

deliran kao mešovito celobrojno nelinearni problem (engl. mixed integer nonlinear problem).

Modifikovan GA pristup za integrisano projektovanje tehnoloških procesa i terminiranje opisan je u literaturi [44]. Najpre se generišu po tri optimalna tehnološka procesa za svaki deo, a onda se ti procesi koriste dalje za terminiranje. Kriterijum optimizacije tehnoloških procesa je minimalno proizvodno vreme, koje uključuje i vreme obrade dela na mašini alatki i vreme transporta dela od mašine do mašine, a kriterijum za optimizaciju planova terminiranja je makespan i uravnoteženo iskorišćenje mašina.

Novi metod za inicijalni odabir tehnoloških procesa, kao i novi način predstavljanja plana terminiranja u kombinaciji sa tehnološkim procesima predstavljen je u referenci [45]. Kriterijumi za optimizaciju su minimizacija makespan-a i minimizacija srednjeg vremena transporta materijala.

Dalje, pristup baziran na metodologiji SA [9] korišćen je za optimizaciju pri integrisanom projektovanju tehnoloških procesa i terminiranju proizvodnje. Tri strategije su predložene za efikasno pretraživanje prostora rešenja: (1) fleksibilnost obrade, koja podrazumeva mogućnost izvršavanja operacija obrade na alternativnim mašinama i korišćenjem alternativnih pribora, (2) fleksibilnost određivanja redosleda operacija podrazumeva mogućnost generisanja različitih redosleda operacija i (3) fleksibilnost terminiranja podrazumeva da se za grupu delova formiraju različiti (alternativni) planovi terminiranja. Algoritam koristi jedan ili više kriterijuma performansi (makespan, uravnotežen nivo iskorišćenja mašina alatki, kašnjenje, cena obrade) u cilju zadovoljenja različitih praktičnih zahteva. U poređenju sa GA i PSO, SA ima sledeće komparativne prednosti: SA za kraće vreme nalazi „dobra“ rešenja, pri čemu treba biti oprezan pri inicijalnom podešavanju parametara. Takođe, SA je okarakterisan kao „oštriji“ pa je iz tog razloga pogodniji za lokalnu pretragu.

Višekriterijumski model mešovito celobrojnog linearnog programiranja u kombinaciji sa SA algoritmom takođe se koristi za rešavanje problema IPPS [46]. Pripremna vremena, kao i vremena transporta delova između mašina alatki su razmatrana u ovom radu kao funkcije cilja.

U radovima [40] i [41], problem IPPS je razmatran kao kombinatorno optimizacioni, a modifikovani PSO algoritam je korišćen u njegovom efikasnom rešavanju. Nekoliko novih operatora (ukrštanje, mutacija i pomeranje) su primenjeni u cilju izbegavanja „zarobljavanja“ rešenja u lokalni optimum. Kriterijumi za optimizaciju su makespan, kašnjenje i nivo uravnoteženog iskorišćenja mašina. U poređenju sa rezultatima dobijenim korišćenjem GA i SA, modifi-

kovani PSO algoritam daje bolje rezultate. Snaga PSO algoritma ogleda se u bržem radu zbog korišćenja matematičkih operacija pri dobijanju novih čestica koje predstavljaju rešenja za razliku od GA i SA algoritama kod kojih se nove jedinice dobijaju promena stringova korišćenjem nekih od pomenutih genetičkih operatora. Ponovno planiranje (engl. replanning) u slučaju kvara mašine alatke ili u slučaju dopreća nove narudžbine detaljno je dato u [41].

Hibridni algoritmi bazirani na multiagentnom sistemu MA (engl. multi agent) korišćeni su za rešavanje problema IPPS u literaturi [47]. Predloženi su lokalni agenti (mašine alatke i delovi) i supervizorski (nadzorni) agent, koji koordinira sve procese i vrši monitoring ponovnog terminiranja (engl. rescheduling). Lokalni i nadzorni agent komuniciraju preko „on-line“ hibridnog protokola. Pristup reterminiranja (engl. rescheduling) je predviđen da reši dva tipa „poremećaja“: kvar mašine alatke i dolazak novog dela u sistem.

Pristup baziran na agentima predložen u radu [48] olakšava optimizaciju i integraciju problema IPPS. Razvijenu MA arhitekturu čine tri agenta, agent za delove (predstavlja sve delove koji se obrađuju u sistemu), agent za mašine alatke (predstavlja mašine) i agent za optimizaciju (vrši optimizaciju primenom GA).

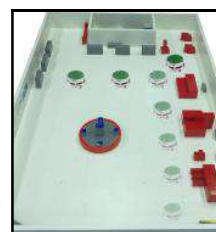
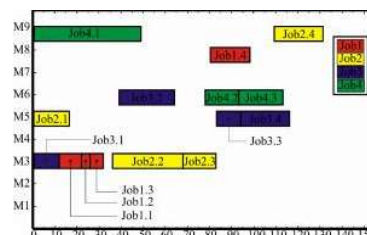
U radu [49] se opisuje metod sinteze (engl. emergent syntesis) za simultano IPPS. U predloženoj metodi svaka mašina alatka je tzv. „learning unit“ zahvaljujući evolucionim NN pa se simultano planiranje i terminiranje ostvaruje kao rezultat interakcije između mašina. Poznato je da proizvodna okruženja nisu deterministička, što podrazumeva različite fluktuacije u zahtevima, pa se pri projektovanju tehnoloških procesa i terminiranju proizvodnje mora prilagodavati tim promenama. Svaka mašina alatka „učič“ da donosi odgovarajuće odluke i time se prilagođava trenutnom stanju u proizvodnom pogonu zahvaljujući NN. Struktura mreže se formira kroz proces evolucije (težinski odnosi i pragovi aktivacije neurona se ažuriraju pomoću GA), a izlaz iz mreže predstavlja odabrani deo za obradu i mašine na kojima se obrada obavlja.

Problem IPPS je rešavan i primenom teorije igara [50], gramatičke optimizacije [51], tzv. „imperijalističkog algoritma“ [52], kao i brojnih hibridnih algoritama Agent-ACO [53] i ACO-PSO [54].

## 5. TERMINIRANJE TRANSPORTNIH SREDSTAVA

Pored planiranja tehnoloških procesa i terminiranja proizvodnje, treća ključna komponenta u gradnji integrisanog inteligentnog tehnološkog sistema pod-

razumeva obezbeđivanje sredstava za brz, pouzdan i efikasan transport materijala. Trenutno, fleksibilna AGV kolica i inteligentni mobilni roboti predstavljaju najrasprostranjenija sredstva za transport priprema, obradaka i gotovih delova u inteligentnom tehnološkom sistemu. Zahvaljujući soft computing tehnikama veštačke inteligencije, oni su sposobni da transportuju različite delove od „starta“ do „cilja“ samostalno, dakle bez intervencija operatera-čoveka. Terminiranje AGV kolica ili mobilnih robota predstavlja jednu od najvažnijih kategorija problema u okviru implementacije ovih transportnih sredstava u tehnološke sisteme.



Slika 6 – Primer terminiranja mobilnog robota u tehnološkom okruženju [58]

Terminiranje jednih ili više AGV kolica ili mobilnih robota podrazumeva određivanje vremenskih parametara (vremena uzimanja delova iz skladišta, postavljane na mašinu, vremena početka i završetka operacija svakog od delova, vremena skidanja sa mašine, vreme transporta od/do mašine), kao i transportnih tokova materijala između radnih stanica u skladu sa usvojenim kriterijum performansi sistema, uzimajući u obzir različita ograničenja, kao što su rokovi, prioriteti itd. Ciljevi su, uglavnom, povezani sa tehnološkim vremenom obrade, ili iskorišćenjem resursa, uz minimizaciju broja transportnih sredstava, minimizaciju ukupnog vremena transporta, ili minimizaciju makespan-a. Kada se faza terminiranja izvrši, u fazi rutiranja je neophodno pronaći odgovarajuće putanje i transportne tokove, na primer, putanje sa najkraćim rastojanjima, ili putanje koje najkraće vremenski traju, ili putanje za koje je utrošak energije minimalan. Neka od najčešćih ograničenja koja važe za AGV kolica i mobilne robote su vezana za to da li se vrši transport samo jednog ili više tipova proizvoda/delova u jednom, da li transportno sredstvo može da se kreće samo napred, ili i nazad, ili za to koje je maksimalno opterećenje transportnog sredstva.



U radu [55] se razmatra simultano integrisano terminiranje mašina alatki i jednih ili više AGV kolica, sa ciljem minimizacije makespan-a. GA sa razvijenim specijalnim operatorima za ukrštanje i mutaciju je predložen za rešavanje ovog kombinatornog problema, koji se sastoji od dva podproblema, problema terminiranja mašina alatki i problema terminiranja AGV kolica, oba poznata kao NP-hard problemi. Eksperimentalni rezultati pokazuju da je razvijeni algoritam efikasan u rešavanju problema simultanog terminiranja, kao i da se kroz integrisano terminiranje ostvaruje povećanje performansi celokupnog fleksibilnog tehnološkog sistema.

U radu [56] je predstavljen pristup baziran na primeni Hopfield-ovih neuronskih mreža, uspešno implementiran za rešavanje zadatka određivanja optimalnog redosleda operacija korišćenjem jednog mobilnog robota. Mobilni robot ima zadatak da preuzme deo iz skladišta/međuskladišta, da pre obrade postavi deo na mašinu alatku, kao i da posle obrade skine deo sa mašine i odnese ga na sledeću mašinu ili u skladište, uzimajući u obzir zadata ograničenja. Kriterijumi performansi, kao što su minimizacija ukupnog vremena transporta za grupu delova i minimizacija kašnjenja sekvenci, obezbeđuju ostvarivanje maksimalnog protoka delova kroz sistem kao globalnog cilja. Eksperimentalni rezultati pokazuju da se za „veće“ probleme (20 i više delova) prikazan Hopfield-ov model pokazao uspešnim pri brzom generisanju dobrih rešenja.

U radu [57] se razmatra problem terminiranja jednog mobilnog robota pri obavljanju zadataka transporta materijala i opsluživanja mašina alatki na tehnološkim linijama. Heuristika bazirana na GA korišćena je za pronalaženje optimalnog rešenja terminiranja sekvenci, a za poređenje rezultata je korišćen model mešovitog celobrojnog programiranja MLP (eng. Mixture Linear Programming). Kriterijum performansi podrazumeva pronalaženje sekvenci za koje je ukupno vreme transporta mobilnog robota minimalno. Eksperimenti su izvršeni za terminiranje redosleda opsluživanja linije za proizvodnju rotora, kao i za još 20 slučajno generisanih problema. Rezultati pokazuju „nadmoć“ GA u poređenju sa MLP modelom u pogledu vremena i kvaliteta rešenja za manje probleme, dok za veće probleme MLP model ne može pronaći nijedno rešenje.

U radu [58] su predložena dva pristupa za inteligentan transport materijala korišćenjem mobilnog robota. Prvi pristup se zasniva na primeni GA za optimizaciju tehnoloških procesa, uz minimalno vreme kao kriterijum. Drugi pristup je baziran na primeni teorije grafova za generisanje putanja i NN za učenje putanja. Praćenje putanja dobijenih korišćenjem GA, kao i učenje i predviđanje optimalnih tokova mate-

rijala zahvaljujući NN, testirano je pomoću Khepera II mobilnog robota u eksperimentalnom statičkom laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja. Ostvarena greška pozicioniranja mobilnog robota ukazuje na to da se konceptijski pristup baziran na aksiomatskoj teoriji projektovanja može koristiti u projektovanju transporta i manipulacije delova u inteligentnom tehnološkom sistemu.

U radu [2] je predstavljena metodologija za razvoj softverske aplikacije za integraciju projektovanja tehnološkog procesa, terminiranja proizvodnje i navigacije mobilnog robota u tehnološkom okruženju. Predložena metodologija je bazirana na primeni teorije inventivnog rešavanja problema TRIZ i multiagentske metodologije MA. Matrica kontradikcije i inventivni principi su se pokazali kao efektivni alat za otklanjanje kontradiktornosti u konceptijskoj fazi razvoja softvera. Predložena multiagentska arhitektura sadrži šest agenata: agent za delove, agent za mašine, agent za optimizaciju, agent za planiranje putanje, agent za mašinsko učenje i agent mobilni robot. Svi agenti zajedno učestvuju u optimizaciji tehnološkog procesa, optimizaciji planova terminiranja, generisanju optimalnih putanja koje mobilni robot prati i klasifikaciji objekata u tehnološkom okruženju. Eksperimentalni rezultati pokazuju da se razvijeni softver može koristiti za predloženu integraciju, a sve u cilju poboljšanja performansi inteligentnih tehnoloških sistema.

## 6. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada dat je prikaz stanja u oblasti konceptijskog projektovanja inteligentnih tehnoloških sistema, sa fokusom na sledećim oblastima istraživanja: planiranju i optimizaciji tehnoloških procesa, optimalnom terminiranju proizvodnje, integrisanim modelima za planiranje i terminiranje proizvodnje, kao i terminiranju transportnih sredstava (AGV kolica ili mobilnih robota) pri unutrašnjem transportu materijala u okviru inteligentnih tehnoloških sistema. Novija istraživanja u ovim oblastima ukazuju na to da se optimalna i/ili približno optimalna rešenja, kao i povećanje performansi inteligentnih tehnoloških sistema obezbeđuje primenom naprednih tehnika veštačke inteligencije (neuronske mreže, genetički algoritmi), biološki inspirisanih tehnika (sistemi mravljih kolonija, inteligencija - teorija roja), metaheuristika (kao što su metod simuliranog kaljenja i tabu pretraga) ili hibridnih pristupa.

## ZAHVALNOST

Rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „Inovativni pristup u primeni inteligentnih tehnoloških sistema za proizvodnju delova od lima zasnovan

na ekološkim principima“ (br. TR-35004), koji je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Vuković, N., Čović, N., Towards a Conceptual Design of an Intelligent Material Transport Based on Machine Learning and Axiomatic Design Theory, Proceedings of the 34<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering, pp. 389-392, Niš, Serbia, 28 – 30 September, 2011.
- [2] Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Integration of Process Planning, Scheduling, and Mobile Robot Navigation Based on TRIZ and Multi-Agent Methodology, FME Transactions (ISSN 1451-2092), New Series, Vol. 41 No. 2, pp. 120-129, 2013.
- [3] Ueda, K., Vaario, J., Ohkura, K., Modelling of biological manufacturing systems for dynamic reconfiguration, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 46(1), pp. 343-346, 1997.
- [4] Ueda, K., Kito, T., Fujii, N., Modeling biological manufacturing systems with bounded-rational agents, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 55(1), pp. 469-472, 2006.
- [5] Ueda, K., Emergent synthesis approaches to biological manufacturing systems, Digital Enterprise Technology, Springer US, pp. 25-34, 2007.
- [6] Shu, L. H., Ueda, K., Chiu, I., Cheong, H., Biologically inspired design, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 60(2), pp. 673-693, 2011.
- [7] Ueda, K., Hatono, I., Fujii, N., Vaario, J., Reinforcement learning approaches to biological manufacturing systems, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 49(1), pp. 343-346, 2000.
- [8] Gen, M., Lin, L., Zhang, H., Evolutionary techniques for optimization problems in integrated manufacturing system: State-of-the-art-survey, Computers & Industrial Engineering, 56(3), pp. 779-808, 2009.
- [9] Li, W. D., McMahon, C. A., A simulated annealing-based optimization approach for integrated process planning and scheduling, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 20(1), pp. 80-95, 2007.
- [10] Wong, T. N., Leung, C. W., Mak, K. L., Fung, R. Y. K., An agent-based negotiation approach to integrate process planning and scheduling, International Journal of Production Research, 44(7), pp. 1331-1351, 2006.
- [11] Reddy, S. B., Operation sequencing in CAPP using genetic algorithms, International Journal of Production Research, 37(5), pp. 1063-1074, 1999.
- [12] Qiao, L., Wang, X. Y., Wang, S. C., A GA-based approach to machining operation sequencing for prismatic parts, International Journal of Production Research, 38(14), pp. 3283-3303, 2000.
- [13] Hua, G. R., Zhou, X. H., Ruan, X. Y., GA-based synthesis approach for machining scheme selection and operation sequencing optimization for prismatic parts, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33(5-6), pp. 594-603, 2007.
- [14] Salehi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22(8), pp. 1179-1187, 2009.
- [15] Li, X. Y., Shao, X. Y., Gao, L., Optimization of flexible process planning by genetic programming, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 38(1-2), pp. 143-153, 2008.
- [16] Ma, G. H., Zhang, Y. F., Nee, A. Y. C., A simulated annealing-based optimization algorithm for process planning, International Journal of Production Research, 38(12), pp. 2671-2687, 2000.
- [17] Nallakumarasamy, G., Srinivasan, P. S. S., Raja, K. V., Malayalamurthi, R., Optimization of operation sequencing in CAPP using simulated annealing technique (SAT), The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 54(5-8), pp. 721-728, 2011.
- [18] Li, W. D., Ong, S. K., Nee, A. Y. C., Hybrid genetic algorithm and simulated annealing approach for the optimization of process plans for prismatic parts, International Journal of Production Research, 40(8), pp. 1899-1922, 2002.
- [19] Ma, G. H., Zhang, F., Zhang, Y. F., Nee, A. Y. C., An automated process planning system based on genetic algorithm and simulated annealing, Proceedings of the ASME design engineering technical conference, Vol. 3, pp. 57-63, 2002.
- [20] Li, W. D., Ong, S. K., Nee, A. Y. C., Optimization of process plans using a constraint-based tabu search approach, International Journal of Production Research, 42(10), pp. 1955-1985, 2004.
- [21] Krishna, A. G., Rao, K. M., Optimisation of operations sequence in CAPP using an ant colony algorithm, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 29(1-2), pp. 159-164, 2006.

- [22] Liu, X. J., Yi, H., Ni, Z. H., Application of ant colony optimization algorithm in process planning optimization, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(1), pp. 1-13, 2013.
- [23] Guo, Y. W., Mileham, A. R., Owen, G. W., Li, W. D., Operation sequencing optimization using a particle swarm optimization approach, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(12), pp. 1945-1958, 2006.
- [24] Li, X., Gao, L., Wen, X., Application of an efficient modified particle swarm optimization algorithm for process planning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-15, 2012.
- [25] Wang, Y. F., Zhang, Y. F., Fuh, J. Y. H., Using hybrid particle swarm optimization for process planning problem, *Computational Sciences and Optimization, 2009 (CSO 2009)*, International Joint Conference on, Vol. 1, pp. 304-308, IEEE, 2009.
- [26] Ming, X. G., Mak, K. L., A hybrid Hopfield network-genetic algorithm approach to optimal process plan selection, *International Journal of Production Research*, 38(8), pp. 1823-1839, 2000.
- [27] Ding, L., Yue, Y., Ahmet, K., Jackson, M., Parkin, R., Global optimization of a feature-based process sequence using GA and ANN techniques, *International Journal of Production Research*, 43(15), pp. 3247-3272, 2005.
- [28] Salehi, M., Bahreinejad, A., Optimization process planning using hybrid genetic algorithm and intelligent search for job shop machining, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(4), pp. 643-652, 2011.
- [29] Huang, W., Hu, Y., Cai, L., An effective hybrid graph and genetic algorithm approach to process planning optimization for prismatic parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), pp. 1219-1232, 2012.
- [30] Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Optimization of Operation Sequencing in CAPP Using Hybrid Genetic Algorithm and Simulated Annealing Approach, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Scientific Conference MMA 2012 - Advanced Production Technologies*, pp. 285-288, Novi Sad, Serbia, 20 - 21 September, 2012.
- [31] Vaario, J., Ueda, K., An emergent modelling method for dynamic scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9(2), 129-140, 1998.
- [32] Pezzella, F., Morganti, G., Ciaschetti, G., A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem, *Computers & Operations Research*, 35(10), pp. 3202-3212, 2008.
- [33] Zhang, G., Gao, L., Shi, Y., An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem, *Expert Systems with Applications*, 38(4), pp. 3563-3573, 2011.
- [34] Sha, D. Y., Lin, H. H., A multi-objective PSO for job-shop scheduling problems, *Expert Systems with Applications*, 37(2), pp. 1065-1070, 2010.
- [35] Rossi, A., Dini, G., Flexible job-shop scheduling with routing flexibility and separable setup times using ant colony optimisation method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(5), pp. 503-516, 2007.
- [36] Essafi, I., Mati, Y., Dauzère-Pérès, S., A genetic local search algorithm for minimizing total weighted tardiness in the job-shop scheduling problem, *Computers & Operations Research*, 35(8), pp. 2599-2616, 2008.
- [37] Huang, K. L., Liao, C. J., Ant colony optimization combined with taboo search for the job shop scheduling problem, *Computers & Operations Research*, 35(4), pp. 1030-1046, 2008.
- [38] Xia, W., Wu, Z., An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems, *Computers & Industrial Engineering*, 48(2), pp. 409-425, 2005.
- [39] Hadidi, L. A., Al-Turki, U. M., Rahim, A., Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: a review, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(1), pp. 21-50, 2012.
- [40] Guo, Y. W., Li, W. D., Mileham, A. R., Owen, G. W., Applications of particle swarm optimisation in integrated process planning and scheduling, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(2), pp. 280-288, 2009.
- [41] Guo, Y. W., Li, W. D., Mileham, A. R., Owen, G. W., Optimisation of integrated process planning and scheduling using a particle swarm optimisation approach, *International Journal of Production Research*, 47(14), pp. 3775-3796, 2009.
- [42] Morad, N., Zalzal, A. M. S., Genetic algorithms in integrated process planning and scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(2), pp. 169-179, 1999.
- [43] Zhang, X. D., Yan, H. S., Integrated optimization of production planning and scheduling for a kind of job-shop, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(7-8), pp. 876-886, 2005.
- [44] Shao, X., Li, X., Gao, L., Zhang, C., Integration of process planning and scheduling - a modified ge-

- netic algorithm-based approach, *Computers & Operations Research*, 36(6), pp. 2082-2096, 2009.
- [45] Lihong, Q., Shengping, L., An improved genetic algorithm for integrated process planning and scheduling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5-8), pp. 727-740, 2012.
- [46] Mohammadi, G., Karampourhaghghi, A., Samaei, F., A multi-objective optimisation model to integrating flexible process planning and scheduling based on hybrid multi-objective simulated annealing, *International Journal of Production Research*, 50(18), pp. 5063-5076, 2012.
- [47] Wong, T. N., Leung, C. W., Mak, K. L., Fung, R. Y. K., Integrated process planning and scheduling/rescheduling - an agent-based approach, *International Journal of Production Research*, 44(18-19), pp. 3627-3655, 2006.
- [48] Li, X., Zhang, C., Gao, L., Li, W., Shao, X., An agent-based approach for integrated process planning and scheduling, *Expert Systems with Applications*, 37(2), pp. 1256-1264, 2010.
- [49] Ueda, K., Fujii, N., Inoue, R., An emergent synthesis approach to simultaneous process planning and scheduling, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 56(1), pp. 463-466, 2007.
- [50] Li, X., Gao, L., Li, W., Application of game theory based hybrid algorithm for multi-objective integrated process planning and scheduling, *Expert Systems with Applications*, 39(1), pp. 288-297, 2012.
- [51] Baykasoğlu, A., Özbakır, L., A grammatical optimization approach for integrated process planning and scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(2), pp. 211-221, 2009.
- [52] Lian, K., Zhang, C., Gao, L., Li, X., Integrated process planning and scheduling using an imperialist competitive algorithm, *International Journal of Production Research*, 50(15), pp. 4326-4343, 2012.
- [53] Leung, C. W., Wong, T. N., Mak, K. L., Fung, R. Y. K., Integrated process planning and scheduling by an agent-based ant colony optimization, *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), pp. 166-180, 2010.
- [54] Srinivas, P. S., Raju, V. R., Rao, C. S. P., Optimization of Process Planning and Scheduling using ACO and PSO Algorithms, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 2, Issue 10, pp. 343-354, 2012.
- [55] Ulusoy, G., Sivrikaya-Şerifoğlu, F., Bilge, Ü., A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles, *Computers & Operations Research*, 24(4), pp. 335-351, 1997.
- [56] Maimon, O., Braha, D., Seth, V., A neural network approach for a robot task sequencing problem, *Artificial intelligence in engineering*, 14(2), pp. 175-189, 2000.
- [57] Dang, Q. V., Nielsen, I., Steger-Jensen, K., Madsen, O., Scheduling a single mobile robot for part-feeding tasks of production lines, *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-17, 2012.
- [58] Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Vuković, N., Čović, N., Towards a Conceptual Design of Intelligent Material Transport Using Artificial Intelligence, *Strojstvo*, 54(3), pp. 205-219, 2012.

## SUMMARY

### ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONCEPTUAL DESIGN OF INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS – A STATE OF THE ART REVIEW

*Intelligent manufacturing systems (IMS), as the highest class of flexible manufacturing systems, are able to adapt to market changes applying methods of artificial intelligence. This paper presents a detailed review of the following IMS functions: (i) process planning optimization, (ii) scheduling optimization, (iii) integrated process planning and scheduling, and (iv) mobile robot scheduling for internal material transport tasks. The research presented in this paper shows that improved performances of IMS are achieved with biologically inspired artificial intelligence techniques (neural networks, genetic algorithms, ant colonies and particle swarm optimization), and also by using metaheuristic algorithms (like simulated annealing and tabu search methods).*

**Key words:** *intelligent manufacturing systems, conceptual design, artificial intelligence, process planning, scheduling, optimization, mobile robot, review*