

Integrisano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima – pregled stanja u oblasti istraživanja

KATARINA Z. MILJKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd

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

Originalni naučni rad

UDC: 621:620.17

DOI: 10.5937/tehnika2006733M

U ovom radu je dat detaljan pregled stanja u oblasti istraživanja jedne od funkcija inteligentnih tehnoloških sistema (ITS) – integrisano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima (DIPPS). U tom smislu, dat je opis DIPPS problema, razmatrani su kriterijumi na osnovu kojih se vrši odabir optimalanog plana terminiranja, definisane su usvojene pretpostavke i predstavljen je matematički model ovog problema. Takođe, detaljno su razmatrani i sledeći poremećajni faktori koji se mogu javiti u okviru tehnoloških sistema: (i) prestanak rada mašine alatke, (ii) dolazak novog dela u sistem i (iii) otkaz obrade dela. Analizirani su pristupi za rešavanje DIPPS problema bazirani na multiagentnim sistemima, kao i pristupi bazirani na algoritmima. Kada su u pitanju pristupi bazirani na algoritmima, fokus u ovom radu je na biološki inspirisanim algoritmima optimizacije i to: evolucionim algoritmima, algoritmima baziranim na inteligenciji roja, kao i hibridnim pristupima. Kritičkom analizom stanja u ovoj oblasti istraživanja može se zaključiti da biološki inspirisane tehnike veštačke inteligencije imaju veliki potencijal u optimizaciji pomenute funkcije ITS-a.

Cljučne reči: planiranje i reterminiranje tehnoloških procesa, dinamički poremećaji, optimizacija, multiagentni sistemi, biološki inspirisani algoritmi

1. UVOD

Inteligentni tehnološki sistem (ITS) 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 okviru razvoja inteligentnih tehnoloških sistema postoje različiti pravci istraživanja. U tom smislu, istraživači u ovoj oblasti se fokusiraju na sledeće ključne funkcije pri istraživanju ITS-a: projektovanje tehnoloških procesa, terminiranje proizvodnje, terminiranje transportnih sredstava u okviru ITS-a, zadaci inspekcije i upravljanje transportnim tokovima materijala [1]. Projektovanje tehnoloških procesa i njihovo terminiranje predstavljaju najznačajnije funkcije koje direktno utiču na performanse ITS-a.

Projektovanje tehnoloških procesa je nastalo kra-

jem devedesetih godina 20. veka sa ciljem da se na sistemski način definišu metode koje obezbeđuju da se proizvodnja realizuje na ekonomičan i kompetitivan način [2], [3].

Projektovanje tehnoloških procesa počinje definisanjem geometrije dela (radionički crtež sa informacijama o zahtevanom kvalitetu i tačnosti), a potom i odabirom metoda obrade, obradnog sistema (mašine alatke, alata, pomoćnih pribora), redosleda operacija, uz određivanje glavnog vremena obrade za zahvate u okviru svih operacija.

Različiti tipovi informacija poput projektantskih podataka o materijalu, proizvodnoj opremi, kao i zahtevima kvaliteta, predstavljaju ulaz u funkciju projektovanja tehnoloških procesa, dok je izlaz iz pomenutog sistema tehnološki postupak, kojim se definiše redosled odvijanja svih aktivnosti (operacija) potrebnih da se od polaznog materijala (sirovine ili polufabrikata) oblikuje gotov deo (proizvod) [4].

Generalno, pristupi u projektovanju tehnoloških procesa se mogu klasifikovati u dve kategorije: ručno projektovanje tehnoloških procesa i kompjuterski podržano projektovanje tehnoloških procesa – CAPP (engl. Computer Added Process Planning) [5]. CAPP se

Adresa autora: Katarina Miljković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16
e-mail: kmiljkovic@mas.bg.ac.rs

Rad primljen: 05.10.2020.

Rad prihvaćen: 20.10.2020.

može definisati kao automatizovan i kompjuterski podržan pristup u projektovanju tehnoloških procesa, baziran na principima grupne tehnologije i egzaktnim matematičkim modelima, u cilju integracije Kompjuterski podržanog projektovanja – CAD (engl. Computer – Aided Design) i Kompjuterski podržane proizvodnje – CAM (engl. Computer – Aided Manufacturing). Ovakvim pristupom se generišu ostvarivi tehnološki procesi u skladu sa različitim kriterijumima poput tehnoloških vremena, troškova, obima proizvodnje, dostupnosti mašina alatki i proizvodne opreme i transportnih tokova materijala. U referentnoj literaturi se navode različiti CAPP sistemi bazirani na varijantnom i generativnom pristupu [6].

Pod pojmom terminiranje (engl. scheduling), ili detaljno terminiranje (engl. detailed scheduling), ili terminiranje proizvodnje (engl. production scheduling), podrazumeva se primena metoda odlučivanja i optimizacionih metoda u cilju planiranja i optimalnog vremenskog raspoređivanja aktivnosti proizvodno-tehnoloških entiteta (mašina alatki, alata, pomoćnih pribora, transportnih sredstava, mobilnih robota). Terminiranje tehnoloških procesa predstavlja proces planiranja mašinske obrade delova na osnovu raspoloživih resursa tehnoloških sistema, a u skladu sa usvojenim kriterijumima performansi. Na taj način se, kao rezultat procesa terminiranja, dobija redosled operacija delova na odgovarajućim mašinama alatkama prema nekom od sledećih kriterijumima: proizvodno vreme (engl. makespan), troškovi proizvodnje (engl. Production cost), uravnoteženo iskorišćenje mašina alatki (engl. balanced utilization), transportni tokovi materijala (engl. flow time), poštovanje rokova završetka (engl. lateness) sa svoje dve kategorije – kašnjenje za slučaj da je vreme završetka duže od vremena definisanog rokom (engl. tardiness) i završetak pre roka za slučaj da je vreme završetka obrade dela kraće od vremena definisanog rokom (engl. earliness) [5]. Opis funkcija cilja, kao i matematička formulacija kriterijuma koji se najčešće koriste u literaturi, prikazani su u tabeli 1.

Na osnovu tokova materijala u tehnološkom sistemu, razlikuju se dva tipa terminiranja: job-shop tip terminiranja se definiše za N različitih delova i M različitih mašina alatki, gde je za svaki od delova definisan set operacija kao i njihov redosled izvršavanja na mašinama alatkama, a za svaku od operacija vreme obrade na odgovarajućim mašinama alatkama (tabela 2, slika 1); i flow-shop tip terminiranja, koji podrazumeva da svi delovi imaju fiksni, unapred definisan, redosled obrade na mašinama alatkama. To znači da se svaki od N delova sekvencijalno obrađuje na mašinama $m=1, \dots, M$, pri čemu je redosled operacija na odgovarajućim mašinama alatkama isti za sve delove (tabela 3, slika 2). Na primer, na osnovu informacija o

obradi delova pri job-shop terminiranju prikazanim u tabeli 2, četvrta operacija dela 2 se izvodi na mašini alatki M2 u trajanju od 3s, dok se prva operacija izvodi na mašini M4 u trajanju od 4s. Sa druge strane, ako se analizira obrada dela 2 pri flow-shop terminiranju, iz tabele 3 se vidi da je vreme trajanja treće operacije, koja se izvodi na mašini alatki M3, 3s, dok se druga operacija dela 3 izvršava na mašini M2 u trajanju od 5s.

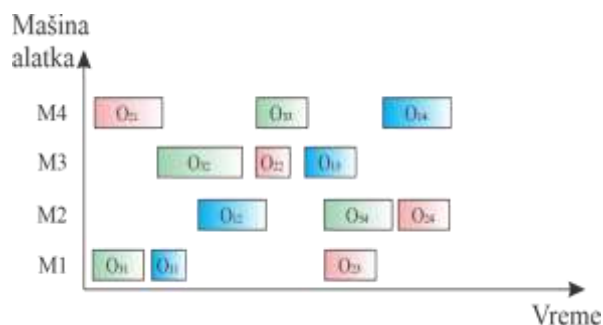
Tabela 1. Funkcije cilja

Funkcija cilja	Matematička formulacija
Proizvodno vreme (engl. makespan)	$\min(\max\{c_i\}, i = 1, \dots, N)$
Transportni tokovi materijala (engl. flow time)	$\min\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N c_i\right)$
Poštovanje rokova završetka (engl. lateness)	$\sum_{i=1}^N (c_i - d_i)$
Kašnjenje (engl. tardiness)	$\min\left(\sum_{i=1}^N \max\{0, (c_i - d_i)\}\right)$
Završetak pre roka (engl. earliness)	$\max\left(\sum_{i=1}^N \max\{0, (d_i - c_i)\}\right)$
N – broj delova, $i = 1, \dots, N$; c_i – vreme završetka obrade dela i ; d_i – zadati rok za obradu dela i	

Konvencionalni pristupi u projektovanju ove dve funkcije ITS-a podrazumevaju da se pomenute faze izvršavaju sekvencijalno, što znači da faza projektovanja tehnoloških procesa prethodi fazi terminiranja. Ovakav pristup projektovanju, često zasnovan na fiksnim tehnološkim procesima projektovanim bez uvida u resurse i stanje samog tehnološkog sistema, dovodi do neuravnoteženog iskorišćenja proizvodnih resursa, stvaranja uskih grla u proizvodnom procesu, smanjenja performansi vremena isporuke i nemogućnosti prilagođavanja dinamičkoj prirodi realnih tehnoloških sistema [2].

Tabela 2. Job-shop tip terminiranja

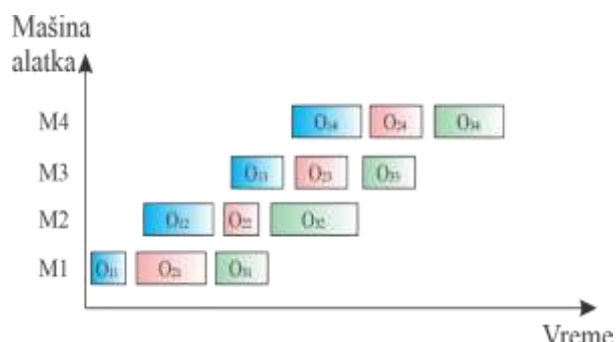
Deo	Operacije			
	1	2	3	4
	Vreme trajanja operacije [s]			
1	2	4	3	4
2	4	2	3	3
3	3	5	3	4
	Mašina alatka			
1	M1	M2	M3	M4
2	M4	M3	M1	M2
3	M1	M3	M4	M2



Slika 1 – Gantov dijagram job-shop tipa terminiranja

Tabela 3. Flow-shop tip terminiranja

Deo	Operacije			
	1	2	3	4
	Vreme trajanja operacije [s]			
1	2	4	3	4
2	4	2	3	3
3	3	5	3	4
	Mašina alatka			
1	M1	M2	M3	M4
2	M1	M2	M3	M4
3	M1	M2	M3	M4



Slika 2 – Gantov dijagram flow-shop tipa terminiranja

U cilju prevazilaženja ovih nedostataka, smanjenja proizvodnih troškova i povećanja efikasnosti proizvodnih sistema, predlaže se integracija planiranja i terminiranja tehnoloških procesa (engl. Integrated Process Planning and Scheduling – IPPS). Integrirano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa podrazumeva dobijanje optimalnog redosleda operacija potrebnih za obradu mašinskih delova, na osnovu definisanih alternativnih tehnoloških procesa obrade, uz poštovanje zadatih tehnoloških ograničenja. Dobijeni redosled operacija predstavlja optimalan plan terminiranja definisan u skladu sa usvojenim kriterijumima performansi. IPPS je tradicionalno uglavnom razmatran bez uticaja poremećajnih faktora usled čijeg dejstva je ipak potrebno promeniti redosled operacija delova na odgovarajućim mašinama alatkama.

2. INTEGRISANO PLANIRANJE I TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA U DINAMIČKIM USLOVIMA

U situacijama gde se često javljaju poremećaji, neophodno je izvršiti određene izmene kako bi se omogućilo prilagođavanje dinamičkoj prirodi realnih tehnoloških sistema, što dovodi do pojave dinamički integriranog planiranja i terminiranja tehnoloških procesa (engl. Dynamic Integrated Process Planning and Scheduling – DIPPS). Prestanak rada mašine alatke, uvođenje nove mašine u tehnološki sistem, dolazak novog dela i otkaz dela čija je obrada u toku, samo su neki od poremećaja koji opisuju dinamičku prirodu tehnoloških sistema.

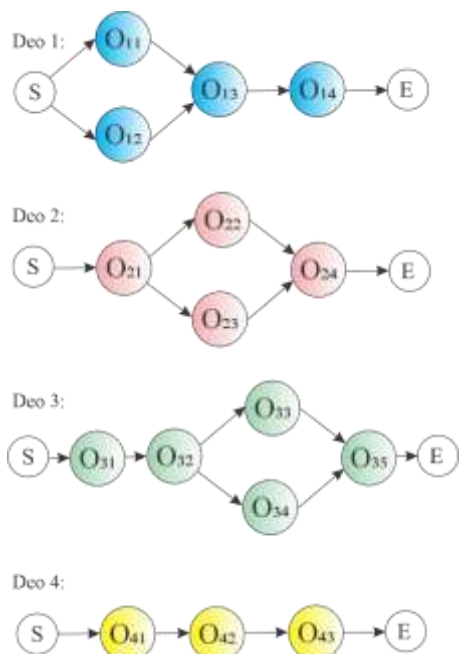
Najveći broj istraživanja u ovoj oblasti se bazira na rešavanju problema koji nastaju usled sledeća tri dinamička poremećaja: dolazak novog dela u tehnološki sistem, prestanak rada mašine alatke i otkaz obrade dela. U nastavku su prikazani primeri mreža izabranih alternativnih tehnoloških procesa za obradu četiri dela (slika 3), pri čemu se, na primer, za obradu delova 1 i 2 koriste 4 operacije, dok se 5 operacija izvršava za deo 3, i 3 operacije za deo 4.

Na osnovu informacija datih u mrežama alternativnih tehnoloških procesa, formira se inicijalni plan terminiranja generisan pre nastanka poremećaja, a zatim formira optimalni reterminirani plan za obradu delova, nakon nastanka svakog od tri pomenuta poremećaja (slika 4, slika 5, slika 6).

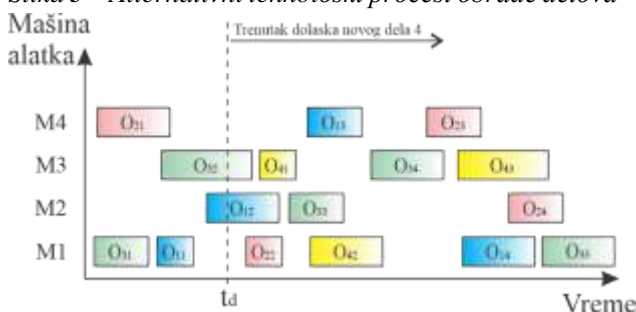
Potreba za obradom novog dela koji se uvodi u tehnološki sistem (engl. new job arrival) podrazumeva i promenu redosleda postojećih operacija nakon trenutka dolaska, uzimajući u obzir i operacije neophodne za obradu novog dela (slika 4). Novi plan terminiranja se može iskoristiti za unapređenje performansi tehnološkog sistema za obradu novog dela poštujući istovremeno zadate rokove obrade svih delova u sistemu.

Prestanak rada mašine alatke (engl. machine breakdown) dovodi do potrebe za ponovnim terminiranjem tj. reterminiranjem (engl. rescheduling) svih operacija koje nisu završene u trenutku otkaza, a izvodile su se na mašini alatki pre prestanka njenog rada. Pristupi u modeliranju ovih poremećaja podrazumevaju da se operacije koje nisu završene prosleđuju na alternativne mašine alatke na kojima je moguće nastaviti obradu mašinskog dela (slika 5).

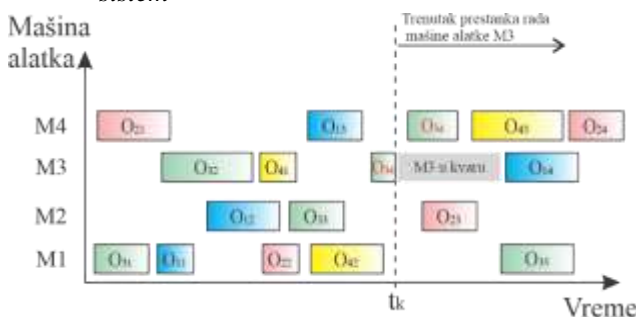
Otkaz dela (engl. job cancellation) predstavlja poremećaj u tehnološkom sistemu koji nastaje usled potrebe da se prekine obrada dela. Iz tog razloga, nakon trenutka otkaza, vrši se ponovno terminiranje preostalih delova, uz zanemarivanje tj. uklanjanje svih operacija otkazanog dela (slika 6).



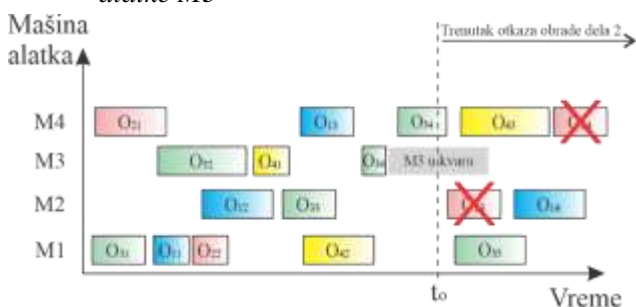
Slika 3 – Alternativni tehnološki procesi obrade delova



Slika 4 – Reterminiranje usled dolaska novog dela u sistem



Slika 5 – Reterminiranje usled prestanka rada mašine alatke M3



Slika 6 – Reterminiranje usled otkaza obrade dela 2

U nastavku su date pretpostavke koje se uzimaju u obzir pri procesima reterminiranja (prikazanim na slikama 4, 5 i 6):

- Vreme potrebno za reterminiranje je zanemarljivo malo. Obrada svih delova na svim mašinama alatkama se nastavlja odmah kada je reterminiranje završeno.
- Ako je u trenutku pojave poremećaja operacija bila u toku, onda se ona nastavlja na istoj mašini alatki, a za slučaj prestanka rada te mašine, operacija se nastavlja na drugoj alternativnoj mašini alatki.
- U jednom trenutku na svakoj mašini alatki može da se izvodi samo jedna operacija jednog dela.
- Delovi su slobodni za obradu od trenutka $t_0 = 0$ u inicijalnom planu terminiranja i od trenutka $t = r_i$ nakon pojave poremećaja (r_i – vreme nakon trenutka pojave poremećaja kada najranije može da počne sledeća operacija dela i , engl. release time).
- Različite operacije jednog dela se ne mogu izvoditi istovremeno.
- Kada je operacija dela završena na jednoj mašini alatki, deo se odmah prosleđuje na mašinu na kojoj se izvodi sledeća operacija, pri čemu se uzima u obzir i vreme transporta dela između mašina alatki.
- Vreme pripreme mašine alatke (i ostalih proizvodnih resursa) za operaciju koja sledi uzima se u obzir pri dinamičkom planiranju i reterminiranju tehnoloških procesa.

3. MATEMATIČKI MODEL DIPPS PROBLEMA

Matemtički model dinamički integrisanog planiranja i reterminiranja tehnoloških procesa, prikazan u nastavku, bazira se na istraživanjima predstavljenim u radovima [7] i [8].

Lista oznaka:

N – broj delova, $i=1, \dots, N$

M – broj mašina alatki, $m=1, \dots, M$

O_{ijk}^m – k -ta operacija j -tog alternativnog tehnološkog procesa dela i koja se izvodi na mašini alatki m

t_{ijk}^m – vreme trajanja operacije O_{ijk}^m

r_i – vreme nakon trenutka pojave poremećaja kada najranije može da počne sledeća operacija dela i

r_m – vreme nakon trenutka pojave poremećaja kada najranije može da počne sledeća operacija na mašini m

t_d – vreme dolaska novog dela

t_k – vreme prestanka rada mašine alatke

t_o – vreme otkaza obrade dela

t_t – vreme trajanja kvara mašine alatke m

s_{ijk}^m – vreme početka operacije O_{ijk}^m

c_{ijk}^m – vreme završetka operacije O_{ijk}^m

O_{ijk}^m – set operacija koje su izvođene na mašini alatki m u trenutku pojave poremećaja

O_{ijk}^m – set operacija koje su završene na mašini alatki m pre trenutka pojave poremećaja

z_{ijk}^m – promenljiva koja ima vrednost 1 u slučaju da se mašina alatka na kojoj se izvodila operacija O_{ijk}^m nije promenila, a u suprotnom ima vrednost 0.

3.1. Slučaj dolaska novog dela u tehnološki sistem i slučaj otkaza obrade dela

Od trenutka nastanka poremećaja potrebno je reterminirati prekinute operacije. Operacije koje su završene pre trenutka pojave poremećaja, kao i one koje su se izvršavale u tom trenutku, su zanemarene pri procesu reterminiranja. U slučaju dolaska novog dela (slika 4), zanemarene su završene operacije O_{11} , O_{21} i O_{31} i one koje su bile u toku O_{12} i O_{32} . U slučaju otkaza obrade dela (Slika 6), zanemarene su O_{11} , O_{12} , O_{13} , O_{21} , O_{22} , O_{31} , O_{32} , O_{33} , O_{41} i O_{42} , kao i operacija O_{34} koja se izvršavala u tom trenutku.

Završene operacije u slučaju dolaska novog dela u tehnološki sistem su određene sa (1):

$$O_{ijk}^m = \left\{ O_{ijk}^m \mid c_{ijk}^m \leq t_d \right\}, m \in [1, M], \quad (1)$$

dok su u slučaju otkaza dela određene sa (2):

$$O_{ijk}^m = \left\{ O_{ijk}^m \mid c_{ijk}^m \leq t_o \right\}, m \in [1, M]. \quad (2)$$

Operacije koje su se izvodile u trenutku dolaska novog dela u tehnološki sistem su određene sa (3):

$$O_{ijk}^m = \left\{ O_{ijk}^m \mid s_{ijk}^m < t_d < c_{ijk}^m \right\}, m \in [1, M], \quad (3)$$

dok su u slučaju otkaza obrade dela predstavljene na sledeći način, jednačinom (4):

$$O_{ijk}^m = \left\{ O_{ijk}^m \mid s_{ijk}^m < t_o < c_{ijk}^m \right\}, m \in [1, M]. \quad (4)$$

Za preostale operacije mora da važi (5) i (6):

$$O_{ijk}^m = \left\{ O_{ijk}^m \mid s_{ijk}^m > t_d \right\}, m \in [1, M], \quad (5)$$

$$O_{ijk}^m = \left\{ O_{ijk}^m \mid s_{ijk}^m > t_o \right\}, m \in [1, M]. \quad (6)$$

Vreme r_i kada najranije može da počne sledeća operacija dela i računa se na osnovu opšte jednačine (7):

$$r_i = c_{ijk}^m \times z_{ijk}^m + t_d \times (1 - z_{ijk}^m). \quad (7)$$

U slučaju da je operacija dela bila u toku u trenutku nastanka poremećaja i da se mašina alatka na kojoj se

izvodila operacija nije promenila (tj. $z_{ijk}^m = 1$), jednačina (7) se svodi na sledeći oblik (8):

$$r_i = c_{ijk}^m = \left\{ s_{ijk}^m + t_{ijk}^m \mid s_{ijk}^m < t_d < c_{ijk}^m \right\}, \quad (8)$$

$i \in N.$

S druge strane, ukoliko je operacija završena pre trenutka nastanka poremećaja, usvajajući da je $z_{ijk}^m = 0$ (nije poznato da li će se promeniti mašina alatka na kojoj će se sledeća operacija izvoditi), vreme r_i nakon dolaska novog dela u sistem kada najranije može da počne sledeća operacija dela i se računa prema jednačini (9):

$$r_i = t_d = \max \left(\left\{ c_{ijk}^m \mid c_{ijk}^m < t_d \right\}, t_d \right), i \in N. \quad (9)$$

U slučaju dolaska novih delova u tehnološki sistem u trenutku t_d , za njih važi $r_i = t_d$.

Za slučaj otkaza obrade dela, važe isti principi za računanje vremena kada najranije može da počne sledeća operacija dela i , definisani jednačinom (10):

$$r_i = c_{ijk}^m \times z_{ijk}^m + t_o \times (1 - z_{ijk}^m). \quad (10)$$

Vreme nakon trenutka dolaska novog dela u sistem kada najranije može da počne sledeća operacija O_{ijk}^m na mašini m se računa pomoću sledećeg izraza (11):

$$r_m = c_{ijk}^m \times z_{ijk}^m + t_d \times (1 - z_{ijk}^m), m \in [1, M], \quad (11)$$

Ukoliko se u trenutku nastanka poremećaja operacija izvodila na mašini alatki m , usvaja se $z_{ijk}^m = 1$, odnosno da se operacija nastavlja na istoj mašini alatki i tada se jednačina (11) se svodi na izraz (12):

$$r_m = c_{ijk}^m = \left\{ s_{ijk}^m + t_{ijk}^m \mid s_{ijk}^m < t_d < c_{ijk}^m \right\} \quad (12)$$

Ukoliko se operacija O_{ijk}^m završila pre trenutka dolaska novog dela u sistem, usvaja se $z_{ijk}^m = 0$ (nije poznato da li će se sledeća operacija dela i izvoditi na istoj mašini alatki), jednačina (11) se svodi na izraz (13):

$$r_m = t_d = \max \left(\left\{ c_{ijk}^m \mid c_{ijk}^m < t_d \right\}, t_d \right), i \in N. \quad (13)$$

U slučaju otkaza obrade dela važe isti principi za računanje vremena kada najranije može da počne sledeća operacija O_{ijk}^m , na mašini m , definisani jednačinom (14):

$$r_m = c_{ijk}^m \times z_{ijk}^m + t_o \times (1 - z_{ijk}^m), \quad m \in [1, M]. \quad (14)$$

3.2. Slučaj prestanka rada mašine alatke

U slučaju prestanka rada mašine alatke (slika 5), zanemarene su završene operacije O_{11} , O_{12} , O_{13} , O_{21} ,

O_{22} , O_{31} , O_{32} , O_{33} , O_{41} i O_{42} , dok je operaciju O_{34} , koja je bila u toku, potrebno proslediti na alternativnu mašinu alatku.

Vreme nakon trenutka pojave poremećaja kada najranije može da počne sledeća operacija dela i , može da se izračuna pomoću jednačine (15):

$$r_i = \begin{cases} c_{ijk}^m \times z_{ijk}^m + t_k \times (1 - z_{ijk}^m), & m \neq r; \\ (c_{ijk}^m + t_t) \times z_{ijk}^m + t_k \times (1 - z_{ijk}^m), & m = r. \end{cases} \quad (15)$$

pri čemu r označava mašinu alatku koja je prestala da radi.

Ukoliko važi $m \neq r$, postoje dva moguća slučaja: prvi, kada je operacija O_{ijk}^m u toku u trenutku prekida rada druge mašine alatke i tada važi $z_{ijk}^m = 1$, tj. operacija nastavlja da se izvodi na mašini m , i tada se jednačina (15) svodi na jednačinu (16); i drugi slučaj, kada je operacija O_{ijk}^m završena pre trenutka prekida rada druge mašine alatke i tada važi $z_{ijk}^m = 0$, iz razloga što se ne zna da li će sledeća operacija dela i da se izvodi na istoj mašini m kao i prethodna i tada važi (17).

$$r_i = c_{ijk}^m = \left\{ s_{ijk}^m + t_{ijk}^m \mid s_{ijk}^m < t_k < c_{ijk}^m \right\} \\ i \in N. \quad (16)$$

$$r_i = t_k = \max \left(\left\{ c_{ijk}^m \mid c_{ijk}^m < t_k \right\}, t_k \right), \\ i \in N. \quad (17)$$

Ukoliko važi $m = r$ i $s_{ijk}^m < t_k < c_{ijk}^m$ znači da je mašina alatka na kojoj se izvodila operacija O_{ijk}^m prestala da radi. Za dalje izvođenje prekinute operacije, takođe postoje dva moguća slučaja: prvi koji podrazumeva prosleđivanje operacije na drugu mašinu alatku i tada je $z_{ijk}^m = 0$, tj. O_{ijk}^m će nastaviti da se izvodi na drugoj masini m i tada jednačina (15) postaje (18); i drugi slučaj kada operacija mora da se nastavi na mašini alatki koja je trenutno u kvaru, tada je $z_{ijk}^m = 1$, pa se mora uračunati i vreme potrebno za popravku mašine m prema izrazu (19):

$$r_i = t_k \quad (18)$$

$$r_i = c_{ijk}^m + t_t \quad (19)$$

Potrebno je napomenuti da u jednačini (19) c_{ijk}^m , tj. vreme završetka operacije, ima vrednost t_k , zato što se u trenutku poremećaja prekida operacija, pa se taj trenutak uzima za trenutno vreme kraja izvođenja operacije O_{ijk}^m .

Kao i prethodno računanje vremena od kada može da se nastavi obrada dela i - r_i , računa se i vreme od kada mašina alatka m može da nastavi obradu dela - r_m , a prema formuli (20):

$$r_m = \begin{cases} c_{ijk}^m \times z_{ijk}^m + t_k \times (1 - z_{ijk}^m), & m \neq r; \\ (c_{ijk}^m + t_t) \times z_{ijk}^m + (t_k + t_t) \times (1 - z_{ijk}^m), & m = r. \end{cases} \quad (20)$$

4. PRISTUPI U INTEGRISANOM PLANIRANJU I RETERMINIRANJU TEHNOLOŠKIH PROCESA U DINAMIČKIM USLOVIMA

Dva osnovna pristupa reterminiranja usled nastanka različitih poremećaja su parcijalno (engl. partial rescheduling) i totalno reterminiranje (engl. total rescheduling). Parcijalno reterminiranje podrazumeva promenu redosleda operacija na koje direktno ili indirektno utiče poremećaj. Komparativna prednost parcijalnog tipa reterminiranja zasniva se na mogućnosti primene u izrazito dinamičkim sistemima gde je potrebno da se novi redosled operacija generiše u što kraćem roku. Sa druge strane, totalno reterminiranje je proces gde su, nakon pojave poremećaja, sve nezavršene operacije ponovo terminirane. Iako ovaj tip reterminiranja rezultira boljim optimalnim rešenjem, računarska kompleksnost ovog pristupa je znatno veća. Totalno reterminiranje se može razmatrati kao potpuno novi problem terminiranja sa različitim prostorom mogućih rešenja.

Poput projektovanja i terminiranja tehnoloških procesa, i DIPPS problem pripada klasi nedeterminističkih polinomialnih problema, tzv. NP – hard kombinatorno-optimizacionih problema. Kako vreme potrebno za rešavanje ovih problema eksponencijalno raste sa dimenzijom problema (povećanje broja delova, mašina alatki, operacija dovodi do povećanja prostora mogućih rešenja), ovi problemi se ne mogu efikasno rešiti primenom konvencionalnih neheurističkih metoda. U cilju prevazilaženja nedostataka konvencionalnih metoda, u literaturi je predložen veliki broj pristupa u rešavanju DIPPS problema, koji se mogu podeliti na (i) pristupe bazirane na multiagentnim sistemima (engl. Multiagent systems) i (ii) pristupe bazirane na algoritmima.

4.1. Multiagentni pristup u rešavanju DIPPS

Kod pristupa koji se baziraju na multiagentnim sistemima, integrisano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima se ostvaruje kroz interakciju između različitih agenata u sistemu. Agenti mogu da predstavljaju fizičke ili logičke entitete, počev od složenih (gde se agentom može predstaviti i sveobuhvatno preduzeće) do jednostavnijih (poput mašina alatki, mobilnih robota, alata, itd.). Analiza različitih tipova agenata, njihova hijerarhijska struktura i međusobna komunikacija na osnovu

definisanih protokola predstavljaju glavne pravce istraživanja u ovoj oblasti.

Autori rada [9] predlažu primenu inteligentnog sistema baziranog na agentima za dinamičko reterminiranje nakon uticaja dinamičkih faktora, a koji se sastoji iz sledeće dve nezavisne komponente: agenta i simulirane okoline (engl. Simulated Environment – SE). Na osnovu pravila prioriteta usvojenog od strane agenta, u odnosu na uslove u realnom tehnološkom sistemu, SE predstavlja proces terminiranja.

Agent se sastoji iz sledeća tri modula: modula opažanja (prima informacije iz SE o trenutnoj situaciji), kognitivnog modula (podrazumava set pravila i odluka) i modula akcije (generiše informacije i šalje u SE). Agent je obučavan pomoću unapređenog algoritma učenja ojačavanjem (engl. Reinforcement Learning – RL) – Q-III, u cilju uspešnog donošenja odluka za dobijanje optimalnog plana terminiranja.

U radu [10] su data kompleksna pravila za selekciju mašina alatki i obradu delova pri čemu je dinamički sistem obučavan tako da unapredi sopstveno učenje i sposobnost adaptacije korišćenjem RL algoritma, koji ima za cilj ostvarivanje kompetitivnih rezultata primenljivih u realnim tehnološkim sistemima. U poređenju sa prethodno razvijenim RL algoritmom, proces traženja optimalnog rešenja brže konvergira primenom pristupa predstavljenog u ovom radu, što ukazuje na robusnost i bolje konvergentne karakteristike algoritma učenja ojačavanjem, kao i naglašenu efektivnost i efikasnost u rešavanju DIPPS problema. Minimizacija srednjeg vremena kašnjenja predstavlja funkciju nagrađivanja, tj. nagradne ocene stanja RL algoritma.

Za rešavanje integrisanog planiranja i job-shop terminiranja/reterminiranja, u radu [11] je primenjen multniagentni sistem (engl. Multi-Agent System – MAS) baziran na online hibridnom komunikacionom protokolu (engl. online Hybrid Agent-based Negotiation – oHAN). Arhitekturu MAS čine lokalni agenti, koji predstavljaju delove i mašine alatke, i supervizorski nadzorni agent. Lokalni agenti imaju zadatak da identifikuju poremećaje koji se javljaju u proizvodnji (razmatrani su prekid rada mašine alatke i dolazak novog dela u tehnološki sistem) i da obezbede optimalno reterminiranje operacija koje nisu završene koristeći decentralizovane pregovore (engl. decentralized negotiations).

Agent nadzora (tzv. supervizorski agent) koordinira i nadgleda proces reterminiranja kako bi se obezbedilo dobijanje novog optimalnog plana terminiranja uz poštovanje kriterijuma performansi. Novi hibridni protokol (engl. an online Hybrid Contract-net Negotiation Protocol - oHCNP) je primenjen u cilju kontrole interakcije i komunikacije između agenata. Rezultati

sprovedenih eksperimenata pokazuju da je predloženi pristup efikasan u rešavanju problema reterminiranja u definisanom vremenskom roku.

U radu [12] je predstavljena posebna MAS arhitektura za dobijanje optimalnog plana terminiranja u „cloud“ proizvodnji. Detaljno su analizirane uloge različitih tipova agenata u sistemu (engl. Enterprise Agent – EA, Service Agent – SA, Enterprise and Service Management Agent – ESMA, Broker Agents – BA, Task Agent – TA, Task Management Agent – TMA, itd.) kao i njihova interakcija. Tradicionalni mrežni protokol je unapređen pomoću karakteristika „cloud“ proizvodnje u cilju omogućavanja brojnih pregovora između SA i TA. Rezultati simulacije ukazuju na izvodljivost i efikasnost predloženog pristupa u dinamičkim uslovima.

4.2. Pristup baziran na algoritmima

Drugi pristup rešavanju DIPPS problema u potpunosti zavisi od tipa korišćenog optimizacionog algoritma. Metaheuristički algoritmi se često koriste za rešavanje DIPPS problema zbog svoje jednostavne implementacije koja omogućava generisanje optimalnih tehnoloških procesa obrade delova. Algoritmi takođe mogu biti podeljeni u dve grupe: algoritmi bazirani na jedinstvenim rešenjima (engl. single-solution algorithms) i algoritmi bazirani na svim rešenjima u populaciji. Algoritmi bazirani na jedinstvenim rešenjima, poput algoritma simuliranog žarenja (engl. Simulated Annealing – SA), tabu pretrage (engl. Tabu Search – TS) i pretrage promenljivih susedstva (engl. Variable Neighborhood Search), se primenjuju u cilju modifikacije samo jednog slučajno generisanog inicijalnog rešenja. Pomenuti algoritmi se često koriste za rešavanje integrisanog planiranja i terminiranja (IPPS), ali u rešavanju DIPPS još uvek nisu zastupljeni. Sa druge strane, algoritmi bazirani na svim rešenjima, koji se često primenjuju u rešavanju DIPPS problema, mogu se klasifikovati na evolucione metaheurističke algoritme (engl. evolutionary algorithms) i algoritme bazirane na inteligenciji roja (engl. swarm intelligence-based algorithms).

4.2.1. Evolucionarni algoritmi

Evolucionarni algoritmi (engl. Evolutionary Algorithms – EA) predstavljaju klasu stohastičkih metoda optimizacije koji simuliraju proces prirodne evolucije. Poreklo EA potiče iz pedesetih godina 20. veka, a sedamdesetih godina se predlažu sledeće metodologije: genetički algoritmi, evoluciono programiranje i evolucione strategije [13]. Zajedničke funkcije za pomenute metodologije su: reprodukcija, slučajne varijacije, takmičenje i odabir elitnih pojedinaca unutar populacije [14]. Koristeći uprošćenja, svi ovi pristupi su bazirani na dva principa evolucije: selekciji i variranju.

Selekcija predstavlja takmičenje za resurse među živim bićima. Neki su bolji od drugih i imaju veće šanse da prežive i reprodukuju njihove genetičke informacije. U evolucionim algoritimima, prirodna selekcija je simulirana stohastičkim procesom selekcije. Svako rešenje dobija šansu za reprodukcijom određeni broj puta, zavisno od njihovog kvaliteta. Stoga se kvalitet procenjuje ocenom pojedinaca i dodeljivanjem vrednosti. Drugi princip, varijacija, imitira prirodnu mogućnost stvaranja novih živih bića, pomoću rekombinacije i mutacije. Iako su osnovni principi jednostavni, ovi algoritmi su se dokazali kao opšti, robusni i moćni mehanizam pretraživanja. Autori rada [13] ističu da je najznačajnija prednost primene evolucionih algoritama mogućnost prilagođavanja zadatku i fleksibilnost u kombinaciji sa robusnim performansama i karakteristikama globalne pretrage.

Genetički algoritmi su jedni od najstarijih i najrasprostranjenijih metaheurističkih algoritama, koji su zasnovani na prirodnoj selekciji i genetici [15]. GA kombinuje koncept „preživljavanja“ najboljeg među rešenjima sa struktuiranom, a ipak slučajnom, razmenom informacija i stvaranjem potomaka. GA podrazumeva iterativno ponavljanje sledećih koraka: generisanje jedinki u populaciji, evaluacija funkcije cilja, selekcija, ukrštanje i mutacija, u cilju dobijanja optimalnih alternativnih rešenja problema uz poštovanje zadatih kriterijuma. GA pokazuje implicitni paralelizam, u smislu da ne ocenjuje i ne poboljšava jedno rešenje, već istovremeno analizira i modifikuje skup mogućih rešenja. Slučajnom inicijalizacijom operator selekcije može da odabere relativno bolja rešenja, operator ukrštanja generiše nova rešenja koja će zadržati dobre osobine roditelja, dok operator mutacije može da poboljša raznolikost i na taj način pruži mogućnost sprečavanja konvergencije algoritma ka lokalno optimalnom rešenju.

U radu [16] je prikazana primena GA na job-shop tip terminiranja, koja predstavlja unapređenu verziju prethodno razvijenog algoritma primenjenog na statički job-shop problem, i odnosi se na kontinualan dolazak novih delova u tehnološki sistem. Autori rada daju prikaz dva pristupa u rešavanju dinamičkog terminiranja, uzimajući u obzir deterministički i stohastički pristup u modeliranju ovog problema.

U procesu dobijanja optimalnog rešenja, razmatrano je sledećih šest funkcija cilja: vreme transportnih tokova materijala, maksimalno vreme kašnjenja, vreme kašnjenja, vreme definisano zadatim rokom, broj delova koji kasne i zbir vremena kašnjenja i vremena roka završetka, uz napomenu da su sve funkcije cilja osim maksimalnog vremena kašnjenja ponderisane. U poređenju sa pristupom baziranom na pravilima prioriteta, eksperimentalni rezultati pokazuju značajno

poboljšanje performansi u dobijanju optimalnih vrednosti funkcija cilja i robusnost predloženog algoritma u terminiranju tehnoloških sistema.

U radu [17], GA su korišćeni za dobijanje inicijalnog plana terminiranja, dok su novi algoritmi predloženi za njihovo reterminiranje. Razmatrana su četiri poremećajna faktora koja se najčešće javljaju u tehnološkim sistemima: prestanak rada mašine alatke, povećan nivo prioriteta za delove, neodložan dolazak novih delova u sistem i otkazivanje delova čija je obrada u toku. Predloženi algoritmi reterminiranja uzimaju u obzir status tehnološkog sistema u trenutku nastanka poremećaja i na osnovu njega generišu nove optimalne planove terminiranja bez potrebe za ponovnim evaluiranjem operacija koje su do tog trenutka izvršene, što je od izuzetnog značaja za dinamička okruženja i terminiranje operacija u realnom vremenu.

U radu [18] je predstavljen problem job-shop terminiranja koji se primenjuje na tehnološke procese u statičkim, dinamičkim i nedeterminističkim uslovima. Pokazana je primena GA, kao i način dekodiranja i generisanja hibridnih planova terminiranja neophodnih usled uticaja poremećajnih faktora. Efikasan proces dekodiranja, baziran na unapred definisanom pretraživanju, je predložen radi unapređenja performansi funkcija cilja pri generisanju optimalnog plana terminiranja. Konačno, ova metoda je testirana za problem terminiranja i reterminiranja u nedeterminističkom okruženju. Eksperimentalni rezultati su pokazali poboljšane karakteristike GA u poređenju sa konvencionalnim pristupima u pogledu vremena trajanja simulacije.

Autori rada [19] predlažu pristup baziran na GA u rešavanju problema terminiranja jedne mašine alatke, na kojoj se obrada delova vrši u skladu sa definisanim rokovima. U radu se analiziraju tri modula: modul za pretprocesiranje (podrazumeva obradu ulaznih informacija, definisanje problema i parametara algoritma poput generisanja jedinki u inicijalnoj populaciji), modul za terminiranje (podrazumeva primenu genetičkih algoritama za dobijanje optimalnog rešenja determinističkog problema, pri čemu su tehničke karakteristike i geometrijska obeležja delova unapred poznati), kao i modul za dinamičku adaptaciju (usled nastanka poremećajnih faktora, problem se prvo generiše modulom za dinamičku adaptaciju, a zatim rešava modulom za terminiranje).

Ponovno terminiranje usled pojave poremećaja zasniva se na dva pristupa. Prvi pristup se bazira na zanemarivanju trenutne populacije i generisanju nove, pomoću modula za terminiranje koji se aktivira nakon nastanka poremećaja. U drugom slučaju, nova populacija se generiše kroz modifikaciju postojeće, tako što se u obzir uzimaju promene nastale usled uzastopnih

pojava poremećajnih faktora. Na taj način, modifikovanjem trenutnih jedinki u populaciji i uzimajući u obzir promene nastale usled poremećaja, omogućava se da modul terminiranja efikasno nastavi proces pretraživanja zasnovan na novoj modifikovanoj populaciji.

Istraživanja u radu [20] fokusirana su na problem naprednog dinamičkog planiranja i terminiranja tehnoloških procesa, koji podrazumeva efikasnu alokaciju proizvodnih resursa uz poštovanje tehnoloških ograničenja nastalih usled konstantnih dolazaka novih delova u sistem. U tom smislu, GA je razvijen u cilju dobijanja plana terminiranja tako da se obe funkcije cilja (vreme pripreme proizvodnje i vreme kašnjenja) minimizuju. Predložena metodologija je testirana na nizu primera, a numerički rezultati za prikazan reprezentativni primer potvrđuju opravdanost primene predložene metodologije.

Pored toga, strategija „zamrznutog“ intervala (engl. frozen interval) predstavlja ključni faktor u predloženom pristupu; za primer predstavljen u ovom radu, povećanjem „zamrznutog“ intervala, značajno poboljšanje stabilnosti plana terminiranja opravdava neznatno pogoršanje efikasnosti.

Istraživanja u radu [21] prikazuju uspešnu primenu pristupa baziranog na korišćenju GA u optimizaciji energetske funkcije cilja pri višeprocorskom terminiranju u realnom vremenu, sa ograničenjima u pogledu resursa i vremena. U tom smislu, razvijena je nova metodologija kreiranja genotipa u cilju predstavljanja dinamičkih planova terminiranja realnih sistema (misli se na dolazak novih delova u sistem). Rezultati eksperimenta pokazuju da se na osnovu predloženog pristupa ostvaruje brža konvergencija i generišu ostvarivi planovi terminiranja boljih performansi.

Istraživanja u radu [15] fokusiraju se na primenu unapredene verzije GA (engl. Novel Genetic Algorithm – NGA), sa posebnim akcentom na način kodiranja hromozoma pri fleksibilnom job-shop terminiranju, a u cilju rešavanja jednog od najčešćih problema u realnim tehnološkim sistemima – prestanka rada mašine alatke. NGA je upoređen sa sledeća dva konvencionalna pristupa: pristupom baziranim na odlaganju operacija koje su bile u toku u trenutku prekida rada mašine alatke i pristupom koji razmatra svaki od scenarija prekida nezavisno tretirajući ih kao predviđene zastoje. Na osnovu sprovedenih eksperimenata, NGA je pokazao značajno bolje rezultate u odnosu na pomenute pristupe u smislu minimizacije ukupnog vremena neophodnog za obradu svih delova čije se terminiranje vrši (engl. makespan).

Ranija istraživanja su pokazala da kombinacija strategije klizećih prozora (engl. rolling scheduling strategy) i GA uspešno rešava problem dinamičkog

fleksibilnog job-shop tipa terminiranja. Iz tog razloga, autori rada [22] predlažu novu strategiju za DIPPS baziranu na strategiji klizećih prozora i unapređenom GA (engl. Improved Genetic Algorithm – IGA) za rešavanje problema nastalih usled dejstva dva poremećajna faktora: dolazak novog dela i prestanak rada mašine alatke. Za poboljšanje sposobnosti pretrage predloženog IGA algoritma, razvijeni su specijalni operatori genetičkih algoritama; konkretno, za poboljšanje performansi lokalnog pretraživanja korišćen je operator mutacije za slučajnu pretragu prostora mogućih rešenja. Eksperiment je podrazumevao poređenje predloženog algoritma na različitim „benchmark“ problemima, u cilju potvrđivanja njegovih performansi, a rezultati pokazuju da takav pristup može efikasno da reši DIPPS problem uz ostvaren zadovoljavajući nivo poboljšanja funkcije cilja.

U radu [23] se razmatra robusnost i stabilnost fleksibilnog job-shop tipa terminiranja usled prestanka rada mašine alatke, primenom višekriterijumske optimizacije bazirane na GA u dve faze. U prvoj fazi se generiše optimalan inicijalni plan terminiranja, u cilju minimizacije ukupnog vremena potrebnog za obradu svih delova (engl. makespan), gde su svi podaci deterministički, a poremećajni faktori nisu razmatrani; druga faza podrazumeva generisanje optimalnog plana terminiranja, nakon nastanka poremećaja (prekid rada slučajno odabrane mašine alatke), uzimajući u obzir sledeće dve funkcije cilja: makespan i stabilnost. Od predložena dva pristupa (NSGA-II i NPGA), primenom ANOVA statističke metode je pokazano da NPGA algoritam daje bolje rezultate u pogledu robusnosti i stabilnosti planova terminiranja.

4.2.2. Algoritmi bazirani na inteligenciji roja

Sa druge strane, algoritmi bazirani na inteligenciji roja, kao što su algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica (engl. Particle Swarm Optimization – PSO), algoritam inspirisan kolonijom mrava (engl. Ant Colony Optimization – ACO), algoritam inspirisan kolonijom svitaca (engl. Firefly Optimization Algorithm – FOA), algoritam inspirisan inteligencijom mravolovaca (engl. Ant Lion Optimizer – ALO), algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova (engl. Grey Wolf Optimizer – GWO), algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova (engl. Whale Optimization Algorithm – WOA), su modelirani na bazi interakcije između čestica roja tj. mogućih rešenja. Nakon završetka procesa optimizacije, individua sa najboljom funkcijom cilja iz populacije se bira za optimalno rešenje.

Cilj istraživanja u radu [24] je da se identifikuju različite primene optimizacionog algoritma inspirisanog kolonijom mrava (engl. Ant Colony Optimization – ACO) u oblasti dinamičkog job-shop terminiranja

tehnoloških procesa. ACO algoritam je testiran u tehnološkom sistemu za tri nivoa iskorišćenosti mašina alatki, tri različita tipa raspodela kojima se modeliraju vremena obrade, kao i tri različita kriterijuma performansi u odabiru optimalnog plana terminiranja. Performanse ACO algoritma, u smislu srednjeg vremena transportnih tokova materijala, srednjeg vremena kašnjenja, i ukupne propusne moći u različitim eksperimentalnim okruženjima, upoređuju se sa onima baziranim na dispečarskim pravilima i FIFO (engl. first-in-first-out) konceptu. U cilju identifikacije najbolje ACO strategije i dispečarskih pravila, izvode se dve serije eksperimenata; dobijeni rezultati su kasnije upoređeni za različita vremena obrade. Eksperimentalni rezultati pokazuju da ACO nadmašuje druge pristupe u slučajevima kada iskorišćenost mašine alatke ili promena vremena obrade nije značajna.

Takođe, pristup baziran na ACO algoritmu, gde se dinamička priroda poremećaja opisuje slučajnim dolaskom delova u sistem, razmatran je u radu [25]. Obezbeđivanje optimalnog plana terminiranja vršeno je modelima koji kombinuju dispečarska pravila, zadate rokove i transportne tokove delova, uz minimizaciju tri funkcije cilja vezane za rokove završetka. Eksperimentalni rezultati su pokazali da u poređenju sa GA, integrisan pristup baziran na ALO algoritmu obezbeđuje globalno bolje planove terminiranja.

Autori rada [26] fokusiraju se na efikasnom rešavanju problema terminiranja i reterminiranja tehnološkog sistema, baziranom na primeni dvofaznog algoritma inspirisanog rojem pčela (engl. Two-stage Artificial Bee Colony – TABC). Problem je modeliran kao fleksibilni job-shop tip terminiranja i podeljen je u dve faze: (i) terminiranje tehnoloških procesa i (ii) reterminiranje u slučaju dolaska novog dela u sistem. Cilj optimizacije je ostvarivanje minimalnog vremena potrebnog za obradu svih delova (engl. makespan). Pored novog pravila za inicijalizaciju populacije roja pčela, predlaže se i poboljšanje performansi algoritma kolektivnim lokalnim pretraživanjem (engl. an ensemble local search). Razmatrane su i upoređene tri strategije reterminiranja, a eksperimenti se izvode koristeći referentne reprezentativne „benchmark“ primere. Za performanse novog plana terminiranja, TABC algoritam se upoređuje sa šest jednostavnih heurističkih algoritama. Rezultati pokazuju da je TABC efikasan u obe faze terminiranja i reterminiranja tehnoloških sistema.

U svojim daljim istraživanjima, autori rada [27] produbljuju problem fleksibilnog job-shop tipa terminiranja, usvajajući pored problema dolaska novog dela u tehnološki sistem i ograničenje u pogledu fazi vremena obrade delova. U cilju minimizacije maksimalnog fazi vremena potrebnog za obradu svih delova, predložena je primena unapređenog TABC algoritma, a čiji su rezultati poređenja, u odnosu na

sedam postojećih algoritama za pet referentnih slučajeva, pokazali uspešnost rešavanja ove vrste problema.

Istraživanja u radu [28] predstavljaju primenu algoritma inspirisanog inteligencijom roja čestica – PSO u cilju rešavanja IPPS i DIPPS problema. Novi pristup podrazumeva dve faze: fazu planiranja (gde se generiše mreža tehnoloških procesa svih delova uzimajući u obzir status statičkog tehnološkog okruženja) i završnu fazu (gde se istovremeno kreiraju tehnološki procesi obrade delova i planovi terminiranja na osnovu trenutnog statusa tehnološkog sistema). Predložen je diskretni PSO (DPSO) algoritam u kojem čestice ažuriraju svoje položaje na osnovu prethodnog sopstvenog najboljeg položaja (pbest) i najboljeg položaja cele populacije (gbest). I u ovom radu se analiziraju dva dinamička poremećaja, otkaz mašine alatke i neodložan dolazak novog dela u sistem. U cilju sprečavanja lokalne konvergencije algoritma u ranim fazama optimizacije, predloženo je uvođenje operatora mutacije, kao i čuvanje više od jednog elitnog rešenja u eksternoj arhivi i njihov slučajan odabir za dalje faze optimizacije.

4.3. Hibridni pristupi

Hibridni pristupi podrazumevaju integraciju dva ili više algoritama za rešavanje DIPPS problema, koristeći najbolje individualne karakteristike svakog od algoritama, u cilju ostvarivanja boljih performansi dobijenih rešenja. Neki od hibridnih pristupa u rešavanju DIPPS problema baziraju se na MAS i ACO algoritmima, BCO i TS, hibridnim genetičkim algoritmima, o kojima će biti više reči u nastavku.

Za rešavanje DIPPS problema, autori rada [29] predlažu integrisanu primenu multiagentnog sistema i heurističkih algoritama, koji ne samo da uspešno rešava problem prisustva poremećajnih faktora, poput prekida rada mašine alatke i prioritete obrade delova, već omogućava efikasnu pretragu (približno) optimalnih rešenja problema. Eksperimentalni rezultati pokazuju uspešnu primenu algoritma inspirisanog kolonijom mrava (engl. Ant Colony Optimization algorithm – ACO), koja se ogleda u poboljšanju fleksibilnosti i prilagodljivosti na nove dinamičke poremećaje. Ukoliko takvi poremećaji nastanu, potrebno je definisati odgovarajuću ontologiju, odnosno formirati i registrovati novi model agenata, kao i definisati modul koji obuhvata te promene.

Hibridni pristup za planiranje i terminiranje tehnoloških sistema u dinamičkim uslovima (razmatrani su obrada dela u skladu sa definisanim prioritetima, otkaz dela i prekid rada mašine alatke), baziran na multiagentnom sistemu – MAS i algoritmu inspirisanom kolonijom mrava – ACO (engl. Hybrid MAS/ACO – HMA), predstavljen je u radu [30]. Arhitektura MAS

je generisana tako da unapredi proces pretraživanja mogućih rešenja komunikacijom između agenata, dok karakteristike ACO algoritma, implementiranog u MAS, poboljšavaju performanse plana terminiranja. Mehanizam akumulacije i isparavanja feromona ugrađen je u modele odlučivanja agenata koji predstavljaju mašine alatke. Planovi terminiranja se dobijaju komunikacijom i pregovorima između agenata, dok se problem reterminiranja rešava na osnovu diferencirane mape feromona generisane prethodno pomenutim mehanizmom. Rezultati eksperimenata pokazuju da je predloženi iterativni pristup baziran na verovatnoći, za razliku od tradicionalnih pristupa zasnovanih na determinističkim pregovorima, konkurentan u smislu kompjuterski efikasnog dobijanja optimalnih planova terminiranja sa minimalnim vremenom (engl. makespan).

Hibridni pristup u radu [31] podrazumeva primenu algoritma baziranog na inteligenciji roja pčela i tabu pretrage za razvijanje matematičkog modela, u cilju efikasnog rešavanja fleksibilnog job-shop tipa terminiranja u dinamičkim uslovima. Rulet metoda za grupisanje klastera se predlaže za uspešnu optimalnu inicijalizaciju populacije, dok se operator ukrštanja uvodi za aktivne pčele radi poboljšanja funkcije eksploatacije. Efektivnost i efikasnost ovakvog hibridnog pristupa, kao i sposobnost eksploatacije i pouzdanost performansi, dokazani su nizom sprovedenih eksperimenata i izvedenih poređenja dobijenih rezultata sa referentnim problemima iz literature. Predloženi algoritam, testiran na tri strategije reterminiranja, je primenjen za rešavanje realnog fleksibilnog job-shop tipa terminiranja u proizvodnji tekstila.

Inspirisana metodom optimizacije, u radu [32] je predstavljena i usvojena strategija periodičnog reterminiranja zasnovana na događajima. Autori predlažu hibridni pristup baziran na genetičkim algoritmima i dispečarskim pravilima za job-shop tip terminiranja uzimajući u obzir priprema vremena koja zavise od sekvence i ograničenja u vidu zadatih rokova. Rezultati simulacije pokazuju da predložena strategija redukuje veličinu problema, prati promene u tehnološkom sistemu i postiže bolje rezultate terminiranja od statičkih, kao i da je pogodna za kompleksnije probleme u realnim tehnološkim sistemima.

Istraživanja u radu [33] fokusiraju se na robusnost i stabilnost fleksibilnih job-shop planova terminiranja u cilju održavanja predviđenog plana terminiranja, usvajajući „makespan“ kao funkciju cilja. Predložen je pristup baziran na hibridnom genetičkom algoritmu (engl. Hybrid Genetic Algorithm – HGA), koji se sastoji iz dve faze. Primarni cilj je da se u toku prve faze, minimizirajući vreme potrebno za obradu svih delova, sistem posmatra kao deterministički bez očekivanih poremećaja. Druga faza (faza dekodiranja) podrazumeva optimizaciju dvokriterijumske funkcije

cilja i integraciju zadataka mašina i redosleda operacija u skladu sa očekivanim prestankom rada mašine alatke. Efekti različitih kriterijuma performansi su analizirani primenom ANOVA statističke metode, a predloženi pristup je upoređen sa tri postojeća pristupa. Ostvareni planovi terminiranja su optimalni u pogledu efikasnog iskorišćenja proizvodnih resursa, kao i sa aspekta fleksibilnosti prilagođavanja na dinamičke promene.

Pristup baziran na hibridnom GA-TS algoritmu u višekriterijumskom dinamičkom terminiranju tehnoloških procesa predložen je u radu [34]. Analizirana su dva dinamička poremećaja, dolasci novih delova u sistem i otkaz mašina alatki, uzimajući u obzir dva kriterijuma performansi: efikasnost i stabilnost plana terminiranja. Nova struktura kodiranja hromozoma, sa operatorima ukrštanja i mutacije, uspešno je primenjena na rešavanje razmatranog problema.

Zbog svoje izražene sposobnosti pretrage, za rešavanje DIPPS problema, autori rada [8] predlažu pristup baziran na hibridnom genetičkom algoritmu sa pretragom promenljivih susedstava (engl. A hybrid Genetic Algorithm with Variable Neighborhood Search – GAVNS) i na strategiji ključnih prozora. Razvijeni model DIPPS problema podrazumeva da se reterminiraju samo operacije dela u trenutno posmatranom prozoru. U tom smislu, izvršeno je nekoliko eksperimenata koji podrazumevaju poređenje predloženog pristupa sa referentnim problemima iz ranijih istraživanja, u cilju potvrde uspešne primene hibridnog algoritma u rešavanju DIPPS problema. Glavni doprinosi ovog istraživanja ogledaju se u unapređenju efikasnosti plana terminiranja. Performanse pretrage GAVNS su upoređene sa IGA algoritmom i pokazuju bolje rezultate, a glavni razlog za to je što GAVNS ima dve efikasne strukture susedstva za lokalnu pretragu i bolju sposobnost pretrage. Izvršeno je i poređenje DIPPS sa DJSP (engl. Dynamic Job-shop Scheduling Problem) i DFJSP (engl. Dynamic Flexible Job-shop Scheduling Problem) i izveden je zaključak da DIPPS problem ima bolju prilagodljivost dinamičkim promenama u tehnološkom sistemu u odnosu na DJSP i DFJSP.

Istraživanja u radu [35] pokazuju primenu hibridnog genetičkog algoritma u cilju minimizacije ukupnog vremena potrebnog za obradu svih delova. Razvijena je nova heuristika, zasnovana na tri koraka, koja je kombinovana sa GA za rešavanje DJSSP. U tim koracima se daje prednost pri dodeljivanju operacija mašinama alatkama u pogledu dužine trajanja vremena obrade, dok se u sledećem dodeljivanju operacija mašinama prioritet daje delu čija je prethodna operacija ranije završena. U cilju zadržavanja najbolje reprezentativne inicijalne populacije, dobro poznata dispečarska pravila su integrisana sa GA. Generisani su

različiti referentni problemi, uzimajući u obzir različiti broj delova, broj mašina alatki i različite dinamičke događaje. Numerički eksperimenti su sprovedeni u cilju evaluacije funkcija cilja i ocene performansi predloženog hibridnog pristupa. Eksperimentalni rezultati ukazuju na to da se primenjenom metodologijom ostvaruju bolja rešenja za dobro poznate referentne probleme iz literature, u pogledu kvaliteta ostvarenih rešenja i CPU vremena.

Nova strategija reterminiranja usled uticaja dinamičkih poremećaja, bazirana na hibridnom inteligentnom algoritmu unapređenom osobinama GA i TS, predložena je u radu [36]. U cilju matematičkog modeliranja dinamičkih poremećaja, generisana je simulacija pomenutih faktora. Kriterijumi performansi koji su razmatrani u radu su: srednje i maksimalno vreme transportnih tokova materijala, srednje i maksimalno kašnjenje, kao i broj delova koji kasne.

U svakom momentu kad je neophodno vršiti reterminiranje na osnovu predložene šeme hibridnog inteligentnog algoritma, simulacija generiše dinamičke poremećaje za sledeći korak. Eksperimenti su podrazumevali poređenje performansi razvijene strategije reterminiranja u odnosu na već postojeće pristupe iz literature u različitim uslovima tehnoloških sistema. Rezultatima je pokazano da je novorazvijena strategija superiornija u odnosu na druge u pogledu robusnosti u dinamičkim tehnološkim sistemima, uzimajući u obzir pet funkcija cilja, različite nivoe opterećenja sistema i različite rokove dospeća.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je dat prikaz stanja u oblasti istraživanja integrisanog planiranja i terminiranja tehnoloških sistema u dinamičkom okruženju, odnosno reterminiranja tehnoloških procesa u slučaju nastanka različitih poremećaja. Predstavljen je matematički model za rešavanje DIPPS problema u slučaju nastanka tri najčešća poremećaja: dolazak novog dela u tehnološki sistem, prestanak rada mašine alatke i otkaz obrade dela.

Razmatrani su različiti pristupi u rešavanju DIPPS problema bazirani na multiagentnim sistemima i na algoritmima, od kojih su posebno predstavljeni evolucionarni algoritmi, i to genetički algoritmi kao najzastupljeniji i najčešće primenjivani, algoritmi bazirani na inteligenciji roja, kao i hibridni pristupi.

Na kraju, autori rada dolaze do operativnog zaključka da je primena pomenutih pristupa veoma uspešna u rešavanju analiziranog kompleksnog kombinatorno-optimizacionog problema, a ujedno je od izuzetnog značaja i za njihov pravilan izbor tokom budućeg integrisanog planiranja i terminiranja tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima (DIPPS), jer je

moгуćnost uvođenja široko zastupljena u digitalizovanim proizvodnim tehnologijama 21. veka, posebno u okviru Industrije 4.0.

6. ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru istraživanja na potprojektu „Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva - Duboko mašinsko učenje inteligentnih tehnoloških sistema u proizvodnom mašinstvu“, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije (ugovor br. 451-03-68/2020-14/200105), kao i na projektu VI – MISSION4.0 (evidencioni broj: 6523109) koji je finansijski podržan od strane Fonda za nauku Republike Srbije, 2020.

LITERATURA

- [1] M. Petrović, *Veštačka inteligencija u projektovanju inteligentnih tehnoloških sistema*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2016.
- [2] M. Petrović, N. Vuković, M. Mitić, and Z. Miljković, Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm, *Expert Syst. Appl.*, vol. 64, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.08.019.
- [3] M. Petrović, M. Mitić, N. Vuković, and Z. Miljković, Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 85, no. 9–12, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7991-4.
- [4] Z. Miljković and M. Petrović, Application of modified multi-objective particle swarm optimization algorithm for flexible process planning problem, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, 2016, doi: 10.1080/0951192X.2016.1145804.
- [5] R. K. Phanden and A. Jain, Integration of Process Planning and Scheduling: Introduction, in *Integration of Process Planning and Scheduling: Approaches and Algorithms*, 2019.
- [6] B. R. Babić, *Računarski integrisani sistemi i tehnologije*. Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, 2017.
- [7] S. Lv and L. Qiao, Process planning and scheduling integration with optimal rescheduling strategies, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 7, pp. 638–655, 2014, doi: 10.1080/0951192X.2013.834468.
- [8] H. Xia, X. Li, and L. Gao, “A hybrid genetic algorithm with variable neighborhood search for dynamic integrated process planning and scheduling,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 102, pp. 99–112, 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.10.015.

- [9] M. E. Aydin and E. Öztemel, "Dynamic job-shop scheduling using reinforcement learning agents," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 33, no. 2–3, pp. 169–178, 2000, doi: 10.1016/S0921-8890(00)00087-7.
- [10] Y. Z. Wei and M. Y. Zhao, Reinforcement learning-based approach to dynamic job-shop scheduling, *Zidonghua Xuebao/Acta Autom. Sin.*, vol. 31, no. 5, pp. 765–771, 2005.
- [11] T. N. Wong, C. W. Leung, K. L. Mak, and R. Y. K. Fung, Integrated process planning and scheduling/rescheduling - An agent-based approach, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 44, no. 18–19, pp. 3627–3655, 2006, doi: 10.1080/00207540600675801.
- [12] Y. Liu, L. Wang, Y. Wang, X. V. Wang, and L. Zhang, Multi-agent-based scheduling in cloud manufacturing with dynamic task arrivals, *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 953–960, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.138.
- [13] T. Bäck, U. Hammel, and H. P. Schwefel, Evolutionary computation: Comments on the history and current state, *Evol. Comput. Foss. Rec.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 1998, doi: 10.1109/9780470544600.ch1.
- [14] C. A. C. Coello, G. B. Lamont, and D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2007.
- [15] Y. M. Wang, H. L. Yin, and K. Da Qin, "A novel genetic algorithm for flexible job shop scheduling problems with machine disruptions," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, no. 5–8, pp. 1317–1326, 2013, doi: 10.1007/s00170-013-4923-z.
- [16] S. Lin, E. Goodman, and W. Punch, A Genetic Algorithm Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problem., *Icga*, pp. 481–488, 1997.
- [17] A. K. Jain and H. A. Elmaraghy, Production scheduling/rescheduling in flexible manufacturing, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 35, no. 1, pp. 281–309, 1997, doi: 10.1080/002075497196082.
- [18] C. Bierwirth and C. Mattfeld, Dirk, Production scheduling and rescheduling with genetic algorithms, *Evol. Comput.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–17, 1999, doi: 10.1007/3-540-60286-0_120.
- [19] A. Madureira, A Genetic Approach for Dynamic Job-Shop Scheduling Problems, *MIC'2001 - 4th Metaheuristics International Conference*, no. March, pp. 41–46, 2001.
- [20] K. J. Chen and P. Ji, A genetic algorithm for dynamic advanced planning and scheduling (DAPS) with a frozen interval, *Expert Syst. Appl.*, vol. 33, no. 4, pp. 1004–1010, 2007, doi: 10.1016/j.eswa.2006.08.025.
- [21] S. C. Cheng, D. F. Shiau, Y. M. Huang, and Y. T. Lin, Dynamic hard-real-time scheduling using genetic algorithm for multiprocessor task with resource and timing constraints, *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 852–860, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007-10.037.
- [22] L. Yin, L. Gao, X. Li, and H. Xia, An improved genetic algorithm with rolling window technology for dynamic integrated process planning and scheduling problem, *Proc. 2017 IEEE 21st Int. Conf. Comput. Support. Coop. Work Des. CSCWD 2017*, pp. 414–419, 2017, doi: 10.1109/CSCWD.2017-8066730.
- [23] S. M. Sajadi, A. Alizadeh, M. Zandieh, and F. Tavan, Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns: multi-objectives genetic algorithm approach, *Int. J. Math. Oper. Res.*, vol. 14, no. 2, pp. 268–289, 2019, doi: 10.1504/IJ-MOR.2019.097759.
- [24] R. Zhou, A. Y. C. Nee, and H. P. Lee, Performance of an ant colony optimisation algorithm in dynamic job shop scheduling problems, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 11, pp. 2903–2920, 2009, doi: 10.1080/0020-7540701644219.
- [25] H. I. Demir and C. Erden, Dynamic integrated process planning, scheduling and due-date assignment using ant colony optimization, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 149, no. September, p. 106799, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106799.
- [26] K. Z. Gao, P. N. Suganthan, T. J. Chua, C. S. Chong, T. X. Cai, and Q. K. Pan, A two-stage artificial bee colony algorithm scheduling flexible job-shop scheduling problem with new job insertion, *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 21, pp. 7652–7663, 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.06.004.
- [27] K. Z. Gao, P. N. Suganthan, Q. K. Pan, M. F. Tasgetiren, and A. Sadollah, Artificial bee colony algorithm for scheduling and rescheduling fuzzy flexible job shop problem with new job insertion, *Knowledge-Based Syst.*, vol. 109, pp. 1–16, 2016, doi: 10.1016/j.knosys.2016.06.014.
- [28] M. R. Yu, B. Yang, and Y. Chen, Dynamic integration of process planning and scheduling using a discrete particle swarm optimization algorithm, *Adv. Prod. Eng. Manag.*, vol. 13, no. 3, pp. 279–296, 2018, doi: 10.14743/apem2018.3.290.
- [29] G. Jezic, M. Kusek, N. T. Nguyen, R. J. Howlett, and L. C. Jain, A multi-agent system for dynamic integrated process planning and scheduling using heuristics, in *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 309–318.

- [30]S. Zhang and T. N. Wong, Flexible job-shop scheduling/rescheduling in dynamic environment: a hybrid MAS/ACO approach, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 11, pp. 3173–3196, 2017, doi: 10.1080/00207543.2016.1267414.
- [31]X. Li, Z. Peng, B. Du, J. Guo, W. Xu, and K. Zhuang, Hybrid artificial bee colony algorithm with a rescheduling strategy for solving flexible job shop scheduling problems, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 113, pp. 10–26, 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.09.005.
- [32]J. Fang and Y. Xi, A rolling horizon job shop rescheduling strategy in the dynamic environment, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 227–232, 1997, doi: 10.1007/BF01305874.
- [33]N. Al-Hinai and T. Y. Elmekawy, Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 132, no. 2, pp. 279–291, 2011, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.04.020.
- [34]L. Zhang, L. Gao, and X. Li, A hybrid genetic algorithm and tabu search for a multi-objective dynamic job shop scheduling problem, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 12, pp. 3516–3531, 2013, doi: 10.1080/00207543.2012.751509.
- [35]N. Kundakcı and O. Kulak, Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 96, pp. 31–51, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.03.011.
- [36]L. Zhang, L. Gao, and X. Li, A hybrid intelligent algorithm and rescheduling technique for job shop scheduling problems with disruptions,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 5–8, pp. 1141–1156, 2015, doi: 10.1007/s00170-012-4245-6.

SUMMARY

INTEGRATED PROCESS PLANNING AND SCHEDULING IN DYNAMIC ENVIRONMENT – THE STATE-OF-THE-ART

This paper gives a detailed state-of-the art in the research area of the important function of Intelligent Manufacturing Systems (IMS) – integrated process planning and scheduling of manufacturing systems in dynamic environment (DIPPS). Referring to this, description of the DIPPS problem is given, the criteria on the basis of which the optimal rescheduling plan are formulated and considered, the adopted assumptions are defined and the mathematical model of this problem is presented. Furthermore, the disturbances that occur in manufacturing systems are considered in detail: (i) machine breakdown, (ii) arrival of a new job and (iii) job cancellation. Approaches for solving DIPPS problems based on multi-agent systems as well as approaches based on algorithms are analyzed. When it comes to approaches based on algorithms, the focus of this paper is on biologically inspired optimization algorithms: evolutionary algorithms, swarm intelligence based algorithms as well as hybrid approaches. The critical analysis within this research area is shown in order to conclude that biologically inspired artificial intelligence techniques have great potential in optimizing the considered IMS function.

Key words: process planning and rescheduling, dynamic disruptions, optimization, multiagent systems, biologically inspired algorithms