



Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B.¹

METAHEURISTIČKI ALGORITMI OPTIMIZACIJE U TERMINIRANJU ROBOTIZOVANOG UNUTRAŠNJEG TRANSPORTA MATERIJALA²

Rezime

U ovom radu se analizira problem terminiranja mobilnog robota (MR) u cilju pronalaženja optimalnog načina opsluživanja mašina alatki u inteligentnom tehnološkom sistemu. Da bi se rešio ovaj NP-hard optimizacioni problem, koriste se različiti biološki inspirisani metaheuristički algoritmi optimizacije, poput algoritama inspirisanog inteligencijom roja čestica - Particle Swarm Optimization (PSO), algoritma inspirisanog inteligencijom jata kitova - Whale optimization algorithm (WOA) i modifikovanog WOA (mWOA). Najbolje performanse pokazao je algoritam mWOA, koji je biološki inspirisan algoritam zasnovan na principu lova jata grbavih kitova. Inteligentni tehnološki sistem korišćen za eksperimentalnu verifikaciju predloženog algoritma se sastoji od osam mašina alatki na kojima se vrši obrada tri dela, koji imaju pet tipova fleksibilnosti, dok se terminirani unutrašnji transport materijala u tehnološkom sistemu vrši jednim mobilnim robotom. Razvijeni algoritam je implementiran u MATLAB softverskom paketu.

Ključne reči: terminiranje tehnoloških procesa i transportnih sredstava, optimizacija, biološki inspirisani algoritmi, Whale optimization algorithm, Particle swarm optimization algorithm

1. UVOD

U tehnološkim sistemima XXI veka terminiranje proizvodnih resursa je jedan od važnih zadataka proizvodnih inženjera. Iz tog razloga, u ovom radu se analizira terminiranje jednog mobilnog robota (MR) koji vrši transport materijala u inteligentnom tehnološkom sistemu. Terminiranje je proces pronalaženja optimalne sekvence tehnoloških procesa i transporta materijala između mašina alatki na kojima se vrši obrada, koji zadovoljava određenu funkciju cilja. Razmatrani tehnološki sistem se sastoji od osam mašina na kojima je potrebno obraditi tri dela. Kako može postojati više tipova fleksibilnosti tehnoloških procesa [11], u okviru ovog rada su analizirane fleksibilnosti tehnološkog procesa, redosleda operacija, mašina alatki, alata i orijentacija alata. Zbog velikog broja alternativnih načina obrade delova, a samim tim i varijantnosti transportnih tokova kojima mobilni robot može transportovati deo kroz tehnološki sistem, ovaj tip problema pripada klasi NP-hard (engl. *non deterministic polynomial*) optimizacionih problema. Za rešavanje ovakvih problema najčešće se koriste metaheuristički algoritmi optimizacije. U tom smislu, u cilju rešavanja problema terminiranja mobilnog robota u tehnološkom sistemu, u ovom radu su korišćena tri optimizaciona algoritma Particle Swarm Optimization (PSO), Whale optimization algorithm (WOA) i modifikovani WOA (mWOA).

2. ANALIZA LITERATURNIH IZVORA

Metodologija za primenu MR u industrijskim uslovima je predmet analize u referencama [1,2]. U ovim radovima se analizira primena mobilnog robota za transport delova u procesu montaže pumpi u jednom tehnološkom okruženju. Zadatak robota je da iz skladišta dostavlja delove u njihova lokalna skladišta, odakle ih radnici preuzimaju i montiraju sklopove. Takođe, analizirana je vrsta komunikacije robota sa sistemom,

¹Aleksandar Jokić, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu - Mašinski Fakultet, jokic1.aleksandar@gmail.com,

dr Milica Petrović, docent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, mmpetrovic@mas.bg.ac.rs,

dr Zoran Miljković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, zmiljkovic@mas.bg.ac.rs,

dr Bojan Babić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, bbabic@mas.bg.ac.rs.

² Rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „Inovativni pristup u primeni inteligentnih tehnoloških sistema za proizvodnju delova od lima zasnovan na ekološkim principima“ (evid. br. TR-35004) Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije, 2011-2018.

korišćeni su QR kodovi za identifikaciju delova i estimaciju položaja kontejnera sa delovima. Kako se lokalna skladišta prazne tokom radnog dana, robot u svakom trenutku mora da planira koje će sledeće lokalno skladište dopuniti, uzimajući pri tome u obzir kriterijum minimalne potrošnje baterija. Za rešavanje ovog problema, autori su predložili heuristički genetički algoritam (GA) i metod MIP programiranja (engl. *Mixed-integer programming*). Eksperimentalni rezultati u realnom okruženju pokazuju opravdanost primene predložene metodologije bazirane na GA u određivanju optimalnog plana terminiranja, kao i implementacije mobilnog robota u rešavanju transportnih zadataka. U radu [3] se analizira terminiranje jedne robotizovane tehnološke ćelije. Razmatran je problem sa m mašina, n delova, i jednim MR koji ih opslužuje. Zadatak robota je da određeni deo skine sa mašine, odnese i postavi na sledeću mašinu alatku. Analiza je izvršena preko minimalnog seta delova (MPS) i sekvence kretanja robota (RMS). Za rešavanje ovog problema korišćen je MIP i hibridni metaheuristički algoritam, baziran na GA i *Taboo search* algoritmu. Funkcija cilja optimizacije u ovom radu je inverzna vrednost srednje vrednosti MPSa i RMSa. Rezultati simulacije pokazuju da se korišćenjem srednje vrednosti MPSa dobije u proseku 9% bolja vrednost funkcije cilja, u odnosu na korišćenje RMSa. Analiza jedne robotizovane tehnološke ćelije je predmet rada [4]. Pored svake mašine alatke se nalazi jedan industrijski robot koji je opslužuje. Takođe, u ovoj ćeliji se koristi jedan mobilni robot koji transportuje delove između mašina alatki i vrši paletizaciju na kraju procesa obrade. Problem je modeliran kao *job-shop* sa dodatnim ograničenjima vezanim za međuskladišta mašina. Razvijen je metaheuristički algoritam baziran na *Taboo search* i *Threshold Accepting* algoritmima, koji na efikasan način pronalazi približno optimalno rešenje. U radu [5] se analizira integrisano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa. Autori su u ovom radu predstavili način kodiranja i dekodiranja tehnoloških procesa, tako da se ti kodovi mogu koristiti za optimizaciju primenom biološki inspirisanih algoritama. U ovom radu razvijena su i implementirana četiri takva algoritma – chaotic particle swarm optimization algorithm (cPSO), simulated annealing (SA), genetic algorithm i hibridni GA-SA algoritam. Izvršeno je pet eksperimenata, a najbolje performanse je pokazao cPSO algoritam. Terminiranje mobilnog robota je predmet razmatranja u radu [6], gde autori predlažu tri biološki inspirisana algoritma za pronalaženje optimalnog rešenja plana terminiranja. Korišćeni su GA, PSO i Gray Wolf optimization (GWO) algoritam, koji su implementirani u MATLAB softverskom okruženju, a GWO se na kraju pokazao kao najbolji. Rešenje je verifikovano i u eksperimentalnom tehnološkom okruženju, a algoritam je implementiran na Khepera II inteligentnom mobilnom robotu.

Algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova (engl. *Whale optimization algorithm* - WOA), originalno predložen u [10], predstavlja jedan od novih biološki inspirisanih optimizacionih algoritama, koji je u kratkom periodu našao primenu u rešavanju mnogih inženjerskih problema. U referenci [7] autori su predstavili binarnu verziju WOA (bWOA) za rešavanje problema odabira karakterističnih objekata na slici, radi povećanja tačnosti klasifikacije slika. Binarna verzija algoritma je formirana korišćenjem „V“ prenosne funkcije. Razvijeni algoritam je testiran na 11 *benchmark* skupova slika, a radi poređenja korišćeni su i različiti alati za statističku analizu. Dobijeni rezultati ukazuju na to da je bWOA u stanju da minimizuje broj karakterističnih objekata i maksimizuje tačnost klasifikacije. U radu [8] je predstavljen algoritam za planiranje putanje mobilnog robota, koji se bazira na WOA. Predstavljenim algoritmom se vrši višekriterijumska optimizacija, gde su kriterijumi dužina puta i promena orijentacije robota (engl. *smoothness of the path*). Takođe, senzori robota su ograničenog dometa, okruženje je statičko, a poznati su samo položaj starta i cilja. Izvršeno je nekoliko eksperimenata i zaključeno da su performanse algoritama poboljšane u odnosu na višekriterijumski GA, koji je ranije korišćen za ovaj problem. Analiza primene WOA, u kombinaciji sa algoritmom baziranim na integrisanim pravilima za lokalno pretraživanje planova terminiranja *flow-shop* problema, izvršena je u [9]. Dodatno je analizirano vreme postavljanja delova na mašine alatke, a svakom delu je dodeljena određena karakteristika koja ukazuje na način i vreme potrebno da bi se izvršilo postavljanje i stezanje. Rezultati ukazuju da je primena WOA za ovakvu vrstu problema optimalna sa aspekta tačnosti i vremena izvršavanja algoritma.

3. DEFINISANJE PROBLEMA

U ovom radu je analizirano terminiranje mobilnog robota, koji u tehnološkom okruženju opslužuje osam mašina alatki na kojima se vrši obrada tri dela [5]. Postoji pet tipova fleksibilnosti tehnoloških procesa koji se razmatraju u ovom radu. Svaki deo ima alternativne tehnološke procese, tj. alternativne načine izvršavanja tehnoloških procesa, dok se svaki tehnološki proces može izvršiti na alternativnim mašinama alatkama, korišćenjem različitih alata i orijentacija alata. Različite orijentacije alata odgovaraju korišćenju različitih pribora za stezanje i pozicioniranje. Način kodiranja i dekodiranja vektora, kojima se reprezentuje svaki alternativni način obrade, se može videti u [5]. Vremena obrade za svaku alternativu obrade, kao i vreme transporta između mašina, se može pronaći u literaturi [5]. Alternativni tehnološki procesi su definisani preko AND/OR konektora [5].

Osnovne pretpostavke vezane za početno stanje i promenu stanja tehnološkog sistema:

- Sve mašine u početnom trenutku su slobodne, a robot se nalazi kod mašine 1,
- Delovi su u početnom trenutku na mašini predviđenoj za njihovu prvu operaciju,
- Vreme postavljanja dela na mašinu i vreme za promenu orijentacije dela su konstantne vrednosti,
- Sledeća operacija dela ne može da počne dok se prethodna ne završi, i
- Robot u svakom trenutku može vršiti transport samo jednog dela.

3.1 Funkcije cilja

U zavisnosti od toga šta je prioritet zadatog sistema, mogu se definisati različite funkcije cilja. U ovom radu su razmatrane sledeće četiri funkcije cilja: (i) minimalno vreme obrade delova, (ii) minimalno vreme završetka rada robota, (iii) ukupno vreme obrade delova i vreme čekanja delova na mobilni robot i (iv) ukupno vreme obrade delova i vreme čekanja mobilnog robota.

Kada je potrebno izvršiti obradu svih delova u što kraćem periodu, kao kriterijum se koristi ukupno vreme obrade delova (jednačina 1), dok je funkcija cilja definisana jednačinom (2):

$$TWPT = \sum_{i=1}^n TW(i) + \sum_{j=1}^m TT(j) + \sum_{k=1}^o TCT(k) + \sum_{l=1}^p SCT(l) \quad (1)$$

gde je:

- TW - vreme obrade delova,
- TT - vreme transporta između mašina alatki,
- TCT - vreme izmene alata,
- SCT - vreme izmene orijentacije alata,
- n - broj operacija koje su izvršene,
- m - broj puta koliko je deo bio transportovan,
- o - broj izmena alata, i
- p - broj izmena orijentacija alata.

$$f_1 = \min(TWPT) \quad (2)$$

Kako sistem za napajanje mobilnog robota može biti ograničavajući faktor pri izvršavanju zadataka transporta u tehnološkom sistemu, na osnovu jednačina (3) i (4), određuje se funkcija cilja minimalnog vremena završetka rada robota (jednačina 5),

$$RWT = \sum_{i=1}^{m_1} RAT(i) - PFT(i) \quad (3)$$

$$FRFT = RWT + \sum_{j=1}^m RTT(j) \quad (4)$$

gde je:

- $RAT(i)$ - vreme dolaska robota do mašine na kojoj se obrađuje deo,
- $PFT(i)$ - vreme završetka operacije dela na mašini do koje je robot došao,
- RWT - vreme čekanja robota,
- $RTT(j)$ - vreme transporta za svaku operaciju robota, i
- m_1 - broj puta koliko je robot čekao.

$$f_2 = \min(FRFT) \quad (5)$$

Ukoliko je potrebno da se, pored ukupnog vremena obrade delova, minimizira i vreme čekanja delova na mobilni robot, funkcija cilja je definisana jednačinom (7),

$$PWT = \sum_{i=1}^{n_1} RFT(i) - PFT(i) \quad (6)$$

gde je:

- $PFT(i)$ - vreme završetka prethodne operacije dela, i

- n_1 - broj puta kada je došlo do čekanja dela.

$$f_3 = \min(TWPT + PWT) \quad (7)$$

Ako je potrebno da iskorišćenje robota bude maksimalno, jedan od načina da se to izvrši je da se minimizira vreme čekanja robota. U tom smislu, funkcija cilja koja obuhvata vreme čekanja robota i ukupno vreme obrade dela je data jednačinom (8).

$$f_4 = \min(TWPT + RWT) \quad (8)$$

4. ALGORITAM INSPIRISAN INTELIGENCIJOM JATA KITOVA

Algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova (engl. *Whale optimization algorithm* - WOA) je jedan od biološki inspirisanih algoritama optimizacije baziran na načinu lova jedne vrste kitova, grbavi kit. Grbavi kit je grabljivica i obično lovi i hrani se jatima malih riba ili škampa. Način na koji ovaj kit vrebava svoj plen je jedinstven u životinjskom carstvu, a otuda i inspiracija za razvoj ovog algoritma. Prvi deo lova je traženje plena, što su obično jata riba koja se nalaze blizu površine. Kada kit uoči plen, prvo zaranja i približava se meti, pravi spirale oko jata, polako izranja i ispušta mehuriće (ovaj manevar je ilustrovan na slici 1). Mehurići imaju ulogu da dezorijentišu jato dok im se kit polako približava. Ova tri manevara lova su matematički modelirana i predstavljaju bazu ovog algoritma optimizacije.



Slika 1. Način lova grbavog kita [10]

4.1 Traženje plena (faza eksploracije)

Kako algoritam ne bi konvergirao ka prvom, potencionalnom lokalnom minimumu, potrebno da je da postoji faza koja će na određeni način istražiti veći deo prostora i pronaći poziciju u neposrednoj blizini globalnog minimuma. U WOA algoritmu ova faza je modelirana preko faze traženja plena. Matematički model traženja plena (jednačine 9 i 10) je definisan tako da se svaki agent (kit) može približavati bilo kom drugom agentu. Na taj način se dobije haotično kretanje kitova po celom prostoru i traženje približnih pozicija globalnog minimuma,

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}_{\text{rand}} - \bar{X} \right| \quad (9)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_{\text{rand}} - \bar{A} \bar{D} \quad (10)$$

gde je:

- t - trenutna iteracija algoritma,
- \bar{A}, \bar{C} - koeficijenti (biće objašnjeni u poglavlju 4.2),
- \bar{X} - trenutna vrednost funkcije cilja,
- \bar{X}_{rand} - slučajno izabran drugi kit ka kome se približava trenutni, i
- \cdot je predstavljeno množenje svakog elementa vektora.

Kada se završi faza eksploracije i pronađe pozicija koja je u neposrednoj blizini globalnog minimuma, počinje faza eksploatacije. Kada bi se napravila paralela sa prirodom ponašanja kitova, ovaj deo algoritma je vezan za trenutak kada kitovi nađu svoj plen i krenu u fazu lova. Kako se kitovi u isto vreme približavaju i

kruže oko plena, ovaj deo algoritma je podeljen na dva dela približavanje plenu i kruženje oko plena. Da bi se ova faza matematički modelovala, koristi se parametar $p \in [0, 1]$, koji je slučajan broj koji podleže uniformnoj raspodeli. Ukoliko je $p < 0.5$, izvršava se približavanje plenu, a ukoliko je $p \geq 0.5$, agenti (kitovi) prate spiralnu putanju oko plena.

4.2 Približavanje plenu

Kako u prostoru koji se istražuje optimalna vrednost funkcije cilja nije poznata, u ovom delu algoritma agenti pretpostavljaju da je optimalna vrednost blizu najboljeg agenta (zbog faze eksploracije) i ka njemu se približavaju. Približavanje plenu se modelira jednačinama (11) i (12),

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t) \right| \quad (11)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \bar{D} \quad (12)$$

gde:

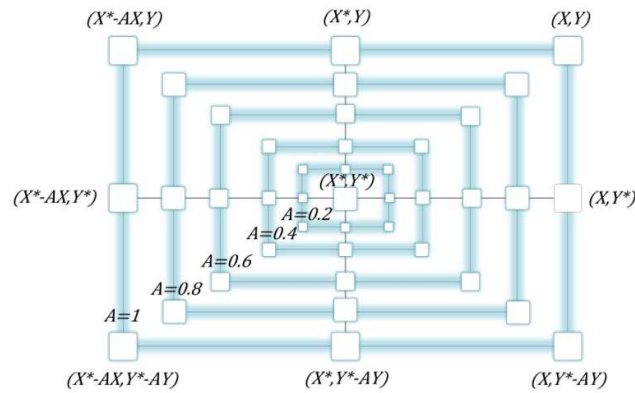
- \bar{X}, \bar{X}^* - predstavljaju trenutnu i željenu vrednost, respektivno.

Naravno, željena vrednost \bar{X}^* se menja tokom iteracija. Koeficijenti \bar{A} i \bar{C} se računaju za svaku iteraciju algoritma preko jednačina (13) i (14),

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r} - \bar{a} \quad (13)$$

$$\bar{C} = 2\bar{r} \quad (14)$$

gde je sa \bar{r} predstavljen slučajan broj između 0 i 1, koji podleže uniformnoj raspodeli, a \bar{a} je broj koji linearno opada od 2 do 0 sa brojem iteracija. Kao što se može videti na slici 2, logika ovog pristupa je da se na početku lova svaki agent može približiti svom cilju (najboljem agentu) na \bar{A} udaljenost od njega. Kako \bar{A} linearno opada tokom iteracija, svi agenti će biti sve bliže najboljem i tako će svi konvergirati ka najboljem rešenju.



Slika 2. Približavanje plenu

4.3 Spiralno približavanje cilju (faza eksploatacije)

U ovoj fazi, agenti se približavaju svojoj meti po trajektoriji spiralnog oblika. Ovaj deo algoritma se grafički predstavlja slikom 3, na njoj se vidi trenutna pozicija jednog agenta i pozicija najboljeg (željenog). Prvo je potrebno izračunati apsolutnu vrednost distance između te dve pozicije (jednačina 15).

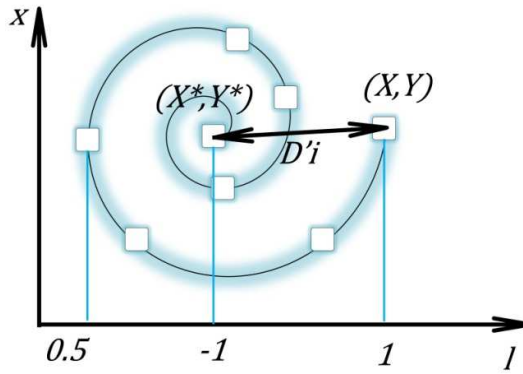
$$\bar{D}' = \left| \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t) \right| \quad (15)$$

Kada je ova vrednost izračunata, može se odrediti nova pozicija agenta prema jednačini (16),

$$\bar{X}(t+1) = \bar{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) \quad (16)$$

gde je:

- b - konstanta koja definiše oblik spirale, i
- $l \in [-2, 1]$ - slučajan broj koji podleže uniformnoj raspodeli i linearno opada sa generacijama.



Slika 3. Spiralni prilaz plenu

4.4 Analiza parametara algoritma

Prvo je potrebno inicijalizovati populaciju, tako što se svim agentima dodele slučajni brojevi za sve njihove pozicije. Pod jednim agentom se podrazumeva jedan plan terminiranja, dok pozicije unutar agenta predstavljaju mašine alatke, alate i orijentacije alata za odabrani plan terminiranja. Zatim se računaju funkcije cilja svih agenata i određuje se najbolji agent u populaciji. Za svaku iteraciju algoritma i za svakog agenta ponaosob se računaju promenljive a, A, C, l, p sa tim što se a linearno smanjuje sa brojem iteracija od 2 do 0. Ukoliko je vrednost promenljive $p \geq 0.5$, dolazi do modifikovanja vrednost pozicija tog agenta primenom jednačine (16) tj. izvršava se spiralno približavanje. U suprotnom se mogu desiti dva slučaja. Prvi, ukoliko je $|\bar{A}| \geq 1$, dolazi do traženja plena (faza eksploracije) tj. do traženja globalnog minimuma. Ovo se može desiti samo u prvoj polovini iteracija algoritma, zbog linearnog smanjivanja parametra a , jer $\bar{A} \in [-a, a]$. Drugi, ukoliko je $|\bar{A}| < 1$, dolazi do modifikovanja vrednosti pozicija kod trenutnog agenta, prema jednačini (12). Važno je napomenuti da ukoliko se najbolji agent modifikuje na ovaj način (jednačina 12), dolazi do promene vrednosti lidera, što nije slučaj za modifikovanje lidera primenom jednačine (16).

4.5 Modifikovani WOA

Modifikovani WOA (mWOA) je predložen zbog ograničenja originalnog WOA, inicijalno razvijenog za optimizaciju kontinualnih funkcija. Iz tog razloga se usvaja novi način kodiranja agenata (tj. rešenja optimizacionog problema datih u vidu planova terminiranja) u cilju primene algoritma na diskretne probleme. Prvi problem koji je uočen je da algoritam često konvergira ka lokalno optimalnim rešenjima. Da bi se prevazišao ovaj problem, opseg veličina $A \in [-2a, 2a]$ i $a \in [3, 1]$ je promenjen, dok njihov karakter promene po generacijama ostaje isti kao i u originalnom algoritmu. Takođe, dodatni uslov je implementiran u algoritam, a odnosi se na promenu svakog agenta, tj. promenu alternativnih mašina alatki, alata, ili orijentacija alata unutar svake pozicije u tom agentu. Ukoliko je promena (po jednačinama 10, 12 i 16) neke veličine u agentu mala, veličina se zaokružuje na prvu veću ili manju vrednost (u tabeli 1 je detaljan prikaz ove funkcije). Takođe, dva elitna agenta se bez promene dodaju u sledeću generaciju, čime se obezbeđuje čuvanje najbolje funkcije cilja. Pseudo-kod mWOA je prikazan tabelom 2.

Tabela 1. Funkcija mmWOA	
1	$P = X(t+1) - X(t)$
2	if3 $ P \leq 1$
3	if4 $P > 0$
4	$X(t+1)$ se zaokružuje na prvi veći broj
5	else4
6	$X(t+1)$ se zaokružuje na prvi manji broj
7	endif4
8	endif3

Tabela 2. Pseudo-kod mWOA	
1.	Ulazni podaci: Broj agenata, Broj generacija, Vreme transporta, Vremena obrade
2.	Inicijalizacija agenata (način kodiranja u literaturi [5])
3.	Računanje funkcije cilja za svakog agenta
4.	for1 za svaku generaciju
5.	for2 za svakog agenta
6.	definisane promenljive a, A, C, l, p
7.	for3 za svaku poziciju u agentu
8.	if1 $p < 0.5$
9.	if2 $ A \geq 1$
10.	Modifikacija pozicije u odnosu na istu poziciju slučajno odabranog agenta (jednačina 10)
11.	Funkcija mmWOA (Tabela 1)
12.	else2
13.	Modifikacija pozicije u odnosu na istu poziciju najboljeg agenta (jednačina 12)
14.	Funkcija mmWOA (Tabela 1)
15.	endif2
16.	else1
17.	Modifikacija pozicije u odnosu na istu poziciju najboljeg agenta (jednačina 16)
18.	Funkcija mmWOA (Tabela 1)
19.	endif1
20.	endfor3
21.	endfor2
22.	Provera da li su sve pozicije u dozvoljenom opsegu i zaokruživanje
23.	Računanje novih vrednosti lidera (najboljeg agenta) i funkcija cilja
24.	endfor1
25.	Čuvanje podataka

5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

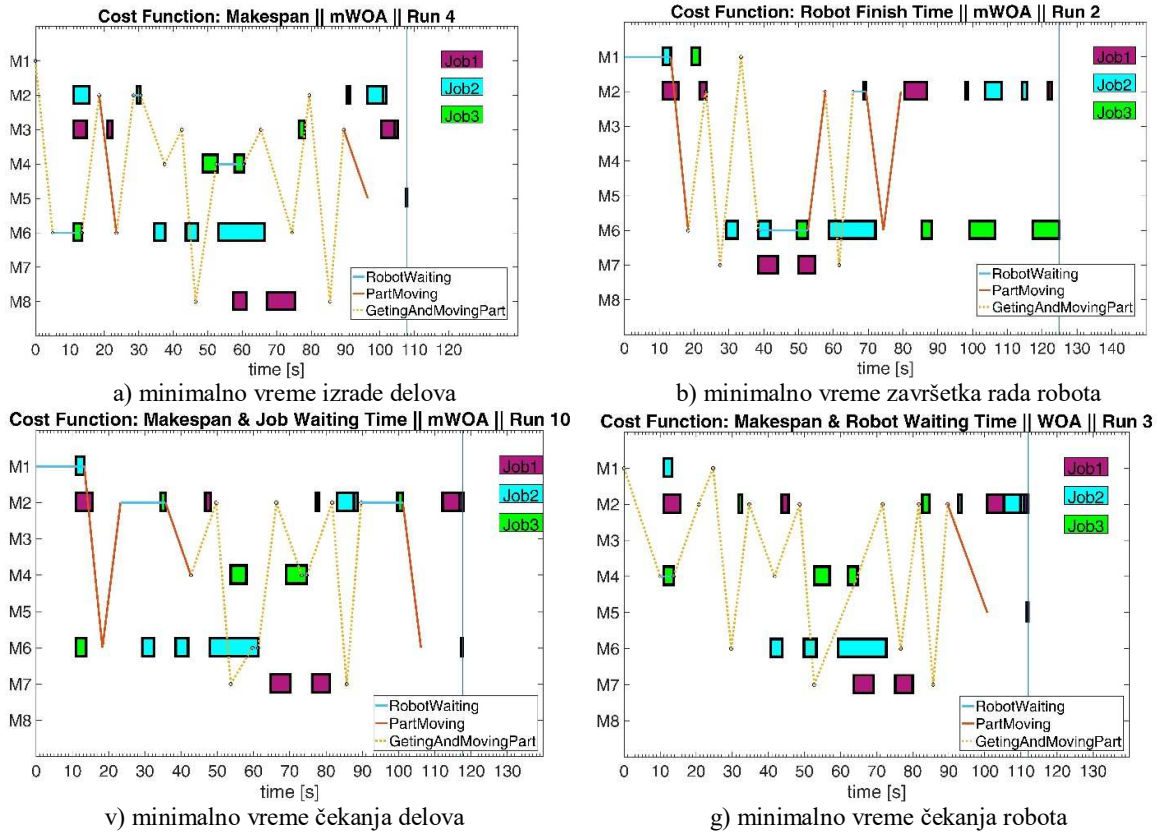
Za zadati tehnološki sistem i delove koje je potrebno obraditi, izvršen je eksperiment (po deset ponavljanja) sa tri različita algoritma, za svaku funkciju cilja pomenutu u poglavlju 3.1. Prvo je izvršen eksperiment sa izvornim WOA, zatim sa PSO algoritmom, i na kraju sa mWOA. Eksperimentalni rezultati su dati u tabeli 3. Za eksperimente je korišćeno 100 agenata, sa po 50 generacija za svaki algoritam optimizacije.

Tabela 3. Eksperimentalni rezultati						
Funkcija cilja	Najbolji rezultati			Srednji rezultati za 10 ponavljanja		
	WOA	PSO	mWOA	WOA	PSO	mWOA
f_1	109.90	110.40	107.90	122.96	121.31	110.76
f_2	86.30	87.80	79.40	96.31	95.14	84.23
f_3	115.80	128.10	124.90	137.63	142.37	143.81
f_4	135.60	131.40	128.50	149.48	145.02	139.07

f_1 - minimalno vreme obrade delova
 f_2 - minimalno vreme završetka rada robota
 f_3 - minimalno vreme čekanja delova i obrade delova
 f_4 - minimalno vreme čekanja robota i obrade delova

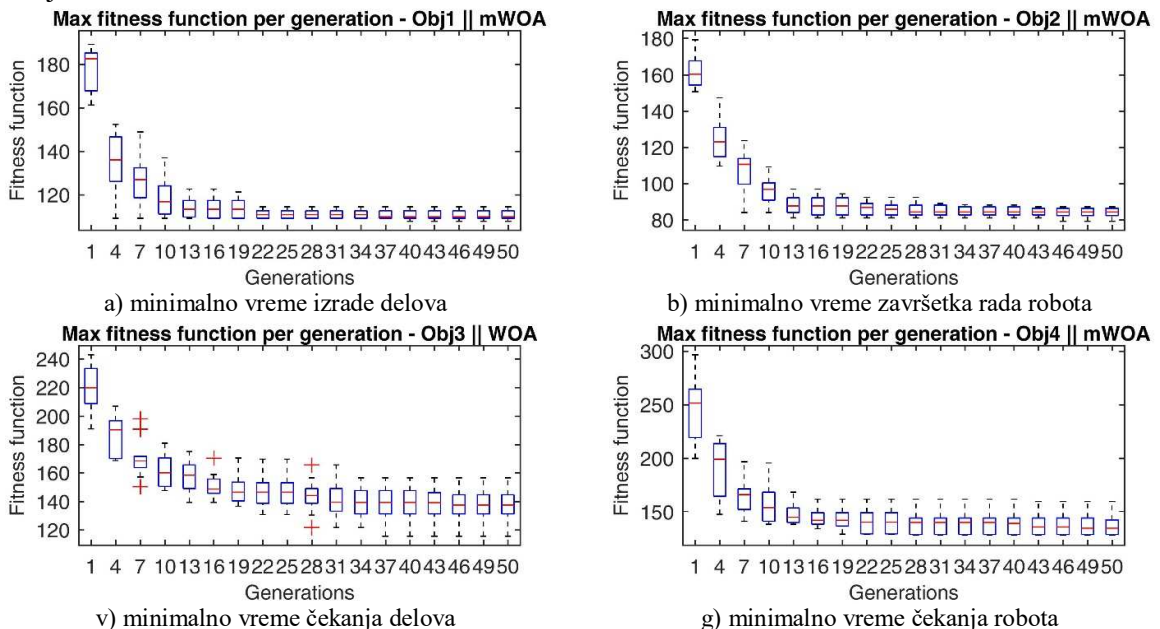
Na slici 3 su prikazani Gantovi dijagrami najboljih planova terminiranja, za različite funkcije cilja. Na njima se može videti redosled obrade delova koji je predstavljen pravougaonicima različitih boja, gde svaka boja predstavlja određeni deo. Prvi pravougaonik neke boje predstavlja prvu operaciju tog dela, dok svaki naredni pravougaonik iste boje predstavlja narednu operaciju tog dela. Linijama koje se mogu videti na dijagramu predstavljena su kretanja mobilnog robota u tehnološkom sistemu. Plave linije predstavljaju čekanje robota na delove, a crvene direktan transport dela na određenu mašinu. Žutim linijama je predstavljen slučaj

kada je potrebno da robot ode do mašine na kojoj se nalazi deo, uzme deo i tek onda ga odnese na mašinu na kojoj je potrebno izvršiti sledeću operaciju.



Slika 3. Gantovi dijagrami za četiri funkcije cilja za najbolje eksperimentalne rezultate planova terminiranja

Na slici 4 je prikazana promena funkcije cilja kroz generacije za sva ponavljanja najboljeg eksperimenta. Crvenom horizontalnom linijom je predstavljena medijana funkcije cilja za sva ponavljanja. Plavi pravougaonik predstavlja unutrašnju granicu uzorka, dok je sivom linijom predstavljena spoljašnja granica uzorka funkcije cilja za sva ponavljanja. Crvenim plusevima su predstavljeni autlajeri funkcije cilja u toj generaciji.



Slika 4. Promena funkcije cilja kroz generacije za najbolje eksperimente

6. ZAKLJUČAK I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

U ovom radu je analizirana primena metaheurističkih algoritma za optimalno terminiranje transportnih sredstava u okviru inteligentnog tehnološkog sistema. Kao transportno sredstvo korišćen je mobilni robot, koji vrši transport delova između mašina alatki. Eksperiment je izvršen za tehnološki sistema sa osam mašina alatki, na kojima se vrši obrada tri dela. Analizirano je pet tipova fleksibilnosti tehnoloških procesa obrade delova – fleksibilnost alternativnih tehnoloških procesa, redosleda operacija, mašina alatki, alata i orijentacija alata. Kako je problem u klasi *NP-hard* optimizacionih problema, korišćena su tri biološki inspirisana algoritma optimizacije - Particle Swarm Optimization (PSO), Whale optimization algorithm (WOA) i modifikovani WOA (mWOA). U obzir su uzete četiri različite funkcije cilja (i) minimalno vreme obrade delova, (ii) minimalno vreme završetka rada robota, (iii) ukupno vreme obrade delova i vreme čekanja delova na mobilni robot i (iv) ukupno vreme obrade delova i čekanja mobilnog robota. Algoritam mWOA se pokazao kao najbolji za rešavanje ove vrste problema jer su dobijeni najbolji rezultati planova terminiranja za tri od četiri funkcije cilja. Jedan od pravaca budućih istraživanja odnosi se na višekriterijumsku optimizaciju planova terminiranja, kao i na analizu ostalih metaheurističkih algoritama.

7. LITERATURA

- [1] Nielsen, I., Dang, Q.V., Bocewicz, G. and Banaszak, Z., 2017. A methodology for implementation of mobile robot in adaptive manufacturing environments. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(5), pp.1171-1188.
- [2] Dang, Q.V., Nielsen, I., Steger-Jensen, K. and Madsen, O., 2014. Scheduling a single mobile robot for part-feeding tasks of production lines. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(6), pp.1271-1287.
- [3] Gultekin, H., Coban, B. and Akhlaghi, V.E., 2018. Cyclic scheduling of parts and robot moves in m-machine robotic cells. *Computers & Operations Research*, 90, pp.161-172.
- [4] Liu, S.Q. and Kozan, E., 2017. A hybrid metaheuristic algorithm to optimise a real-world robotic cell. *Computers & Operations Research*, 84, pp.188-194.
- [5] Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M. and Miljković, Z., 2016. Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 64, pp.569-588.
- [6] Petrović, M. and Miljković, Z., Grey Wolf Optimization Algorithm for Single Mobile Robot Scheduling. *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2017)*, ISBN 978-86-7466-692-0, pp. ROII.2.1-6, Kladovo, Srbija, 5-8 June, 2017.
- [7] Hussien, A.G., Houssein, E.H. and Hassanien, A.E., 2017, December. A binary whale optimization algorithm with hyperbolic tangent fitness function for feature selection. In *Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS), 2017 Eighth International Conference on* (pp. 166-172). IEEE.
- [8] Dao, T.K., Pan, T.S. and Pan, J.S., 2016, November. A multi-objective optimal mobile robot path planning based on whale optimization algorithm. In *Signal Processing (ICSP), 2016 IEEE 13th International Conference on* (pp. 337-342). IEEE.
- [9] Fu, M., Zhonghua, H., Zhijun, G., Xiaoting, D. and Xutian, T., 2017, July. Whale optimization algorithm for flexible flow shop scheduling with setup times. In *Modelling, Identification and Control (ICMIC), 2017 9th International Conference on* (pp. 157-162). IEEE.
- [10] Mirjalili, S. and Lewis, A., 2016. The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, pp.51-67.
- [11] Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S.P. and Steckel, K.E., 1984. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS magazine*, 2(2), pp.114-117.

Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B.

METAHEURISTIC OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR SINGLE MOBILE ROBOT SCHEDULING

Abstract: In this paper, the authors analyze single mobile robot scheduling problem in order to find an optimal way to transport parts in intelligent manufacturing system. Because of the combinatorial complexity, this problem is considered to be NP-hard and the authors propose three different metaheuristic algorithms (PSO, WOA and mWOA) to solve it. Manufacturing system consists of eight machine tools, three parts and single mobile robot used for material transport tasks. Optimal scheduling plans are obtained by single objective optimization procedure, using four fitness functions. The experimental results show that mWOA outperforms all other algorithms. All the algorithms are implemented in MATLAB software package.

Key words: single mobile robot scheduling, optimization, biologically inspired algorithms, WOA, PSO algorithm