

ИНТЕЛИГЕНТНИ ТЕХНОЛОШКИ СИСТЕМИ

AT-8 Терминирање производно-технолошких ентитета

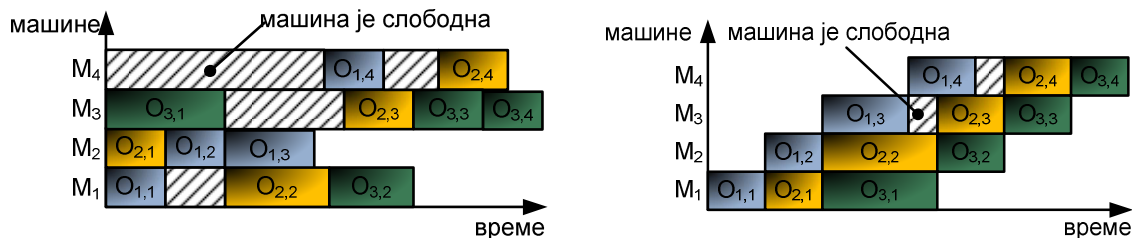
Терминирање флексибилних технолошких процеса

Терминирање (енгл. *scheduling*) представља процес планирања машинске обраде, као и „придруживање“ технолошких операција за сваки од обрадака одговарајућој машини алатки, уз истовремено оптимално временско распоређивање. Циљ овог процеса је одређивање редоследа операција обраде на одговарајућим машинама алаткама, уз минимизацију одређених перформанси (средње време проведено у систему, производно време које обухвата и време обраде и време транспорта дела, рокове израде одређене лансираним радним налозима, и др.). Проблем терминирања се може класификовати у више категорија на основу следећа четири параметра:

- модели за долазак делова у технолошки систем;
- број машина алатки у технолошком систему;
- ток материјала у технолошком систему;
- критеријуми на основу којих се терминирање врши.

Истраживања у области терминирања су примарно била фокусирана на проналажење ефикасних алгоритама, који су имали за циљ да реше различите типове терминирања и генеришу оптималне планове терминирања за различите конфигурације производних ресурса:

- терминирање једне машине алатке (енгл. *single machines scheduling*);
- паралелно терминирање више машина алатки (енгл. *parallel machines scheduling*),
- терминирање се врши тако да се делови кроз технолошки систем крећу сходно изабраном алтернативном технолошком процесу, при чему један део може више пута посетити исту машину алатку (енгл. *job-shop scheduling*), слика 8.1 лево;
- терминирање операција са делове који сваку од машина алатки могу да посете само једном (енгл. *flow shop scheduling*), слика 8.1 десно;



Слика 8.1: Пример Gantt-ових мапа за *job-shop* (лево) и *flow shop* (десно) тип терминирања

Од претходно наведених типова терминирања, у литератури је најзаступљенији *job-shop* тип терминирања. Овај тип терминирања се може дефинисати на следећи начин:

„Дато је n делова, који се обрађују на t машина алатки, уз дефинисана технолошка ограничења за операције сваког дела. Потребно је одредити редослед обраде tj редослед извршавања операција датих делова на датим машинама алаткама, тако да су задовољена технолошка ограничења, а добијене секвенце оптималне према задатим критеријумима перформанси.“

Као и оптимизација технолошких процеса и оптимално терминирање одабраних алтернативних технолошких процеса припада групи *NP-hard* недетерминистичких полиномних оптимизационих проблема (енгл. *non deterministic polynomial optimization problems*). Повећањем димензије проблема чије се терминирање врши, тј. повећањем броја делова, машина алатки и операција, експоненцијално се повећава и време потребно за његово решавање. Из разлога што терминирање представља један од најкомплекснијих комбинаторно-оптимизационих проблема, развој алгоритама који га ефикасно решавају већ годинама представља изазов у овој научној области истраживања. Конвенционалне нехеуристичке методе нису у стању да ефикасно реше овај тип проблема па зато овакви проблеми „траже“ алгоритме базиране на хеуристичким методама, код којих се итеративним поступцима побољшава и добија оптимално или приближно оптимално почетно решење. Генетички алгоритми *GA* (енгл. *Genetic Algorithms*), генетичко програмирање *GP* (енгл. *Genetic Programming*), симулирано кађење *SA* (енгл. *Simulated Annealing*), табу претраге *TS* (енгл. *Tabu Search*), методе интелигенције колонија, као што су оптимизација применом система мрављих колонија *ACO* (енгл. *Ant Colony Optimization*), или оптимизација применом теорије (интелигенције) роја *PSO* (енгл. *Particle Swarm Optimization*) и други хибридни алгоритми, могу да се примене и на решавање проблема оптимизације планова терминирања технолошких процеса.

За разлику од планирања технолошких процеса, терминирање је много више повезано са тренутним стањем у производном погону. Фиксни технолошки процеси често обезбеђују планове терминирања који доводе до неуравнотеженог коришћења ресурса, стварања уских грла у производном процесу и смањења перформанси времена испоруке. Из тог разлога је често неопходно оригинални технолошки процес модификовати да би се прилагодио новонасталим променама у производном погону.

Потпуно флексибилни *job-shop* проблеми (табела 8.1), као посебна категорија *job-shop* проблема терминирања (табела 8.2), имају своје две категорије: проблем рутирања, где се одређује редослед операција на машинама и проблем терминирања, где се одређује време почетка сваке од операција.

Табела 8.1: Пример терминирања потпуно флексибилног 3x5 (за три дела на пет машина алатки) *job-shop* проблема са 9 операција

део	операције	Машине алатке				
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
1	O _{1,1}	3	2	3	4	1
	O _{2,1}	1	3	4	1	5
	O _{3,1}	3	8	2	1	6
2	O _{1,2}	2	5	4	7	8
	O _{2,2}	5	6	9	8	5
	O _{3,2}	5	1	2	1	2
3	O _{1,3}	2	5	4	2	4
	O _{2,3}	1	3	2	6	1
	O _{3,3}	9	8	6	7	2

Табела 8.2: Пример терминирања делимично флексибилног 3x5 (за три дела на пет машина алатки) *job-shop* проблема са 9 операција

део	операције	Машине алатке				
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
1	O _{1,1}	3	-	5	-	2
	O _{2,1}	-	3	4	-	5
	O _{3,1}	5	8	-	1	-
2	O _{1,2}	-	3	6	2	5
	O _{2,2}	1	7	-	3	-
	O _{3,2}	-	4	3	1	5
3	O _{1,3}	2	-	4	-	1
	O _{2,3}	1	3	2	4	5
	O _{3,3}	-	3	-	-	4

Као и *job-shop* терминирање, флексибилно *job-shop* терминирање припада класи *NP-hard* оптимизационих проблема, при чему се за оптимизацију користе следећа ограничења:

- све машине алатке су доступне у почетном, нултом тренутку ($t_0=0$);
- на свакој машини алатки може да се врши операција само једног дела у једном тренутку тј. ниједна машина не може да обрађује више од једног дела истовремено;
- да би се операција извршила, неопходно је да се одабере једна машина алатка из сета алтернативних машина за ту операцију;
- операције се не могу прекидати док се не заврше;
- сва припремна времена помоћних процеса су укључена у времена обраде;
- операције једног дела се не могу обављати симултано (истовремено) на више од једне машине алатке (док се не заврши операција O_{ij} , не може почети операција O_{ij+1} i -тог дела).

Математички модел за оптимизацију планова термирања

С обзиром на разматрани проблем оптимизације планова термирања, у оквиру овог *handout*-а су представљена два математичка модела за одређивање функција циља (*object1* и *object2*), које се односе на укупно време неопходно за обраду свих делова чије се термирање врши (енгл. *makespan*) и уравнотежено искоришћење машина алатки, респективно.

$$object1 = \max(c_{ij}) (c_{ij} \in T_d(s_{ij}, c_{ij})),$$

$$object2 = object1 + \sum_{a=1}^m \left| \sum p_{ij} - avgmt \right| (o_{ij} \in M_a),$$

где је:

c_{ij} – најраније време завршетка операције o_{ij} ;

s_{ij} – најраније време почетка операције o_{ij} ;

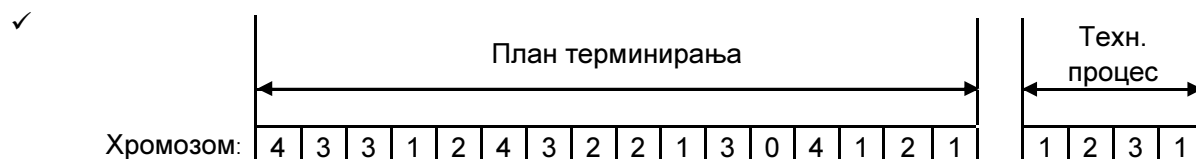
$\sum p_{ij}$ – укупно време обраде на машини алатки;

$avgmt$ – просечно време обраде на свим машинама алаткама;

Генетички алгоритми у оптимизацији планова термирања

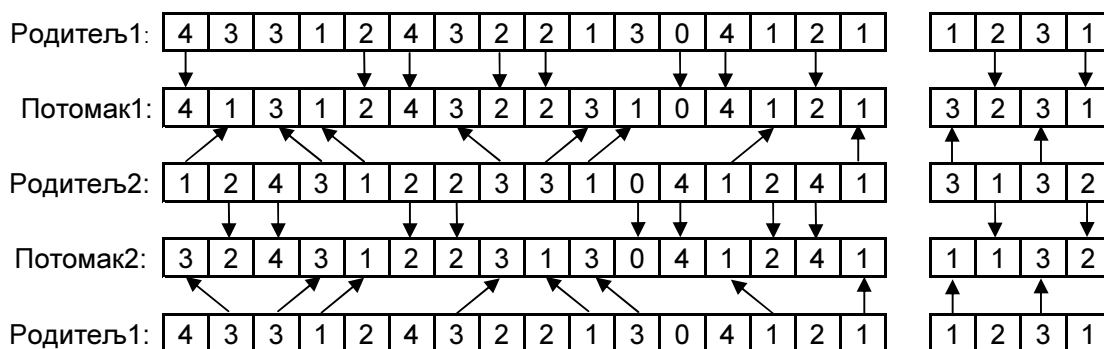
Генетички алгоритми су најзаступљенији и најчешће коришћен еволуциони алгоритам примењен у решавању проблема оптимизације како технолошких процеса, тако и планова термирања. Главни кораци приступа базираног на генетичким алгоритмима у оптимизацији планова термирања су описани на следећи начин:

- ✓ *Генерисање јединки у уницијалној популацији.* Свака индивидуа у популацији је представљена као хромозом, који се састоји од два дела различите дужине (главни подстринг који представља план термирања и помоћни подстринг који представља технолошки процес), види слику 8.2. Дужина хромозома за план термирања одређена је бројем делова и максималним бројем операција q . Параметар q представља максималан број операција за све алтернативне технолошке процесе ($q=4$). За пример са почетка, број делова је четири, док је број машина девет ($n=4$ и $m=9$). Из тог разлога, стринг за план термирања се састоји од 16 ($n \times q = 4 \times 4 = 16$) елемената, док се подстринг за технолошки процес састоји од четири елемента. На пример, технолошки процес за део 1 има четири операције, па су 4 елемента у плану термирања једнака 1. Аналогно, технолошки процес за део 2 има четири операције, па су четири елемента у плану термирања једнака 2. Технолошки процеси за делове 3 и 4 имају четири и три операције, респективно, па су четири елемента у плану термирања једнака 3, а три елемента једнака 4. Дакле, план термирања се састоји од четири гена који имају вредност један, четири гена који имају вредност два, четири гена који имају вредност три и три гена који имају вредност 4. Преостали гени (у примеру на слици испод, од укупно 16 гена, преостало је само један ген, $1=16-4-4-4-3$) имају вредност нула. Након одређивања броја нула, јединица, двојки, тројки и черворки, гени су случајно распоређени у плану термирања, као што је приказано на слици испод. Помоћни подстринг се састоји од четири гена (пошто се врши термирање за четири дела), где сваки ген представља одабрани алтернативни процес. На пример, први ген помоћног подстринга има вредност један, што значи да је за први део одабран први алтернативни технолошки процес. Аналогна процедура је спроведена и за остала три гена.



Слика 8.2: Хромозом за план термирања

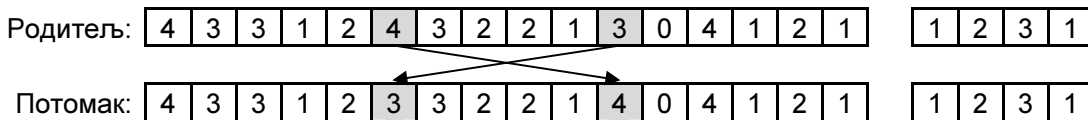
- ✓ **Евалуација функције циља и иницијализација параметара генетичких алгоритама.** Функција циља за сваку од индивидуа у иницијалној популацији рачуна се према једначинама из математичког модела за оптимизацију (види претходно поглавље). Параметри генетичких алгоритама који се иницијализују су: величина популације S , укупан број генерација M , вероватноћа укрштања p_c и вероватноћа мутације p_m .
- ✓ **Селекција.** Након генерисања иницијалне популације и евалуације функције циља, следи корак селекције, који подразумева бирање два родитеља-хромозома из текуће популације. Селекција се врши на бази рулет селекције (енгл. *roulette wheel selection*), где је вероватноћа селекције пропорционална функцији циља.
- ✓ **Укрштање.** На основу дефинисане вероватноће укрштања p_c , неке од индивидуа су одабране за укрштање, при чему је оператор укрштања примењен и на главни и на помоћни подстринг. За сваки пар родитељских хромозома (родитељ 1 и родитељ 2), најпре се за потомке иницијализују два „празна“ хромозома. Оператор укрштања је прво примењен на помоћни подстринг (технолошки процес), тако што су случајно изабрани гени родитеља 1 и родитеља 2 заменили места. На пример, потомак 1 настаје на следећи начин: други и четврти ген родитеља 1 постали су други и четврти ген потомка 1, респективно, док су први и трећи ген родитеља 2 постали исти гени потомка 1. Након примене оператора укрштања на помоћни подстринг, план терминирања за родитеља 1 је упоређен са планом терминирања родитеља 2. Исти елементи у оба стринга (2, 4 и 0) су најпре детектовани, а потом и снимљени. Пошто је помоћни стринг потомка 1 настао од другог и четвртог гена родитеља 1, то се гени 2 и 4 из главног постринга родитеља 1 директно (на исте позиције) копирају у потомак 1. На исти начин, други и четврти ген родитеља 2 копирају се на исте позиције потомка 2. Нула се, такође, копира на исту позицију потомка. Непопуњени елементи (гени) у потомку 1 попуњавају се преосталим генима (први и трећи ген) родитеља 2, док се непопуњени елементи (гени) у потомку 2 попуњавају се преосталим генима (први и трећи ген) родитеља 1. У овом примеру (погледати слику 8.4), број непопуњених елемената у главном пострингу (плану терминирања) родитеља 1 је $n_1=0$, док је број непопуњених елемената у главном пострингу (плану терминирања) родитеља 2 је $n_2=0$. Пошто је $n_1=n_2$, нема празних позиција у потомцима 1 и 2. У случају да је $n_1>n_2$, број празних места у потомку 1 је тада већи од броја празних места у потомку 2, па се n_1-n_2 празних позиција у потомку 1 попуни нулом. Преостали елементи родитеља 2 се прослеђују на празне позиције потомка 1. За потомак 2, једна нула је случајно селектована и претворена у празно место. Преостали елементи у родитељу 1 су постављени на празне позиције потомка 2. За случај да је $n_1<n_2$, спроводи се аналогна процедура.



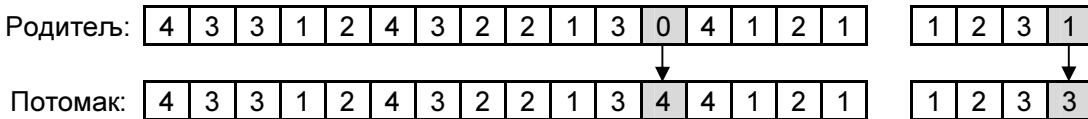
Слика 8.3: Оператор укрштања за терминирање

- ✓ **Мутација.** Након корака укрштања хромозома, а у складу са дефинисаном вероватноћом мутације p_m , неки хромозоми (родитељи) су случајно одабрани за мутацију. За сваки од одабраних родитеља, на основу случајно генерисаних позиција мутације, примењена су два оператора мутације, а као резултат су добијени потомци са мутираним геном. Примери оператора мутације су приказани на сликама које следе. **Први оператор мутације** је двопозициона „swapping“ мутација (погледати слику 8.4), која се одвија у три корака: (i) селекција једног родитеља; (ii) случајан одабир два гена у главном подстрингу (план терминирања); (iii) нови хромозом - потомак се добија заменом места случајно одабраних гена. **Други оператор** мутације се користи за генерисање нових потомка променом једног алтернативног технолошког процеса једног дела. Након селекције једног родитеља у првом кораку овог оператора мутације, случајно се бира једна позиција мутације. Следећи корак

подразумева замену вредности одабраног гена алтернативним (на пример: први алтернативни технолошки процес за део 4 је замењен трећим алтернативним технолошким процесом, такође, за део 4). У складу са овом променом, а из разлога зато што је број операција за трећи алтернативни технолошки процес дела 4 већи од броја операција првог алтернативног технолошког процеса (број операција за прву и другу алтернативу је 3, док је број операција за трећу алтернативу 4), то се једна нула у главном подстрингу случајно одабере и замени са 4 (погледај слику 8.5 за други оператор мутације за терминирање).



Слика 8.4: Први оператор мутације за терминирање



Слика 8.5: Други оператор мутације за терминирање

- ✓ Поновити претходне кораке жељени број генерација. Број генерација M је дефинисан у кораку иницијализације параметара генетичког алгорита.

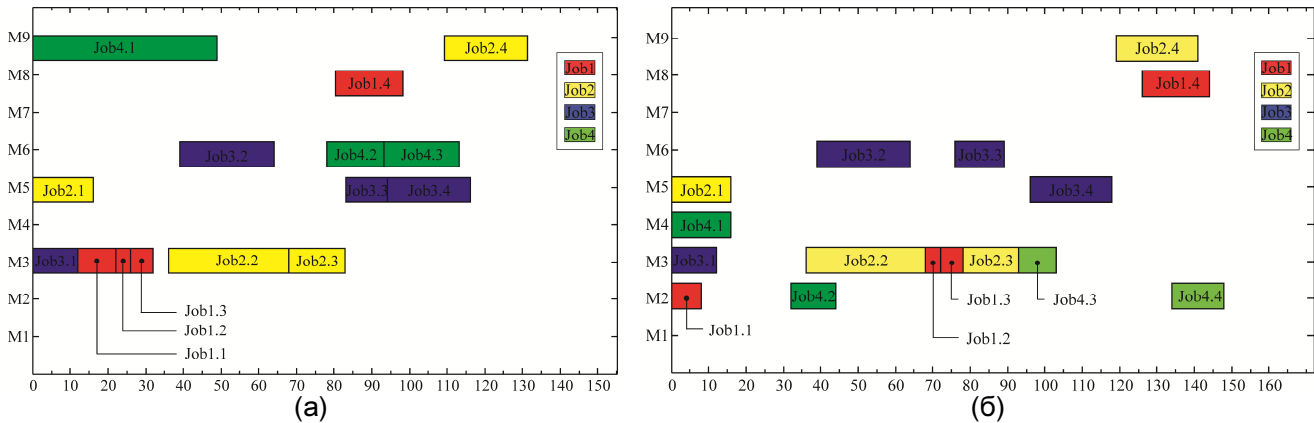
Експериментални резултати оптимизације планова терминирања флексибилних технолошких процеса

Експеримент почиње случајним одабиром једног од три алтернативна технолошка процеса за сваки од четири дела. За тако одабране технолошке процесе, параметри генетичких алгоритама за оптимизацију планова терминирања су: величина популације $S=500$, укупан број генерација $M=100$, вероватноћа укрштања $p_c=0.80$ и вероватноћа мутације $p_m=0.10$. Времена транспорта између машина алатки дата су у табели 8.3. Алгоритми су имплементирани у *Matlab* програмском пакету и десктоп рачунару (3.10 GHz процесор; 2 MB RAM) са *Windows 7* оперативним системом и тестирани применом *Khepera II* мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења.

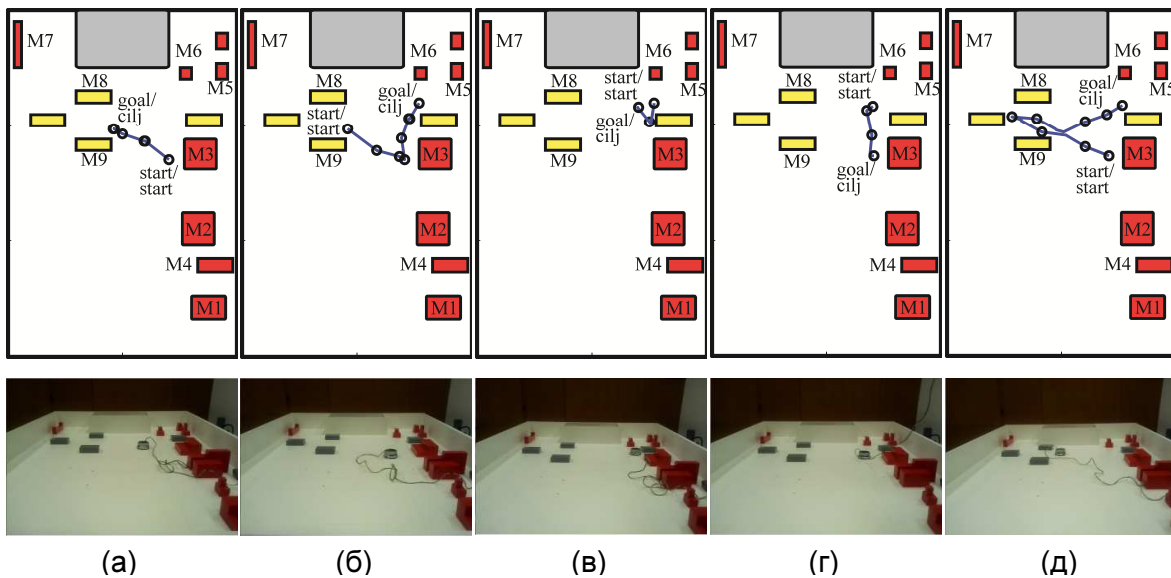
Генетички алгорита за терминирање флексибилних технолошких процеса генерише део-машина секвенцу у складу са две функције циља *object1* (слика 8.6 лево, $makespan=131$) and *object2* (слика 8.6 десно, $makespan=148$). На тај начин, путања коју *Khepera II* мобилни робот прати је генерисана применом приказаног генетичког алгорита за терминирање, где се као оптимизациони критеријум користи минимизација производног времена TP . Тестирање тачности остваривања задатих позиција извршено је у статичком лабораторијском моделу технолошког окружења, при чему су позиције машина алатки *a priori* познате. Експериментални модел технолошког окружења, *Khepera II* мобилни робот и сегменти путање (3,3)-(1,3)-(4,9)-(1,3)-(1,3)-(3,6)-(2,5)-(3,6)-(3,6)-(4,6)-(3,5)-(2,3)-(2,3)-(1,8)-(0,1)-(2,9)-(4,6) мобилног робота приказани су на слици 8.7. Док извршава задатак транспорта, за одређивање положаја (позиције и оријентације) робот користи развијен и имплементиран модел кретања на бази пређеног пута - одометрије (погледати предавање **АТ-5**), као и A^* алгорита претраживања за одабир оптималне путање између машина алатки (погледати аудиторну вежбу **ПА-2**). Средња вредност грешака, остварених координата у односу на задате, у x и у правцу износи $\Delta x=0,53$ [cm] и $\Delta y=2,35$ [cm], респективно.

Табела 8.3: Време транспорта између машина алатки

машина	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	50	79	36	99	106	130	116	102
2	50	0	31	16	51	56	78	67	54
3	79	31	0	47	20	27	63	48	26
4	36	16	47	0	67	70	90	84	70
5	99	51	20	67	0	7	55	40	22
6	106	56	27	70	7	0	62	47	29
7	130	78	63	90	55	62	0	15	37
8	116	67	48	84	40	47	15	0	22
9	102	54	26	70	22	29	37	22	0



Слика 8.6: (а) *Gantt*-ов дијаграм за термирања на основу *object1* (Makespan=131); (б) *Gantt*-ов дијаграм за термирања на основу *object2* (Makespan=148)



Слика 8.7: Сегменти путање (а) М3-М9; (б) М9-М3-М6; (в) М6-М5-М6-М5; (г) М5-М3; (д) М3-М8-М9-М6 и положај мобилног робота. Путања представља резултат примене генетичких алгорита на проблем оптималног термирања технолошких процеса.