

ИНТЕЛИГЕНТНИ ТЕХНОЛОШКИ СИСТЕМИ

АТ-7 Флексибилни технолошки процеси – пројектовање и оптимизација

Флексибилни технолошки процеси

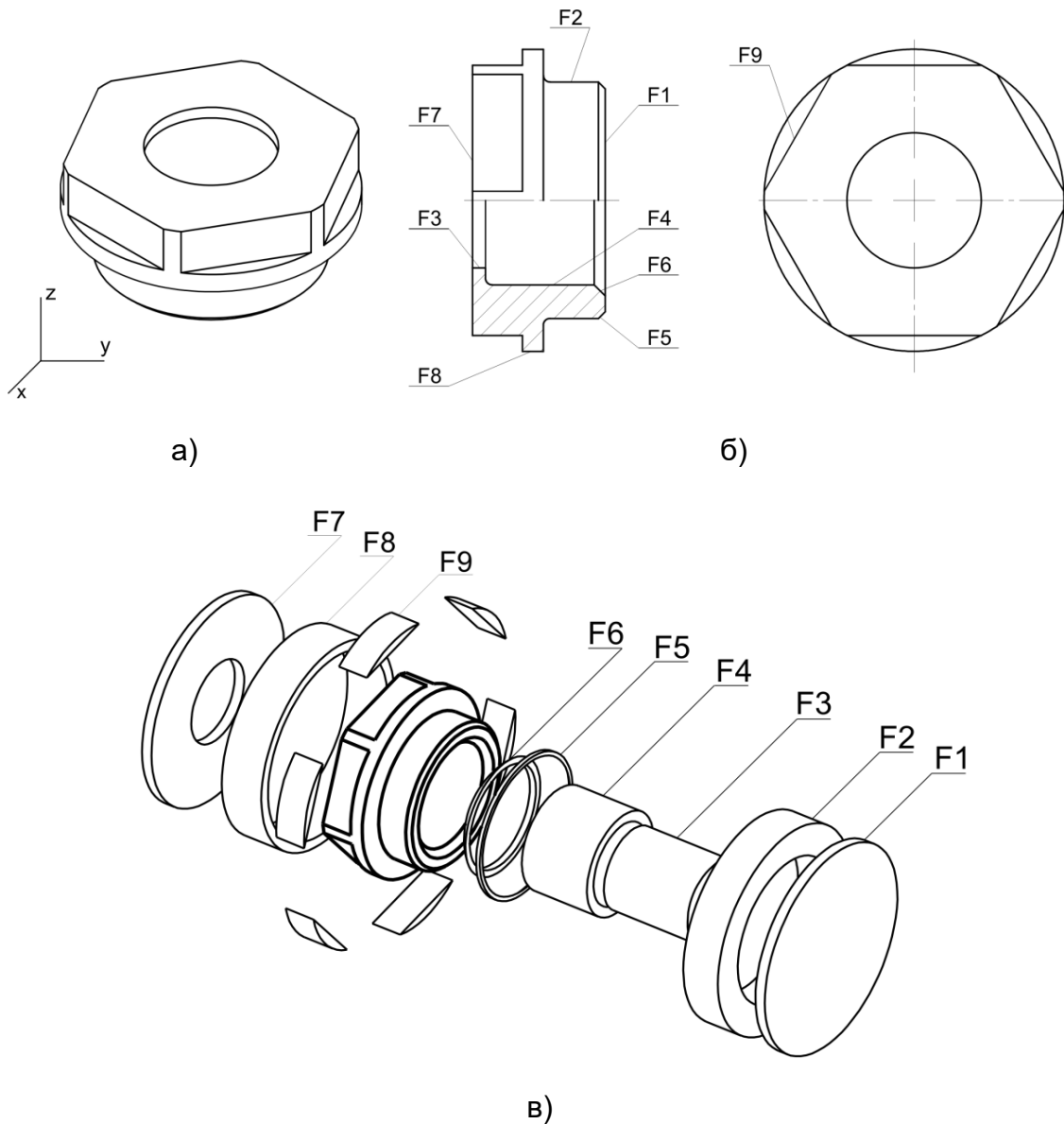
Пројектовање технолошких процеса – CAPP (енгл. *Computer Added Process Planning*) је настало крајем деведесетих година 20. века са циљем да споји и интегрише Компјутерски подржано пројектовање CAD (енгл. *Computer – Aided Design*) и Компјутерски подржану производњу – CAM (енгл. *Computer – Aided Manufacturing*). Овај систем има за циљ да системски одреди детаљне методе којима се делови или склопови (у случају монтаже) могу произвести економично и конкурентно, од иницијалне фазе (радионички цртеж готовог дела), преко међуфаза (сиров материјал, припремак, обрадак), до завршне фазе (жељени облик готовог дела). Улази за пројектовање технолошког процеса су пројектни подаци, подаци о сировом материјалу, подаци о обрадном систему (подаци о машини алатки, алатима, стезним приборима), подаци о захтевима квалитета и подаци о типу производње (појединачна, малосеријска, великосеријска, масовна). Излаз из поменутог система је технолошки процес, којим се дефинише редослед одвијања свих активности (операција) потребних да се од полазног материјала (сировине или полуфабриката) обликује готов део (производ).

Увођење појма флексибилности у домен пројектовања технолошких процеса произилази из потребе да се одговори све већим захтевима тржишта и прилагоди све чешћим променама у технолошким окружењима. Такође, потврђено је да се увођењем флексибилности, кроз алтернативне начине обраде делова, могу остварити боља решења у погледу оптималних флексибилних технолошких процеса. Најчешће примењивани типови флексибилности технолошких процеса су: (i) флексибилност машина алатки (енгл. *machine flexibility*), (ii) флексибилност алата (енгл. *tool flexibility*), (iii) флексибилност оријентација алата (енгл. *Tool Access Direction - TAD flexibility*), (iv) флексибилност процеса (енгл. *process flexibility*) и (v) флексибилност редоследа операција (енгл. *sequencing flexibility*).

- Флексибилност машина алатки подразумева могућност извођења једне операције на више алтернативних машина алатки, при чему су време трајања операције и трошкови за сваку од машина различити;
- Флексибилност алата обезбеђује могућност извођења исте операције коришћењем различитих алтернативних алата;
- Флексибилност оријентације алата подразумева могућност извођења исте операције коришћењем различитих алтернативних оријентација алата;
- Флексибилност процеса се односи на могућност обраде истог дела на различите начине, користећи технолошке процесе са алтернативним операцијама и/или алтернативним редоследом операција;
- Флексибилност редоследа операција представља могућност измене редоследа операција при оптимизацији технолошких процеса, уз остваривање захтеваног квалитета обраде (тачности обраде и квалитета обрађене површине).

Разматрање поменутих типова флексибилности је од значаја за остваривање бољих перформанси технолошких система (на пример побољшања у смислу смањења производног времена и трошкова производње), као и побољшања у погледу њихове ефикасности и ефективности. У циљу додатног појашњења претходно поменутих типова флексибилности, предложен је репрезентативан реалан део приказан на слици 7.1. Репрезентативан део се састоји од девет технолошких форми (енгл. *feature*) које се могу добити коришћењем 25 операција¹. Техничке карактеристике дела, које укључују класе толеранције, класе храпавости са одговарајућим вредностима параметра храпавости R_a (средње аритметичко одстојање профила), алтернативне операције, алтернативне машине алатке, алате и оријентације алата приказане су у табели 7.1.

¹ Напомена: свака технолошка операција је везана за алтернативну машину алатку. Уколико се нека операција састоји од више захвата, или више пролаза у оквиру једног захвата, време трајања операције је једнако збиру главних времена обраде за сваки од захвата.



Слика 7.1: Пример репрезентативног дела са девет технолошких форми а) 3Д модел дела, б) и в) технолошке форме

Свака технолошка форма репрезентативног дела може бити добијена применом две или три операције, где се свака од операција може изводити на алтернативним машинама алаткама (што представља флексибилност машина алатки), коришћењем алтернативних алата (што се односи на флексибилност алата), као и оријентација алата (флексибилност оријентација алата). На пример, технолошка форма F1 може бити добијена операцијом 1, на алтернативним машинама M1, M2, или M3, коришћењем алтернативних алата T1 или T2, и оријентацијом алата у смеру +z. Узимајући у обзир и чињеницу да главно време обраде зависи како од карактеристика саме машине алатке (конкретно од типа преносника – ступњевит или континуалан) тако и од геометрије алата, може се закључити да време обраде зависи и од избора машине алатке и од избора алата. Стога, време обраде за операцију 1 на машини M1, коришћењем алата T1 износи 2.3s, док време обраде на истој машини M1, али алатом T2 износи 3.3s. Даље, технолошка форма F3, са могућношћу добијања на три алтернативна начина, најбољи је пример флексибилности процеса; први алтернативни начин јесте секвенца операција {3,4}, други начин је секвенца операција {6,7} и трећи начин операцијама {18,19}. На крају, технолошке форме F5 и F6 представљају примере за флексибилност редоследа операција; технолошка форма F5 може бити добијена хронолошки пре F6, исто као што и технолошка форма F6 може бити добијена хронолошки пре F5. Другим речима, редослед добијања ових технолошких форми не утиче на захтевани квалитет обраде. Како се технолошка форма F5 може добити или операцијом 9 или операцијом 24, а технолошка форма F6 операцијом 10 или операцијом 25, операције 9 и 10, као и операције 24 и 25 могу заменити редослед.

Табела 7.1: Техничка спецификација репрезентативног дела

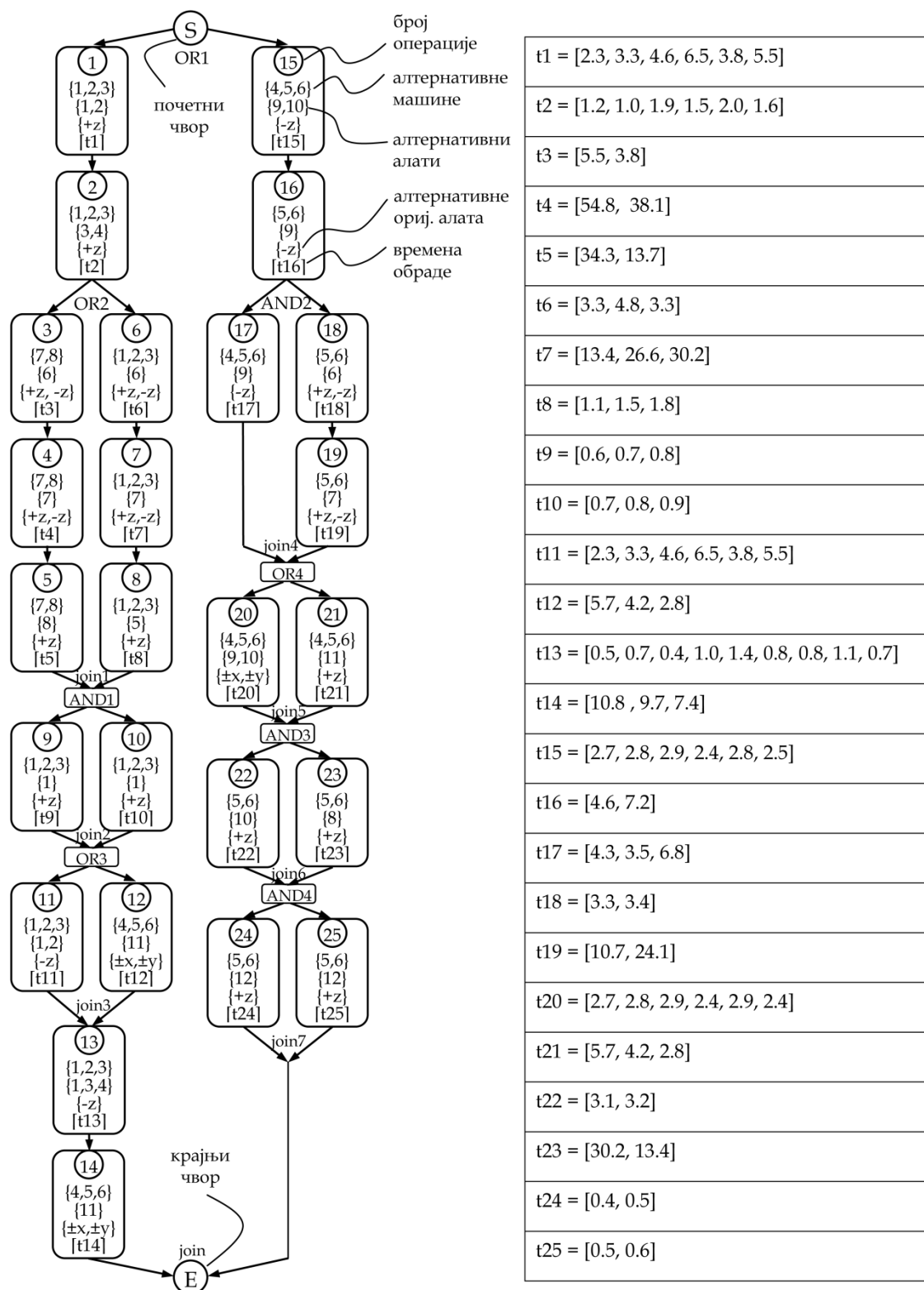
технолошка форма	толеранције (R _a)	алтернативне операције	алтернативне машине	алтернативни алати	алтернативне ориј. алата
F1	IT11 (6.3)	стругање (операција 1) глодање (операција 20) глодање (операција 21)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T9, T10 T11	+z +x, -x, +y, -y +z
F2	IT11 (6.3)	стругање (операција 2) глодање (операција 22)	M1, M2, M3 M5, M6	T3, T4 T10	+z +z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 3) проширивање (операција 4)	M7, M8 M7, M8	T6 T7	+z, -z +z, -z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 6) проширивање (операција 7)	M1, M2, M3 M1, M2, M3	T6 T7	+z, -z +z, -z
F3	IT10 (3.2)	бушење (операција 18) проширивање (операција 19)	M5, M6 M5, M6	T6 T7	+z, -z +z, -z
F4	IT8 (1.6)	проширивање (операција 5) унутрашње стругање (операција 8) проширивање (операција 23)	M7, M8 M1, M2, M3 M5, M6	T8 T5 T8	+z +z +z
F5	IT11 (6.3)	стругање (операција 9) глодање (операција 24)	M1, M2, M3 M5, M6	T1 T12	+z +z
F6	IT11 (6.3)	стругање (операција 10) глодање (операција 25)	M1, M2, M3 M5, M6	T1 T12	+z +z
F7	IT11 (6.3)	стругање (операција 11) глодање (операција 12) глодање (операција 15)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T11 T9, T10	-z +x, -x, +y, -y -z
F8	IT11(6.3)	стругање (операција 13) глодање (операција 16)	M1, M2, M3 M5, M6	T1, T3, T4 T9	-z -z
F9	IT11(6.3)	глодање (операција 14) глодање (операција 17)	M4, M5, M6 M4, M5, M6	T11 T9	+x, -x, +y, -y -z

Представљање флексибилних технолошких процеса се остварује на основу познатих информација о алтернативним машинама алаткама, алтернативним алатима, алтернативним оријентацијама алата, алтернативним редоследима операција, као и информацијама о свим операцијама (са потребним бројем захвата и пролаза) неопходним за обраду дела. Графови, Петријеве мреже, OR мреже, AND/OR мреже су само неке од многобројних метода које су у литератури коришћене за представљање флексибилности технолошких процеса обраде дела.

Метод представљања технолошког процеса путем AND/OR мрежа може се описати на следећи начин. Генерално, сваку мрежу технолошког процеса чине три врсте чворова: **почетни чвор**, један или више **средњих чворова**, **крајњи чвор**, као и три врсте конектора OR конектор, AND конектор и JOIN конектор. Почетни и крајњи чвор указују на почетак и крај технолошког процеса, док средњи чворови представљају редослед одвијања операција технолошког процеса и описују флексибилност машина, алата и оријентација алата. Сваки од средњих чворова, поред редног броја операције, садржи и сет алтернативних машина на којима се операција изводи, сет алтернативних алата којима се врши обрада, као и сет алтернативних оријентација алата, са одговарајућим временима трајања операције на алтернативној машини коришћењем алтернативног алата². Сви чворови мреже су повезани стрелицама, које указују на редослед извршавања операција. Имајући у виду расположиве ресурсе у производном погону (машине алатке, алате помоћу којих је могуће обрадити део, као и помоћне приборе), за део је могуће генерисати и одговарајуће алтернативне технолошке процесе. Сваки алтернативни технолошки процес почиње такозваним **OR конектором** (описује флексибилност технолошког процеса), а завршава се **JOIN конектором**, па се на основу вредности OR конектора (нула или један) доноси одлука о томе који ће од алтернативних технолошких процеса обраде дела бити одабран (види слике у наставку). Уколико је, на пример, вредност OR конектора нула, бира се лева алтернативна грана технолошког процеса, док се у супротном, за вредност OR конектора један, бира десна алтернативна грана технолошког процеса. У случају да се алтернативни технолошки процес, или пак цела мрежа технолошког процеса, не састоји од OR конектора, тада сви средњи чворови морају бити посећени приликом претраживања тј. све операције представљене мрежом морају бити извршене на алтернативним машинама алаткама.

² Напомена: свака технолошка операција је везана за алтернативну машину алатку. Уколико се нека операција састоји од више захвата, или више пролаза у оквиру једног захвата, време трајања операције је једнако збиру главних времена обраде за сваки од захвата.

AND конектор се уводи из потребе описивања флексибилности редоследа операција. Узимајући у обзир карактеристике овог типа флексибилности, AND конектор указује на могућност измене редоследа операција унутар AND-линка не нарушавајући при томе ограничења у погледу претхођења (енгл. *precedence constrains*)³. Секвенце операција технолошких процеса између OR чворова називају се још и OR-линкови, док се секвенце операција технолошких процеса између AND конектора називају AND-линкови. На слици 7.2 је приказан пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела са слике 7.1, са укљученим флексибилностима, као и детаљним описом машина алатки, алата, оријентација алата за сваку од операција.



Слика 7.2: Мрежа алтернативних технолошких процеса за репрезентативни део

³ Редослед операција се одређује тако да правила претхођења нису нарушена (на пример груба обрада претходи финој обради, фина обрада претходи брушењу, итд).

Ако се за пример узме операција 1, са мреже се јасно може уочити да је њу могуће изводити на некој од машина из сета {1, 2, 3}, коришћењем алата из сета алтернативних алата {1, 2}, са оријентацијом +z. Времена обраде за операцију 1 приказана су у вектору $t_1 = [2.3 \ 3.3 \ 4.6 \ 6.5 \ 3.8 \ 5.5]$.

Даље, {3, 4, 5}, {6, 7, 8}, {11}, {12} су четири OR-линк гране, док је {9,10} једна AND-линк грана када конектор OR1 узме вредност нула. Узимајући у обзир карактеристике оба типа конектора, OR и AND, један од могућих алтернативних технолошких процеса обраде репрезентативног дела је приказан следећим редоследом операција {1, 2, 6, 7, 8, 10, 9, 12, 13, 14}.

Математички модел за оптимизацију технолошких процеса

Оптимизација технолошког процеса има велики утицај на перформансе савремених технолошких система и може се извршити применом једног или више различитих оптимизационих критеријума (минималан утрошак енергије, минимална цена, минимално време производње, уравнотежен степен искоришћења машина алатки,...). Производно време (енгл. *production time* - *PT*) је један од најчешће коришћених критеријума при оптимизацији флексибилних технолошких процеса и представља збир времена обраде дела на машини алатки (енгл. *working time* - *TW*) и времена транспорта дела од машине алатке до машине алатке (енгл. *transportation time* - *TT*). Математички модел производног времена приказан је на следећи начин:

$$PT(i) = \sum_{j=1}^{P_{ij}} TW(i, j, k, l) + \sum_{j=1}^{P_{ij}-1} TT(i, l, (j, k_1), (j+1, k_2)), \quad i \in [1, n], j \in [1, P_{ij}],$$

где је:

$PT(i)$ – производно време за i -ти део;

$TW(i, j, l, k)$ – време трајања операције o_{ijl} на k -тој алтернативној машини;

$TT(i, l, (j, k_1), (j+1, k_2))$ – време транспорта дела i између алтернативних машина k_1 и k_2 ;

n – укупан број делова;

o_{ijl} – j -та операција l -ог технолошког процеса i -тог дела;

P_{ij} – број операција l -ог технолошког процеса i -тог дела;

k – алтернативне машине за операцију o_{ijl} ;

Претпоставке које се користе приликом примене овог математичког модела су следеће:

- све машине су доступне у почетном тренутку ($t_0=0$);
- на једној машини се може вршити само једна операција једног дела у једном тренутку;
- операције једног дела се не могу обављати симултано (истовремено) на више машина алатки (док се не заврши операција o_{ijl} , не може почети операција o_{ij+1l} i -тог дела).

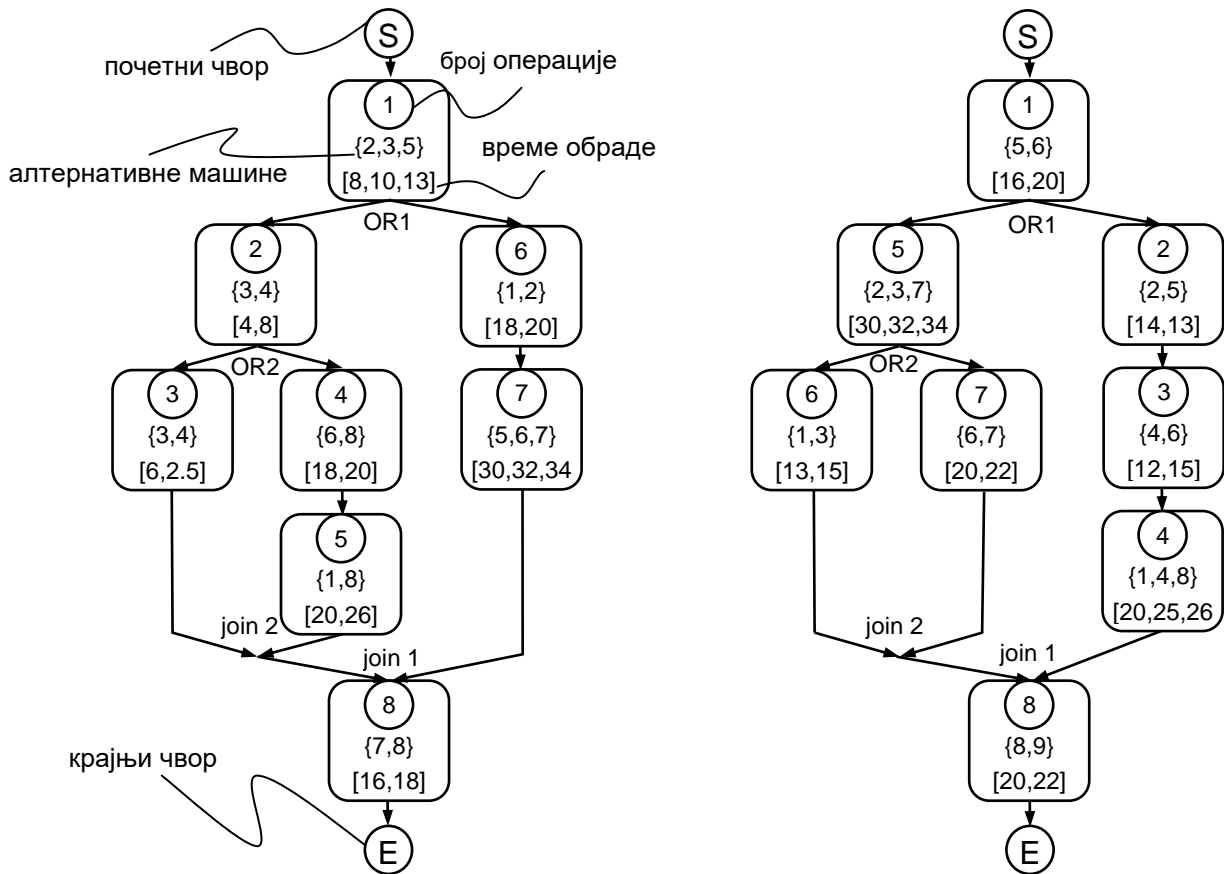
Функција циља или функција одлучивања (енгл. *objective function*) $f(i)$, која се користи при одабиру оптималног технолошког процеса за део i , има следећу формулацију:

$$\max f(i) = \frac{1}{TP(i)},$$

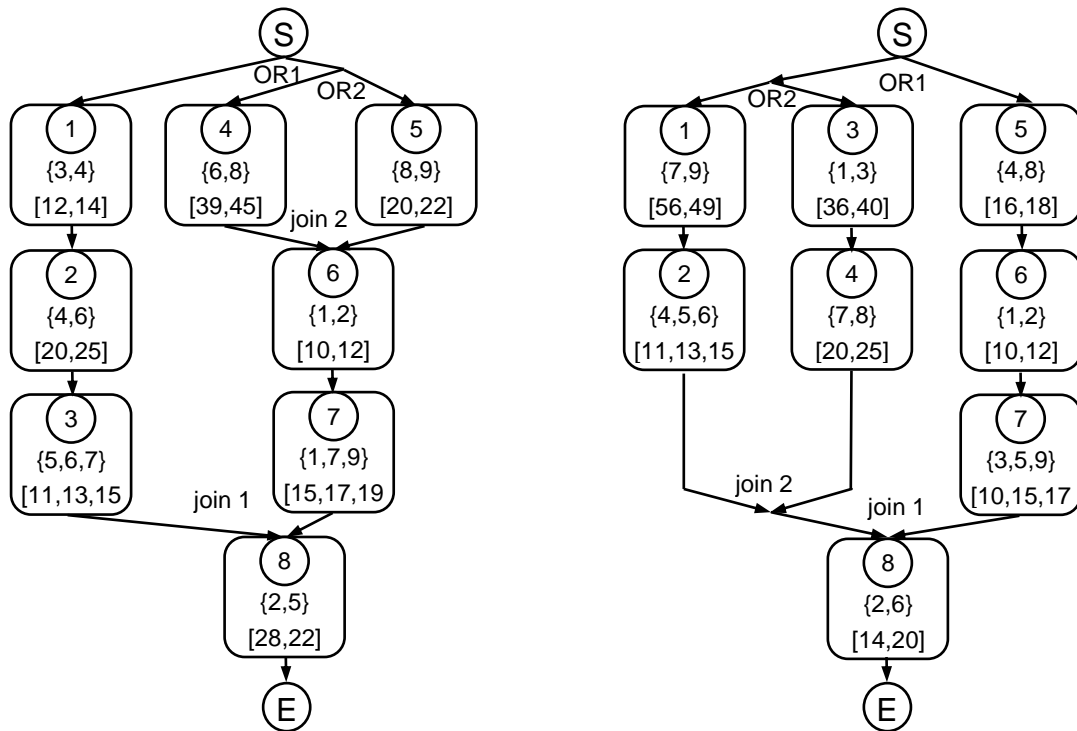
и представља технолошки процес са минималним производним временом $TP(i)$.

Применом неке од метода оптимизације (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*) или хибридни алгоритми) могуће је генерисати оптималне технолошке процесе обраде

делова. У наставку ће бити описана метода оптимизације на бази примене генетичких алгоритама за четири дела приказана мрежама алтернативних технолошких процеса обраде (слике 7.3а и 7.3б).



Слика 7.3а: Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде изабраних делова 1 и 2 са почетним, средњим и крајњим чворовима, као и OR и join конекторима

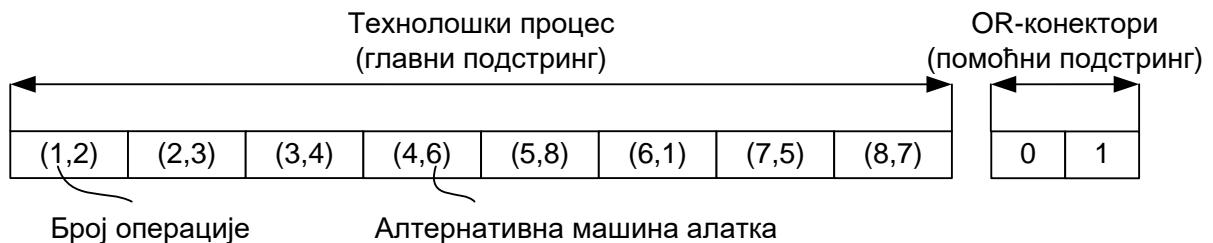


Слика 7.3б: Пример мреже алтернативних технолошких процеса обраде изабраних делова 3 и 4 са почетним, средњим и крајњим чворовима, као и OR и join конекторима

Генетички алгоритми у оптимизацији технолошких процеса

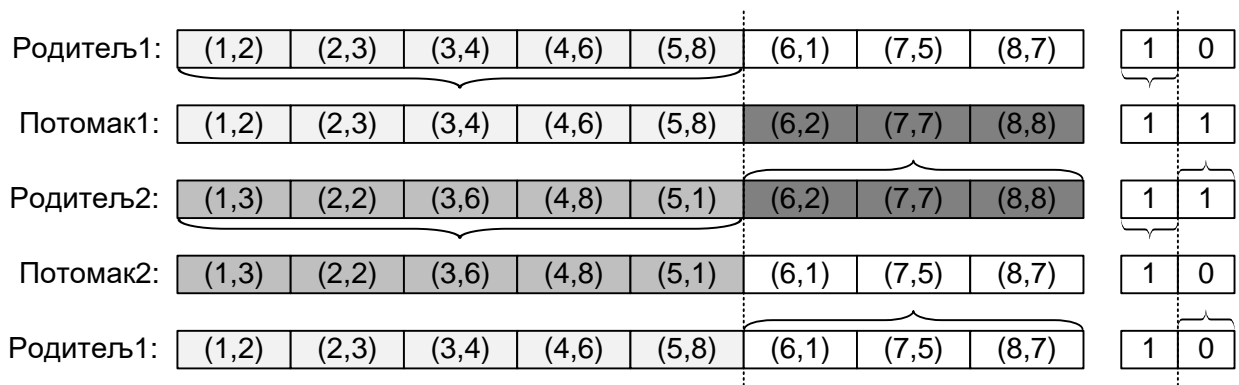
Генетички алгоритми представљају један од најпознатијих и најстаријих метода за решавање оптимизационих проблема, који се базира на природној селекцији, односно биолошкој еволуцији. Оригинална идеја о генетичким алгоритмима потиче из 1975. године, од John Holland-а, (University of Michigan), где се први пут предлаже кодирање генетске информације у виду хромозома (stringa) фиксне дужине и на тај хромозом примењују оператори генетичких алгоритама. Кодирање и декодирање свих индивидуа (јединки) које чине популацију, селекције индивидуа, укрштања хромозома и мутација чине операторе генетичких алгоритама. Главни кораци приступа базираног на генетичким алгоритмима за проблем оптимизације технолошких процеса су описани на следећи начин:

- ✓ **Генерисање јединки у иницијалној популацији.** Свака индивидуа у иницијалној популацији је представљена као хромозом, који се састоји од два дела различите дужине (главни подстринг, који представља технолошки процес и помоћни подстринг, који представља OR-конектор), као што је приказано на слици 7.4. Главни подстринг хромозома чине гени (број гена је једнак укупном броју операција), а сваки ген дефинишу два броја: први који представља број операције и други који представља алтернативну машину алатку на којој се изводи операција. Гени помоћног подстринга су представљени бројевима нула или један. Уколико је, на пример, вредност OR конектора нула, бира се десна алтернативна грана технолошког процеса, док се у супротном, за вредност OR конектора један, бира лева алтернативна грана технолошког процеса.
- ✓ **Евалуација функције циља и иницијализација параметара генетичких алгоритама.** Функција циља $f(i)$ за сваку од јединки у иницијалној популацији рачуна се према једначинама датим у поглављу о математичком моделу за оптимизацију флексибилних технолошких процеса. Параметри генетичких алгоритама при иницијализацији су: величина популације S , укупан број генерација M , вероватноћа укрштања p_c и вероватноћа мутације p_m .



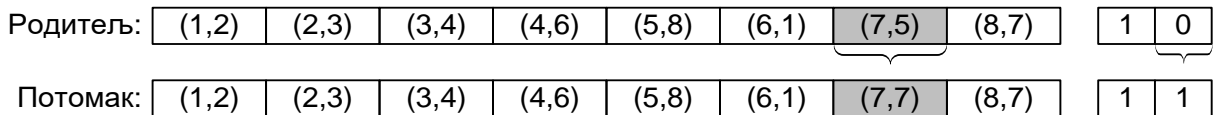
Слика 7.4: Шема кодирања хромозома

- ✓ **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 $f(i)$.
- ✓ **Укрштање.** На основу дефинисане вероватноће укрштања p_c , неке од индивидуа су одабране за укрштање (енгл. *crossover*). За сваки пар родитељских хромозома главног подстринга (технолошки процес), случајно је одабрана једна позиција укрштања, а потомци су добијени као што је приказано на слици 7.5. Дакле, потомак 1 настаје комбинацијом првог дела хромозома родитеља 1 (део лево од позиције укрштања) и другог дела родитеља 2 (део десно од позиције укрштања). На аналоган начин је добијен и потомак 2 (настаје комбинацијом првог дела родитеља 2 и другог дела родитеља 1). Укрштање за помоћни подстринг извршено је на следећи начин: један од случајно одабраних гена родитеља 1 постаје ген потомка 1, док се преостали ген добија од родитеља 2.



Слика 7.5: Оператор укрштања главног и помоћног подстринга хромозома

- ✓ **Мутација.** Након корака укрштања хромозома, а у складу са дефинисаном вероватноћом мутације p_m , неки хромозоми (родитељи) су случајно одабрани за мутацију. На основу случајно генерисане позиције мутације, на сваки од одабраних родитеља је примењен оператор мутације, а као резултат су добијени потомци са мутираним геном. У конкретном примеру, оператор мутације подразумева замену алтернативне машине алатке за случајно одабрану операцију и то на следећи начин: потомак се добија када се селектована машина алатка у главном подстрингу замени неком од машина алатки из сета алтернативних машина, слика 7.6. Тако је, на пример, ген (7,5) случајно селектован за оператор мутације; машина 5 је замењена машином 7, која је алтернативна машина за операцију 7 из сета машина (5,6,7).



Слика 7.6: Оператор мутације

- ✓ **Поновити наведене кораке жељени број генерација.** Број генерација M је дефинисан у кораку евалуације функције циља и иницијализације параметара генетичког алгорита.
- ✓ **Генерисати три оптимална алтернативна решења.** У табели 7.2 представљена су по три алтернативна технолошка процеса за сваки од четири дела, која се користе као улазни подаци за фазу термирања. На пример, за део 1, оптимални алтернативни технолошки процеси су (1,3)-(2,3)-(3,3)-(8,8), (1,2)-(2,3)-(3,3)-(8,8) и (1,5)-(2,3)-(3,3)-(8,8). Од приказана три оптимална процеса, одабран је технолошки процес (1,3)-(2,3)-(3,3)-(8,8), са вредностима OR конектора $OR1=1$ и $OR2=0$, са функцијом циља 0.0116 и производним временом 86s.

Табела 7.2: Алтернативни технолошки процеси за четири репрезентативна дела				
Део	Алтернативни технолошки процеси	Функција циља	Производно време	Одабрани технолошки процеси
1	(1,3)-(2,3)-(3,3)-(8,8)	0,0116	86	(1,3)-(2,3)-(3,3)-(8,8)
	(1,2)-(2,3)-(3,3)-(8,8)	0,0101	99	
	(1,5)-(2,3)-(3,3)-(8,8)	0,0087	115	
2	(1,5)-(5,3)-(6,3)-(8,9)	0,0076	131	(1,5)-(5,3)-(6,3)-(8,9)
	(1,6)-(5,3)-(6,3)-(8,9)	0,0070	142	
	(1,5)-(5,3)-(6,3)-(8,8)	0,0066	151	
3	(1,3)-(2,6)-(3,5)-(8,5)	0,0096	104	(1,3)-(2,6)-(3,5)-(8,5)
	(1,3)-(2,6)-(3,6)-(8,5)	0,0094	106	
	(1,4)-(2,4)-(3,5)-(8,5)	0,0075	134	
4	(1,9)-(2,5)-(8,6)	0,0090	111	(1,9)-(2,5)-(8,6)
	(1,9)-(2,6)-(8,6)	0,0088	113	
	(5,4)-(6,2)-(7,3)-(8,2)	0,0077	130	