

UDC: 006:004.42

INFO M: str. 27-33

**LEKIN - RAČUNARSKI PROGRAM ZA REŠAVNJE PROBLEMA
RASPOREĐIVANJA U PLANIRANJU PROIZVODNJE I USLUGA
SOFTWARE »LEKIN« FOR SOLVING SCHEDULING PROBLEMS
IN PLANNING OF PRODUCTION AND SERVICING**

Zoran Rakićević, Jovana Kojić
Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka

REZIME: U ovom radu prikazan je računarski program LEKIN, namenjen rešavanju problema raspoređivanja, u procesno-organizovanoj proizvodnji (engl. Job Shop problem). Najpre je opisan proces planiranja proizvodnje i usluga i ukazano je na mesto raspoređivanja u procesu planiranja. Potom je opisan računarski program LEKIN - nakon opisa korisničkog interfejsa samog programa, predstavljene su njegove mogućnosti za rešavanje upravljačkih problema raspoređivanja, kroz metode rešavanja koje su implementirane u ovaj računarski program.

KLJUČNE REČI: Planiranje i raspoređivanje u proizvodnji, Job-shop problem, Računarski program LEKIN, Heuristike za rešavanje Job-shop problema.

ABSTRACT: This paper presents LEKIN – software for solving job shop scheduling problems in manufacturing and services. First, the process of production and service planning is described and it is pointed out to the place of scheduling in the planning process. Then, the computer program LEKIN is described - after the description of the user interface of the LEKIN, it's possibility for solving managerial scheduling problems is showed through an explanation of methods implemented in this software.

KEY WORDS: Production planning and scheduling, Job Shop problem, LEKIN software, Heuristics for solving Job-shop problem.

1. UVOD

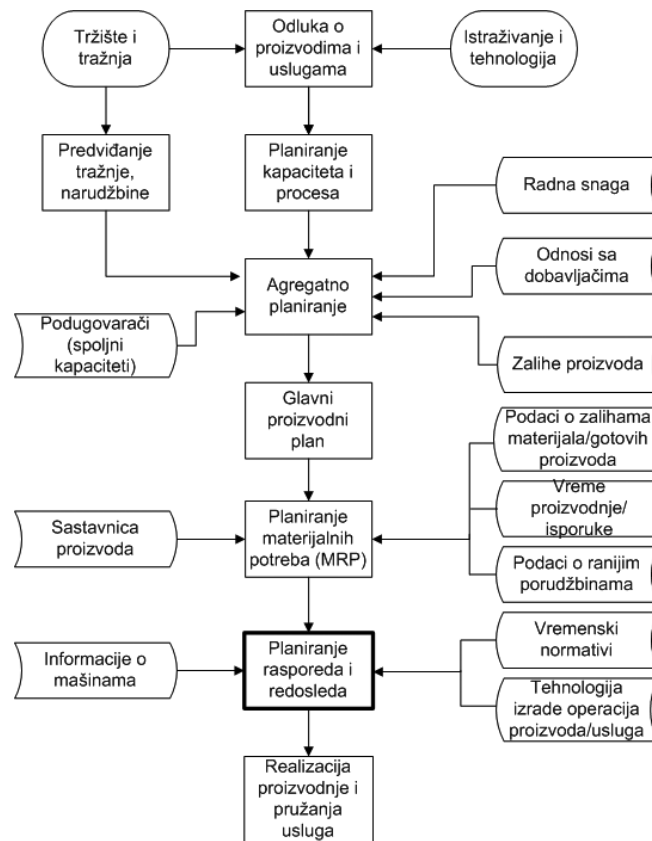
Problemi planiranja i raspoređivanja, koji čine sastavni deo procesa upravljanja i odlučivanja u svakodnevnom poslovanju kako proizvodnih tako i uslužnih preduzeća, važan su poslovni aspekt kome je u današnje vreme posvećena velika pažnja. U današnjem konkurentskom okruženju, efikasan proces planiranja i raspoređivanja i efektivan plan i raspored, predstavljaju neophodnost za opstanak na tržištu.

Planiranje je faza upravljanja u kojoj se preciziraju ciljevi koji se žele postići, kao i akcije i aktivnosti potrebne za dostizanje predloženih ciljeva uz uvažavanje svih ograničenja. [1] Domen planiranja u proizvodnji i pružanju usluga su ciljevi i akcije koje se definišu i sprovode kako bi omogućile efikasno i efektivno sprovođenje samog procesa proizvodnje i pružanja usluga. Cilj planiranja proizvodnje je i optimizacija korišćenja resursa kako bi se postigli ciljevi proizvodnje. [2]

Na osnovu dijagrama koji je predstavljen Slikom 1 vidi se mesto i uloga procesa raspoređivanja u okviru procesa planiranja. [3]

Problemi raspoređivanja u planiranju proizvodnje i usluga su na nivou kratkoročnog tj. operativnog planiranja i obuhvataju određivanje redosleda i rasporeda proizvodnje proizvoda na mašinama ili raspored uslužnih aktivnosti na izvršioce u procesu pružanja usluga, kao i definisanje potrebnih resursa za izvršavanje tih aktivnosti. Suština problema raspoređivanja predstavlja prostorni raspored aktivnosti na radne centre i vremenski raspored aktivnosti i operacija nekog posla, dat kroz termin-plan koji se najčešće predstavlja u vidu gantograma. Poznato je da neki od takvih problema mogu biti: određivanje rasporeda i redosleda proizvodnje proizvoda po mašinama; određivanje redosleda izvođenja aktivnosti na projektu; rasporeda transportnih sredstva i njihovih posada u procesu transporta; rasporeda izvršilaca u procesu pružanja usluga i mnogi

drugi. Takvi problemi raspoređivanja u realnim slučajevima su zbog velikih dimenzija i ograničenosti kapaciteta ljudi i mašina NP-teški problemi, pa se za njihovo rešavanje najčešće koriste jednostavne heuristike u vidu definisanih pravila raspoređivanja, kao i složene heuristike u vidu metoda lokalnog pretraživanja ili veštačke inteligencije.



Slika 1. – Proces planiranja proizvodnje i pružanja usluga (modifikovan izvor [3])

Usled dinamičnosti savremenog poslovanja, koja dovodi do brzih promena okolnosti u kojima preduzeće posluje, dobijena rešenja u prošlosti često ne zadovoljavaju ni trenutne zahteve sistema, te se sam proces modelovanja problema iz domena operacionog menadžmenta ne može zamisliti bez upotrebe savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija. Sam proces raspoređivanja u proizvodnji i pružanju usluga zahteva izuzetno poznavanje tehnika matematičkog modelovanja iz oblasti operacionih istraživanja, kao i veštine programiranja kompleksnih algoritama u programskim jezicima. Menadžeri koji ne poseduju takva znanja mogu koristiti već postojeće računarske programe za rešavanje problema raspoređivanja. Računarski program LEKIN predstavlja jedan od takvih alata.

Rad koji se predstavlja je organizovan u nekoliko delova. Posle uvodnog dela, opisuje se jedan od problema raspoređivanja, engl. *Job Shop problem*. Nakon toga detaljno se opisuje računarski program LEKIN, namenjen rešavanju ovog problema.

2. JOB SHOP PROBLEM RASPOREĐIVANJA

Proizvodne sisteme najčešće karakterišu brojni faktori: broj proizvodnih resursa ili mašina, njihove karakteristike i konfiguracija, nivo automatizacije, tip sistema za manipulisanje u unutrašnjem transportu, itd. Razlike u brojnim karakteristikama prouzrokuju pojavu različitih tipova proizvodnog procesa. Različiti tipovi proizvodnih procesa iziskuju upotrebu različitih modela u planiranju, a samim tim i raspoređivanju proizvodnje. [3]

Problem raspoređivanja, za čije rešavanje je namenjen računarski program LEKIN, koji će nešto kasnije biti predstavljen, je problem raspoređivanja u procesno organizovanoj proizvodnji.

Procesno organizovana proizvodnja, poznata i kao prekidna ili radionička proizvodnja, je tip proizvodnje velikog varijeteta, a malog obima, koji se često sreće u proizvodnim i uslužnim organizacijama. Ovaj tip proizvodnog sistema karakteriše to da je raspored mašina organizovan i grupisan prema procesu obrade; da se proizvodi najčešće prave po narudžbini; da se proizvodi značajno razlikuju u pogledu korišćenih materijala, zahteva operacija obrade i njihovog redosleda, kao i vremena obrade i pripreme.

U ovom proizvodnom okruženju, svaki proizvod, ili svaka mala grupa proizvoda proizvodi se tako što prolazi kroz različit niz operacija, krećući se od jedne do druge mašine ili mašinskog centra u skladu sa redosledom operacija izrade svakog proizvoda.

Velika prednost ovakvog načina organizacije je njegova fleksibilnost, a veliki nedostatak se može javiti usled velikih vremenskih gubitaka u unutrašnjem transportu. Problem koji se ovde posebno ističe je definisan pitanjem: Kako definisati redosled proizvodnje proizvoda po mašinama? Kojem proizvodu dodeliti prioritet u proizvodnji tako da se proizvodni ciklus smanji? Ovakav problem naročito dolazi do izražaja

usled ograničenosti kapaciteta mašina u proizvodnoj radionici ili pogonu i pojave uskih grla u proizvodnom procesu. Problem raspoređivanja u procesno organizovanoj proizvodnji je problem raspoređivanja u proizvodnoj radionici i poznat je pod engleskim nazivom *Job Shop*.

Job shop problem se može definisati kao problem promenljivog toka diskontinualne, pojedinačne i maloserijske proizvodnje karakteristične za grupni raspored tj. proizvodni pogon ili radionicu u kojoj su mašine grupisane prema vrsti obrade. Dakle, *Job Shop* problem predstavlja problem rasporeda operacija obrade nekoliko proizvoda na više mašina. U ovom problemu, svaki proizvod koji je potrebno rasporediti zahteva obradu na više mašina. Redosled proizvodnje svakog proizvoda na mašinama unapred je data. Suština problema je, u okviru raspoloživog kapaciteta mašina, definisati redosled proizvoda na svakoj mašini, imajući u vidu da svaki proizvod zahteva različito vremensko angažovanje.

Job Shop problem raspoređivanja se može predstaviti pomoću modela disjunktivnog programiranja. [4]

$$\min C_{max}$$

p.o.

$$y_{kj} - y_{ij} \geq p_{ij} \text{ za svako } ((i,j),(k,j)) \in A$$

$$C_{max} - y_{ij} \geq p_{ij} \text{ za svako } (i,j) \in N$$

$$y_{ij} - y_{il} \geq p_{il} \text{ ili } y_{il} - y_{ij} \geq p_{ij} \text{ za svako } ((i,l),(i,j)) \in B$$

$$y_{ij} \geq 0 \text{ za svako } (i,j) \in N$$

gde su:

n – broj proizvoda (poslova), $j = 1, \dots, n$;

m – broj mašina, $i = 1, \dots, m$;

(i,j) – predstavlja uređeni par tj. operaciju obrade j -tog proizvoda na i -toj mašini;

p_{ij} – vreme obrade j -tog proizvoda na i -toj mašini (tj. vremenski normativ trajanja operacije);

$G = (N, A \cup B)$ – disjunktivni graf gde se čvorovima na grafu predstavljaju operacije $(i,j) \in N$, $j = 1, \dots, n$, $i \in M^j \subset M := \{1, \dots, m\}$, a preko A i B se definišu lukovi između čvorova iz N ;

A – predstavlja konjunktivne lukove, koji označavaju redosled operacija obrade jednog proizvoda;

B – predstavlja disjunktivne lukove, koji označavaju vezu dve operacije koje pripadaju različitim proizvodima, a treba da se proizvode na istoj mašini;

y_{ij} – vreme kada počinje operacija (i, j) , odnosno kada počinje da se obrađuje j -ti proizvod na i -toj mašini;

C_{ij} – vreme završetka j -tog proizvoda na i -toj mašini;

C_{max} – vremenski trenutak u gantogramu kada se završi poslednja operacije izrade proizvoda. Ova funkcija cilja jednaka je maksimalnoj vrednosti C_{ij} koja predstavlja vreme završetka j -tog proizvoda na i -toj mašini ($C_{max} = \max\{C_{ij}\}$);

Prva grupa ograničenja iz matematičkog modela obezbeđuje da svaka naredna operacija obrade nekog proizvoda ne može početi dok se prethodna operacija ne završi. Druga grupa ograničenja se odnosi na funkciju C_{\max} , koja označava da vremenski trenutak završetka neke operacije nije veći od vremenskog trenutka u kome se završi poslednja operacija obrade. Treća grupa ograničenja se odnosi na redosled između operacija obrade različitih proizvoda na istoj mašini, koji može biti različit. Poslednja grupa ograničenja se odnosi na upravljačku promenljivu koje moraju uzeti nenegativne vrednosti.

3. RAČUNARSKI PROGRAM »LEKIN«

Računarski program LEKIN® je namenjen rešavanju različitih varijanti problema *Job Shop* (posebno problema *Flexible Job-Shop*). LEKIN je razvijen na Leonard N. Stern poslovnoj školi u okviru Univerziteta u Njujorku.[5]

Računarski program LEKIN namenjen je za korišćenje u akademske svrhe, kao obrazovni alat za upoznavanje studenata sa teorijom i praksom problema raspoređivanja. Akademska verzija ovog softvera, koja će u radu biti predstavljena, ima sposobnost rada sa sledećim dimenzijama problema raspoređivanja: 50 proizvoda, 20 radnih centara i 100 mašina. Minimalna konfiguracija koja je potrebna za instaliranje i pokretanje ovog računarskog programa je: 3 MB memorije hard diska, 8 MB RAM operativne memorije, 1 MB RAM memorije grafičke kartice i neki od operativnih sistema: Windows 95, 98, 2000, XP.

Neke od funkcionalnih karakteristika ovog softvera su:

– Podržava šest osnovnih problema raspoređivanja u okviru proizvodnog okruženja:

- *single machine* – problem rasporeda na jednoj mašini;
- *parallel machines* – problem rasporeda na nekoliko paralelnih mašina;
- *flow shop* – problem rasporeda n proizvoda na m mašina u kome svi proizvodi imaju identičnu putanju koju slede, a koja se sastoji od unapred određenog niza operacija na mašinama;
- *flexible flow shop* – je problem *Flow Shop* u kome se u pojedinim fazama kroz koje se proizvodi obrađuju, umesto jedne mašine, nalazi nekoliko istorodnih mašina grupisanih u jedan mašinski centar koji je namenjen proizvodima sa istim tipom obrade;
- *job shop* – problem rasporeda n proizvoda na m mašina u kome svaki proizvod ima različitu i unapred određenu rutu koju sledi, a koja se sastoji od niza operacija na mašinama;
- *flexible job shop* – ovaj problem nastaje kada se u pojedinim fazama kroz koje se obrađuju proizvodi, umesto jedne mašine, nalaze mašinski centri sa mašinama iste vrste koje mogu da izvršavaju istu vrstu obrade;

– Jednostavan korisnički interfejs i jednostavno unošenje podataka;

– Primena različitih pravila raspoređivanja i heuristika;

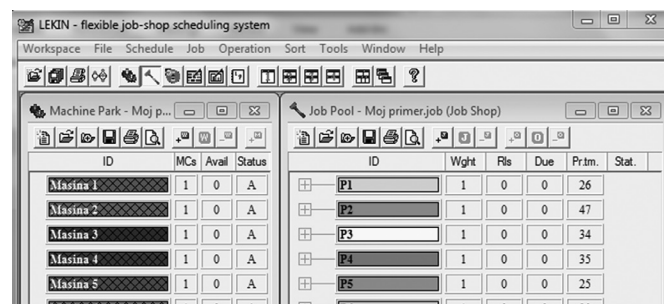
- Jednostavno generisanje gantograma sa mogućnošću korekcija putem premeštanja pojedinih elemenata gantograma, opcijom *drag and drop*;
- Jednostavno i lako unošenje korisnički definisanih i eksternih algoritama.

Računarski program LEKIN ima i nekoliko ograničenja:

- Isključivo se koriste podaci koji su determinističke prirode, nikako stohastičke;
- Bilo koje dve mašine, sa svojim operacijama izrade, moraju biti potpuno zamenljive ili potpuno nezamenljive. Na primer: nije moguća situacija u kojoj jedan posao može da se obavi na mašini A ili na mašini B (u ovom slučaju mašine A i B su zamenljive), a neki drugi posao može se vršiti samo na mašini A (u ovom slučaju mašine A i B nisu zamenljive);
- Svaki proizvod mora imati pozitivno vreme obrade;
- Tok operacija svakog proizvoda je unapred poznat. Zbog toga problem *Open shop*, problem rasporeda nekoliko proizvoda u kome redosled operacija obrade na mašinama nije definisan, nije podržan sa akademskom verzijom ovog programa;
- Svaki proizvod mora proći kroz radni centar najviše jedanput. Recirkulacija, tj. ponovno vraćanje u radne centre, nije podržano akademskom verzijom ovog programa;
- Nije dozvoljeno da se neka operacija na jednoj mašini prekine i nastavi na drugoj mašini, ili sačeka da bi se neka druga operacija izvršila na istoj mašini.

Svrha računarskog programa LEKIN jeste unošenje podataka o problemu rasporeda, dobijanje različitih rešenja u vidu rasporeda, kao i evaluiranje njegovih performansi. Izgled programa LEKIN predstavljen je na Slici 2. Početni radni prostor u samom prozoru programa je podeljen u dva dela. Jedan deo se odnosi na informacije o raspoloživim mašinama iz mašinskog parka, a drugi na informacije o proizvodima koje je potrebno rasporediti.

Informacije o mašinama mogu se videti kroz prozor mašinski park, engl. *Machine Park* prikazan na Slici 2. Tu su predstavljeni: nazivi mašina, njihova struktura, tj. njihov broj (MCs), vremenski period u kome mašina postaje raspoloživa za obradu (*Avail*), status mašine koji je u vezi sa vremenima pripreme za obradu određenog predmeta rada (*Status*).



Slika 2. Početni izgled programa LEKIN

Mašinski park se sastoji od nekoliko mašinskih centara. Svaki mašinski centar se sastoji od niza mašina koje su sposobne da izvedu istu vrstu posla tj. obradu na proizvodima. Svaka mašina može pripadati samo jednom mašinskom centru (ili radnom centru - engl. *Work centre*). Mašine koje pripadaju istom mašinskom centru sposobne su za rad na istim tipovima proizvoda, ali uz različite normative. Svaki proizvod može biti obrađen na bilo kojoj mašini iz mašinskog centra. Mašine u istom mašinskom centru, iako sposobne za izvršavanje istih operacija na proizvodima, imaju različite vremenske trenutke kada su dostupne za izvršavanje nekog posla. Mašine iz različitih mašinskih centara nisu međusobno zamenljive.

LEKIN podržava dva osnovna tipa mašinskog parka: običan i fleksibilan. **Običan mašinski park** (engl. *Ordinary Machine Park*) je mašinsko okruženje kod koga se svaki mašinski centar sastoji od tačno jedne mašine. Pored proizvodnog okruženja sa jednom mašinom (engl. *Single machine*) ovde spadaju i obični *Flow Shop* i *Job Shop*, proizvodna okruženja tipa radionice ili pogona. Za razliku od toga **fleksibilni mašinski park** (engl. *Flexible Machine Park*) je proizvodno okruženje gde je svakom mašinskom centru dozvoljeno da ima više od jedne mašine iste vrste. Primeri ovakvog proizvodnog okruženja su okruženje sa paralelnim mašinama (*Parallel machine* ili *Flexible Single machine*) i *Flexible Flow Shop* okruženje.

Dimenzije problema, predstavljene kroz broj proizvoda puta broj mašina, koje rešava računarski program LEKIN prikazane su Tabelom 1.

Tabela 1. Dimenzije problema – LEKIN

Proizvodno okruženje	Dimenzije problema podržane programom LEKIN
Single machine	50X1
Parallel Machine (Flexible Single Machine)	50X100
Flow Shop	50X20
Flexible Flow Shop	50X20
Job Shop	50X20
Flexible Job Shop	50X20

Informacije o proizvodima predstavljene su kroz prozor *Job Pool* (Slika 2). Proizvodi koji se izvide na mašinama mogu imati sledeće parametre:

(Rls) Release date r_j – vreme kada proizvod, tj. njegova prva operacija, postaje raspoloživ za obradu;

(Due) Due date d_j – rok završetka, tj. vreme do koga bi proizvod trebalo da se završi. Ukoliko se proizvod ne završi do ovog vremena, on prouzrokuje kašnjenje i moguće plaćanje penala. Jedan od ciljeva raspoređivanja jeste smanjenje zakašnjenja na najmanju moguću meru;

(Wght) Weight w_j – težinski koeficijent za naglašavanje značajnosti među proizvodima. Ova vrednost može se koristiti u različitim kriterijumskim funkcijama kako bi se određenom važnom proizvodu dao veći prioritet, i na taj način pokušalo smanjiti njegovo kašnjenje u odnosu na druge proizvode;

(Pr.tm.) Processing Time p_j – vreme obrade proizvoda, dobijeno sabiranjem vremena obrade svih njegovih operacija obrade;

(Stat.) Status – status operacije i koristi se za definisanje pripremnog vremena za operaciju. Status se obeležava slovima engleskog alfabeta od A do Z. Operacije sa istim statusom imaju jednaka priprema vremena, koja se uzimaju iz matrice pripremnih vremena svakog mašinskog centra koje zadaje korisnik u programu;

(+) Route – putanja j -tog proizvoda koja određuje tok operacija izrade na mašinama. Ispod svakog proizvoda u prozoru Job Pool, a prethodnim klikom na znak +, može se videti redosled i vremenski normativi operacija izrade proizvoda na mašinama;

Ukoliko imamo aktivni raspored proizvoda kao rešenje koji je generisano nekim pravilom ili heuristikom u softverskom paketu LEKIN, onda se ovde u okviru informacija o proizvodima mogu naći i sledeći podaci: Vremenski period kada proizvod počinje sa obradom (*Bgn*), vremenski period kada je proizvod završen (*End*), ukupno kašnjenje proizvoda (T) i ukupno kašnjenje koje je pomnoženo sa težinskim koeficijentom (wT).

Nakon što se definišu parametri proizvoda i mašina iz problema raspoređivanja, korisnik može kreirati rešenja, izborom različitih komandi iz menija *Schedule*, koja se odnose na:

- Jednostavna pravila raspoređivanja: *SPT*, *ATCS*, *EDD*, *LPT*, itd., koja će kasnije biti predstavljena u radu.
- Složene heuristike kao što su *Shifting Bottleneck*, *Local Search*.
- Algoritme koji su lično napravljeni od strane korisnika.
- Ručni unos redosleda proizvoda po mašinama.

Da bi se dobijena rešenja generisana gantogramom, međusobno poredila, postoje kriterijumske funkcije za merenje uspešnosti svakog rešenja. Kriterijumske funkcije koje se koriste u modelima raspoređivanja, a podržane su u računarskom programu LEKIN su:

- *Makespan* ($\min C_{max}$) – vreme obrade svih proizvoda, ili vreme kada poslednji proizvod završi sa obradom, $C_{max} = \max_j(C_j)$, gde je C_j vreme kada se j -ti proizvod završi;
- *The Maximum Tardiness* ($\min T_{max}$) – maksimalno zakašnjenje. Pod zakašnjenjem se podrazumeva pozitivna razlika između vremena stvarnog završetka obrade određenog proizvoda i vremenskog roka do koga se očekuje njegov završetak, tj. $T_j = (C_j - d_j)^+$; Maksimalno zakašnjenje se predstavlja kao $T_{max} = \max_j(T_1, \dots, T_n)$;
- *The Total Number of Late Jobs* ($\min \sum_{j=1}^n U_j$) – ukupan broj proizvoda koji su u zakašnjenju. Ukoliko j -ti proizvod kasni, onda je $U_j = 1$, u suprotnom je nula. Ukupan broj proizvoda koji kasne sa završetkom obrade može biti pomnožen sa njihovim težinskim koeficijentima pa se može predstaviti sledećom funkcijom cilja: $\min \sum_{j=1}^n w_j U_j$;
- *The Total Flow Time* ($\min \sum_{j=1}^n C_j$) – zbir vremena završetka obrade svih proizvoda. Ovo vreme može biti

pomnoženo težinskim koeficijentima svakog proizvoda da bi se dobila sledeća funkcija $\min \sum_{j=1}^n w_j C_j$;

- *The Total Tardiness* ($\min \sum_{j=1}^n T_j$) – zbir kašnjenja svih proizvoda. Ova kriterijumska funkcija može biti predstavljena i sa ponderima za svaki proizvod. Ponderi mogu označavati troškove kašnjenja j -tog proizvoda po jedinici vremena. $\min \sum_{j=1}^n w_j T_j$.

Sve prethodno navedene kriterijumske funkcije je potrebno minimizirati.

Nakon upoznavanja sa kriterijumima uspešnosti, može se pristupiti procesu dobijanja rešenja izborom neke od metoda rešavanja, kao što su heuristike i jednostavna pravila raspoređivanja. Korisnici mogu primeniti nekoliko metoda nad istim podacima radi poređenja dobijenih rešenja.

Raspoložive heuristike su:

A) **Shifting Bottleneck Heuristics** – Heuristike premeštanja uskih grla:

- **General SB Routine** (engl. *Generic Shifting Bottleneck algorithm*), autor: Nutthapol Asadathorn [6]. Heuristika premeštanja uskih grla deli problem rasporeda proizvoda na m mašina, na m problema rasporeda na jednoj mašini. U svakoj iteraciji postoje mašine na kojima je izvršeno raspoređivanje u prethodnim iteracijama. Raspoređivanje se vrši na nekoj novoj mašini koja predstavlja usko grlo, prema rešenju tj. redosledu proizvoda dobijenom rešavanjem problema raspoređivanja samo na toj mašini. Nakon toga, metoda pokušava da ponovo rasporedi već raspoređene proizvode da bi se smanjilo ukupno kašnjenje. Ova heuristika podržava rešavanje sledećih problema raspoređivanja: *Single Machine, Parallel Machines, Flow Shop, Flexible Flow Shop, Job Shop, Flexible Job Shop*, problem sa datim vremenima pripreme i vremenima kada pojedini proizvodi postaju raspoloživi, kao i nekoliko kriterijumskih funkcija: $C_{max}, T_{max}, \sum_{j=1}^n C_j, \sum_{j=1}^n T_j, \sum_{j=1}^n w_j C_j, \sum_{j=1}^n w_j T_j$.

- **Objective Specific routines** – heuristike premeštanja uskih grla sa definisanom kriterijumskom funkcijom:

SB/sum wT (engl. *Shifting Bottleneck algorithm for Total Weighted Tardiness*) – autor: Marcos Singer. [7] Ova heuristika je specijalno namenjena za običan problem *job shop* i *flow shop* (ali i za problem rasporeda na jednoj mašini), i koristi kriterijum $\sum_{j=1}^n w_j T_j$. Kada se težinski koeficijenti ne razmatraju u modelu raspoređivanja onda funkcija cilja postaje $\sum_{j=1}^n T_j$. Ova heuristika daje vrlo dobra rešenja za problem kome je namenjena. Ukoliko se heuristika koristi na primeru problema gde rokovi završetka nisu definisani (*due date* = 0), tada funkcija cilja postaje jednaka ukupnoj ponderisanoj vrednosti završetka svih poslova ($\sum_{j=1}^n w_j C_j$). U ovakvoj situaciji, lokalno pretraživanje daje bolje rezultate od heuristike premeštanja uskih grla. Brzina rešavanja problema ove heuristike opada sa pora-

stom dimenzija problema (to se dešava već prilikom porasta broja poslova na više od 12). U budućnosti se u program LEKIN planira uvođenje heuristike kotrljajućeg vremenskog horizonta planiranja (engl. *Rolling Horizon heuristics*), kreirane od istog autora, koja će moći da rešava *Job shop* problem velikih dimenzija.

SB/Tmax (engl. *Shifting Bottleneck heuristic for Maximum Tardiness*) – autor: Alkis Vazacopoulos, takođe je namenjena rešavanju uobičajenog *job shop* i *flow shop* problema. Algoritam ove heuristike koristi dve kriterijuma: najveće zakašnjenje (*Maximum Tardiness*), kao primarni kriterijum, i vremenski trenutak u kome su svi proizvodi završeni (*Makespan*), kao drugi kriterijum.

- B) **Local Search Heuristic** – autor: Stephan Kreipl - ova heuristika zasniva se kombinaciji iterativnog lokanog pretraživanja boljih rasporeda i *metropolis* algoritma. [8] Koristi se za problem *job shop* i *flow shop* (izuzev *flexible job shop* i *flexible flow shop* problema), sa svim kriterijumskim funkcijama: $C_{max}, T_{max}, \sum_{j=1}^n C_j, \sum_{j=1}^n T_j, \sum_{j=1}^n w_j C_j, \sum_{j=1}^n w_j T_j$. Prilikom pozivanja ove heuristike, korisnik programa sam određuje vreme trajanja lokalne pretrage.

- C) **Hibridna metoda rešavanja problema** – metode dobijene kombinacijom dve ili više heurističkih metoda:

- **SB-LS** (engl. *Shifting Bottleneck & Local Search*) – autor: Ya Yang. [9] Ova heuristika predstavlja kombinaciju dve navedene heuristike i koristi se za rešavanje problema *Flow Shop* i *Flexible Flow shop*. Kod *Flexible Flow Shop* problema, ako je broj proizvoda koje je potrebno rasporediti znatno veći od broja mašina, ovaj algoritam se pokazuje znatno uspešnijim u odnosu na ostale algoritme.

- D) **Heuristike definisane od strane krajnjeg korisnika** - pored korišćenja postojećih heuristika, krajnji korisnik preko opcije iz menija (*Tools/Plug-in Manager*) može koristiti heuristike koje su razvijene van softvera LEKIN, u nekom programskom jeziku kao .exe fajl. Preporuka je Visual C++, ali mogu i ostale okruženja za razvoj aplikacija u Win32.

U generisanju rešenja, pored prethodno navedenih heuristika, mogu se koristiti i brojna jednostavna pravila (engl. *dispatching rules*) koja daju dovoljno dobra rešenja, a ponekad su i jedina mogućnost primene. Pravila raspoređivanja koje pokriva LEKIN su:

- **EDD** (engl. *Earliest Due Date*) - Prvo rasporediti proizvod sa najranijim rokom završetka. Ovo pravilo je poznato i pod nazivom *Jackson's rule* i garantuje optimalno rešenje za problem minimizacije kašnjenja u rasporedu na jednoj mašini $1||L_{max}$ [10]. Ovo pravilo raspoređivanja je dobro sa aspekta kriterijumske funkcije ($\min L_{max}$).

- **MS** (engl. *Minimum Slack*) - Prvo rasporediti proizvod sa najmanjim vremenskim zalihama. Vremenska zalih nekog j -tog proizvoda se izračunava preko formule $\max(d_j - p_j - t, 0)$, gde d_j - predstavlja rok za završetak obrade j -tog proizvoda; p_j - vreme obrade j -tog proizvoda; t - vremenski trenutak u kome se vrši raspoređivanje. Ovo pravilo ima sličan efekat kao pravilo *Earliest due date (EDD)* pa smanjuje kašnjenje proizvoda ($\min L_{max}$) i ima za cilj smanjenje vremenskih rezervi na mašinama, kao i smanjenje čekanja proizvoda na obradu.
- **ATCS** (engl. *Apparent Tardiness Cost with Setups*) - pravilo raspoređivanja namenjeno minimizaciji ponderisane vrednosti ukupnog kašnjenja. Prema ovom pravilu, prioritet pri raspoređivanju ima proizvod sa najvećom vrednošću funkcije:

$$I_j(t, l) = \frac{w_j}{p_j} e^{\frac{(-\max(d_j - p_j - t, 0))}{k_1 \bar{p}}} e^{-\frac{s_{ij}}{k_2 s}}$$

gde su, pored već opisanih oznaka, još i:

- l – indeks proizvoda koji je upravo završen i poslednji dodat u raspored;
- \bar{p} – prosečno vreme obrade svih proizvoda;
- \bar{s} – prosečno vreme pripreme svih proizvoda;
- s_{ij} – pripremno vreme potrebno kada proizvod j dolazi na obradu posle proizvoda l ;
- k_1 i k_2 – parametri za skaliranje. Njihovu vrednost može definisati korisnik, ali se može koristiti i preporuka data u literaturi [11].

$$k_1 = 4,5 + R, \text{ za } R \leq 0,5 \quad k_2 = \frac{\tau}{(2\sqrt{\eta})}$$

$$k_1 = 6 - 2R, \text{ za } R > 0,5$$

gde su:

$$R = \frac{(d_{max} - d_{min})}{C_{max}} - \text{raspon roka završetka (engl. Due Date Range); u kome je: } d_{min} - \text{najmanja vrednost roka završetka od svih proizvoda; } d_{max} - \text{najveća vrednost roka završetka od svih proizvoda;}$$

$$\tau = 1 - \frac{\bar{d}}{C_{max}} - \text{uzanost roka završetka (engl. Due Date tightness), u kome je: } \bar{d} - \text{prosečna vrednost roka završetka od svih proizvoda;}$$

$$\eta = \frac{\bar{s}}{p} - \text{strogost prosečnog vremena pripreme u odnosu na prosečno vreme obrade poslova (engl. Setup Time Severity)}$$

Ovo pravilo se najčešće koristi za kriterijumsku funkciju $\sum_{j=1}^n w_j T_j$.

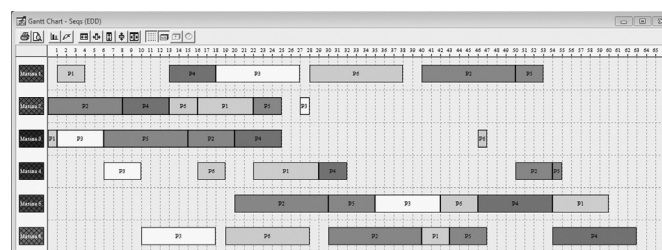
- **SPT** (engl. *Shortest Processing Time*) – Pravilo raspoređivanja u softverskom paketu LEKIN koje neraspoređenom proizvodu sa najmanjim preostalim vremenom obrade daje prvi prioritet pri raspoređivanju.

- **LPT** (engl. *Longest Processing Time*) - Pravilo raspoređivanja koje neraspoređenom proizvodu sa najvećim preostalim vremenom obrade daje prvi prioritet pri raspoređivanju.
- **FCFS** (engl. *First Come First Serve*) – pravilo raspoređivanja poznato i pod nazivom *Earliest release date (ERD)*. Ovo pravilo prvo raspoređuje onaj proizvod koji prvi postaje raspoloživ za obradu. Pravilo ima uticaj na kriterijumsku funkciju ($\min L_{max}$)
- **CR** (engl. *Critical Ratio*) - Prvo rasporediti operaciju j -tog proizvoda sa najmanjom vrednošću kritičnog racia:

$$CR = \frac{d_j - p}{\sum_{i=k}^m p^{i,j}}$$

Primenom ovog pravila dobijamo kompromis između pravila EDD i LPT.

Nakon primene određene metode rešavanja, program će generisati rešenje u vidu gantograma u kome se vidi detaljan raspored proizvoda po mašinama (Slika 3).



Slika 3. – Izgled Gantograma u programu LEKIN

U programu LEKIN, gantogram je interaktivne prirode i ima mogućnost “*drag and drop*”, pa je moguće na pojedinim mašinama, prevlačenjem operacije nekog proizvoda, menjati dobijeni redosled.

Pored Gantograma, u programu LEKIN se rešenja primene više pravila ili heuristika mogu predstaviti u okviru *Log Book* prozora. (Slika 4).

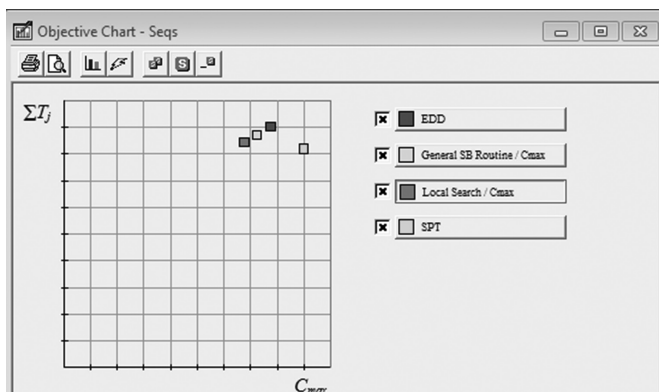
Schedule	Time	C _{max}	T _{max}	ΣT _j	ΣC _j	ΣT _j	Σw _j C _j	Σw _j T _j
CR	1	81	81	6	317	317	317	317
EDD	1	63	63	6	321	321	321	321
Current SB Routine / Cmax	1	59	59	6	310	310	310	310
Local Search / Cmax	63	55	55	6	309	309	309	309
SPT	1	67	67	6	354	354	354	354

Slika 4. – Rešenja primene različitih metoda raspoređivanja

Svako rešenje dobijeno primenom nekog pravila ili heuristike se vrednuje pomoću gore predstavljenih kriterijumskih funkcija, pa se na taj način može vršiti upoređivanje dobijenih rešenja. Izborom nekog od rešenja iz prozora *Log book* gantogram se menja.

Dobijena rešenja u programu LEKIN mogu se međusobno uporediti preko opcije *Objective Chart*. Ova opcija predstavlja dobijena rešenja u dijagramu (Slika 5) sa nekoliko dimenzija. Na osnovu ovog dijagrama, rešenja imaju mogućnost višekri-

terijumskog i grafičkog poređenja. Kriterijumi (dimenzije) za predstavljanje u dijagramu čekiraju se na opciji *Multi-Objectives*.



Slika 5. – Grafičko poređenje rešenja u programu LEKIN

4. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen računarski program LEKIN za rešavanje problema raspoređivanja u proizvodnji i uslugama. Korišćenjem ovog programa omogućava se veća fleksibilnost u pravljenju rasporeda, zbog lakog i jednostavnog generisanja rezultata nakon izmene parametara u samom modelu. Na osnovu toga, LEKIN povećava efikasnost u pravljenju rasporeda, što ima uticaj na efikasnost drugih procesa u proizvodnim i uslužnim sistemima. Efikasan raspored podrazumeva brže kretanje roba i usluga kroz proizvodna ili uslužna postrojenja, viši stepen upotrebe osnovnih sredstava, veći stepen iskorišćenosti njihovih kapaciteta, niže troškove, brže isporuke proizvoda, fleksibilnost u usluživanju i bolji kvalitet usluga.

Značaj programa LEKIN je i u obrazovanju budućih planera proizvodnje. Ovakav program studentima omogućava lakše razumevanje problema raspoređivanja u proizvodnji i pružanju usluga kao i sagledavanje mogućnosti metoda za rešavanje tih problema.

LITERATURA

- [1] Omerbegović-Bijelović, J., *Planiranje i priprema proizvodnje i pružanje usluga*, FON, Beograd, 2006.
- [2] Omerbegović-Bijelović, J. i drugi., *Osnove operacionog menadžmenta*, FON, Beograd, 2010.
- [3] Heizer, J. and Render, B., *Operations management*, 10th edition, Prentice Hall, 2011.
- [4] Pinedo, M., *Planning and Scheduling in manufacturing and service*, Springer, 2005.
- [5] <http://community.stern.nyu.edu/om/software/lekin/>
- [6] Asadathorn, N., *Scheduling of Assembly Type of Manufacturing Systems: Algorithms and Systems Development*, Ph.D thesis, Department of Industrial Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, New Jersey, 1997.
- [7] Pinedo, M. and Singer, M. "A Shifting Bottleneck Heuristic for Minimizing the Total Weighted Tardiness in a Job Shop" *Naval Research Logistics*, Vol. 46, No. 1, pp 1–12, 1999.
- [8] Kreipl, S. "A Large Step Random Walk for Minimizing Total Weighted Tardiness in a Job Shop", *Journal of Scheduling*, Vol. 3, No. 3, pp 125–138, 2000.
- [9] Yang, Y., Kreipl, S. and Pinedo, M. "Heuristics for Minimizing Total Weighted Tardiness in Flexible Flow Shops", *Journal of Scheduling*, Vol. 3, No. 2, pp 89–108, 2000.
- [10] Kellerer, H., "Minimizing the maximum lateness", Chapter 10. p.2, in Leung, J.Y.-T. (editor), *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2004.
- [11] Lee, Y. H., Bhaskaran, K., and Pinedo, M. "A heuristic to minimize the total weighted tardiness with sequence-dependent setups". *IIE Transactions*, Vol. 29, No. 1, pp 45–52, 1997.



Zoran Rakićević,
Fakultet organizacionih nauka
Kontakt: zoran.rakicevic@fon.bg.ac.rs
Oblasti interesovanja: Operacioni menadžment, Planiranje proizvodnje i pružanja usluga, Preduzetništvo, Biznis planiranje



Jovana Kojić,
Fakultet organizacionih nauka
Kontakt: jovana.kojic@fon.bg.ac.rs
Oblasti interesovanja: menadžment razvoja tehnologije, upravljanje performansama tehnološkog razvoja, kvantitativne metode u tehnološkom menadžmentu, softverska podrška za rešavanje menadžerskih problema.

