

UDK: 684.432:65.012.2

# Terminiranje kompleksnih proizvodnih procesov

*Complex production scheduling*avtor **Janez ABRAM**, Novoles d.d., Straža, e-pošta: janez.abram@novoles.si

## izvleček/Abstract

**V prispevku** je predstavljen algoritem za terminiranje kompleksnih proizvodnih procesov, ki izhaja iz Heller – Logemannovega algoritma. Terminski izračun je prilagojen omejitvam strojnih in delovnih kapacitet z možnostjo izbire alternativnih delovnih mest. Algoritem je bil preizkušen pri proizvodnji stolov. S simulacijo proizvodnega procesa smo predvideli časovne in kapacitetne omejitve. Pri izenačevanju kapacitet smo upoštevali sistem ozkih grl, ki časovno prerazporeja tiste operacije, ki ne vplivajo na prepustnost proizvodnje.

**In this paper**, we provide algorithm of a complex production schedule which considered capacity burden of the machines and workers. The algorithm is derivative of network planning and Heller-Logemann algorithm. Production scheduling was performed with a computer programme, in chair production. Set of different operating scenarios was simulated in order to support the scheduling on human and machine resources. Optimized production technology (OPT) was used, where bottlenecks are identified and scheduled first to optimize the throughput of the system.

**Ključne besede:** terminiranje, izenačevanje kapacitet, proizvodnja stolov, sistem ozkih grl, simulacija procesov

**Keywords:** scheduling, capacity balance, chair production, optimized production technology, process simulation

## Uvod

Pri planiranju proizvodnje, za katero je značilna velika prilagodljivost zahtevam kupca in veliko število različnih izdelkov, ni dovolj izdelati okvirni časovni plan za skupino izdelkov, ki jih bomo proizvajali. Zaradi različnih obremenitev delovnih resursov, ki se med proizvajanjem spreminjajo glede na vrsto izdelkov, je treba simulirati proizvodni proces in izdelati ukrepe. Ključnega pomena je spremljanje zasedenosti strojev, razporeditev delavcev po operacijah in delovnih mestih ter ozkih grl. V nasprotnem primeru prihaja do nižje produktivnosti, nedoseganja dogovorjenih rokov in posledično do nekonkurenčnosti na trgu.

V kompleksnih proizvodnih procesih se hkrati proizvaja večje število vrst izdelkov, ki so sestavljeni iz velikega števila sestavnih delov. Delovni nalogi se lansirajo v proizvodnjo med tem, ko se realizirani končujejo. Izdelki se proizvajajo na različnih delovnih mestih ali strojih, katerih zmogljivosti med seboj niso vedno usklajene. Časi trajanja operacij so od nekaj minut do nekaj dni. Časi izvedbe operacije so normirani.

Z izrazom terminiranje v proizvodnji običajno razumemo določanje rokov za dokončanje proizvodov, komponent in operacij ter čas začetka dela. Terminiranje tako poteka na najvišji ravni dokončanih proizvodov, na ravni planiranja potreb po materialih in na najnižji ravni, ki pomeni terminiranje operacij, povezanih z izvedbo naloge [ 1 ] . Pri terminiranju kompleksnih proizvodnih procesov se najpogosteje išče najugodnejša varianta razporeditve operacij po delovnih mestih in času.

## Heller - Logemannov algoritem

Algoritem omogoča terminiranje proizvodnih procesov, v katerih se pojavljajo vezani ali nevezani delovni nalogi. Pri nepovezanih nalogih prva operacija nima neposredno predhodne operacije, vse druge pa imajo po eno predhodno operacijo. Pri povezanih delovnih nalogih pa samo prve operacije na najnižjem nivoju (element – podsestav – sestav) nimajo predhodne operacije, medtem ko imajo vse druge po eno ali več predhodnih operacij.

Osnovna oblika Heller - Logemannovega algoritma je dopolnjena tako, da poleg časov obdelave upošteva tudi čase prekrivanja operacij in čase medoperacijskega zastoja [ 2 ] . Algoritem dovoljuje terminiranje v naprej (tek v desno) in v nazaj (tek v levo). Terminiranje

v naprej enakomerno zaseda kapacitete, a povzroča medfazne zaloge obdelovancev. Operacije naj bi se izvedle čimprej, zraven so časovne rezerve. Terminiranje v nazaj pa manj ugodno zaseda kapacitete, vendar so manjše tudi medfazne zaloge. Časovnih rezerv ni, zato obstoji nevarnost, da roki za izvedbo posameznih operacij niso uresničljivi [ 3 ] .

Pri terminskem računu oblikujemo tabele z operacijami, ki jih je treba opraviti v terminski enoti. Tabela uredimo po šifrah delovnih mest tako, da so v skupine združene vse operacije, ki se opravljajo na istem delovnem mestu, ne glede na to, v katerem delovnem nalogu se pojavljajo. Izračun opravljamo v več prehodih skozi tabelo operacij [ 4 ] .

Heller - Logemannov algoritem v svojem delovanju ne upošteva pomembnih dejavnikov terminiranja, kot so:

- omejitev razpoložljivih delavcev za delo na stroju ali delavcev za nastavljanje strojev, ki neposredno vplivajo tudi na prestavitev začetka operacij za določene naloge,
- izbiro alternativnih delovnih mest za določene operacije,
- upoštevanje obratovanja določenih strojev v različnem številu izmen.

## Opis algoritma za terminiranje kompleksnih proizvodnih procesov

Pred izračunom terminov oblikujemo tabelo z operacijami, v katero vnesemo podatke:

- identifikacijo operacije,
- prioriteto operacije,
- identifikacijo neposredno naslednje operacije,
- čas za izvedbo operacije,

- čas medoperacijskega zastoja
- čas prekrivanja,
- število delavcev, ki so potrebni za izvedbo operacije,
- število neposredno predhodnih operacij,
- začetni in končni termin operacije.

Bazo podatkov v tabeli operacij uredimo po zaporedju delovnih nalogov, ki se lansirajo v proizvodnjo. V vsakem delovnem nalogu poiščemo tiste elemente in sestave, ki jih je treba izdelati najprej, in jim dodelimo najvišjo prioriteto. Izračun poteka tako, da določamo termine za vse operacije elementov in sklopov delovnega naloga v enem prehodu.

Pri Heller - Logemannovem algoritmu se določajo termini po delovnih mestih za delovne naloge. Pri izračunu končnega termina delovnega naloga je tako treba več prehodov skozi tabelo, kar pomeni slabšo preglednost po delovnih nalogih ter zahtevnejše programiranje.

Da v tabeli z operacijami ne ponavljamo podatkov, oblikujemo novo tabelo, v kateri za vsa delovna mesta določimo število izmen obratovanja stroja. Obe tabeli med seboj povežemo na podlagi ključa – delovno mesto. Kjer roki izgotovitve delovnih nalogov niso posebej predpisani (tek v desno), poteka izračun terminov po naslednjih korakih (slika 1 in slika 2):

1. Postavimo se na prvo operacijo elementa / sklopa delovnega naloga, pri kateri je število neposredno predhodnih operacij enako nič. Če je takšnih operacij več, izberemo tisto, ki ima najvišjo prioriteto.
2. Prvi prosti termin določimo tako, da se pomikamo po časovni premici naprej oziroma preverimo, ali je ob terminu, ki je vpisan v polje S8, delovno mesto

prosto. če je, preverimo ali imamo ob terminu S8 delavca za izvedbo operacije. Če ga imamo, potrdimo začetni termin.

3. Končni termin S9 izračunamo tako, da začetnemu terminu S8 prištejemo čas za izvedbo operacije S4 in čas obratovanja stroja v izmeni (razlikujemo dopoldansko, popoldansko in nočno izmeno). Npr., če poteka delo na delovnem mestu v eni izmeni, operacija pa se konča v drugi ali tretji izmeni, je treba operaciji prišteti čas druge in tretje izmene. časovni interval poteka operacije se tako podaljša za dve izmeni. Hkrati vrednost v polju S7 za tekočo operacijo zmanjšamo za 1.
4. Poiščemo operacijo oziroma vse operacije, ki neposredno sledijo obravnavani tekoči operaciji. Ključ za iskanje je polje S3.
5. Ugotovimo, kdaj se lahko naslednja operacija začne. Če se naslednja operacija opravlja prekrito, se začetni termin naslednje operacije določi tako, da začetnemu terminu obravnavane operacije prištejemo čas prekrivanja, če prekrivanja ni, se začetni termin naslednje operacije določi tako, da se končnemu terminu tekoče operacije prišteje čas medoperacijskega zastoja.
6. Če ima naslednja operacija že prej izračunan in v polju S8 vpisan začetni termin, ki je večji od pravkar izračunanega, ga pustimo, sicer pa novo izračunani začetni termin vpišemo v polje S8 naslednje operacije. Vrednost v polju S7 za naslednjo operacijo zmanjšamo za 1. Korake od 4 do 6 ponovimo za vse operacije, ki neposredno sledijo obravnavani operaciji.
7. Če naslednji operaciji sledi

operacija, se postavimo na naslednjo operacijo elementa oziroma sklopa, ki ima v polju S7 vrednost nič in korake od 2 do 6 ponovimo. Če so razporejene vse operacije elementa oziroma sklopa lansiranega izdelka, nadaljujemo izračun za naslednje

skupine operacij, ki so potrebne za izdelavo elementov ali sklopov izdelka.

8. Ko so obdelane vse operacije izdelka, nadaljujemo izračun na naslednjem izdelku (koraki od 1 do 7).
9. Operacije, ki imajo v polju S7

vrednost -1, so razporejene – terminirane. Ko so obdelane vse operacije na vseh izdelkih, je terminski izračun v naprej (tek v desno) končan.

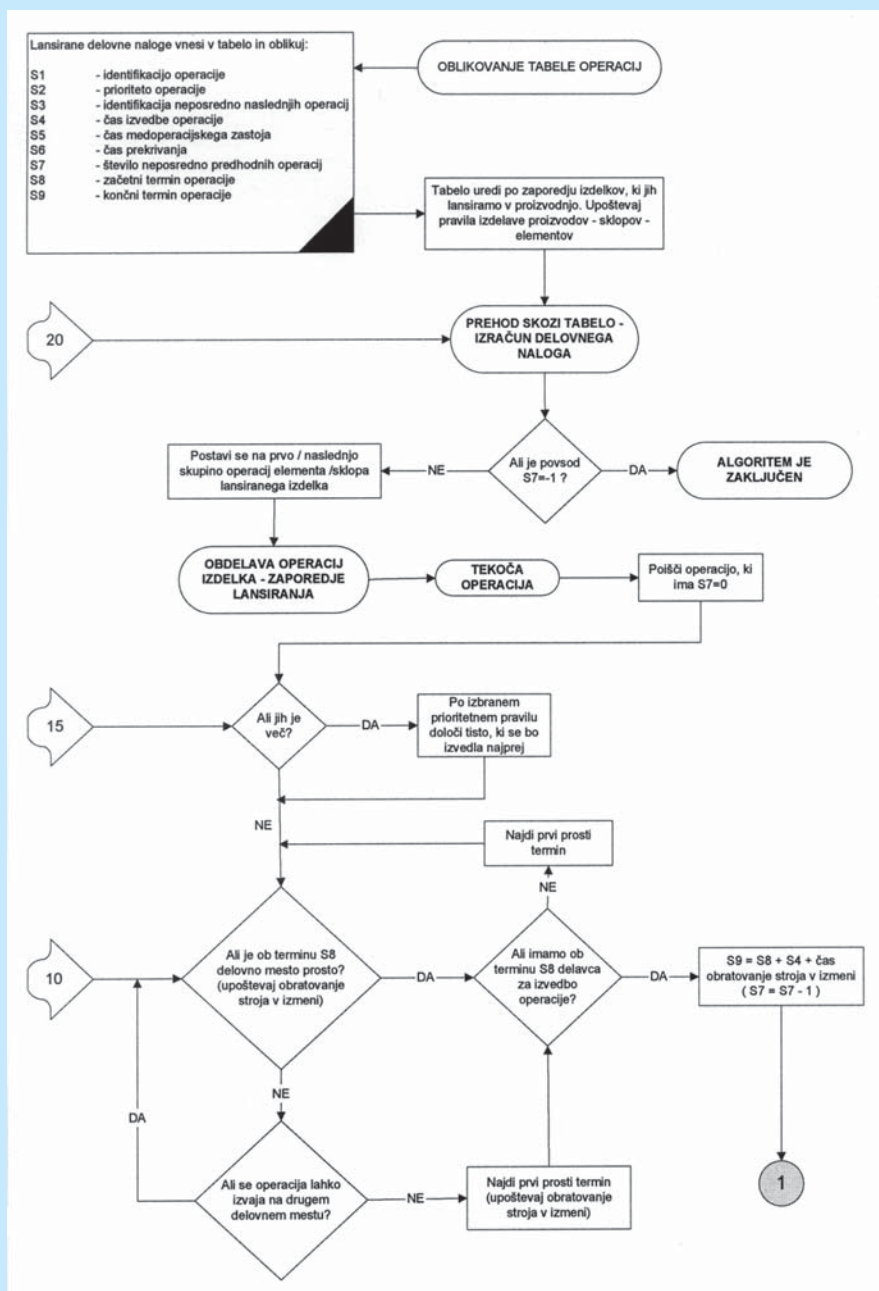
10. Na koncu lahko prikažemo rezultate v obliki preglednice ali pa grafično v obliki gantograma.

## Uporaba algoritma

V proizvodnem procesu izdelave stolov se v enem mesecu pojavlja od 30 do 70 različnih izdelkov. Velikost serije je od 100 do 1.000 kosov in se redko ponavlja. Tedensko izdelamo od 5 do 15 različnih proizvodov v dveh izmenah. Bolj obremenjeni stroji obratujejo v nočni izmeni [ 5 ]. Pri testiranju algoritma smo se omejili na 12 izdelkov. Formirali smo tabelo s 650 operacijami in jim določili termine.

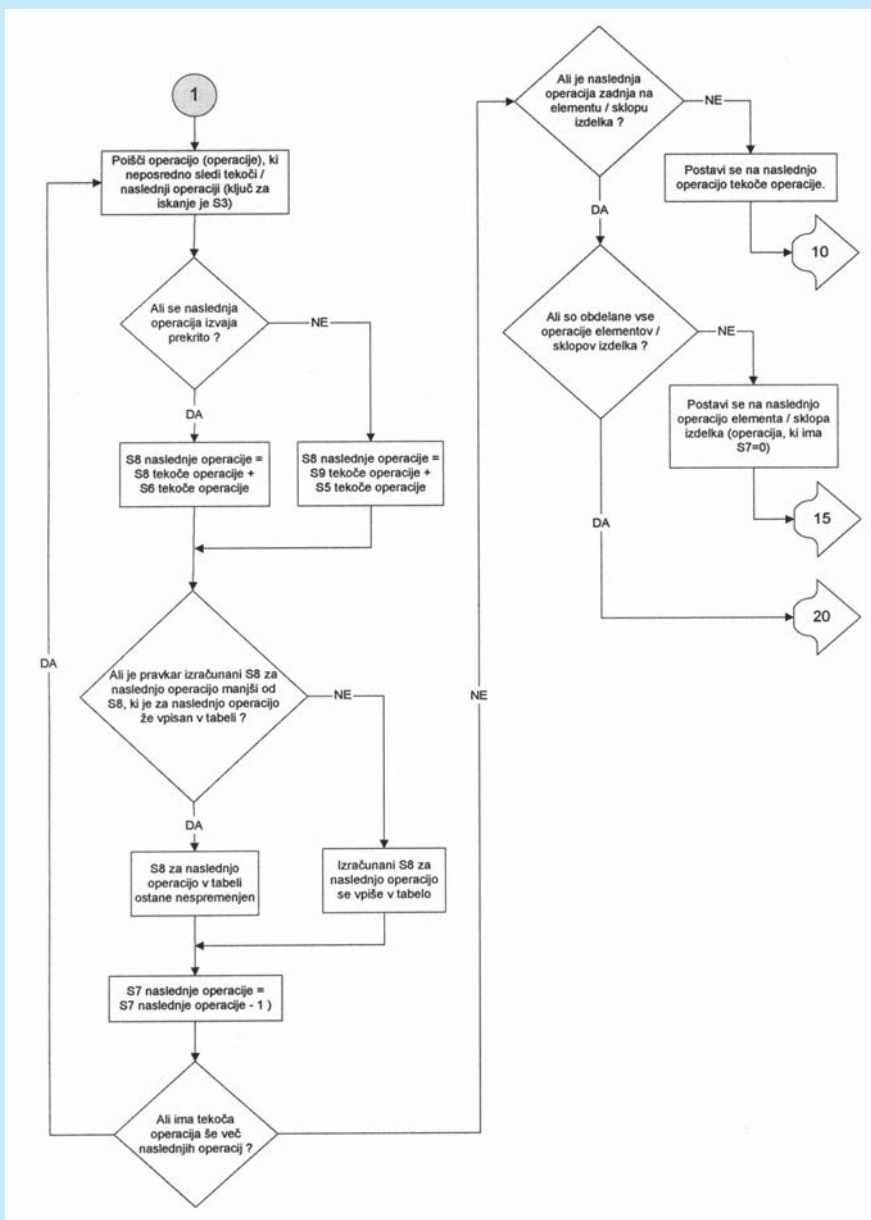
Z izračunom terminov smo ugotovili termine za posamezne operacije, ki so osnova za določitev obremenitev posameznih delovnih mest (slika 3) in potrebno število delavcev v časovnih intervalih (slika 4). Izračun smo izdelali za delovne naloge, ki nimajo posebej določenega končnega roka. Ker pogosto vsa delovna mesta niso enakomerno obremenjena v celotnem časovnem obdobju, je za izvedbo operacije smiselno iskati alternativna, manj obremenjena delovna mesta, na katerih lahko opravljamo enake operacije.

V grafičnem prikazu proizvodnega rasporeda (slika 3) lahko ugotovimo, da se koncentracija operacij po delovnih mestih razlikuje. Posamezna delovna mesta so bolj obremenjena od drugih. Večje število operacij v začetnem obdobju vpliva na število delavcev v začetnih izmenah (slika 4), kar je tudi ena izmed slabosti algoritma – tek v desno. Izvajanje delovnih nalogov in operacij je smiselno sprožiti takrat, ko jih lahko absorbiramo z razpoložljivimi kapacitetami. Ideja izhaja od obre-



□ Slika 1. Algoritem za terminiranje kompleksnih proizvodnih procesov (tek v desno)

Figure 1. Scheduling algorithm for complex production process (running to the right)



□ Slika 2. Algoritem za terminiranje kompleksnih proizvodnih procesov (tek v desno)

Figure 2. Scheduling algorithm for complex production process (running to the right)

menitve odvisnega sproščanja delovnih nalogov (BOA – Die belastungsorientierte Auftragsfreigabe)[ 6] .

S primerjavo števila delavcev po izmenah lahko ugotovimo, da se dopoldanske in popoldanske izmene bistveno ne razlikujejo. V nočni izmeni dela eden delavec. Za izvedbo vseh operacij smo potrebovali 17 izmen. Če število delavcev zmanjšamo, se termini operacij premaknejo po časovni osi naprej. Ključnega pomena pri tem pa je, da se ne prenašajo kritične operacije oziroma sklopi operacij. Tako dosežemo, da se najkasnejši možni roki izdelave čim manj spreminjajo.

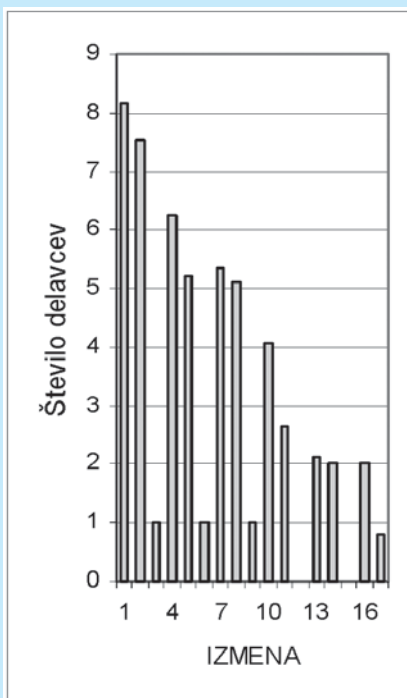
Ker vseh operacij ni treba lansirati v začetnih terminih, je pomembno, da ugotovimo operacije, ki povzročajo ozka grla v proizvodnji (OPT - Optimized Production Technology)[ 7] . Ta določajo prepustnost proizvodnje. Zato smo v začetku izvedli simulacijo in izračunali termine brez omejitev razpoložljivih kapacitet (slika 5). Iz določenih terminov smo ugotovili delovna mesta, kjer so potrebne kapacitete večje, kot so razpoložljive. Kritičnim operacijam, ki povzročajo ozka grla, smo dodelili najvišjo prioriteto pri zaporedju lansiranja v proizvodnjo. Ponovno smo opravili izračun in upoštevali razpoložljive kapacitete (slika 6). Prioritete operacijam bi lahko določili tudi tako, da bi poiskali kritične aktivnosti oziroma operacije po metodi



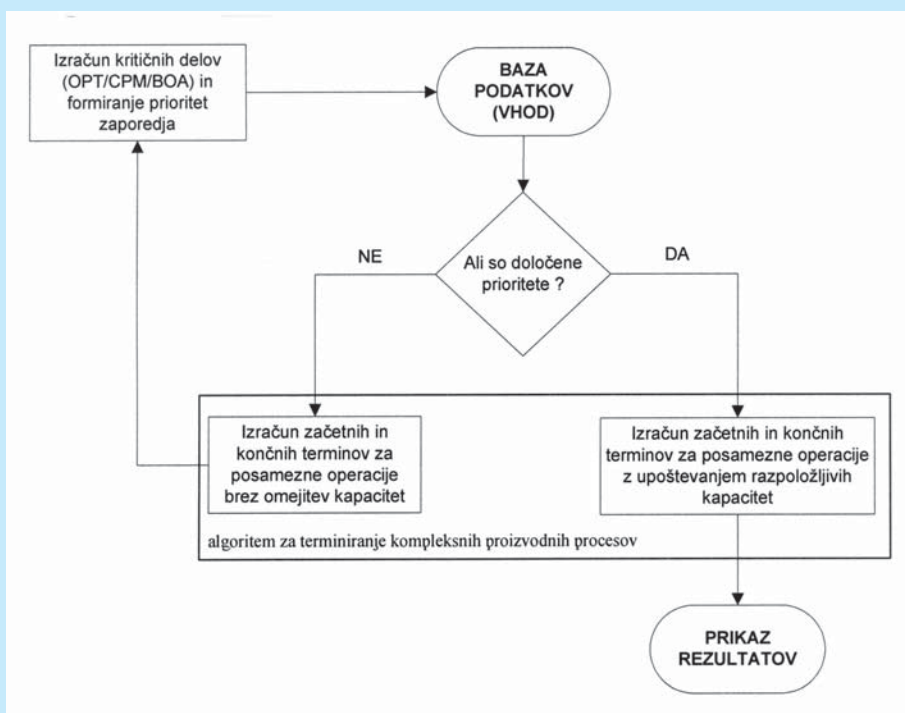
□ Slika 3. Gantogram proizvodnega razporeda pri terminiranju

Figure 3. Gantt chart of the production schedule

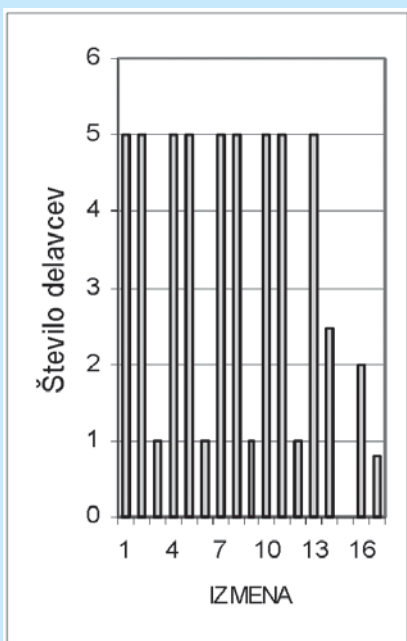




- **Slika 4.** Razporeditev delavcev po izmenah brez upoštevanja razpoložljivih kapacitet dela
- **Figure 4.** Number of employees required per shifts – not considering the utilisation of employees



- **Slika 5.** Simulacija proizvodnega procesa z algoritmom za terminiranje kompleksnih proizvodnih procesov in metodo izenačevanje kapacitet s sistemom ozkih grl
- **Figure 5.** Production simulation with algorithm of a complex production schedule and OPT



- **Slika 6.** Razporeditev delavcev po izmenah z upoštevanja razpoložljivih kapacitet dela
- **Figure 6.** Number of employees required per shifts – considering the utilisation of employees

kritične poti (CPM - Critical Path Method). Na ta način bi določili operacije, ki jih je mogoče časovno premikati, ne da bi s tem še vplivali na trajanje celotnega izdelavnega časa [ 8] . Iz izračunanih terminov po algoritmu za terminiranje kompleksnih proizvodnih procesov, lahko določimo začetne in končne roke aktivnosti.

## Sklep

Pri planiranju proizvodnje, kjer so izdelki sestavljeni iz velikega števila sestavnih delov, ki se obdelujejo na različnih delovnih mestih, katerih zmogljivosti niso usklajene, je ključnega pomena čim bolj realno predvideti časovni potek operacij. V takšnih proizvodnjah so poti obdelovancev različne, zasedenost strojev pa je odvisna od izdelkov, zmogljivosti strojev in planiranja.

Če je razpoložljiva kapaciteta večja od dejanske, se operacija ne začne ob najugodnejšem terminu. Zato se zamikajo začetki in konci delovnih nalogov, posledično pa se podaljšuje pretočni čas izdelkov. V proizvodnji ne potrebujemo vedno enakega števila delavcev v vseh izmenah, kar pomeni omejeno delovno kapaciteto. Pri lansiranju izdelkov v proizvodnjo moramo zato upoštevati omejitve kapacitete delovnih sredstev in omejitve kapacitete dela. Fleksibilnost delovnih kapacitet lahko dosežemo s prerazporejanjem delavcev, s prilagajanjem dinamike proizvodnje s pogodbenimi delavci, z nadurnim delom, z dodatno izmeno idr. [ 9].

Z omejevanjem kapacitet se operacije, ki v danih časovnih okvirjih ne vplivajo na izdelavni rok, zamikajo v kasnejša časovna obdobja. Kritične operacije pa je treba realizirati pred drugimi. Takšne operacije je smiselno tudi prerazporejati na alternativna delovna mesta, s čimer razbremenimo samo kapaci-

tete delovnih sredstev in ne kapacitet dela.

Enakomerno obremenitev delavcev v celotnem časovnem obdobju lahko dosežemo tudi z dodajanjem novih delovnih nalogov (dršno planiranje) izhodiščnemu naboru že lansiranih delovnih nalogov oziroma predstavljajanjem obstoječih delovnih nalogov v drugo časovno obdobje. Z izenačevanjem kapacitet vplivamo na preglednost proizvodnje, na raven vmesnih zalog, na transport in na zahtevnost obvladovanja proizvodnje.

Z algoritmom analiziramo potek proizvodnega procesa. Planer mora pri tem ugotoviti optimalne kapacitete glede na obseg dela. Prenizke razpoložljive kapacitete podaljšujejo izdelavni čas izdelkov, previsoke pa povzročajo visoko raven vmesnih zalog. Če se delovna mesta, ki so ozka grla, spreminjajo, moramo pri določanju prioritete operacijam z vsakim razpisom znova določiti le-te. Če želimo, da so termini izvedbe delovnega naloga končani hitreje, pa lahko še pred lansiranjem delovnih nalogov izvedemo različne ukrepe. Ti so povečanje števila delavcev, obratovanje stroja v dveh, treh ali štirih izmenah, kooperacije, prerazporejanje manj pomembnih delovnih nalog v prosta terminska obdobja, spreminjanje zaporedja lansiranja delovnih nalogov idr. [ 5] . □

## popravek

V prejšnji številki revije Les (5/2006) je prišlo do pomote pri klasifikaciji članka dr. Nika Torellija Violina II: Zvočna barva lesa (str. 140 do 151). Članek spada med pregledne znanstvene članke.

## literatura

- Rusjan B.:** Management proizvodnje, Ekonomska fakulteta, Ljubljana, 1999, 295
- Rant M., Jeraj M., Ljubič T.:** Enoten kompleksen organizacijski sistem planiranja v proizvodnih organizacijah, POIS, Radovljica, 1992
- Muhlemann A., Oakland J., Lockyer K.:** Production and Operations Management, Pitman, London, 1992, 566
- Ljubič T.:** Planiranje in vodenje proizvodnje, Moderna organizacija, Kranj, 2000, 443
- Abram J., Zadnik L., Tratnik M., Oblak L.:** Optimisation of scheduling: A case of industrial chair manufacturing, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Operational Research, Nova Gorica, 28-30 Sept. 2005, 51-56
- Schönsleben P.:** Integrales Logistik-management, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2000, 751
- Chong C. S., Sivakumar A. I., Gay R.:** Simulation based scheduling using a two-pass approach, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, D. J. Morrice), 2003, 1433-1439
- Norman A. McDaniel, William W. Bahnmaier:** Scheduling guide for program managers, Published by the defense systems management college press Fort Belvoir, 2001, 82
- Polajnar A., Buchmeister B., Leber M.:** Proizvodni menedžment, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2001, 407