

UNIVERZITET U BEOGRADU

ĐORĐE ZRNIĆ
DRAGOLJUB SAVIĆ

SIMULACIJA PROCESA
UNUTRAŠNJE
TRANSPORTA

MAŠINSKI FAKULTET
Beograd, 1997.

UNIVERZITET U BEOGRADU

ĐORĐE ZRNIĆ
DRAGOLJUB SAVIĆ

SIMULACIJA PROCESA
UNUTRAŠNJE
TRANSPORTA

MAŠINSKI FAKULTET
Beograd, 1997.

**Dr Đorđe Zrnić
Mr Dragoljub Savić**

**SIMULACIJA PROCESA
UNUTRAŠNJEG TRANSPORTA
IV izdanje**

Recenzenti:
**Dragutin Popović
Dr Sava Dedijer**

Izdavač:
**MAŠINSKI FAKULTET
UNIVERZITETA U BEOGRADU
Beograd, 27. marta br. 80**

**Štampanje odobrila
Komisija za izdavačku delatnost
Mašinskog fakulteta u Beogradu,
24.11. 1997.**

Tiraž: 150 primeraka

**Štampa: Zavod za grafičku tehniku
Tehnološko-metalurškog fakulteta
Beograd, Karnegijeva 4**

ISBN 86-7083-166-X

**© Sva prava zadržavaju autor i izdavač
Preštampavanje ili fotokopiranje nije dozvoljeno**

P R E D G O V O R

Poznata je činjenica da transport i manipulacija materijalom i proizvodnim procesima predstavljaju ključne elemente rezervi za racionalizaciju proizvodnje, koja se postiže snižavanjem transportnih troškova, skraćenjem proizvodnog ciklusa i manjim angažovanjem ljudskog rada. Tako se i najveće mogućnosti za povećanje produktivnosti u industrijskoj proizvodnji nalaze upravo u području projektovanja, planiranja i upravljanja aktivnostima unutrašnjeg transporta i skladištenja. Otuda je jedan od najvažnijih zadataka stručnjaka koji se bave tehnikom i tehnologijom transporta da stalno razvijaju i realizuju nove metode za proučavanje i rešavanje racionalizacije kretanja materijala.

Sadržaj priručnika je orijentisan na primenu metoda teorije čekanja i simulacije u procesu projektovanja transportnih i skladišnih sistema. Primena ovih modela omogućuje dinamički pristup rešavanju problema kretanja materijala i koristi se kao dopuna drugim grafičkim i analitičkim metodama.

Dati su poznati analitički modeli teorije čekanja iz literature i niz originalnih modela za simulaciju procesa unutrašnjeg transporta. Uz svaki model je priložen odgovarajući program sa uputstvom za korišćenje. Pored rada na redovnoj nastavi iz predmeta Fabrička postrojenja, priručnik će koristiti poslediplomci grupe za "Projektovanje fabrika". Takodje, knjiga može da koristi svima koji izučavaju simulacione procese, kao i stručnjacima u praksi koji se bave projektovanjem složenih transportnih sistema.

Koristimo ovu priliku da se zahvalimo profesoru Dragutinu Popoviću i profesoru Dr. Savi Dedijeru na obavljenoj recenziji.

Takodje se zahvaljujemo Slobodanki Krupežević na tehničkoj obradi knjige, apsolventu Nenadu Ćupriću za saradnju pri prenošenju Basic programa SARZA, TRAKA i FREK na FORTRAN, kao i Milanu Vukoviću rukovodiocu izdavačkog servisa na zalaganju oko izdavanja knjige.

AUTORI

PREDGOVOR DRUGOM IZDANJU

Poseban interes koji je pobudilo prvo izdanje ovog praktikuma, pokazao je da je oblast simulacije nedovoljno obradjena u domaćoj literaturi. Veliki broj primeraka prodat izvan fakulteta pokazuje da postoji veliko interesovanje u inženjerskoj, a posebno u projektantskoj praksi za primenu simulacionih modela u rešavanju realnih problema unutrašnjeg transporta i skladištenja.

U odnosu na prvo izdanje knjige značajne dopune unete su u sledeća poglavlja:

- 2. Primena teorije redova čekanja (tekst je dopunjjen zatvorenim sistemima opsluživanja, dati su izrazi za sisteme $E_1/E_\infty/1$ i $E_1/E_\infty/\infty$, kao i veličine b_{tw} , b_{tws} i b_{Ns} za sve opisane sisteme; tekst je ilustrovan brojnim dijagramima i primerima).

- 3. Metod Monte Karlo (novi tekst u potpunosti je prilagođen potrebama nastavnog procesa, prikazan je test χ^2 za verifikaciju neparametarskih hipoteza, dodate su Poasonova teoretska i empirijske raspodele: neprekidna, atributska i redosledna).

- 4. Simulacija (uradjen je kompletan primer sa skokovitim kretanjem simulacionog sata i intervalnim nailascima u sistemu),

- 5. Višefazni višekanalni sistem (tekst je obogaćen kompletnim primerom serije simulacionih eksperimenata od postavke zadatka, preko definisanja ulaznih podataka, sve do prikupljanja i tumačenja simulacionih rezultata),

- 6. Simulacija procesa uskladištenja (definisan je novi simulacioni model sa redovima čekanja na ulazu i izlazu iz sistema, što je poslužilo kao osnova za izradu potpuno novog računarskog programa).

U poglavljima 1., 2., 7. i 8. ispravljene su uočene tehničke greške.

Poglavlja 9. i 10. potpuno su nova.

Poglavlje 9. tretira problem zatvorenog sistema opsluživanja primenom metoda verovatnoće promene stanja.

Poglavlje 10. zaslužuje posebnu pažnju, ne samo zbog značaja i složenosti problema komisioniranja, već i zbog činjenice da je rezultat nastavnog procesa iz predmeta Fabrička postrojenja i da su autori programa /51/ redovni studenti Mašinskog fakulteta.

Koristimo ovu priliku da se zahvalimo profesoru Dragutinu Popoviću i profesoru Dr Savi Dedijeru na obavljenoj recenziji.

Takodje se zahvaljujemo Slobodanki Krupežević na tehničkoj obradi knjige i Miljanu Vukoviću Rukovodiocu izdavačkog servisa na zalaganju oko izdavanja knjige.

Beograd, februara 1987. godine

A U T O R I

PREDGOVOR TREĆEM IZDANJU

Treće izdanje je dopunjeno modelima teorije redova čekanja sa prioritetom i primerima pojedinih izvedenih rešenja transporta u industriji.

Materija knjige je namenjena prvenstveno studentima dodiplomske i poslediplomske studije (Grupa za projektovanje fabrika, Fabričkih postrojenja i skladišnih sistema) Mašinskog fakulteta u Beogradu. Knjiga ima monografiski karakter, a sadrži i niz podataka neophodnih za projektovanje u inženjerskoj praksi.

Beograd, novembra 1990. godine

A U T O R I



S A D R Ž A J

1. U V O D	1
1.1. Program izvodjenja nastave	2
2. PRIMENA TEORIJE REDOVA ČEKANJA	6
2.1. Uvod	6
2.2. Teorija redova čekanja	14
2.3. Osnovne karakteristike i izlazni parametri sistema za opsluživanje	20
2.4. Jednokanalni sistem opsluživanja sa neograničenim redom čekanja	21
2.5. Analiza jednokanalnih sistema čekanja u procesima unutrašnjeg transporta	35
2.6. Višekanalni sistem opsluživanja sa neograničenim redom čekanja (M/M/C)	38
2.7. Višekanalni sistem opsluživanja sa ograničenim redom čekanja (M/M/c/m)	45
2.8. Zatvoreni sistem opsluživanja	49
2.8.1. Sistem sa jednim kanalom opsluživanja	49
2.8.2. Višekanalni sistem opsluživanja	51
2.9. Redovi sa prioritetom	54
2.9.1. Redovi čekanja sa dva prioriteta	55
2.10. Primer korišćenja programa QPBES	63
3. METOD MONTE KARLO	64
3.1. Generisanje slučajnih brojeva	66
3.2. Generisanje pseudoslučajnih brojeva	67
3.3. Testovi za verifikaciju neparametarske hipoteze	70
3.4. Modeliranje slučajne promenljive po teorijskoj raspodeli	72
3.4.1. Ravnomerna raspodela	73
3.4.2. Erlangova raspodela k-tog reda	74
3.4.3. Eksponencijalna raspodela	76
3.4.4. Normalna raspodela	77
3.4.5. Poasonova raspodela	78
3.5. Modeliranje slučajne promenljive po empirijskoj raspodeli	79
3.5.1. Modeliranje slučajne promenljive po neprekidnoj empirijskoj raspodeli	80
3.5.2. Modeliranje slučajne promenljive po diskretnoj empirijskoj raspodeli	82
3.5.3. Redosledna empirijska raspodela	84
3.6. Sistemski generator pseudoslučajnih brojeva	84
3.7. Struktura i funkcija programa FREK	85
4. SIMULACIJA	89
4.1. Osnovni pojmovi	91
4.2. Vrste simulacije	95
4.3. Mogućnosti i ograničenja simulacionih modela	97

4.4. Primer simulacije korišćenjem tablice slučajnih brojeva	98
4.5. Tablica slučajnih brojeva	110
5. VIŠEFAZNI VIŠEKANALNI SISTEMI	112
5.1. Simulacioni model	115
5.2. Organizacija podataka	118
5.3. Strukturni program OPS	120
5.4. Verifikacija modela	124
5.5. Primer korišćenja programa OPS	126
6. SIMULACIJA PROCESA USKLADIŠTENJA	143
6.1. Opis rada visoko-regalne dizalice	143
6.2. Prosečno vreme opsluživanja	146
6.3. Osnovni matematički model	151
6.4. Simulacioni model	155
6.5. Organizacija podataka	158
6.6. Struktura programa NOVIREG	159
7. SIMULACIJA RADA UREDJAJA NEPREKIDNOG TRANSPROTA	173
7.1. Matematički model	177
7.2. Struktura i funkcije programa TRAKA	178
7.3. Primer simulacionog eksperimenta sa programom TRAKA	180
8. SIMULACIJA RADA POSTROJENJA ZA POVRŠINSKU ZAŠТИTU	187
8.1. Opis tehnološkog procesa	187
8.2. Odredjivanje S-te permutacije u leksičkom redosledu ..	188
8.3. Numerički primer	188
8.4. Slučajne permutacije	190
8.5. Numerički primer	191
8.6. Matematička postavka problema	191
8.7. Numerički primer	194
8.8. Organizacija podataka	198
8.9. Struktura i funkcija programa SARZA	199
9. ZATVORENI SISTEM OPSLJUŽIVANJA	207
9.1. Simulacioni model	207
9.2. Organizacija podataka	208
9.3. Struktura programa ZOPS	209
10. PRIPREMA ROBE ZA DISTRIBUCIJU (KOMISIONIRANJE)	215
10.1. Osnovni matematički model procesa komisioniranja ..	224
10.2. Opis procesa komisioniranja u malim skladištima ..	228
10.3. Simulacioni model	228
10.4. Organizacija podataka	229
10.5. Struktura i funkcija programa KOMISION	232
L I T E R A T U R A	247

1. U V O D

Evidentno je da danas u mnogim fabrikama i skladištima rada transportni zahtevi se često posmatraju kao sporedni poslovi koji mogu da se reše improvizacijom, ili, ako se uzmu malo ozbiljnije, tretiraju se kao izolovan problem koji će se rešavati na parče sa ad hoc usvajanjem opreme. Pri tome se zanemaruje činjenica da, ako su uštede u troškovima, vremenu, radu i prostoru efektne u svakom stepenu, od istovara polufabrikata, odnosno sirovog materijala, do otpreme gotovih proizvoda, svaki stepen ne može da se razmatra izolovano, već kao deo celokupnog modela kretanja i procesa. Transportni sistem je integralni deo proizvodnje, tako da za analitičku studiju i celokupno planiranje procesa zasluzuje da mu se pokloni velika pažnja.

Pri projektovanju transportnog sistema projektant se često suočava sa potpuno oprečnim uticajnim faktorima, tako da je veoma značajno proceniti koji od njih preovladjuje u svakom pojedinačnom slučaju koji se razmatra. Ako uticajni faktori nisu precizno procenjeni postoji mogućnost da se usvoji neko neracionalno rešenje.

Današnje stanje transportne tehnike se karakteriše stalnim razvojem uredjaja za transport i manipulaciju i čini osnovu za planiranje i projektovanje transportnih sistema. To znači, da pri razmatranju svakog problema transportovanja materijala postoji veliki broj alternativa koje su tehnički ostvarljive. Problem se sastoji u tome da se iz skupa mogućih rešenja izabere takvo, koje najbolje ispunjava tehničke i ekonomске uslove date projektnim zadatkom.

Sve tešnje povezivanje procesa transportovanja i skladištenja materijala sa proizvodnim procesima, dovodi do stvaranja složenih transportnih sistema, koji rade često sa neregularnim režimom rada (stohastički proces), tako da nije moguće tačno planirati rad po obimu i vremenu. Da bi ovakav sistem mogao da radi bez zastoja, mora da ima odgovarajući kapacitet. Odstupanja od optimalnog kapaciteta dovode do neefektivnog iskorišćenja opreme ili do stvaranja velikih redova čekanja, odnosno nagomilavanja materijala, u pojedinim fazama procesa. Koristeći

se odgovarajućim modelom procesa potrebno je naći takvu strukturu transportnog sistema da se zadovolje uslovi postavljeni transportnim zadatkom. U ovu svrhu mogu da se koriste modeli teorije čekanja i modeli simulacije.

Modeli redova čekanja daju nam uvid šta se dešava u sistemima sa opsluživanjem (sistem unutrašnjeg transporta), međutim korisni su samo za primenu u jednostavnijim situacijama. Modeli redova čekanja nisu mnogo korisni za rešavanje praktičnih problema velike složenosti, ali omogućuju stvaranje osnovnog koncepta i kod rešavanja kompleksnih praktičnih problema.

Težnja ka povećanju efikasnosti transportnog sistema diktiра neophodnost korišćenja metoda simulacije za analizu transportnih tokova. Simulacija transportnih procesa omogućava da se detaljno ispituju kako pojedini elementi transportnog procesa, tako i ceo transportni sistem. Preim秉stvo postupka simulacije procesa u odnosu na analitičke metode je u tome da daje tačnije rezultate, a da nije potrebna skupa i dugotrajna provjera rezultata dobijenih u eksploracionim uslovima. Široke mogućnosti koje daje primena ovog postupka su u tome, što pomoću njega mogu da se izučavaju kako procesi koji se javljaju u postojećim uslovima, tako i procesi koji bi mogli da nastanu u hipotečkim uslovima, koji odgovaraju različitim predloženim varijantama organizacije transporta.

1. 1. Program izvodjenja nastave

U okviru predmeta Fabrička postrojenja, koji slušaju studenti IV godine Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, deo raspoloživog fonda časova je predviđen za izvodjenje simulacionih eksperimenta. Cilj programa nastave je da se budući inženjeri srode sa istraživanjem realnog proizvodnog sistema, njegovim modeliranjem, kodiranjem algoritma, verifikacijom modela i programa, eksperimentisanjem pomoću modela i analizom dobijenih rezultata.

Polazni nivo znanja studenata je poznavanje metoda matematičke statistike i programiranja. Za rad, studentima stoje na raspolaganju personalni računari (procesori: 486 i pentijum) pod Windows 95 operativnim sistemom

i neophodna periferna oprema (matrični i laserski štampači, ploteri A3 i A0 formata, skener A3 formata) kao i neophodni komercijalni software (programi za crtanje, obradu teksta, obradu statističkih veličina i sl.).

Vežbe počinju određivanjem mesta i uloge modeliranja procesa industrijskog transporta i uskladištenja na računaru. Daje se kratak opis i prikaz realizovanih modela. Uvode se osnovni pojmovi iz teorije čekanja i radi se sa modelima za ocenu efikasnosti jednofaznih sistema (jednokanalni i višekanalni sistemi sa ograničenim i neograničenim redom čekanja). Pri radu studenti koriste gotove programe. Svi programi obezbedjeni su potrebnim tekstom, tako da svaki student može samostalno da komunicira sa računarom.

Na sledećim vežbama se definiše istraživački postupak: planiranje eksperimenta na realnom sistemu, statistička obrada dobijenih rezultata, modeliranje, verifikacija modela i planiranje simulacionog eksperimenta. Prvenstveno se analizira uloga standardnih tehniku matematičke statistike, a posebna pažnja poklanja se simulaciji diskretnih sistema metodom Monte Karlo. Za shvatanje pojma simulacije pokazalo se da ručna obrada jednog primera uz pomoć tablica slučajnih brojeva ima veliki značaj.

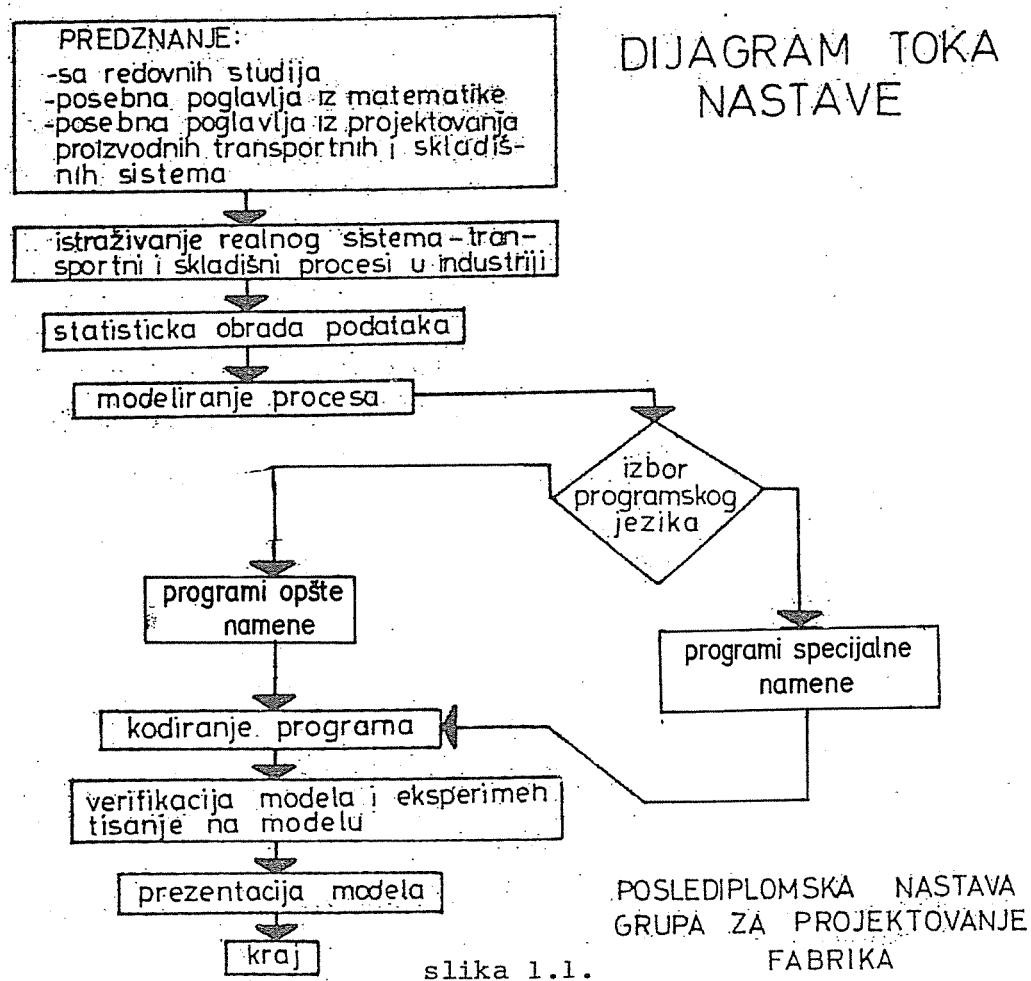
U procesu planiranja simulacionog eksperimenta učestvuju timovi od pet studenata. Članovi grupe biraju jedan od gotovih modela, definisu početne uslove i promenljive karakteristike sistema ili parametre neke od raspodela. Svaki član grupe sprovodi po jedan simulacioni eksperiment. Dobijeni rezultati se prikazuju na zajedničkom dijagramu i analiziraju.

Grupa naprednjih studenata u dogovoru sa profesorom i asistentom definiše neki složeniji problem iz oblasti transporta ili uskladištenja. Svakom kandidatu daju se gotovi potprogrami koji mu mogu pomoći u radu. Po izvršenoj verifikaciji modela i programa i sprovedenog eksperimenta student prezentira rad pred kolegama.

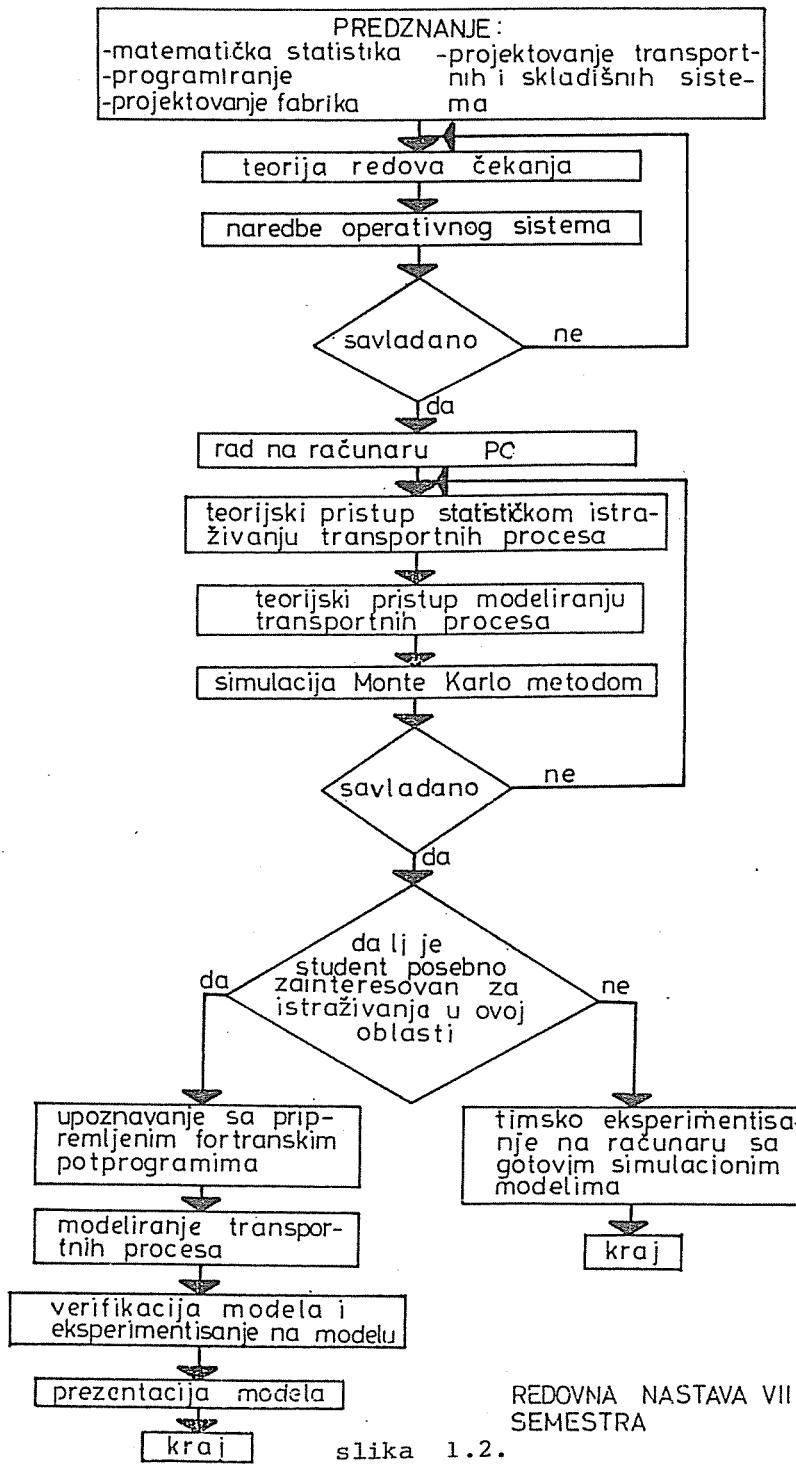
Studenti poslediplomci (Grupa za projektovanje fabrika) prolaze kroz ceo proces počevši od snimanja koja obavljaju na nekom realnom sistemu (fabrike, skladišta itd.), pa do modeliranja i verifikacije poredjenjem izlaznih rezultata simulacije

i eksperimentalnih rezultata. Proces kodiranja instrukcija se izvodi programskim jezicima opšte i specijalne namene: FORTRAN 77, TURBO-PASCAL, MODULA 2, GPSS (fortranska i paskalska verzija) i ISDS/FON. Izbor jezika zavisi od složenosti postavljenog problema. U knjizi su date izvorne verzije programa radjene u FORTRAN-u.

Na slikama 1.1 i 1.2 dati su dijagrami toka izvodjenja nastave.



DIJAGRAM TOKA LABORATORIJSKIH VEŽBI



REDOVNA NASTAVA VII I VIII SEMESTRA

slika 1.2.

2. PRIMENA TEORIJE REDOVA ČEKANJA

2.1. Uvod

Sa porastom mehanizacije i automatizacije transportnih procesa u prvi plan se stavlja razmatranje zajedničkog dejstva različitih transportnih sredstava sa gledišta povezivanja transportnih operacija. Povezivanje pojedinih transportnih sredstava i usklajivanje rada jednog sa drugim može da učini, da različiti elementi funkcionalno i vremenski dejstvuju zajednički. Kombinacija više istih ili različitih transportnih sredstava koji rade zajedno na ispunjenju određenog transportnog zadatka predstavlja jedan transportni sistem.

Osnovni zadatak transportnog sistema je premeštanje tereta, skupljanje nekoliko transportnih tokova u jedan i razgranavanje jednog toka na nekoliko, tj. ostvarivanje veze mesta otpreme sa mestom dopreme. Pored toga, transportni sistem ostvaruje i vezu po vremenu da bi se regulisala brzina pojedinih tokova, na primer kod procesa proizvodnje.

Da bi jedan transportni sistem mogao da funkcioniše pravilno potrebno je ispitati sposobnost povezivanja pojedinih transportnih sredstava u toku rada. Mesto gde se teret predaje i prihvata, odnosno mesto veze izmedju pojedinih transportnih sredstava mora da se podredi uslovima transportnog zadatka isto kao i pojedini transportni uredjaji datog sistema.

Model transportnog procesa može da se predstavi kao jedna apstraktna mreža medjusobno povezanih transportnih putanja koje definišu prostornu strukturu sistema. Mesta na kojima se cve putanje sučeljavaju zovu se čvorne tačke mreže transportnog sistema, odnosno mesta gde se ostvaruje veza izmedju pojedinih transportnih sredstava. Mreža povezuje sve potrebne elemente transportnog sistema na nivou zadatka.

Materijal se kreće duž cele mreže transportnog sistema, ali je evidentno da se na čvornim tačkama više ili manje usporava ili privremeno zaustavlja. Iz ovoga se može zaključiti da je potrebno posvetiti posebnu pažnju rešavanju ovih mesta, kako bi mogao da se ubrza protok materijala. Pri tome treba napomenuti da su novne funkcije čvornih tačaka:

- pretovar materijala (na pr. utovar kamiona, slika 2.1; postavljanje kutija na kolica u procesu komisioniranja, slika 2.2; pretovar jediničnog tereta, slika 2.3, itd.).

- obavljanje tehnoloških operacija (na pr. proces automatskog zavarivanja školjke automobila (slika 2.4.), fleksibilni sistem montaže proizvoda (slika 2.4a).

- deljenje i sakupljanje transportnih tokova (slika 2.5a i 2.5b), transportni sistem u fleksibilnoj proizvodnji (slika 2.6.).

- promena transportno tehničkog stanja robe (paletizacija i depaletizacija, slika 2.7a i 2.7b).

- privremeno zaustavljanje toka materijala, (medjufazna skladišta); primer transporter-a na ulazu u skladište (slika 2.7c).

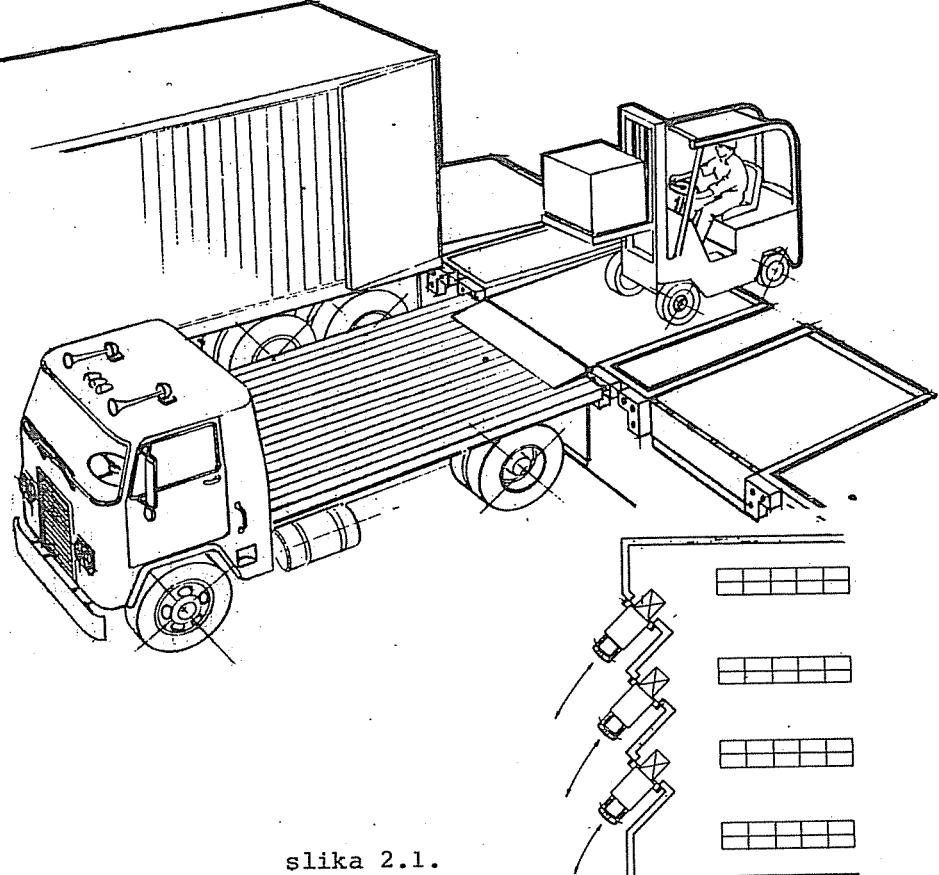
Materijal se preko pojedinih putanja dovodi do čvorne tačke i odvodi se preko drugih putanja. Ako se posmatra ovaj proces u jednom dužem vremenskom periodu količina materijala koji se doveđe u jednu čvornu tačku (Q_{di}) mora da bude jednaka količini materijala koji se odvede iz te čvorne tačke (Q_{oj}). U opštem slučaju važi izraz:

$$\sum_{i=1}^m Q_{di} = \sum_{j=1}^n Q_{oj} \quad (i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n)$$

Karakteristike jedne čvorne tačke, zavisno od funkcije koju preuzima, definišu: vrsta materijala koji se transportuje, dimenzije tereta, intenzitet toka i osobine transportnih sredstava koja učestvuju u datom procesu.

Transportni sistemi u procesu proizvodnje i skladištenju često rade sa neregularnim režimom rada (stohastički proces), tako da nije moguće tačno planirati rad po obimu i vremenu. Da bi ovakav sistem mogao da radi bez zastoja, mora da ima odgovarajući kapacitet. Odstupanja od optimalnog kapaciteta dovode do neefektivnog iskorišćenja opreme ili do stvaranja velikih redova čekanja u pojedinim fazama procesa.

Pri planiranju sistema za unutrašnji transport i skladištenje, osnovni je problem stvaranje redova čekanja na mestima pretovara, odnosno na mestima gde se čeka transport. Karakteris-



slika 2.1.

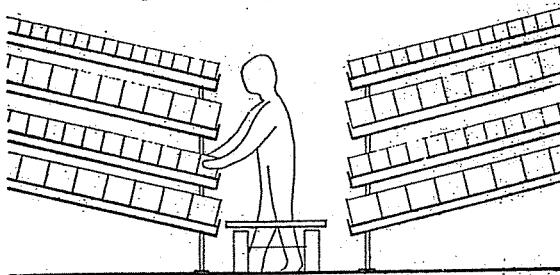
rike ovog problema su sledeće:

1. Dolazak materijala je u opštem slučaju slučajan dogadjaj. Za dolazak, odnosno interval vremena izmedju dolaska egzistira verovatnoća, koja se može iskazati sa odredjenom sigurnošću.

2. Proces opsluživanja dešava se u jednom vremenskom intervalu, koji sledi zadatu statističku raspodelu.

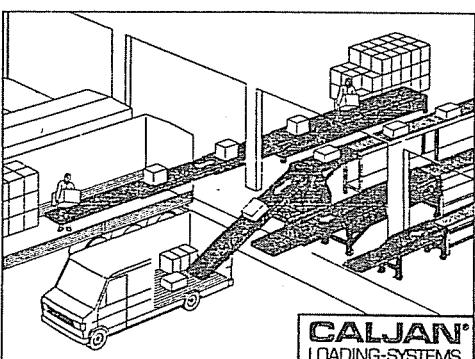
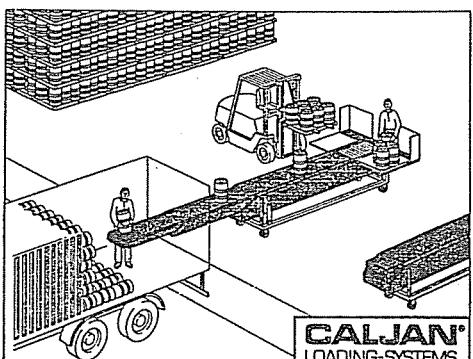
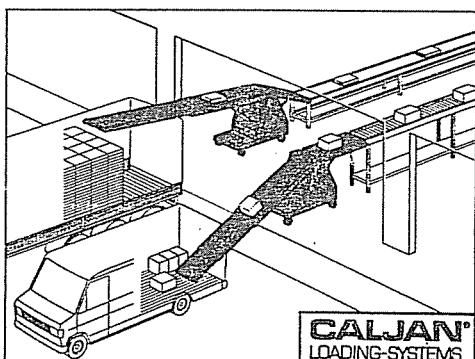
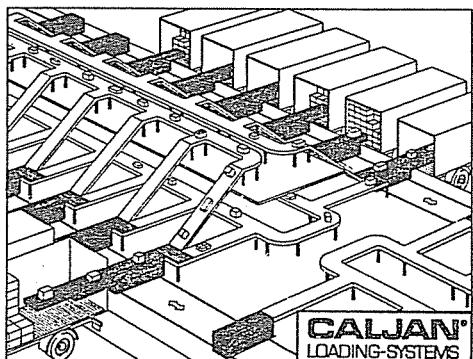
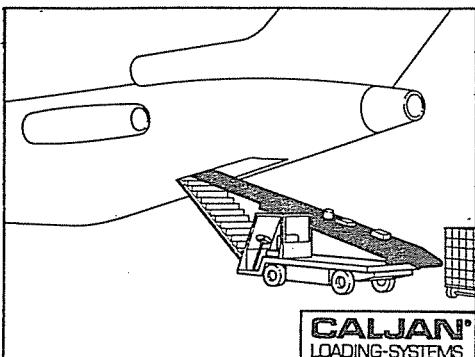
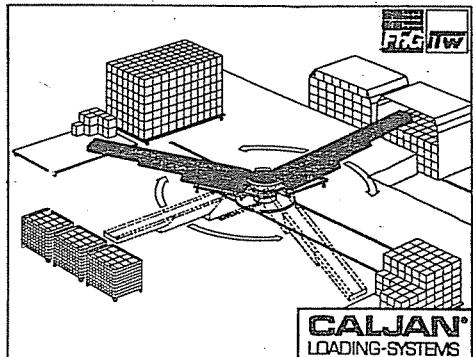
3. Mora da se definiše mehanizam opsluživanja.

4. Sistem je označen sa jednim od dva stanja: nastaju redovi čekanja, ili je broj uredjaja (ili ljudi) za opsluživanje na datom mestu, tako veliki da su nedovoljno zaposleni.

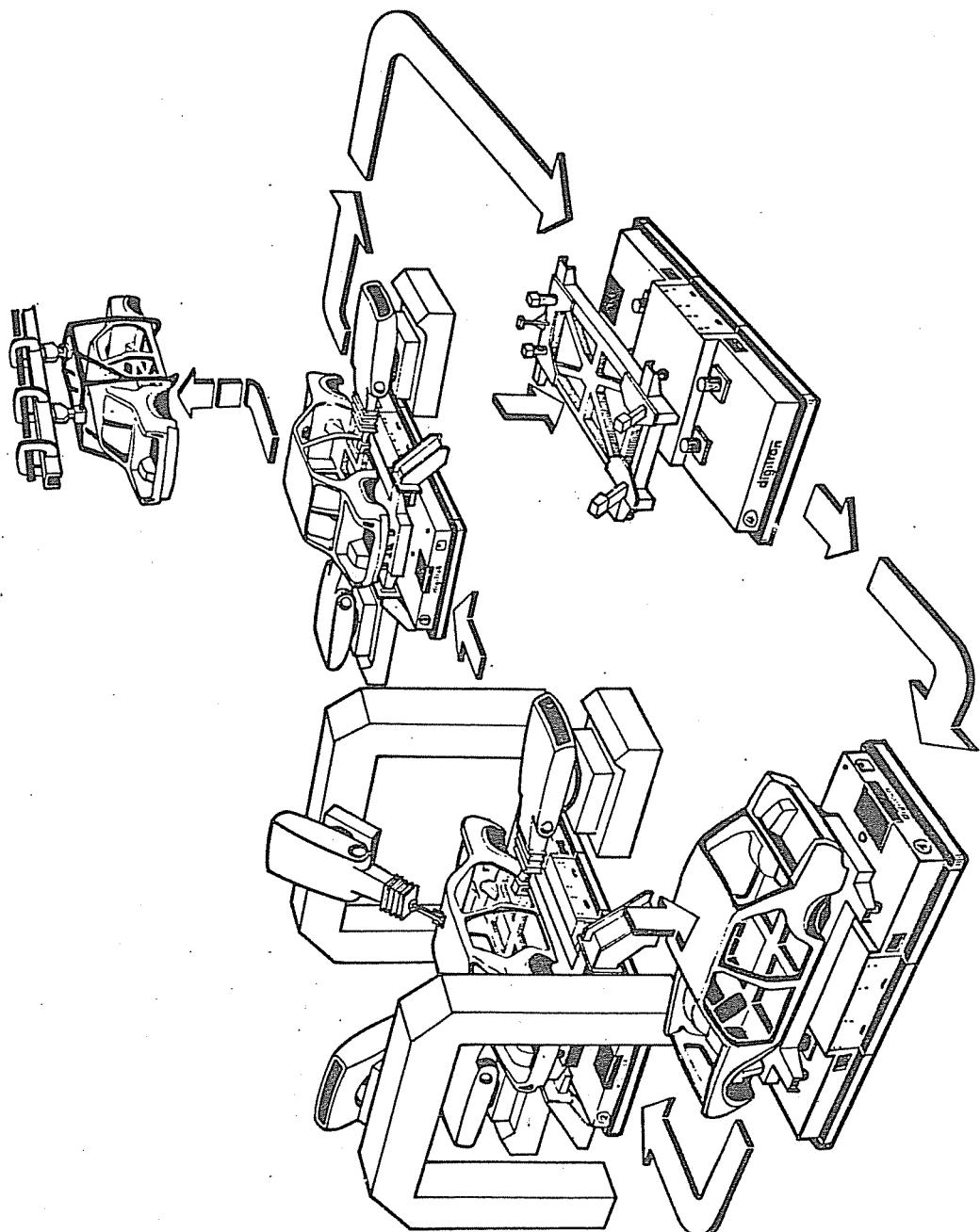


slika 2.2.

Koristeći se odgovarajućim modelom procesa, potrebno je naći takvu strukturu transportnog sistema da se zadovolje

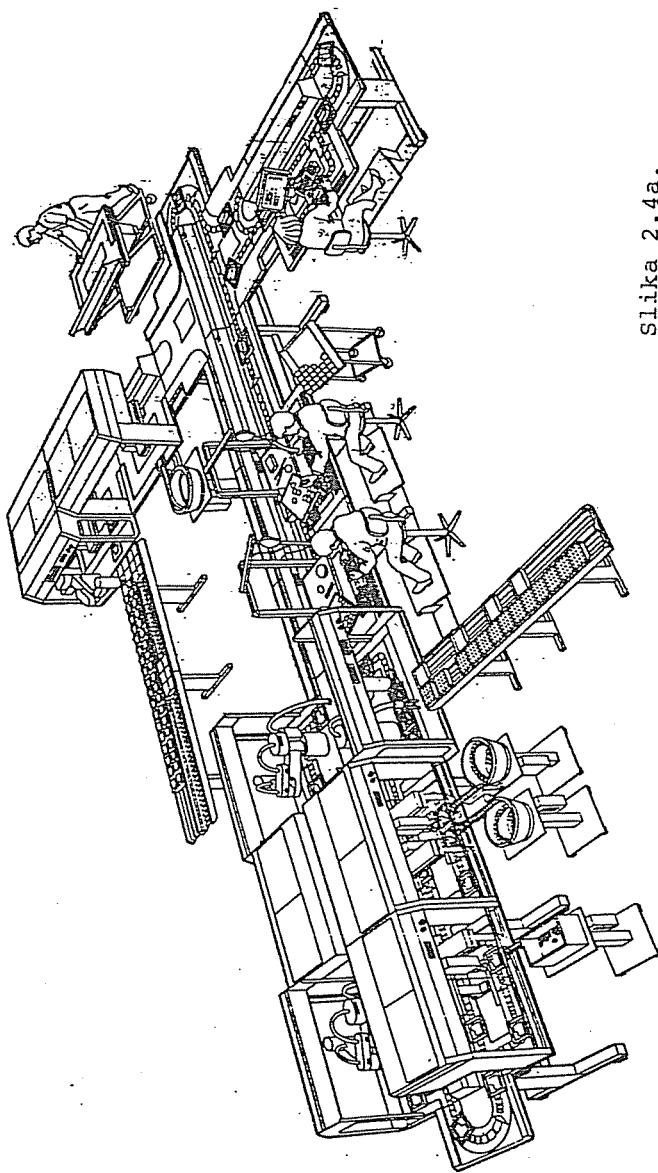


Slika 2. 3.



slika 2.4.

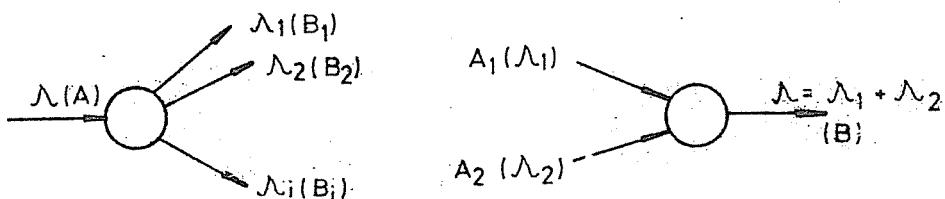
Slika 2.4a.



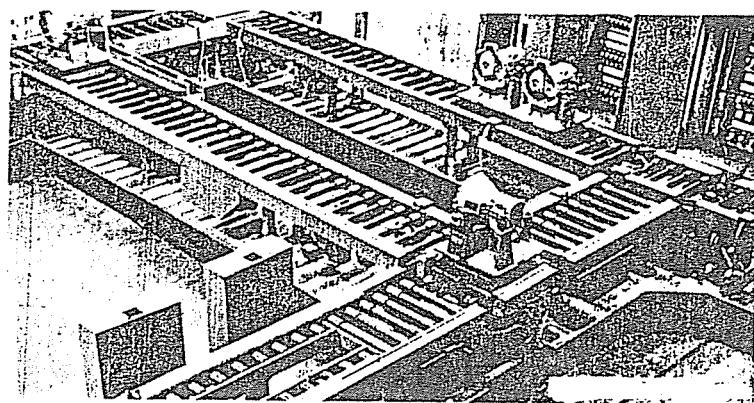
uslovi postavljeni transportnim zadatkom. Glavni zadatak konstrukcije modela transportnog sistema je da karakteriše realne procese date preko raspodele vremenskih parametara. Pri tome, izabrani model treba da odražava realnost u velikom stepenu i da predvidi ponašanje i rad sistema. Pojedine elemente transportnog sistema moguće je posmatrati kao stanice opsluživanja. To znači da svaki transportni uredjaj odnosno grupa transportnih uredjaja, mogu da obrazuju jedan sistem opsluživanja koji je deo (podsistem) celokupnog transportnog, odnosno skladišnog sistema.

Jedna od najvažnijih funkcija modela je, kako je već ranije navedeno da predvidi ponašanje i rad nekog sistema. Studiranje fenomena čekanja kao stohastičkog procesa, treba da karakteriše statistička svojstva slučajnih procesa. U ovu svrhu mogu da se koriste matematički modeli (teorija redova čekanja) i modeli simulacije.

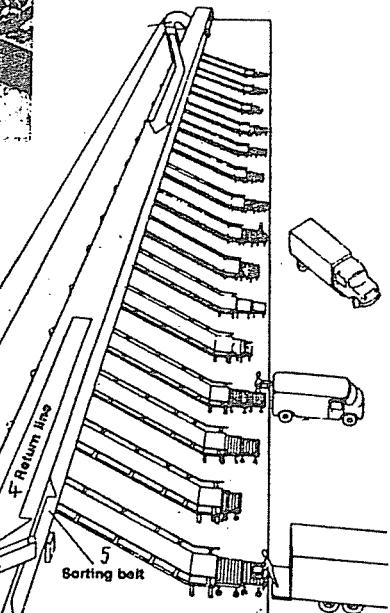
Matematički modeli redova čekanja daju nam uvid šta se dešava u sistemima sa opsluživanjem (npr. sistem unutrašnjeg transporta). Pažnja se usmerava na izračunavanje verovatnoće da će se sistem opsluživanja naći u specifičnom stanju u ma koje slučajno izabrano vreme. Poznavanje takvog stanja vodi direktno ka parametrima koji su interesantni, kao prosečan broj transportnih jedinica koje čekaju, prosečno vreme čekanja, itd. Modeli redova čekanja nisu mnogo korisni za rešavanje praktičnih problema velike složenosti, ali oni omogućuju stvaranje osnovnog koncepta i kod rešavanja kompleksnih problema.



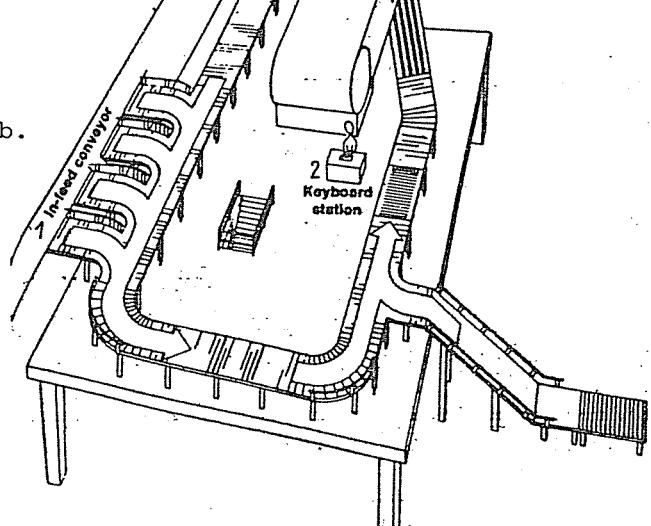
Slika 2.5a.

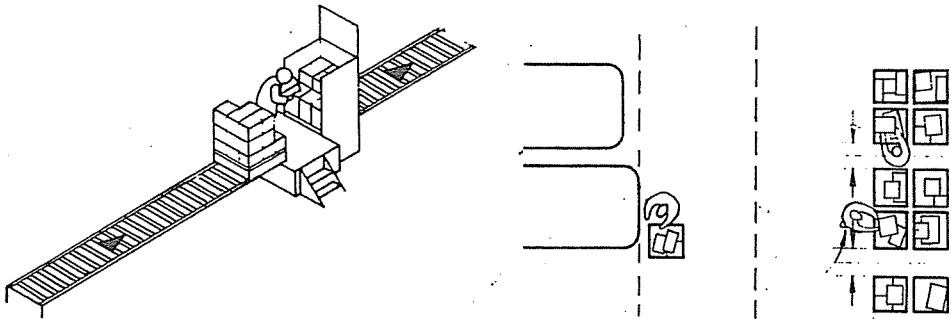


Slika 2.6.



Slika 2.5b.





slika 2.7.a

2.2. Teorija redova čekanja

Teorija redova čekanja se sastoji od matematičkih modela različitih tipova, koji omogućuju da se predviđi kako se poнаша sistem opsluživanja, kada mu se postave određeni zahtevi. "Teorija redova čekanja je studija fenomena stvaranja linija čekanja..." /26/.

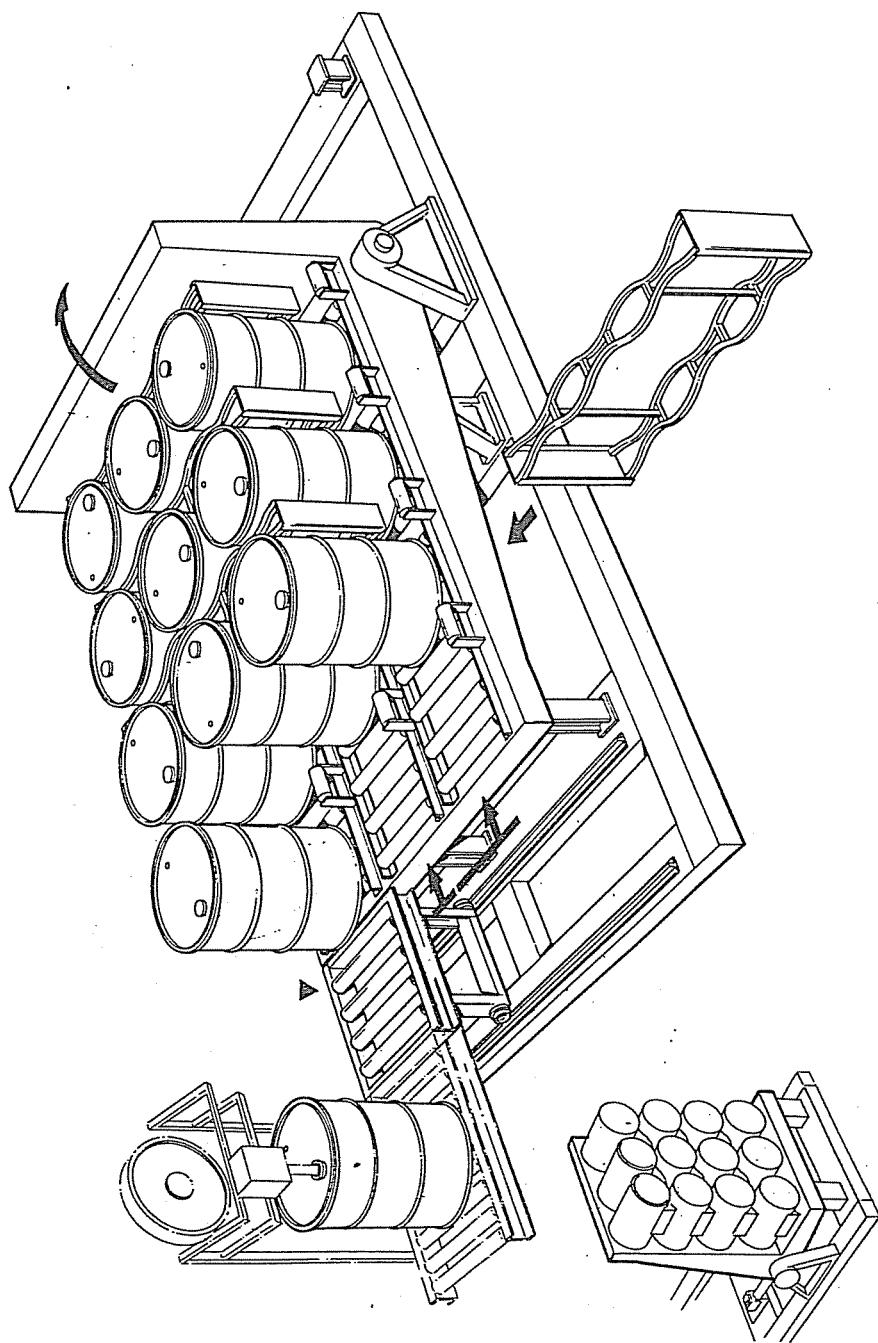
Redovi čekanja se pojavljuju u sistemu kada u dato vreme broj "jedinica" koje žele opsluživanje prevazilazi kapacitet uređaja za opsluživanje. Jasno je da prosečni kapacitet uređaja za opsluživanje μ mora da bude dovoljan da prihvati prosečni iznos jedinica koje dolaze u sistem (λ). Zavisno od varijacija intervala vremena između dolaska i promene trajanja vremena opsluživanja, redovi čekanja će se pojaviti sa vremena na vreme.

Jedinica (TJ) koja zahteva opsluživanje stvara se u toku vremena iz datog izvora i pridružuje se redu nekog sistema koji obezbeđuje to opsluživanje. Kada data jedinica dodje na red, opslužuje se pomoću uređaja za opsluživanje (TU) i posle završetka opsluživanja napušta sistem. Posle napuštanja sistema može ili ne mora da se pridruži populaciji ulaznog izvora.

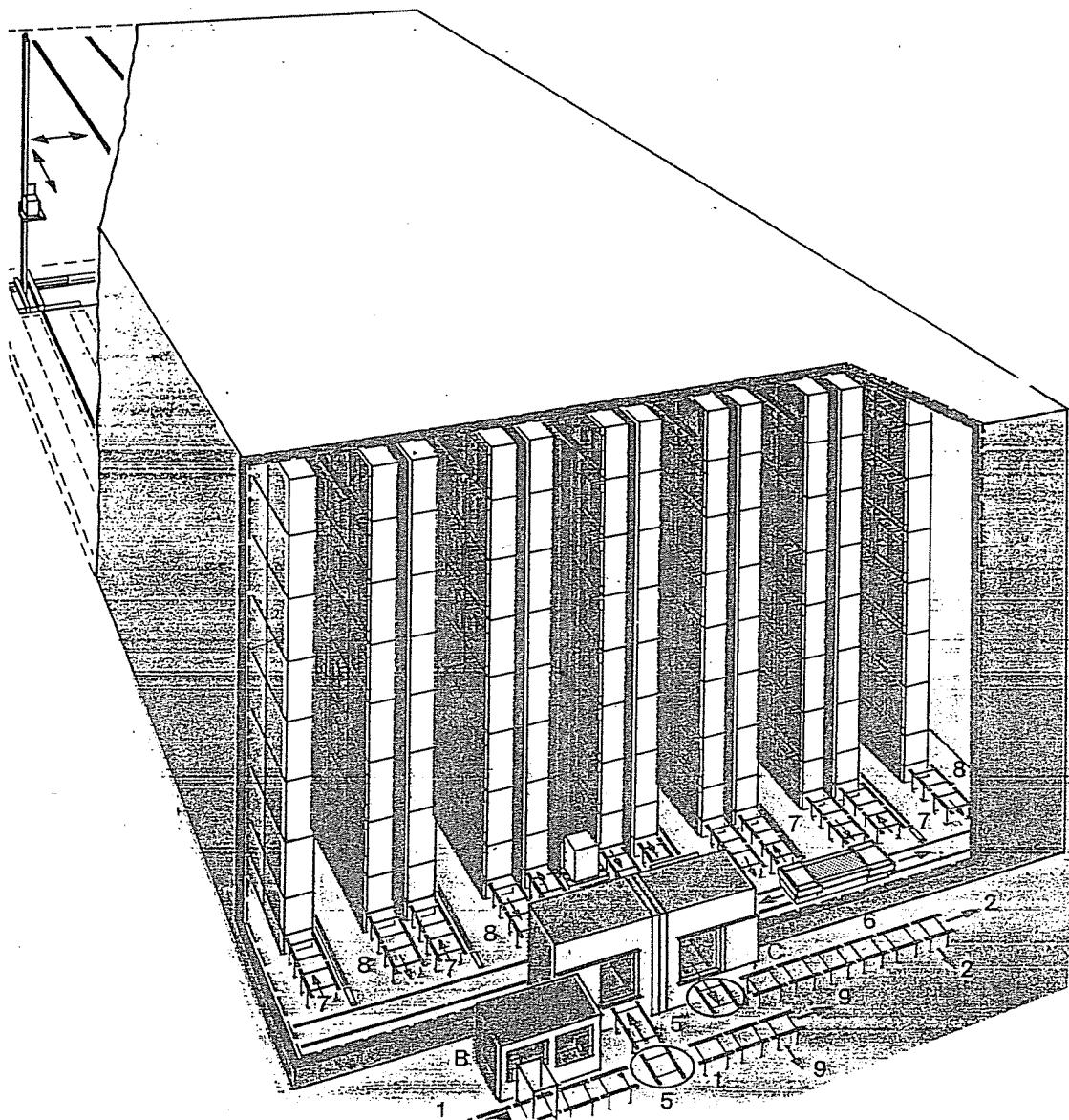
Na slici 2.8. dat je elementarni (jednokanalni) sistem opsluživanja sa naznačenim granicama sistema.

Sistem redova čekanja karakterišu sledeći elementi /26/, izvor, ulazni proces, mehanizam opsluživanja, disciplina reda čekanja i konfiguracija sistema čekanja.

Izvor je mesto iz koga potiču jedinice (TJ) koje zahtevaju opsluživanje. Ukupni broj potencijalnih jedinica koje zaht-



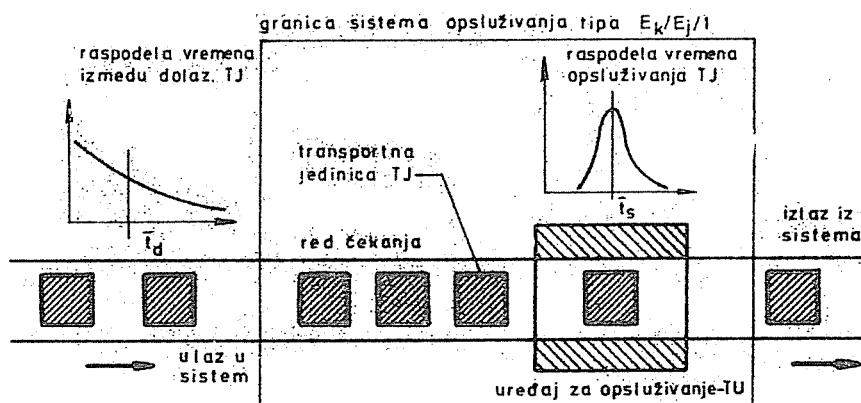
Slika 2.7b.



Slika 2.7c.

evaju opsluživanje može da bude konačan ili beskonačan, tako da je i izvor konačan ili beskonačan. U svim stvarnim problemima izvor je konačan.

Ukoliko je populacija dovoljno velika, onda iz praktičnih razloga može da se uzme da je izvor beskonačan (transportni, odnosno skladišni sistem sadrži veliki broj transportnih jedinica). Ovo usvajanje je korisno pri rešavanju mnogih problema u praksi, zato što je analiza modela sa beskonačnim izvorom bitno lakša nego modela sa konačnim izvorom.



slika 2.8.

Ulagani proces. Kod problema sa beskonačnim izvorom vreme izmedju dolazaka jedinica iz izvora (t_{di}) se uzima da je nezavisno i identično distribuirana slučajna promenljiva. Uobičajen oblik ovog procesa, koji se upotrebljava u modelima redova čekanja, i koji ima empirijsko opravdanje u njegovoj upotrebi je Poissonov proces. Prosečan iznos dolazaka jedinica je $\lambda = 1/\bar{t}_d$, gde je \bar{t}_d - prosečno vreme izmedju dolazaka.

Mehanizam opsluživanja. Da bi se definisao mehanizam opsluživanja moraju da budu specificirane tri nezavisne promenljive:

1. Vreme opsluživanja mora da bude određeno; u opštem slučaju je jedna promenljiva slučajna veličina (t_{si}). Može se uzeti da vreme opsluživanja formira jedan niz od nezavisnih i identično rasporedjenih slučajnih promenljivih. Takođe se uzima da su vremena izmedju dolazaka i vremena opsluži-

vanja uzajamno nezavisna.

2. Kapacitet opsluživanja se obično daje kao broj jedinica koje mogu jednovremeno da se opsluže. Ovaj broj može da bude fiksiran (broj TU ili broj TJ koje može da prihvati jedan uredjaj), ili može da varira u toku vremena. Sistem za opsluživanje može da ima jedan ili više kanala.

3. Uredaj za opsluživanje može da bude na raspolaganju u izvesno vreme, ali ne i u drugo (TU radi na drugom poslu, poslužilac obavlja pomoćne dužnosti).

Disciplina u redu čekanja je kriterijum po kome se vrši selekcija jedinica za opsluživanje onda kada su već u redu. Ovde se razlikuju dva slučaja: jedinstveni red čekanja (mogući u svim slučajevima, nezavisno od broja kanala) i više paralelnih redova čekanja (samo kod višekanalnih sistema).

Iz jedinstvenog reda čekanja jedinice na opslužna mesta prelaze po nekoj od sledećih disciplina:

- FIFO - (prva koja dođe - prva se opslužuje),
- LIFO - (poslednja koja dodje - prva se opslužuje),
- SIRO - slučajna disciplina - redosled opsluživanja određuje se na slučajan način izmedju svih prisutnih jedinica; verovatnoća izbora je jednak za sve jedinice,
- PRI - disciplina prema prioritetu može da bude određena prema najkraćem ili najdužem vremenu opsluživanja, tipu transportne jedinice, njenoj masi, vrsti robe itd.; kod pojave jedinica sa višim prioritetom mogu da nastupe dva slučaja:

a) produžava se već započeti proces opsluživanja i po njegovom završetku bira se jedinica sa najvišim prioritetom,

b) prekida se započeti proces opsluživanja, jedinica sa mesta opsluživanja se vraća u red čekanja, a prihvata se prioritetna jedinica.

Kod sistema sa više redova čekanja izbor discipline u svakom pojedinom redu čekanja isti je kao i kod jednorednih sistema, ali se mogu pojaviti i druge mogućnosti. Prvo, jedinice mogu da se klasiraju prema mestima opsluživanja (pojedini uredjaji za opsluživanje mogu da se specijalizuju za rad na određenim jedinicama); i drugo, ukoliko postoji više istih kanala za

opsluživanje može da nastupi tzv. "jockeying" /26/, a to je da se jedinice priključuju tamo gde su najkraći redovi (prelaženje sa dužih na kraće redove). Ovaj proces može da bude slučajan ili da se ponaša prema usvojenoj disciplini reda čekanja.

Dva značajna fenomena mogu da budu prisutna u sistemima redova čekanja:

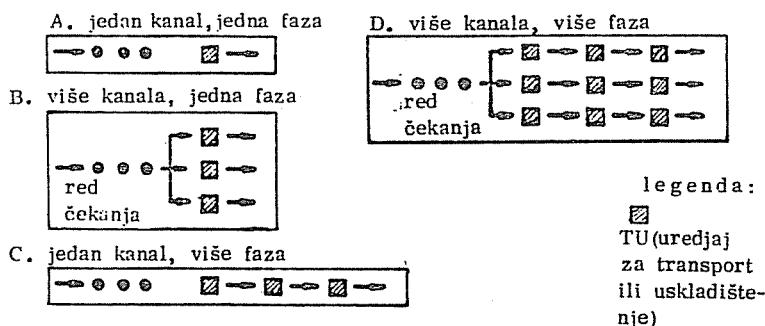
- jedinica se ne priključuje redu koji ima dužinu veću od neke odredjene (zadate), i
- jedinica napušta red, pošto mu se prethodno priključila i čekala izvesno vreme.

Konfiguracija sistema za opsluživanje može da bude sledeća (slika 2.9.)

- jedan kanal i jedna faza opsluživanja,
- više kanala i jedna faza opsluživanja,
- jedan kanal i više faza opsluživanja (serijski jednokanalni sistem),
- više kanala i više faza opsluživanja (serijski višekanalni sistem), i
- složeni sistem opsluživanja, koji predstavlja kombinaciju prva četiri navedena sistema.

Zavisno od raspoloživog prostora za čekanje jedinica može da se izvrši podela na:

- sisteme sa prostorom za čekanje neograničenog kapaciteta, i
- sisteme sa prostorom za čekanje ograničenog kapaciteta.



slika 2.9

2.3. Osnovne karakteristike i izlazni parametri sistema za opsluživanje

Kod studiranja fenomena čekanja u stohastičkim procesima, analize mogu da se vrše za procese koji zavise od vremena, ili mnogo jednostavnije, za proces sa stacionarnim stanjem, usvajajući njegovo postojanje. U ovom poglavlju će se prvenstveno razmatrati karakteristike stacionarnog stanja u problemu redova čekanja.

Ukupan broj jedinica u sistemu za opsluživanje predstavlja stanje sistema. Uopšte je interesantno prosečno ponašanje sistema i odatle se ne interesujemo za stanje sistema u funkciji vremena. Pažnja se usmerava na izračunavanje verovatnoće da će se sistem naći u specifičnom stanju u ma koje slučajno izabrano vreme. Poznavanje takvog stanja vodi direktno ka parametrima koji su interesantni. Procenjujući ove parametre u funkciji broja katala za opsluživanje ili prosečnog vremena opsluživanja, očigledno je kako se ovaj model može upotrebiti u projektovanju sistema za unutrašnji transport i usklađenje.

Statističko ponašanje sistema opsluživanja karakterišu uglavnom sledeći parametri:

- broj jedinica u sistemu, uključujući i onu koja se opslužuje u datom momentu vremena t , $N_s(t)$,
- broj jedinica u sistemu koje čekaju na opsluživanje u datom momentu $N_w(t)$,
- vreme opsluživanja t_s ,
- vreme zadržavanja jedinice u sistemu (proteklo vreme od trenutka kada se jedinica priključi redu do trenutka napuštanja sistema posle završenog opsluživanja) t_{ws} , i
- vreme čekanja jedinice na opsluživanje t_w .

Prosečan broj jedinica u sistemu opsluživanja \bar{N} je određen sa tri faktora:

- raspodelom verovatnoće vremena dolaska jedinica (t_d),
- raspodelom verovatnoće vremena opsluživanja (t_s), i
- koeficijentom opterećenja sistema (intenzitetom protoka) ρ .

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} ; \quad \lambda = \frac{1}{\bar{t}_d} ; \quad \mu = \frac{1}{\bar{t}_s}$$

Opšta karakteristika svih redova čekanja je da sistem stacionaran za $\rho < 1$, odnosno $\lambda < \mu$. Za male vrednosti koeficijenta ρ srednja dužina reda ne prevazilazi mnogo vrednost koeficijenta ρ . U slučaju kada $\rho \rightarrow 1$ dužina reda raste do beskonačnosti (izuzetak je sistem $E_{\infty}/E_{\infty}/1$ kod koga je za $\rho=1$, $N=1$). Ukoliko je $\rho > 1$, odnosno $\lambda > \mu$ sistem prestaje da bude stacionaran.

Kendalova (Kendall) obeležavanja. 1953. godine Kendall je predložio simbole za klasifikaciju redova čekanja koji se u glavnom primenjuju svuda u literaturi. Definisani su sledeći simboli:

M - označava raspodelu vremena izmedju dolaska ili vremena opsluživanja sa negativnom eksponencijalnom distribucijom,

G - označava raspodelu vremena opsluživanja opšteg tipa (uzima se ista oznaka i za raspodelu vremena ulaznog procesa opšteg tipa),

D - označava vremena izmedju dolazaka ili vremena opsluživanja koja su konstantna, i

C - označava broj kanala u sistemu.

Za Erlangov proces se uzima oznaka E_k ($k=1, 2, \dots$). Pri tome je:

$$E_{\infty} = D \quad \text{i} \quad E_1 = M$$

Sistem čekanja se karakteriše sledećim izrazom: ulazni proces /proces opsluživanja/ broj kanala. Tako na pr. izraz $M/D/5$ ($E_1/E_{\infty}/5$), označava sistem opsluživanja u kome je dolazak opisan Poisson-ovim procesom, vreme opsluživanja je konstantno, i ima pet kanala.

2.4. Jednokanalni sistem opsluživanja sa neograničenim redom čekanja

Jednačine Polačeka i Hinčina se koriste za izračunavanje osnovnih parametara jednokanalnih sistema opsluživanja $E_1/E_k/1(M/G/1)$, /12/:

$$N_w = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \left\{ 1 + \left[\frac{\rho t_s}{E(t_s)} \right]^2 \right\}$$

$$N_s = \rho + \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \left\{ 1 + \left[\frac{\sigma_{ts}}{E(t_s)} \right]^2 \right\}$$

$$t_w = \frac{\rho E(t_s)}{2(1-\rho)} \left\{ 1 + \left[\frac{\sigma_{ts}}{E(t_s)} \right]^2 \right\}$$

$$t_{ws} = E(t_s) + \frac{\rho \bar{t}_s}{2(1-\rho)} \left\{ 1 + \left[\frac{\sigma_{ts}}{E(t_s)} \right]^2 \right\}$$

$$N_w = \lambda t_w$$

$$N_s = \lambda t_{ws}$$

$$N_s = \rho + N_w$$

gde je:

ρ - koeficijent iskorišćenja uređaja za opsluživanje

$$\rho = \lambda E(t_s),$$

$E(t_s)$ - prosečno vreme opsluživanja,

σ_{ts} - standardna devijacija vremena opsluživanja,

N_w - prosečan broj jedinica u redu čekanja,

N_s - prosečan broj jedinica u sistemu,

t_w - prosečno vreme čekanja jedinice na opsluživanje,

t_{ws} - prosečno vreme zadržavanja jedinice u sistemu.

Navedeni obrasci se primenjuju u slučajevima eksponencijalne raspodele vremena dolaska jedinice u sistem pri ma kojoj Erlangovoj raspodeli vremena opsluživanja. Pri tome se pretpostavlja da postoji beskonačan izvor, neograničen red čekanja i da vlada FIFO disciplina. Izraz:

$$\left\{ 1 + \left[\frac{\sigma_{ts}}{E(t_s)} \right]^2 \right\}$$

koji je prisutan u svakoj od navedenih jednačina zavisi od rasejavanja vremena opsluživanja. Mogu da se uoče dva posebna slučaja:

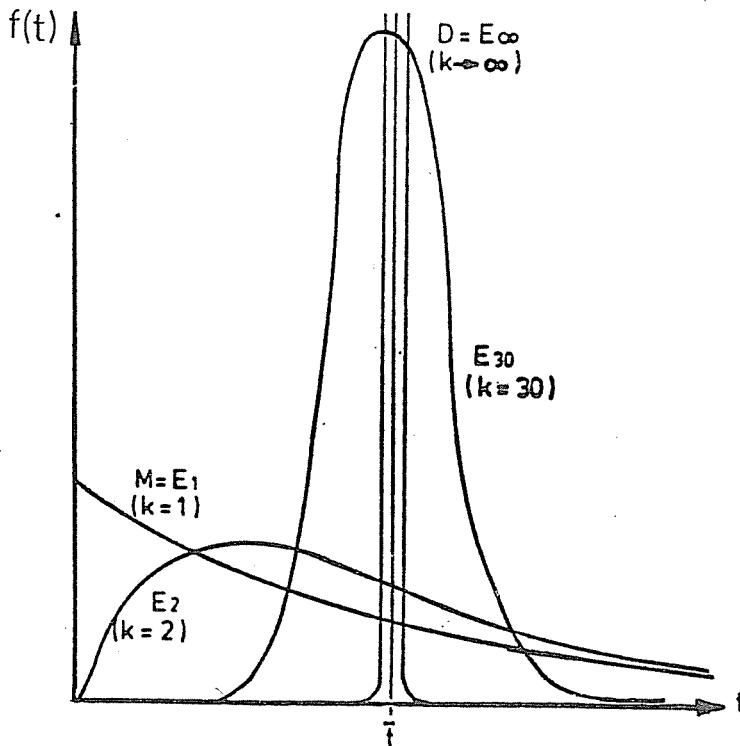
- vreme opsluživanja je konstantna veličina, pa je

$$\sigma_{ts} = 0,$$

- vreme opsluživanja ima eksponencijalnu raspodelu, pa je

$$\sigma_{ts} = E(t_s)$$

Koeficijent varijacije $\sigma_{ts}/E(t_s)$ kod eksponencijalne distribucije je jednak jedinici. Distribucije koje imaju veće variranje oko srednje vrednosti, prirodno imaju veću standardnu devijaciju (hipereksponecijalna raspodela); dok sa druge strane, distribucije sa manjim variranjem oko srednje vrednosti, imaće manju standardnu devijaciju, gde dolazi familija Erlangovih raspodela (slika 2.10).



Slika 2.10.

Pri rešavanju praktičnih problema u projektovanju sistema unutrašnjeg transporta ili skladištenja, variranje vremena opsluživanja nije tako veliko kao u slučaju eksponencijalne raspodele, odnosno σ_{ts} retko dostiže veličinu $E(t_s)$. Praktično, kada se vreme opsluživanja ponaša po eksponencijalnoj raspodeli, uzima se za najnepovoljniji slučaj. U stvarnosti, vreme opsluživanja se ponaša po Erlangovoj raspodeli reda K ($K=1, 2, \dots$)

Iz navedenih jednačina može se uočiti da sa porastom vrednosti K (raspodele Erlanga višeg reda), opada prosečan broj jedinica u sistemu opsluživanja, pa je:

$$(N)_k > 1 < (N)_{k=1}$$

Navedene formule daju prosečne vrednosti veličina redova čekanja i vremena čekanja. Obično je poželjno da se zna i raspodela ovih veličina. Disperzija veličine broja jedinica u sistemu je određena od Hinčina i Polačeka (kao i disperzija vremena bavljenja jedinice u sistemu), za sisteme redova čekanja sa jednim uredjajem za opsluživanje, eksponencijalnom raspodelom vremena između dolaska i disciplinom upravljanja FIFO. Poslednji kriterijum nije bio neophodan u prethodnim formulama /12/.

$$\sigma_{t_w} = \sqrt{\frac{\lambda E(t_s^3)}{3(1-\rho)} - \frac{\lambda^2 E^2(t_s^2)}{2(1-\rho)^2}}$$

$$\sigma_{t_{ws}} = \sqrt{\frac{\lambda E(t_s^3)}{3(1-\rho)} - \frac{\lambda^2 E^2(t_s^2)}{2(1-\rho)^2} + \sigma_{t_s}^2}$$

$$\sigma_{N_s} = \sqrt{\frac{\lambda^3 E(t_s^3)}{3(1-\rho)} + \frac{\lambda^4 E^2(t_s^2)}{4(1-\rho)^2} + \frac{\lambda^2 (3-2\rho) E(t_s^2)}{2(1-\rho)} + \rho(1-\rho)}$$

gde je:

σ_{t_w} - standardna devijacija vremena čekanja,

$\sigma_{t_{ws}}$ - standardna devijacija vremena zadržavanja jedinice u sistemu,

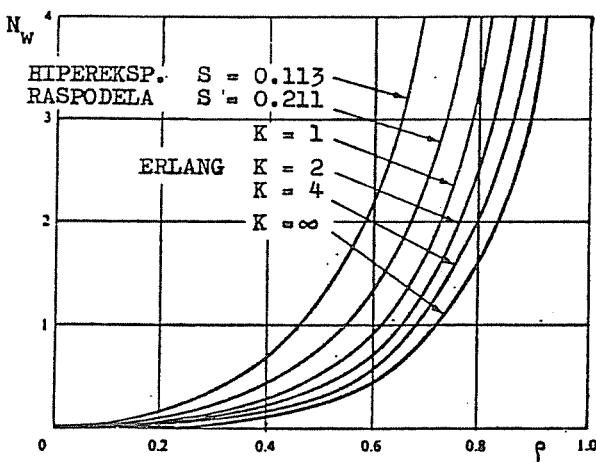
σ_{N_s} - standardna devijacija broja jedinica u sistemu,

λ - prosečan dolazak jedinica u sistem,

t_s - vreme opsluživanja, i
 σ_{t_s} - standardna devijacija vremena opsluživanja.

Na dijagramu - (slika 2.11.) date su krive zavisnosti N_w od ρ za razne vrednosti K. Slike 2.12. i 2.13. prikazuju krive σ_{N_s} i $\sigma_{t_{ws}}$ u funkciji od ρ za različite vrednosti K.

Posmatrajući stvarne procese u transportnim sistemima, može se zaključiti da se većina ponaša po gama raspodeli (K je realan broj). Erlangova raspodela je poseban slučaj gama raspodele za celobrojno K.

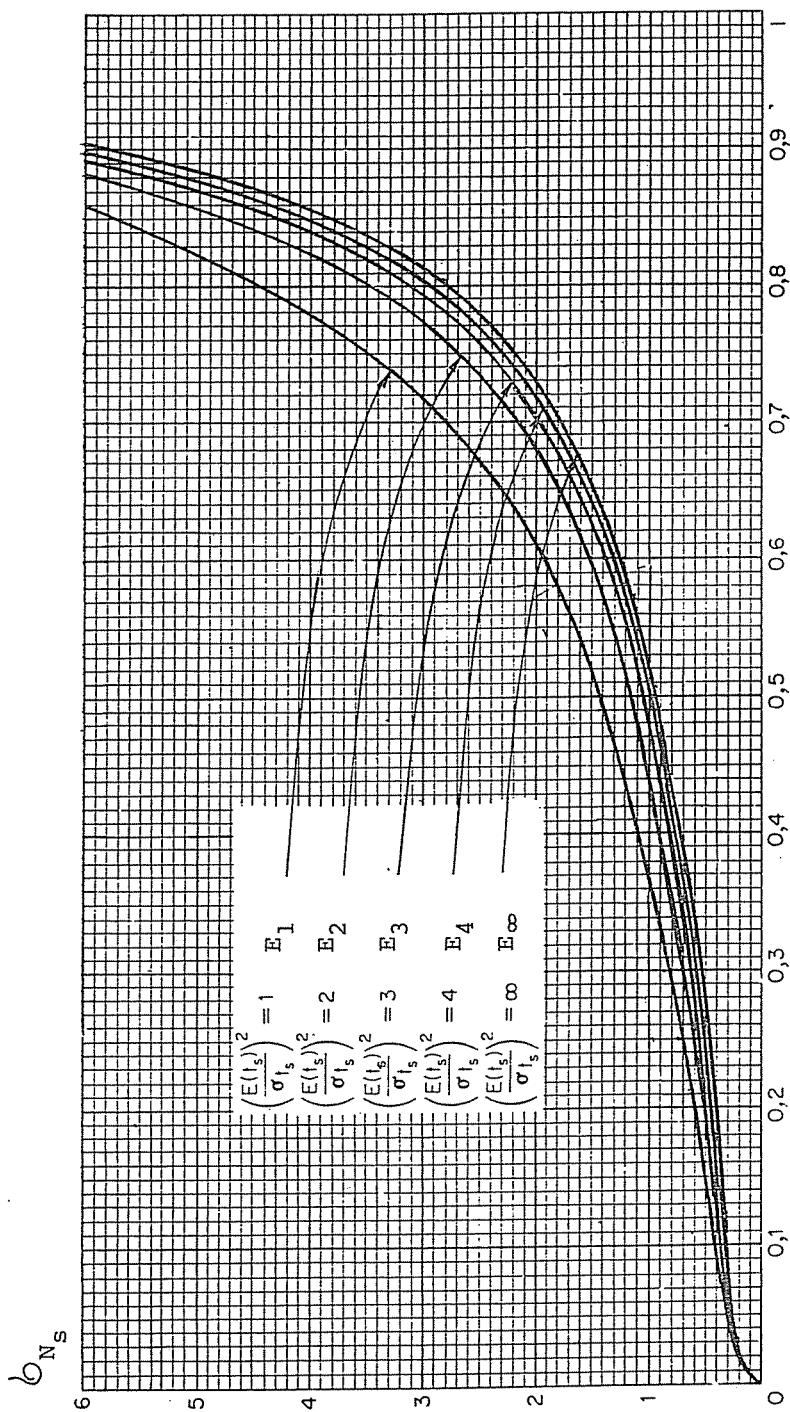


Slika 2.11.

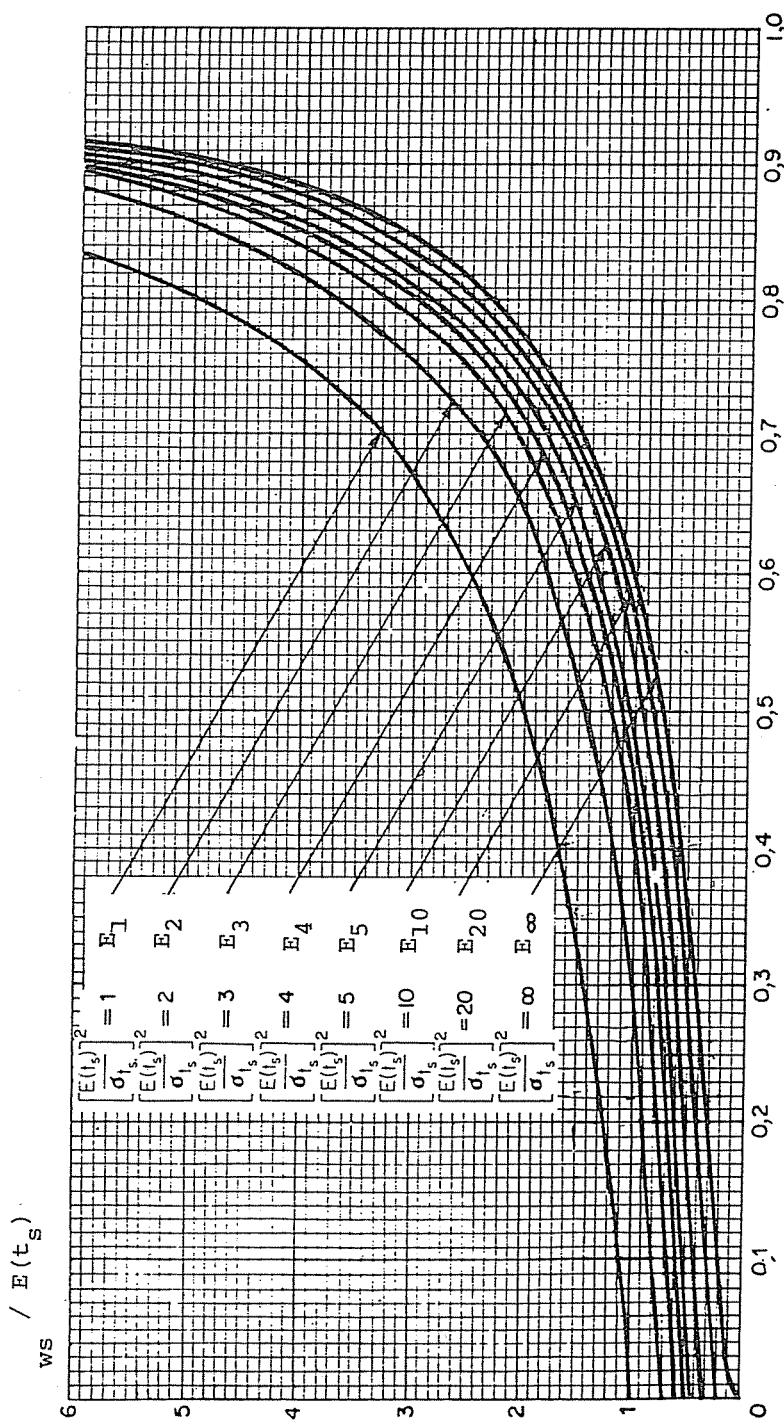
Jedno od svojstava gama raspodele je sledeće: ako se dve ili više nezavisnih promenljivih podčinjavaju gama raspodeli, to se suma tih promenljivih takođe podčinjava gama raspodeli..

Pri korišćenju formula Polačeka i Hinčina za određivanje srednje dužine redova čekanja i vremena čekanja kod složenih sistema, tj. sistema sa paralelnim i serijskim vezama, neophodno je imati u vidu sledeće:

- kod toka koji karakteriše Poisson-ova raspodela, koji se grana na K paralelnih kanala opsluživanja i pri tome se odbira svaka k-ta transportna jedinica, dolazi do promene parametra ulazne raspodele. Poasonova raspodela se pretvara u raspod-



Slika 2.12.



Slika 2.13.

elu Erlanga k-tog reda. Na primer, ako se Poisson-ov tok deli na dva toka, nastali tokovi će imati Erlangovu raspodelu drugog reda (E_2). Ako se ulazni tok (Poisson) deli na veoma veliki broj kanala za opsluživanje, može se smatrati da su vremena izmedju dolaska jedinica u svaki kanal opsluživanja konstantna (E_∞).

- kod grananja toka materijala, koji karakteriše Erlangova raspodela, na nekoliko paralelnih kanala opsluživanja, svaki tok na ulazu u odgovarajući kanal opsluživanja ima takodje Erlangovu raspodelu sa odgovarajuće promjenom srednjom vrednosti /9/.

- raspodela izlaznih parametara stanice opsluživanja je jednaka raspodeli ulaznih parametara za sledeću stanicu opsluživanja (kod serijskih sistema) /9/.

U slučaju kada se vreme opsluživanja ponaša po eksponentijalnoj raspodeli ($E_1/E_1/1$), osnovni parametri sistema su dati sledećim izrazima:

$$N_w = \frac{\rho^2}{1-\rho}$$

$$N_s = \frac{\rho}{1-\rho}$$

$$t_w = \frac{\rho E(t_s)}{1-\rho}$$

$$t_{ws} = \frac{E(t_s)}{1-\rho}$$

$$\sigma_{N_s} = \frac{\sqrt{\rho}}{1-\rho}$$

$$\sigma_{t_w} = \frac{E(t_s)}{1-\rho} \sqrt{2\rho - \rho^2}$$

$$\sigma_{t_{ws}} = \frac{E(t_s)}{1-\rho}$$

$$P_0 = 1 - \rho$$

$$P_n = \rho^n (1-\rho) = \rho^n P_0, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n P_0 = \frac{P_0}{1-\rho} = 1$$

$$P(n \leq N) = \sum_{n=0}^N \rho^n (1-\rho)$$

$$P(n > N) = \sum_{n=N+1}^{\infty} \rho^n (1-\rho) = \rho^{N+1}$$

$$P(T > t) = e^{-\mu(1-\rho)t}$$

$$P(T \leq t) = 1 - e^{-\mu(1-\rho)t}$$

gde je:

ρ - koeficijent iskorišćenja uređaja za opsluživanje,

$E(t_s)$ - prosečno vreme opsluživanja,

N_w - prosečan broj jedinica u redu čekanja,

N_s - prosečan broj jedinica u sistemu,

t_w - prosečno vreme čekanja jedinice na opsluživanje,

t_{ws} - prosečno vreme zadržavanja jedinice u sistemu,

σ_{N_s} - standardna devijacija broja jedinica u sistemu,

σ_{t_w} - standardna devijacija vremena čekanja,

$\sigma_{t_{ws}}$ - standardna devijacija vremena zadržavanja jedinice u sistemu,

P_0 - verovatnoća da nema ni jedne jedinice u sistemu,

P_n - verovatnoća da ima n jedinica u sistemu,

$P(n \leq N)$ - verovatnoća da je broj jedinica u sistemu manji ili jednak N ,

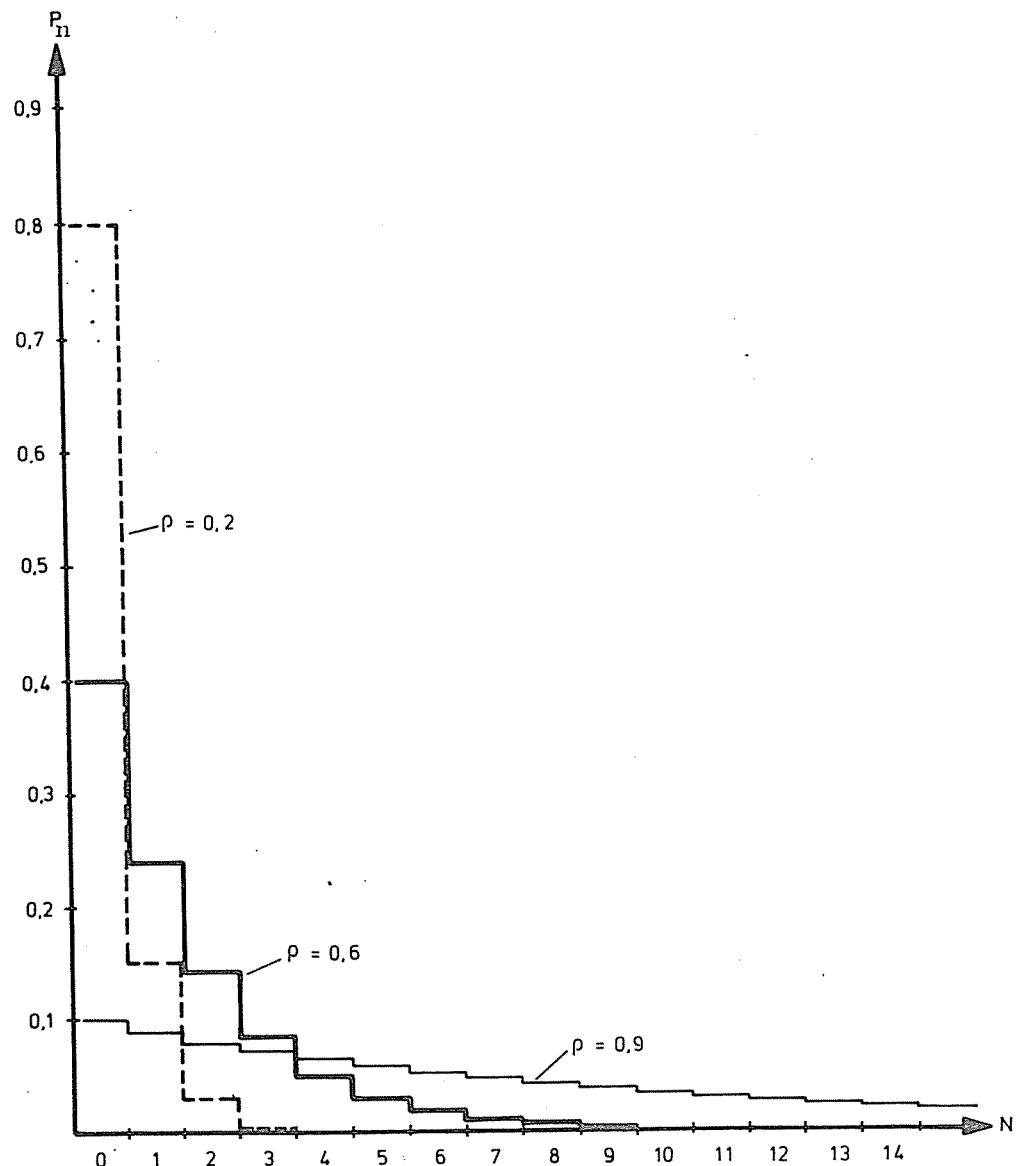
$P(n > N)$ - verovatnoća da je broj jedinica u sistemu veći od nekog zadatog broja N ,

$P(T > t)$ - verovatnoća da je vreme bavljenja jedinice u sistemu veće od nekog zadatog vremena t ,

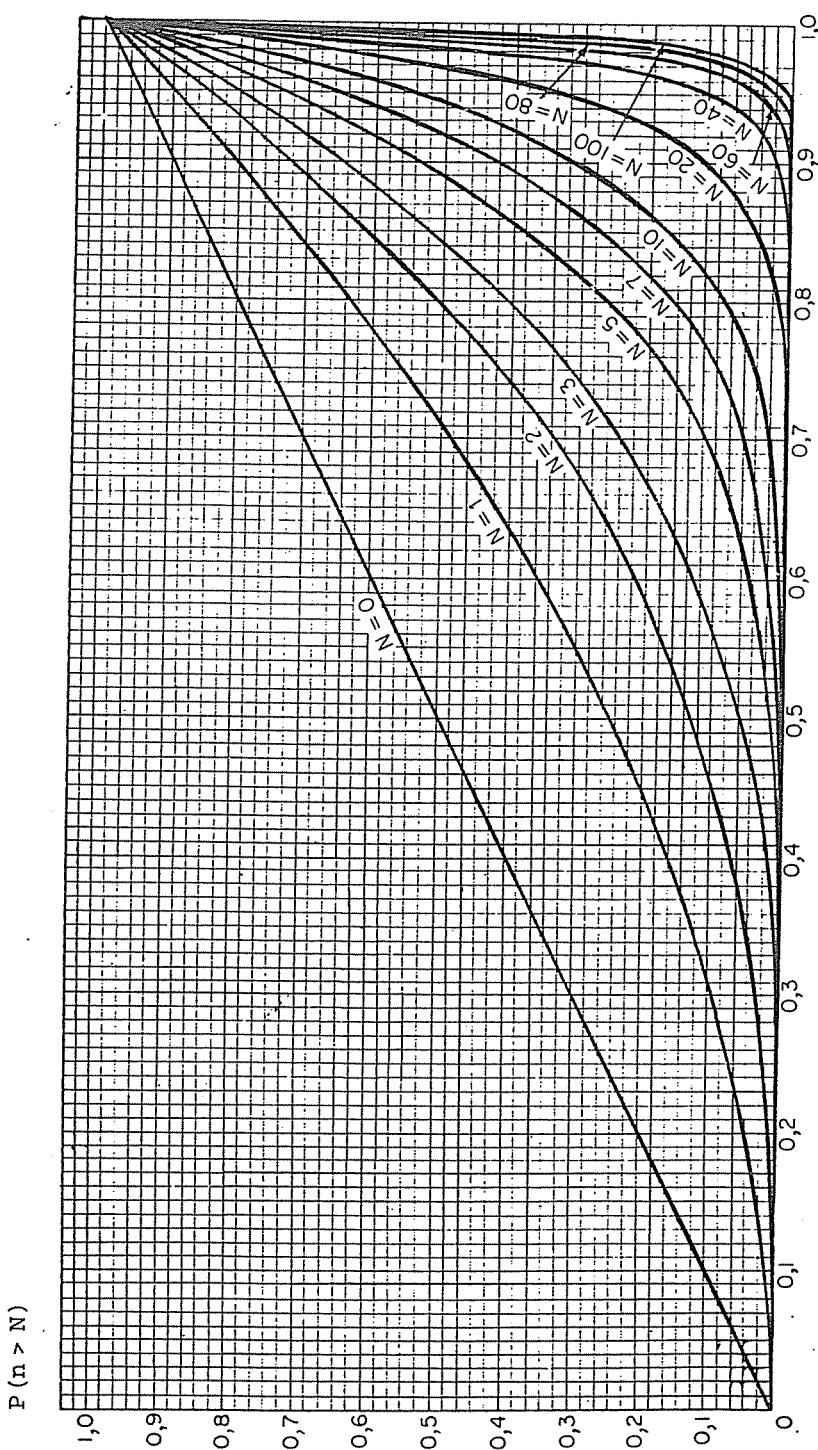
$P(T \leq t)$ - verovatnoća da je vreme bavljenja jedinice u sistemu manje ili jednako t .

Na slici 2.14. su date verovatnoće P_n za razne vrednosti ρ . Slika 2.15. prikazuje krive $P(n > N)$ u zavisnosti od ρ za razne vrednosti N .

U slučaju kada je Poisson - ov tok jedinica koje ulaze u sistem i konstantno vreme opsluživanja ($\sigma_{t_s} = 0$), osnovni parametri sistema ($E_1/E_\infty/1$) su dati sledećim izrazima:



Slika 2.14.



Slika 2.15.

$$N_w = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$$

$$N_s = \rho + \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$$

$$t_w = \frac{\rho E(t_s)}{2(1-\rho)}$$

$$t_{ws} = \frac{(2-\rho) E(t_s)}{2(1-\rho)}$$

$$\sigma_{N_s} = \frac{1}{1-\rho} \sqrt{\rho - \frac{3\rho^2}{2} + \frac{5\rho^3}{6} + \frac{\rho^4}{12}}$$

$$\sigma_{t_{ws}} = \frac{E(t_s)}{1-\rho} \sqrt{\frac{\rho}{3} - \frac{\rho^2}{12}}$$

gde je:

- N_w - prosečan broj jedinica u redu čekanja,
- N_s - prosečan broj jedinica u sistemu,
- t_w - prosečno vreme čekanja jedinice na opsluživanje,
- t_{ws} - prosečno vreme zadržavanja jedinice u sistemu,
- σ_{N_s} - standardna devijacija broja jedinica u sistemu,
- $\sigma_{t_{ws}}$ - standardna devijacija vremena zadržavanja jedinice u sistemu.

Primer

U odeljenju za montažu se prosečno svakih 20 minuta završi 5 proizvoda. Proizvodi se iz odeljenja montaže otpremaju u centralno skladište viljuškarom. Prosečno vreme ciklusa viljuškara iznosi 18 minuta. Raspodela vremena izmedju zahteva za otpremom proizvoda (t_d) i raspodela vremena opsluživanja (t_s) su eksponencijalne.

Intenzitet protoka je dat izrazom:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

gde je:

$$\lambda = \frac{1}{t_d} = 0,05, \quad \mu = \frac{1}{t_s} = 0,0556$$

$$\rho = \frac{0,05}{0,0556} = 0,9$$

Prosečan broj transportnih jedinica koji čeka na otpremu iznosi:

$$N_w = \frac{\rho^2}{1-\rho} = 8,1 ,$$

odnosno čeka na otpremu $8,1 \cdot 5 = 40,5$ proizvoda. Prosečno vreme čekanja iznosi:

$$t_w = \frac{\rho \bar{t}_s}{1-\rho} = 162 \text{ min.}$$

Ako je vrednost proizvoda 600.000 din. troškovi kamata iznose $600.000 \cdot 0,64 = 384.000$ din. (pri kamati 64%). Godišnji troškovi zauzetog prostora u hali iznose 20.000 din, pa su ukupni godišnji troškovi $384.000 + 20.000 = 404.000$ din. Ukupni godišnji troškovi čekanja iznose:

$$40,5 \cdot 404.000 = 16.362.000 \text{ din.}$$

Na smanjenje troškova čekanja moguće je uticati na sledeće načine:

- skraćenjem ciklusa transporta (kraće vreme utovara i istovara, veća brzina kretanja, bolja organizacija posla, itd.),
- povećanjem nosivosti uredjaja, ili boljim iskorišćenjem nosivosti postojećeg uredjaja (na pr. korišćenjem transportne jedinice koja može da primi 6 umesto 5 jedinica), i
- povećanjem broja transportnih uredjaja koji opslužuju dati proces.

Ako se vreme transporta skrati za 10% ($\bar{t}_s = 16,2 \text{ min.}$), menjaju se parametri sistema:

$$\rho = \frac{0,05}{0,062} = 0,81$$

$$N_w = \frac{\rho^2}{1-\rho} = 3,45 ,$$

pa je smanjenje ukupnih godišnjih troškova 57% (slika 2.16.), zato što čeka na otpremu $3,45 \cdot 5 = 17,3$ proizvoda.

U slučaju kada je moguće transportovati po 6 proizvoda u jednom ciklusu, prosečno vreme izmedju dolaska jedinica za otpremu iznosi $\bar{t}_d = 24 \text{ min.}$, pa je:

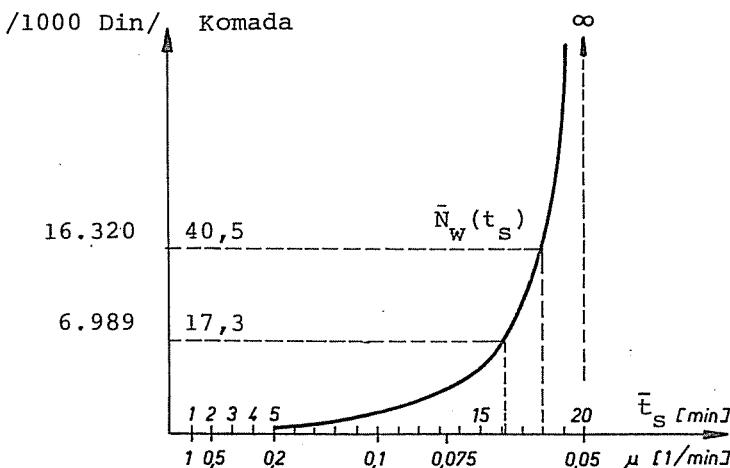
$$\rho = \frac{0,042}{0,0556} = 0,76$$

$$N_w = \frac{\rho^2}{1-\rho} = 2,4 ,$$

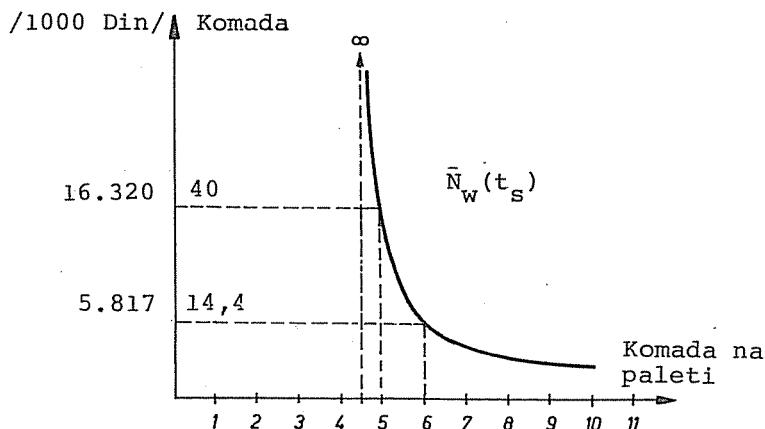
tako da čeka na otpremu $2,4 \cdot 6 = 14,4$ proizvoda, pa su troškovi čekanja smanjeni za 70% (slika 2.17.).

Kada se transport obavlja sa više transportnih sredstava imamo višekanalni sistem ($c = 2,3$, itd.), pa se za proračun koriste odgovarajući izrazi. Efekat povećanja broja viljuškara je prikazan na slici 2.18.

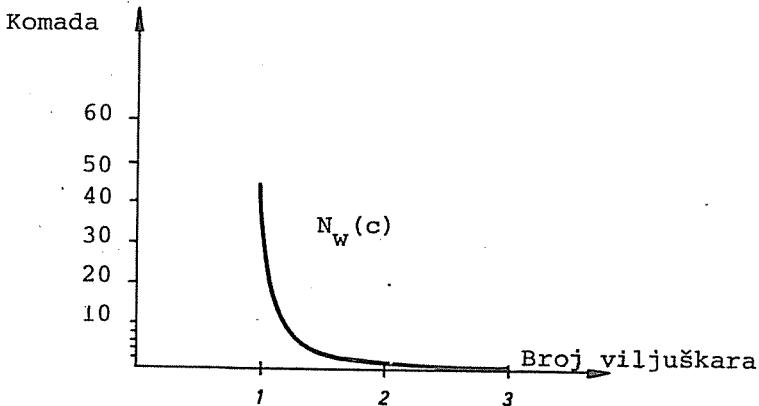
Treba napomenuti da povećanje broja uredjaja za opsluživanje dovodi do dodatnih troškova koje treba uzeti u obzir.



Slika 2.16.



Slika 2.17.



Slika 2.18.

2.5. Analiza jednokanalnih sistema čekanja u procesima unutrašnjeg transporta

Za sistem redova čekanja oblika $E_k/E_j/1$ (za $k=1, 2, \dots$ i $j=1, 2, \dots$), znači opšti sistem čekanja sa ma kojim Erlangovim raspodelama dolaska i opsluživanja jedinica, nije dato analitičko rešenje primenljivo u praksi. Pošto je Erlangova raspodela pogodna za aproksimaciju stvarnih transportnih procesa /7/, /8/, /9/, /12/, /21/, /35/, /37/, /38/, i dr. razmatraće se posebni oblici ovog sistema. Treba napomenuti da se normalna raspodela dobro aproksimira Erlangovom raspodelom pri velikim vrednostima parametra K /8/.

Sistem tipa $E_1/E_1/1$ ($M/M/1$)

Ovo je praktično najnepovoljniji slučaj koji se javlja u sistemima za unutrašnji transport i skladištenje. Koristi se pri orijentacionom proračunu dužine redova, kada ne postoje podaci o srednjem rasejavanju i kada se ulazni tok ponaša po Poisson-ovom procesu.

Sistem tipa $E_1/E_k/1$ ($M/E_k/1$)

Analiza krivih na slici 2.11. pokazuje da se sa porastom koeficijenta K smanjuje prosečna dužina reda čekanja. Ovaj efekat je naročito izražen pri većim vrednostima koeficijenta opterećenja (intenziteta protoka).

Gudehus /7/ daje podatke o radu visoko-regalnih dizalica (VRD). Pošto se radni ciklus menja u uskim granicama, raspodela vremena opsluživanja može da se aproksimira Erlangovim procesom (E_{30}). Ukoliko teret dolazi sa jako promenljivom periodičnosti u toku vremena, onda bi se imala varijanta sistema za opsluživanje tipa $E_1/E_{30}/1$.

Analiza rada viljuškara na skladištima vune i pamuka je pokazala da se proces opsluživanja mogao da aproksimira Erlangovim raspodelama tipa E_2-E_5 /37/. Snimanjem ciklusa rada regalne dizalice u jednoj fabričkoj traktoru se dobila raspodela vremena opsluživanja tipa E_{10} .

Sistem tipa $E_1/E_\infty/1$ (M/D/1)

Ovo je najpovoljniji slučaj pri Poisson-ovom ulaznom toku. Primjenjuje se u slučaju neritmičkog dolaska paleta, a vreme opsluživanja je konstantno (obično kod pomoćnih uredjaja za prebacivanje paleta).

Sistem tipa $E_k/E_1/1$ ($E_k/M/1$)

Određivanje prosečnog broja jedinica u sistemu opsluživanja ovog tipa nije moguće pomoću ranije navedenih jednačina Polačeka i Hinčina. Ferschl./8/ daje obrazac za izračunavanje prosečnog broja jedinica u sistemu preko jedne implicitne funkcije:

$$N_S = \frac{\rho}{1-V(k, \rho)}$$

pri tome postoji zavisnost:

$$\sum_{i=1}^K v^{i/K} = K\rho, \quad (0 \leq v \leq 1)$$

Ova jednačina nema analitičko rešenje u slučaju kada je vrednost koeficijenta $K > 2$, i mora da se rešava numerički.

Gudehus /8/ navodi da je moguće odrediti prosečan broj jedinica u sistemu opsluživanja tipa $E_k/E_1/1$ pomoću izraza za rešavnnje sistema $E_1/E_k/1$ i pri tome je greška oko 15%.

Sistem tipa $E_\infty/E_1/1$ (D/M/1)

Za tačno određivanje broja jedinica u ovom sistemu, može da se koristi obrazac Ferschla, pri $K \rightarrow \infty$. Za približno određivanje prosečnog broja jedinica u sistemu Gudehus /8/ navodi da ako se koristi formula za $E_1/E_\infty/1$, greška je manja od 2%.

S i s t e m t i p a $E_{\infty}/E_{\infty}/1$ (D/D/1)

Kod ovog sistema su dolazak TJ i opsluživanje u taktovima. U sistemu za opsluživanje može da se nalazi samo jedna TJ. Prosečar broj jedinica u sistemu je dat izrazom:

$$N_s = \rho$$

Pri rešavanju praktičnih problema, teorija redova čekanja može da se koristi na dva načina:

- pri rekonstrukciji postojećih pogona; snimanjem dolazaka jedinica u sistem i vremena opsluživanja (transportnih ciklusa), moguće je formirati histograme koji daju relativnu frekvenciju pojedinih vremena. Raspodela dužine radnog ciklusa treba da se aproksimira funkcijom za koju postoji analitičko rešenje.

- pri projektovanju novih postrojenja raspodela vremena između dolazaka jedinica i opsluživanja usvajaju se na osnovu iskustva i ranijih istraživanja.

Elementi koje nam daje teorija redova čekanja služe za definisanje mesta gde se prekidaju transportni tokovi odnosno nagomilava materijal u procesu. Mesta nagomilavanja materijala u procesu možemo nazvati i medjuskladišta. Važno je napomenuti da medjuskladišta u jednom transportnom sistemu, koja su postavljena ispred i iza uređaja koji opslužuju, obezbeđuju visok koeficijent vremenskog iskorišćenja ovih uređaja. Ovo je zbog toga što je prosečni kapacitet uređaja za opsluživanje (TU) određen srednjom dužinom radnog ciklusa, a dolazak tereta (TJ) i njegova distribucija imaju stohastički karakter.

Analizirajući jednačinu za određivanje broja jedinica u sistemu čekanja, Gudehus /7/ dolazi do zaključka da:

- ako regalna dizalica (RD) mora da radi sa zadatim ρ , neophodno je u sistemu imati mesta za N (ρ) transportnih jedinica (TJ) (ovim je definisano medjuskladište), i

- ako u sistemu opsluživanja ima mesta za N transportnih jedinica, maksimalni koeficijent iskorišćenja regalne dizalice (RD) je $\rho(N)$.

Kapacitet transporta zavisi od sledećih faktora: nosivosti (TU), radne brzine i broja TU koji rade paralelno na obavljanju datog posla. Promena svakog od ovih parametara utiče na

promenu veličine reda čekanja, odnosno na broj TJ u sistemu. Pošto kapacitet transporta zavisi i od broja transportnih uređaja (TU), potrebnih za obavljanje date operacije, potrebno je razmatrati sisteme sa više uređaja za opsluživanje koji rade paralelno (višekanalni sistem).

Program QPJED proračunava sve navedene pokazatelje. U programu su korišćene sledeće promenljive:

LAMBDA - parametar ulazne raspodele,

ETIM - srednje vreme opsluživanja,

VARTIM - disperzija vremena opsluživanja,

PROD - koeficijent iskorišćenja opslužnih mesta,

LQ - prosečan broj jedinica u redu čekanja,

L - prosečan broj jedinica u sistemu,

WQ - prosečno vreme jedinica u redu čekanja,

W - prosečno vreme jedinice u sistemu,

PZERO - verovatnoća da nikoga nema u sistemu.

Ulagne promenljive su: LAMBDA, ETIM i VARTIM, a izlagne promenljive su LQ, L, WQ, W i PZERO.

Program se startuje naredbom RUN QPJED. Tada se program predstavlja i traži ulagne promenljive. Treba voditi računa da se unesu sva tri podatka, jer svaki podatak koji se ne unese, računar prihvata kao da je jednak nuli. U slučaju da je $\rho \geq 1$ izvršava se naredba 40. i program šalje poruku da problem nije rešiv. U slučaju da je $\rho < 1$ program izračunava izlagne promenljive prema navedenim jednačinama.

2.6. Višekanalni sistem opsluživanja sa neograničenim redom čekanja (M/M/C)

Ovde mogu da nastupe dva slučaja:

- više uređaja za opsluživanje radi paralelno. TJ koje dolaze mogu da se ravnomerno dele i obrazuju poseban red čekanja ispred svakog uređaja; pri tome raspodela TJ po pojedinim kanalima može da bude posebno zadata. Iako ovi uređaji rade paralelno, svaki od njih se razmatra posebno kao jednokanalni sistem;

- obrazuje se zajednički red čekanja ispred višekanalnog

sistema; transportnu jedinicu prihvata prvi uredjaj iz sistema koji je slobodan.

Dalje će se razmatrati drugi slučaj. Ako se pretpostavi da sistem ima C kanala za opsluživanje, koeficijent iskorišćenja svakog kanala će biti:

$$\rho = \frac{E(t_s)}{c \bar{t}_d}$$

kao i u prethodno razmatranim sistemima je stacionaran za $\rho < 1$.

Obrasci za izračunavanje osnovnih parametara kod sistema opsluživanja sa više kanala /4/:

- verovatnoća da ima n jedinica u sistemu, za slučaj kada postoji red čekanja

$$P_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, c-1$$

$$P_n = \frac{1}{c! c^{n-c}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0; \quad n \geq c$$

- verovatnoća da ima c ili više jedinica u sistemu

$$P(n \geq c) = \sum_{n=c}^{\infty} P_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c P_0}{c! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu c}\right)}$$

- verovatnoća da nema ni jedne jedinice u sistemu

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{c! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu c}\right)} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c}$$

- verovatnoća da je vreme bavljenja jedinice u sistemu veće od nekog zadatog vremena t.

$$P(T > t) = e^{-\mu t} \left\{ 1 + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c P_0 \left[1 - e^{-\mu t(c-1 - \frac{\lambda}{\mu})} \right]}{c! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu c}\right) \left(c-1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)} \right\},$$

- prosečan broj jedinica u redu čekanja

$$N_w = \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^{c+1} \cdot P_0}{c \cdot c! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu c}\right)^2}$$

Prosečan broj jedinica u sistemu, prosečno vreme u redu čekanja i prosečno vreme u sistemu računaju se kao kod jedno-kanalnog sistema:

$$N_s = N_w + \frac{\lambda}{\mu}$$

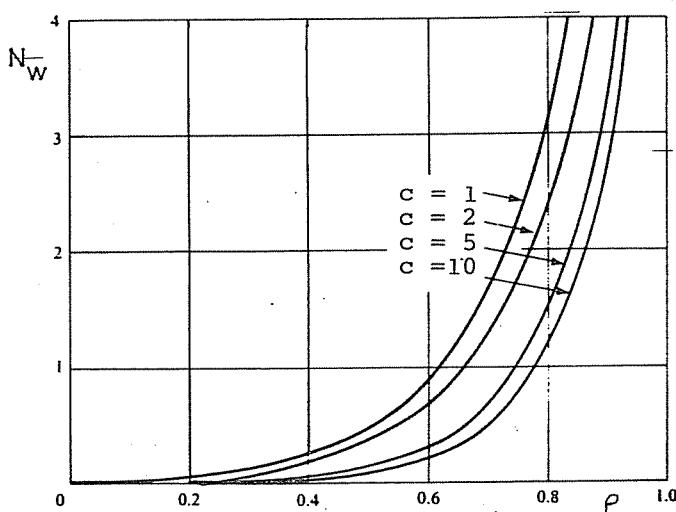
$$t_w = \frac{N_w}{\lambda}$$

$$t_{ws} = \frac{N_s}{\lambda}$$

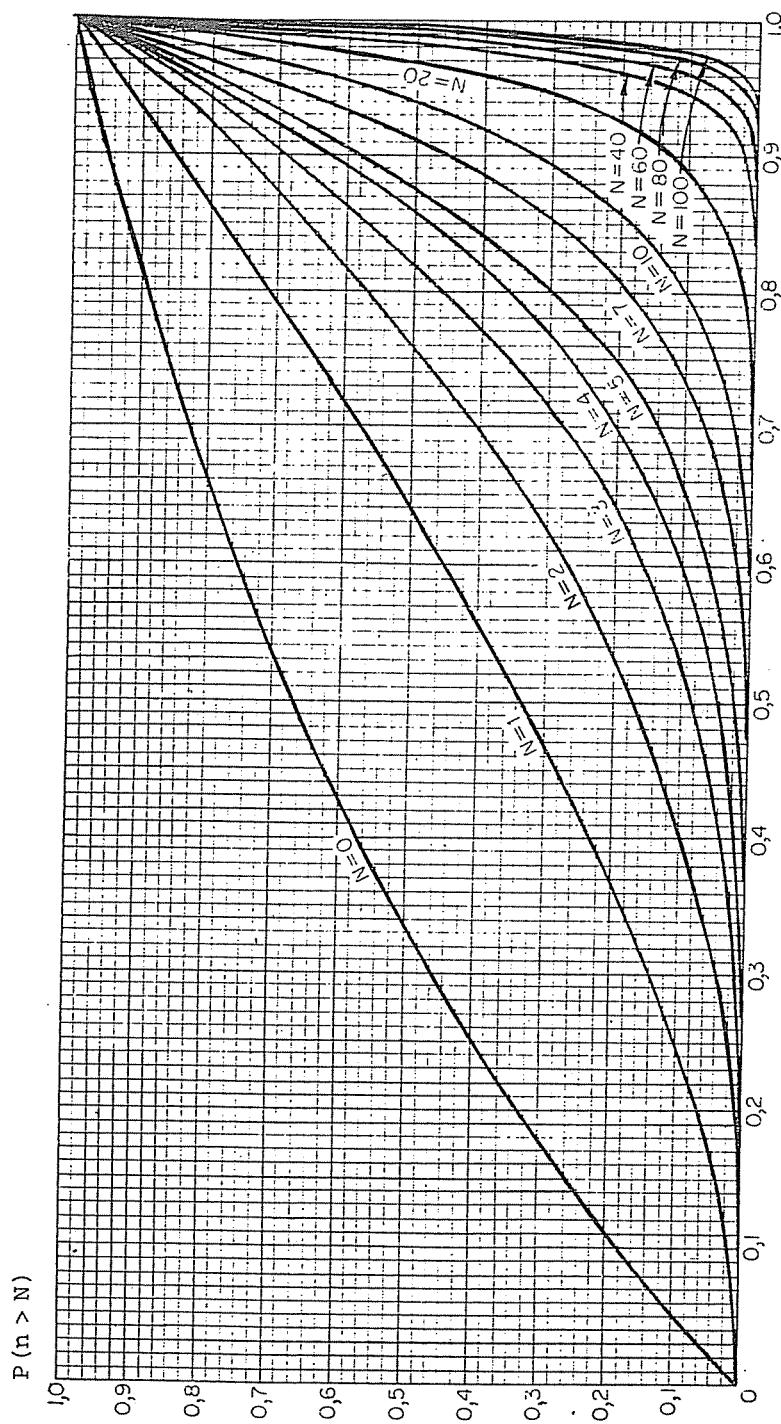
Za korišćenje gornjih jednačina, moraju da budu ispunjeni sledeći uslovi:

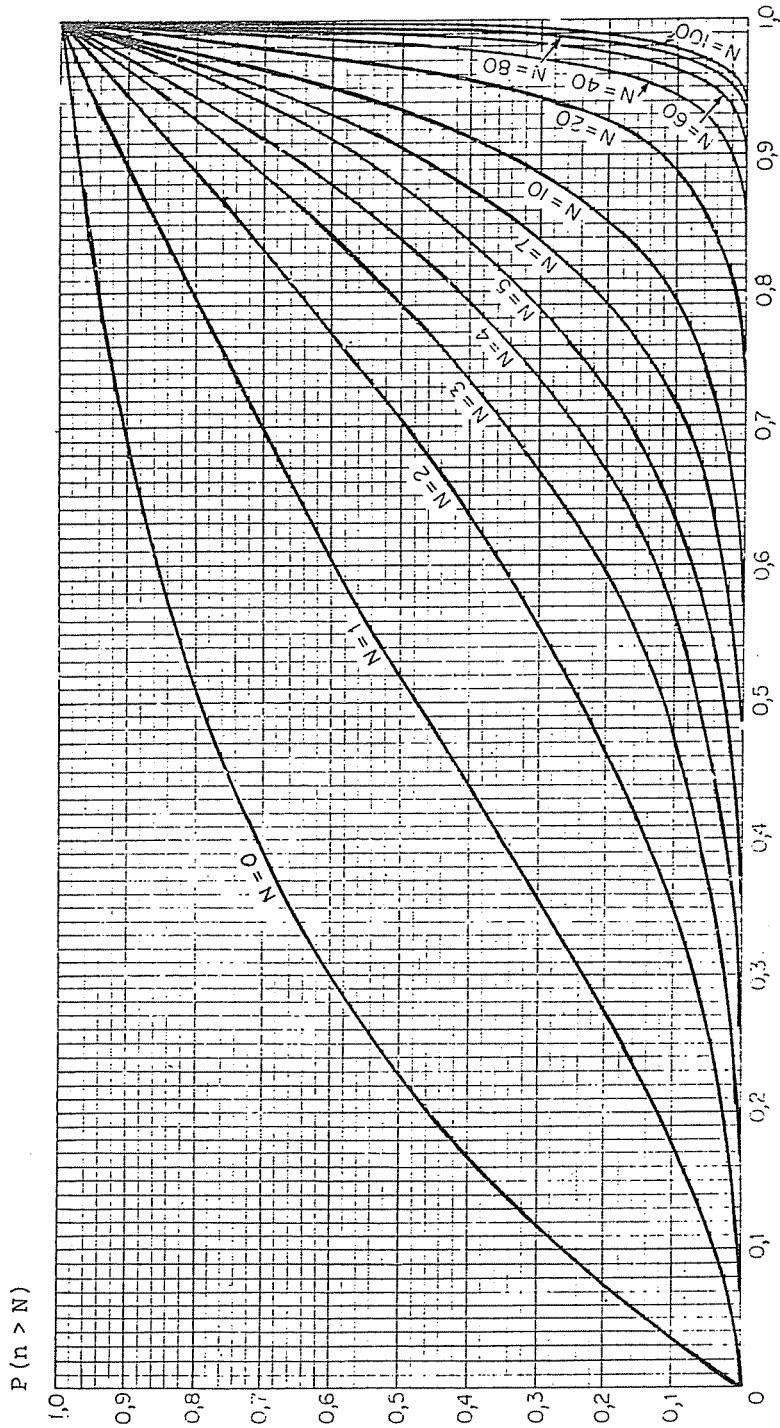
- vreme dolaska TJ u sistem ima Poisson-ovu raspodelu,
- raspodela vremena opsluživanja je eksponencijalna,
- svi kanali imaju isto srednje vreme opsluživanja, i
- TJ se opslužuje po FIFO disciplini.

Na dijagramu - slika 2.19. su date krive zavisnosti N_w od ρ za sistem opsluživanja sa različitim brojem kanala (C). Na slikama 2.20. do 2.22. su date zavisnosti $P(n > N)$ za sisteme sa 2, 3 i 5 kanala. Slika 2.23. daje zavisnost standardne devijacije bavljenja jedinice u sistemu ($\sigma_{t_{ws}}$) od $\rho / 12$.

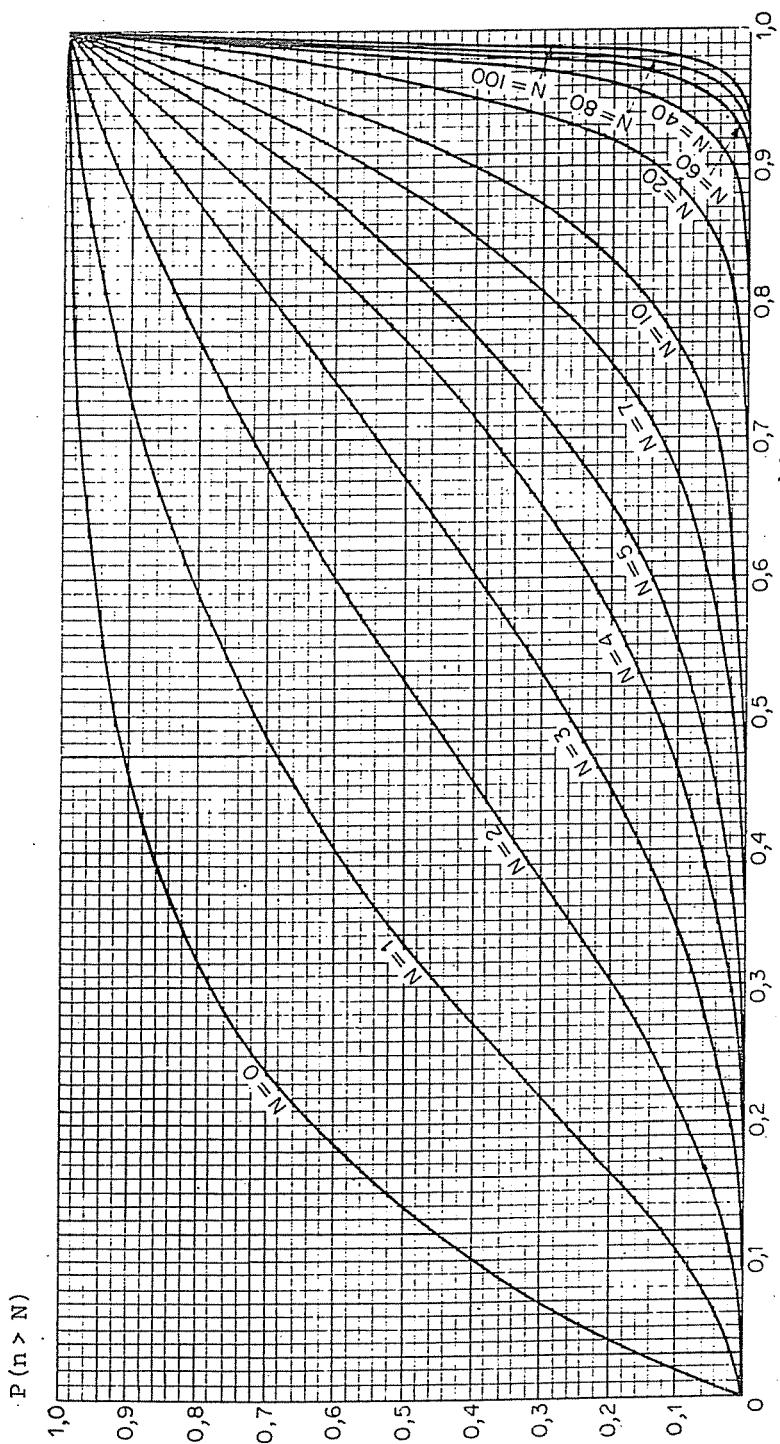


Slika 2.19.

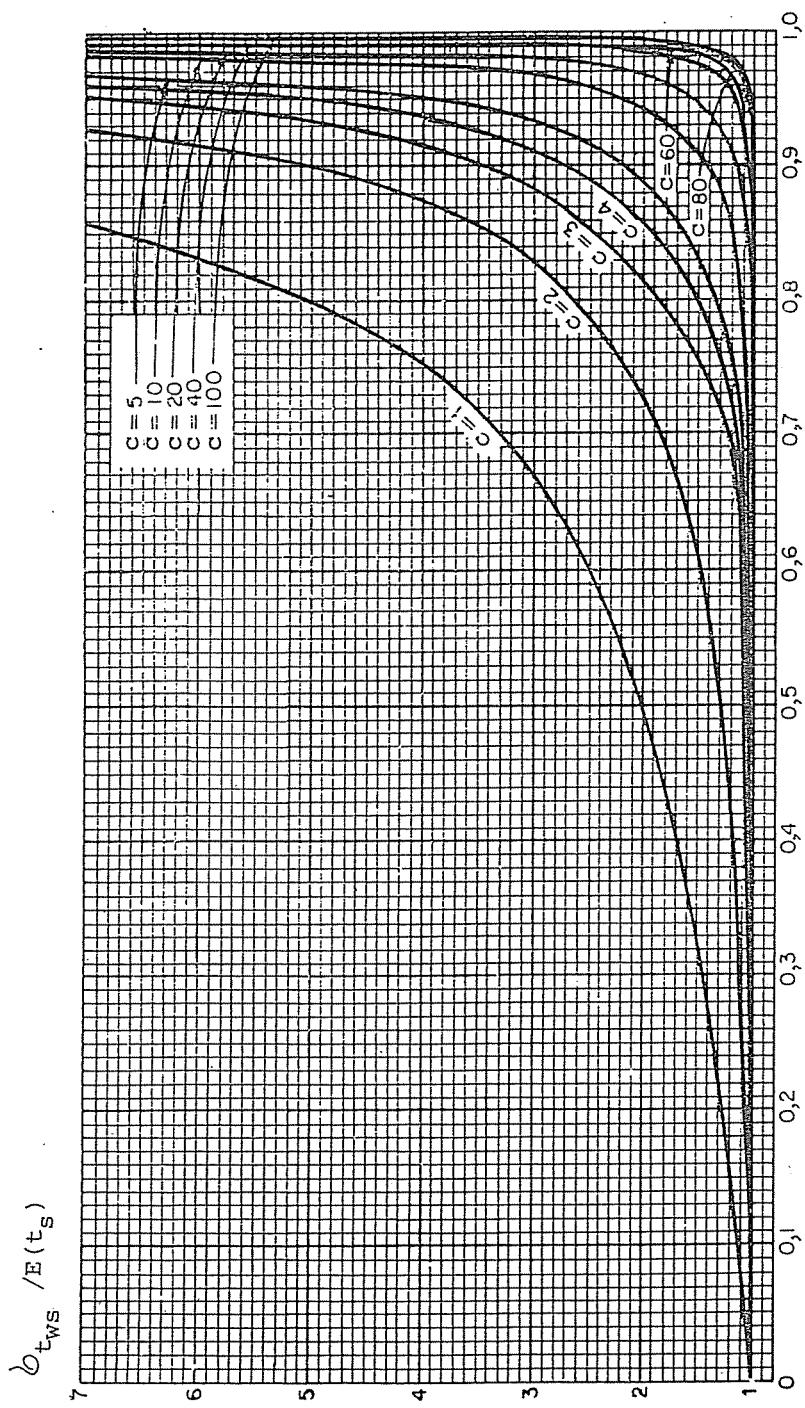




Slika 2.21.



Slika 2.22.



Slika 2.23.

Program QPBES proračunava sve pokazatelje rada sistema.

Ulazne promenljive su:

LAMBDA - parametar ulazne raspodele,

MU - parametar vremena opsluživanja,

N - broj očekivanih jedinica u sistemu,

S - broj kanala opsluživanja,

Izlazne promenljive su:

L - prosečan broj jedinica u sistemu,

LQ - prosečan broj jedinica u redu čekanja,

W - prosečno vreme jedinica u sistemu,

WQ - prosečno vreme jedinica u redu čekanja,

PT - verovatnoća da vreme provedeno u sistemu bude veće od pretpostavljenog,

PN - verovatnoća da broj jedinica u svakom trenutku bude veći od pretpostavljenog,

PZERO - verovatnoća da nema jedinica u sistemu,

PS - verovatnoća da su svi kanali zauzeti.

Potprogram FACT koristi se za izračunavanje faktorijela.

2.7. Višekanalni sistem opsluživanja sa ograničenim redom čekanja (M/M/c/m)

Ovaj sistem razlikuje se od predhodnog po ograničenom redu čekanja sa ukupno m mesta u sistemu opsluživanja. Granični slučajevi su za $m=c$ kada u sistemu postoje samo opslužni kanali za $m=\infty$ kada se stvar svodi na sistem sa neograničenim redom čekanja. Dolazni potok jedinica postoji samo ako ima slobodnih mesta u sistemu. Kada su sva mesta zauzetā nove jedinice ne mogu ući u sistem, pa se javlja kategorija jedinica odbijenih od procesa opsluživanja. Na ovaj način parametar dolazne raspodele ima dvojnu vrednost u funkciji broja zauzetih mesta u sistemu:

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda, & n = 0, 1, \dots, m-1 \\ 0, & n = m, m+1, \dots, \end{cases}$$

Parametar raspodele opsluživanja zavisi od broja zauzetih kanala opsluge.

$$\mu_n = \begin{cases} n \cdot \mu, & n = 0, 1, \dots, c \\ c \cdot \mu, & n = c+1, c+2, \dots \end{cases}$$

Pokazatelji rada sistema su (za $1 < c < m$):

- verovatnoća da nema nikog u sistemu

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^c \left(\frac{1}{n!} \right) \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right] + \frac{1}{c!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \sum_{n=c+1}^m \left(\frac{\lambda}{\mu \cdot c} \right)^{n-c}}$$

- verovatnoća da u sistemu ima n jedinica

$$P_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 ; \quad n \leq c$$

$$P_n = \begin{cases} \frac{1}{c!} \frac{(\lambda/c)^{n-c}}{c^{n-c}} P_0 ; & c < n \leq m \\ 0 ; & n > m \end{cases}$$

-prosečan broj jedinica u redu čekanja

$$N_w = \frac{P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \left(\frac{\lambda}{\mu \cdot c} \right)}{c! \left(1 - \frac{\lambda}{\mu \cdot c} \right)^2} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\mu \cdot c} \right)^{m-c} - (m-c) \left(\frac{\lambda}{\mu \cdot c} \right)^{m-c} \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\mu \cdot c} \right) \right]$$

-prosečan broj jedinica u sistemu

$$N_s = N_w + c - \sum_{n=0}^{c-1} (c-n) P_n,$$

-efektivan parametar raspodele nailazaka u sistemu

$$\lambda_{eff} = \mu \left[c - \sum_{n=0}^{c-1} (c-n) P_n \right],$$

-prosečno vreme bavljenja jedinica u redu čekanja

$$t_w = \frac{N_w}{\lambda_{eff}},$$

-prosečno vreme bavljenja jedinica u sistemu

$$t_{ws} = \frac{N_s}{\lambda_{eff}}.$$

Osnovni parametri jednokanalnog sistema (M/M/1/m) su dati sledećim izrazima:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}$$

$$P_0 = \begin{cases} \frac{1 - \frac{\lambda}{\mu}}{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{m+1}} & \text{za } \lambda \neq \mu \\ \frac{1}{m+1} & \text{za } \lambda = \mu \end{cases}$$

$$P_n = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & \text{za } n = 0, 1, 2, \dots, m; \lambda \neq \mu \\ P_0 & \text{za } \lambda = \mu \end{cases}$$

$$N_w = N_s - (1 - P_0)$$

$$N_s = \begin{cases} \frac{\lambda}{\mu - \lambda} - \frac{(m+1) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{m+1}}{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{m+1}} & \text{za } \lambda \neq \mu \\ \frac{m}{2} & \text{za } \lambda = \mu \end{cases}$$

$$\lambda_{eff} = \mu(1 - P_0)$$

$$t_w = \frac{N_w}{\lambda_{eff}}$$

$$t_{ws} = \frac{N_s}{\lambda_{eff}}$$

Primer

Iz pogona jedne fabrike u skladište dolazi 18 paleta na čas (Poisson-ov tok). Palete se postavljaju na prijemni rolgang koji može da prihvati šest TJ. Regalna dizalica, kojom se palete postavljaju u regale, ima prosečan ciklus opsluživanja 2,5 min. (eksponencijalna raspodela).

Potrebno je odrediti procenat TJ koje zbog zauzetosti rolganga moraju da se odlože na pod skladišta.

$$\lambda = 18 \text{ TJ/h}$$

$$\mu = 24 \text{ TJ/h}$$

$$\rho = 0,75$$

$m = 7$ (najveći broj TJ u sistemu)

$$P_0 = \frac{1 - \frac{18}{24}}{1 - (\frac{18}{24})^8} = 0,2778$$

$$N_s = \frac{\frac{18}{24}}{1 - \frac{18}{24}} - \frac{8(\frac{18}{24})^8}{1 - \frac{18}{24}} = 2,11$$

$$N_w = 2,11 - (1 - 0,2778) = 1,39$$

$$\lambda_{eff} = \mu(1 - P_0) = 24(1 - 0,2778) = 17,33 \text{ TJ/h}$$

$$P_7 = (\frac{\lambda}{\mu})^7 \cdot P_0 = 0,75^7 \cdot 0,2778 = 0,037,$$

što znači da se 3,7% paleta postavlja na pod skladišta.

Program OPKON proračunava sve pokazatelje rada sistema.

Ulagne promenljive su:

LAMBDA - parametar ulazne raspodele,

MU - parametar vremena opsluživanja,

N - broj očekivanih jedinica u sistemu,

M - ukupan broj mesta u sistemu opsluživanja,

S - broj kanala opsluživanja.

Izlazne promenljive su:

L - prosečan broj jedinica u sistemu,

LQ - prosečan broj jedinica u redu čekanja,

W - prosečno vreme jedinica u sistemu,

PN - verovatnoća da u sistemu ima N jedinica,

PZERO - verovatnoća da nema nikog u sistemu,,

LAMEFF - efektivni parametar raspodele nailazaka
u sistem.

2.8. Zatvoren sistem opsluživanja

Kod zatvorenog sistema opsluživanja jedinice ulaznog procesa su sastavni deo sistema, odnosno zahtevi za opsluživanjem nastaju u samom sistemu. U sistemu se uvek nalazi konačni broj jedinica. Svaka jedinica u ma kome trenutku vremena može da postavi zahtev za opsluživanjem. To znači da intenzitet toka zahteva (dolazaka) zavisi, kako od ukupnog broja jedinica, tako i od broja jedinica koje zahtevaju opsluživanje.

Teorija zatvorenih sistema opsluživanja se primenjuje kada transportni uredjaji opslužuju više radnih mesta, pogona ili skladišta, pri rešavanju medjupogonskog skladišta kada se koristi jedinstveni transportni sistem ili kod projektovanja sistema za održavanje uredjaja za transport i uskladištenje.

2.8.1. Sistem sa jednim kanalom opsluživanja

Ako se sa λ označi intenzitet toka zahteva, a sa μ kapacitet opsluživanja, verovatnoće različitih stanja sistema su date izrazima:

$$P_1 = r P_0 \frac{\lambda}{\mu}$$

$$P_2 = (r - 1) P_1 \frac{\lambda}{\mu}$$

$$P_n = [r - (n - 1)] P_{n-1} \frac{\lambda}{\mu}$$

$$P_r = [r - (r - 1)] P_{r-1} \frac{\lambda}{\mu}$$

gde je

P_0 - verovatnoća da nema zahteva za opsluživanjem,

P_n - verovatnoća da postoji n zahteva u sistemu
($n = 1, 2, 3, \dots, r$),

r - broj jedinica u sistemu opsluživanja.

Za izračunavanje verovatnoće P_0 postavlja se sistem jednačina:

$$P_0 = P_0$$

$$P_1 = r P_0 \frac{\lambda}{\mu}$$

$$P_2 = r (r-1) P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2$$

$$P_n = \frac{r(r-1)(r-2)(r-3)\dots[r-(n-1)]}{r!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$$

$$P_r = r! P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^r$$

Pošto je verovatnoća svih mogućih stanja sistema:

$$\sum_{n=0}^r P_n = 1 ,$$

dobija se izraz za verovatnoću P_0

$$P_0 = \frac{1}{1+r \frac{\lambda}{\mu} + r(r-1) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + r(r-1)(r-2) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \dots + r! \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^r}$$

Kada se izračuna vrednost za P_0 iz prethodnih jednačina se određuju sve ostale verovatnoće P_n .

Osnovni parametri sistema opsluživanja su dati sledećim izrazima:

- prosečan broj zahteva (jedinica) koji čeka na opsluživanje

$$N_{zw} = \sum_{n=1}^r (n-1) P_n$$

- prosečan broj zahteva (jedinica) koji se nalazi u sistemu opsluživanja

$$N_{zs} = \sum_{n=0}^r n \cdot P_n$$

- prosečan zastoj jedinice zbog čekanja na opsluživanje

$$N_w = \frac{\sum_{n=1}^r (n-1) P_n}{r}$$

- prosečan zastoj jedinice zbog bavljenja u sistemu opsluživanja

$$N_s = \frac{\sum_{n=0}^r n P_n}{r}$$

- prosečno vreme čekanja jedinice na opsluživanje

$$t_w = \frac{N_w}{\lambda} = \frac{1}{r\lambda} \sum_{n=1}^r (n-1) P_n$$

- verovatnoća da će jedinica (zahtev) čekati na opsluživanje

$$P_w = 1 - P_0$$

Primer

Jedan kran opslužuje 5 radnih mesta. Prosečan broj zahteva za korišćenje krana u toku časa iznosi 4 ($\lambda = 4$ zahteva/ $/h$). Prosečno vreme opsluživanja iznosi 2 min. ($\bar{t}_s = 2$ min.). Statistička ispitivanja su pokazala da zahtevi imaju Poissonov tok, a da je raspodela vremena opsluživanja eksponencijalna.

$$\sum_{n=0}^r P_n = \sum_{n=0}^5 P_n = 2,2074 \quad P_0 = 1$$

$$P_0 = 0,453$$

$$P_w = 1 - 0,453 = 0,547$$

$$N_{zw} = 0,351$$

$$N_{zs} = 0,898$$

Prosečan zastoj na radnom mestu zbog čekanja na kran iznosi

$$N_w = \frac{\sum_{n=1}^5 (n-1) P_n}{5} = 0,07$$

tj. radno mesto ne radi 7% od raspoloživog vremena čekajući na opsluživanje, pri tome je prosečno vreme čekanja:

$$T = \frac{1}{5 \cdot 4} \sum_{n=1}^5 (n-1) P_n = \frac{60}{5 \cdot 4} \cdot 0,35 = 1,05 \text{ min.}$$

Prosečan zastoj radnog mesta usled čekanja na opsluživanje i opsluživanja (bavljenje jedinice u sistemu opsluživanja)

$$N_s = \frac{\sum_{n=0}^5 n P_n}{5} = \frac{0,898}{5} = 0,18$$

2.8.2. Višekanalni sistem opsluživanja

Verovatnoće stanja sistema su date izrazima:

- za $n \leq c$ ($n=0, 1, 2, \dots, c$), gde je (c) broj kanala za opsluživanje

$$P_1 = r P_0 \frac{\lambda}{\mu}$$

$$P_2 = \frac{r-1}{2} = P_1 \frac{\lambda}{\mu}$$

$$P_c = \frac{r-(c-1)}{c} P_{c-1} \frac{\lambda}{\mu}$$

ako se gornje jednačine izraze preko P_0

$$P_1 = r P_0 \frac{\lambda}{\mu}$$

$$P_2 = \frac{r(r-1)}{2} P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2$$

$$P_c = \frac{r(r-1)(r-2)\dots[r-(c-1)]}{c!} P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c$$

- za $n > c$ ($n=c+1, c+2, c+3, \dots, r$)

$$P_{c+1} = P_c (r-c) \frac{\lambda}{\mu c}$$

$$P_{c+2} = P_{c+1} [r-(c+1)] \frac{\lambda}{\mu c}$$

$$P_r = P_{r-1} [r-(r-1)] \frac{\lambda}{\mu c}$$

odnosno kada se gornje jednačne izraze preko P_0

$$P_{c+1} = \frac{r(r-1)(r-2)\dots(r-c)}{c!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{\mu c}\right) P_0$$

$$P_{c+2} = \frac{r(r-1)(r-2)\dots[r-(c+1)]}{c!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{\mu c}\right)^2 P_0$$

$$P_r = \frac{r!}{c!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{\mu c}\right)^{r-2} P_0 ,$$

pošto je

$$\sum_{n=0}^r P_n = 1$$

iz gornjih jednačina se određuje P_0 , a zatim i verovatnoće svih željenih stanja (P_n).

Prosečan broj jedinica (zahteva) koji čeka na opsluživanje dat je izrazom:

$$N_{zw} = \sum_{n=c}^r (n-c) P_n$$

Prosečno čekanje jedinice na opsluživanje:

$$N_w = \frac{\sum_{n=c}^r (n-c) P_n}{r}$$

Prosečan broj jedinica koji se nalazi u sistemu opsluživanja:

$$N_{zs} = \sum_{n=0}^r n P_n$$

Prosečan zastoj jedinice zbog bavljenja u sistemu opsluživanja:

$$N_s = \frac{\sum_{n=0}^r n P_n}{r}$$

Prosečno vreme čekanja jedinice na opsluživanje:

$$t_w = \frac{N_w}{\lambda} = \frac{1}{r\lambda} \sum_{n=c}^r (n-c) P_n$$

Verovatnoća da će se pojaviti red čekanja:

$$P_w = \sum_{n=c}^r P_n$$

Prosečan broj kanala za opsluživanje koji nije zauzet:

$$\bar{c}_0 = \sum_{n=0}^c (c-n) P_n$$

Prosečno stajanje jednog kanala opsluživanja

$$\bar{c}_1 = \frac{\bar{c}_0}{c} = \frac{\sum_{n=0}^c (c-n) P_n}{c}$$

2.9. Redovi sa prioritetom

Modeli redova čekanja koji su do sada razmatrani ne obuhvataju prioritete pojedinih tokova, odnosno jedinica. Sistemi opsluživanja kod kojih se upravljanje ostvaruje prema prioritetu često su prisutni u praksi (sortiranje, komisioniranje, istovar/utovar kamiona itd.).

Dužina redova čekanja i vreme čekanja zavise od strategije upravljanja ovim sistemom, tako da su prisutne tri discipline upravljanja /12/:

1. Jedinica sa prioritetom se postavlja uvek na početak reda čekanja ("head of line"). Jedinica sa prioritetom j opslužuje se pre jedinica sa prioritetom $j+1, j+2, j+3, \dots$ itd. Jedinica sa prioritetom nikada ne prekida već započeto opsluživanje druge jedinice.
2. Jedinica sa prioritetom j prekida opsluživanje jedinice sa prioritetom $j+1$ koja se već opslužuje. Posle opsluživanja jedinice sa prioritetom j nastavlja se opsluživanje jedinica $j+1$ sa mesta odakle je bilo prekinuto. Tok jedinica višeg prioriteta ponaša se u skladu sa jednačinama Polačeka i Hinčina (poglavlje 2.4), odnosno, tako kao da ne postoje tokovi nižeg prioriteta.
3. Jedinica sa prioritetom j prekida opsluživanje jedinice prioriteta $j+1$ ili nižeg. Posle završenog opsluživanja jedinice sa prioritetom j , počinje opsluživanje jedinice nižeg prioriteta $j+1$ od početka. Na tok jedinica višeg prioriteta se takodje mogu primeniti jednačine Polačeka i Hinčina. U projektantskoj praksi se retko sreću ovakvi slučajevi prioriteta.

U daljem tekstu će se razmatrati redovi sa prioritetom kada se ne prekida započeti proces opsluživanja. Posmatrajmo k različitim tokova transportnih jedinica koji ulaze u red čekanja sa prioritetom $1, 2, 3, \dots k$. Ako transportne jedinice svake klase dolaze nezavisno i obrazuju Poisson-ov tok, to će se i ukupni tok dolazaka intenziteta λ ponašati po istom zakonu:

$$\lambda_n = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n$$

Vreme opsluživanja za različite prioritete je $t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{sk}$, pa je prosečno vreme opsluživanja celog toka:

$$E(t_s) = \frac{\lambda_1}{\lambda} E(t_{s1}) + \frac{\lambda_2}{\lambda} E(t_{s2}) + \dots + \frac{\lambda_k}{\lambda} E(t_{sk}) \quad i$$

$$E(t_s^2) = \frac{\lambda_1}{\lambda} E(t_{s1}^2) + \frac{\lambda_2}{\lambda} E(t_{s2}^2) + \dots + \frac{\lambda_k}{\lambda} E(t_{sk}^2)$$

Pri tome je:

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \dots + \rho_k, \quad i$$

$$\rho_j = \lambda_j E(t_{sj}).$$

Ukupni broj transporna jedinica u redu čekanja dobija se sabiranjem jedinica svih tokova:

$$n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k$$

pa je prosečno vreme zadržavanja svih jedinica u sistemu:

$$t_{ws} = \frac{\lambda_1}{\lambda} t_{w1} + \frac{\lambda_2}{\lambda} t_{w2} + \dots + \frac{\lambda_k}{\lambda} t_{wk}$$

Po analogiji mogu da se dobiju i izrazi za N_w i t_w .

2.9.1. Redovi čekanja sa dva prioriteta

U slučaju kada se vreme opsluživanja ponaša po eksponentijalnoj raspodeli ($E_1/E_1/1$), osnovni parametri sistema su dati sledećim izrazima (tok sa indeksom 1 ima veći prioritet od toka sa indeksom 2):

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2$$

$$\rho_1 = \lambda_1 \cdot E \cdot (t_{s1})$$

$$\rho_2 = \lambda_2 \cdot E \cdot (t_{s2})$$

$$E(t_s) = \frac{\lambda_1}{\lambda} E(t_{s1}) + \frac{\lambda_2}{\lambda} E(t_{s2})$$

$$E(t_s^2) = \frac{\lambda_1}{\lambda} E(t_{s1}^2) + \frac{\lambda_2}{\lambda} E(t_{s2}^2)$$

Prosečan broj jedinica u redu čekanja je

$$N_{w1} = \frac{\rho \cdot \lambda_1 E(t_s)}{1 - \rho_1}, \quad i$$

$$N_{w2} = \frac{\rho \cdot \lambda_2 E(t_s)}{(1 - \rho_1)(1 - \rho)}$$

Prosečan broj jedinica za ceo sistem iznosi

$$N_w = N_{w1} + N_{w2} = \frac{\rho E(t_s) [\lambda - \rho \lambda_1]}{(1 - \rho_1)(1 - \rho)}$$

Prosečno vreme čekanja jedinice na opsluživanje

$$t_{w1} = \frac{\rho}{1 - \rho_1} E(t_s)$$

$$t_{w2} = \frac{\rho}{(1 - \rho_1)(1 - \rho)} E(t_s)$$

Prosečno vreme čekanja jedinice za ceo sistem iznosi

$$t_w = \frac{\lambda_1}{\lambda} t_{w1} + \frac{\lambda_2}{\lambda} t_{w2}$$

$$t_w = \frac{E^2(t_s) [\lambda - \rho \lambda_1]}{(1 - \rho_1)(1 - \rho)}$$

Verovatnoća da je vreme bavljenja jedinice u sistemu manja od nekog zadatog vremena t

$$P(t_{w1} < t) = \frac{\lambda - \rho \lambda_1}{1 - \rho_1} E(t_{s1}) e^{-(1 - \rho_1)t/E(t_{s1})}$$

U slučaju kada je prisutan sistem sa konstantnim opsluživanjem ($E_1/E_\infty / 1, \sigma_{t_s} = 0$), osnovni parametri sistema su dati sledećim izrazima:

$$E(t_s) = t_s \quad i \quad E(t_s^2) = t_s^2$$

$$N_{w1} = \frac{\rho \lambda_1 t_s}{(1 - \rho_1)}$$

$$N_{w2} = \frac{\rho \lambda_2 t_s}{(1 - \rho_1)(1 - \rho)}$$

$$N_w = N_{w1} + N_{w2}$$

$$N_w = \frac{\rho t_s [\lambda - \rho \lambda_1]}{(1 - \rho_1)(1 - \rho)}$$

$$t_{w1} = \frac{\rho t_s}{2(1 - \rho_1)}$$

$$t_{w2} = \frac{\rho t_s}{2(1 - \rho_1)(1 - \rho)}$$

$$t_w = \frac{\lambda_1}{\lambda} t_{w1} + \frac{\lambda_2}{\lambda} t_{w2}$$

$$t_w = \frac{t_s [\lambda - \rho \lambda_1]}{2(1 - \rho_1)(1 - \rho)}$$

```

C      QPJED - program za analiticki proračun
C      jednokanalnih sistema osluživanja
REAL L,LQ,LAMBDA
TYPE 51
S1   FORMAT('Ojednokanalni sistem  '//
1' sa Erlansovom raspodelom vremena osluživanja'//
2' u formatu 3F10.0 ucitati'/
3' brzinu dolazaka u sistem'/
4' srednje vreme i disperziju osluživanja')
READ(5,20)LAMBDA,ETIM,VARTIM
20   FORMAT(3F10.0)
IF(1/LAMBDA.LE.ETIM)GOTO 40
PROD=LAMBDA*ETIM
PZERO=1-PROD
L=PROD+(LAMBDA*LAMBDA*VARTIM+PROD)*PROD)/(2*PZERO)
LQ=L-PROD
W=L/LAMBDA
WQ=LQ/LAMBDA
TYPE 30,LAMBDA,ETIM,VARTIM,L,LQ,W,WQ,PZERO
30   FORMAT('Obrzina dolazaka u sistem',T50,'=',F10.5/
1' srednje vreme osluživanja',T50,'=',F10.5/
2' disperzija vremena osluživanja',T50,'=',F10.5///
3' prosecan broj jedinica u sistemu',T50,'=',F10.5/
4' prosecan broj jedinica u redu',T50,'=',F10.5/
5' prosecno vreme jedinice u sistemu',T50,'=',F10.5/
6' prosecno vreme jedinice u redu',T50,'=',F10.5/
7' verovatnoća da nema jedinica u sistemu',T50,'=',F10.5)
STOP
40   TYPE 45
FORMAT('Oproblem nije resiv, jer je koeficijent'/
1' iskoriscenja osluživoš mesta veci od 1')
STOP
END

```

```

C OPBES - program za analiticki proracun
C visekanalnog sistema sa
C neograničenim redom očekivanja
C REAL*4 LAMBDA,MU,N,L,LQ,NFACT
C TYPE 1
1 FORMAT(' program za proracun visekanalnog opsluzivanja'
1' po eksponentijalnoj raspodeli u slučaju'
2' nailaska iz jednog reda, beskonačno izvora'
3' i reda očekivanja, FIFO discipline u redu očekivanja',//'
4' u formatu 5F10.0 ucitati'
5' brzinu dolaska u sistem, brzinu opsluzivanja,'/
6' broj očekivanih jedinica u sistemu,'/
7' broj kanala opsluzivanja i pretpostavljeno '//'
8' vreme jedinice u sistemu')
READ(5,20) LAMBDA,MU,N,S,T
20 FORMAT(5F10.0)
IF(LAMBDA.GE.S*MU)GOTO 700
NS=S
SUM=0.0
DO 205 NK=1,NS
SK=NK-1
CALL FACT(SK,NFACT)
SUM=SUM+(1/NFACT)*(LAMBDA/MU)**SK
205 CONTINUE
CALL FACT(S,SFACT)
PZERO=1/(SUM+(1/SFACT*(1-LAMBDA/(MU*S))))*(LAMBDA/MU)**S
IF(N.GE.S)GOTO 210
CALL FACT(N,NFACT)
PN=(1/NFACT)*((LAMBDA/MU)**N)*PZERO
GOTO 215
210 CALL FACT(S,SFACT)
PN=(1/(SFACT*S**((N-S)))*((LAMBDA/MU)**N)*PZERO
215 CALL FACT(S,SFACT)
PS=((LAMBDA/MU)**S)*PZERO/(SFACT*(1-LAMBDA/(MU*S)))
PTN=((LAMBDA/MU)**S)*PZERO*(1-EXP(-MUST*(S-1-LAMBDA/MU)))
PTD=SFACT*(1-LAMBDA/(MU*S))*(S-1-LAMBDA/MU)
PT=EXP(-MUST)*(1+PTN/PTD)
LQ=((LAMBDA/MU)**(S+1))*PZERO/(S*SFACT*(1-LAMBDA/(MU*S))**2)
L=LQ/LAMBDA/MU
W=L/LAMBDA
WQ=LQ/LAMBDA
TYPE 100, LAMBDA,MU,N,S,T
TYPE 120, L,LQ,W,WQ
TYPE 190, PT,PN,PZERO,PS
100 FORMAT('Obrzina dolaska u sistem',T50,'=',F10.5/
1' brzina opsluzivanja',T50,'=',F10.5/
2' očekivani broj jedinica u sistemu',T50,'=',F10.5/
3' broj kanala opsluzivanja',T50,'=',F10.5/
4' pretpostavljeno vreme jedinice u sistemu',T50,'=',F10.5)
120 FORMAT('// Prosecan broj jedinica u sistemu',T50,'=',F10.5/
1' prosecan broj jedinica u redu',T50,'=',F10.5/
2' prosecko vreme jedinice u sistemu',T50,'=',F10.5/
3' prosecko vreme jedinice u redu',T50,'=',F10.5)
190 FORMAT('Očekivatnoča da vreme provedeno u sistemu bude//'

```

```
1' vece od pretpostavljenos ',T50,'=',F10.5/
2' verovatnoca da broj jedinica u sistemu bude '//'
3' veci od pretpostavljenos ',T50,'=',F10.5/
4' verovatnoca da nema jedinica u sistemu ',T50,'=',F10.5/
5' verovatnoca da su svi kanali zauzeli ',T50,'=',F10.5)
GOTO 2000
700 TYPE 705
705 FORMAT('Okoefficijent iskoriscenja opsluznih mesta'/
1' je veci od 1')
2000 STOP
END
SUBROUTINE FACT(P,PROD)
NUM=P
PROD=1.
IF(NUM.EQ.0) GO TO 20
DO 10 K=1,NUM
PROD=PROD*K
10 RETURN
END
```

```

C QPKON - program za analiticki proracun
C visekanalnog sistema sa
C ogranicenim redovima cekanja
REAL*4 LAMBDA,MU,N,M,L,LQ,LAMEFF
TYPE 1
1 FORMAT('Oprogram za proracun visekanalnog opluzivanja/'
1' po eksponentijelnoj raspodeli u slucaju'
2' dolazaka iz jedinog reda, beskonacnos izvora i'
3' FIFO discipline u konacnom redu cekanja')
TYPE 2
2 FORMAT(' u formatu 5F10.0 ucitajte'
1' brzinu naplazaka u sistemu, brzinu opluzivanja'
2' broj ocekivanih Jedinica u sistemu'
3' ukupan broj mesta u sistemu i'
4' broj kanala opluzivanja')
READ(5,20)LAMBDA,MU,N,M,S
20 FORMAT(5F10.0)
IS=IS+1
SUM=0.0
DO 405 NK=1,IS
SK=NK-1
CALL FACT(SK,TFACT)
SUM=SUM+(1/TFACT)*(LAMBDA/MU)**SK
405 CONTINUE
SUM2=+0
NM=M
DO 410 NK=IS,NM
SUM2=SUM2+(LAMBDA/(MU*S))**(NK-S)
410 CONTINUE
CALL FACT(S,SFACT)
PZERO=1/(SUM+(1/SFACT)*((LAMBDA/MU)**S)*SUM2)
IF(N.LE.S)GOTO 415
IF(N.GT.M)GOTO 420
PN=(1/(SFACT*S***(N-S)))*((LAMBDA/MU)**N)*PZERO
GOTO 425
415 CALL FACT(N,1FACT)
PN=(1/TFACT)*((LAMBDA/MU)**N)*PZERO
GOTO 425
420 PN=.0
425 LQ=((((LAMBDA/MU)**(S+1)*PZERO)*(1-(LAMBDA/(MU*S))***(M-S)-(M-S
1*((LAMBDA/(MU*S))***(M-S))*(1-LAMBDA/(MU*S))))/(S*SFACT*(1-
2*LAMBDA/(MU*S))**2))
NS=S
SUM=0
DO 560 NK=1,NS
KK=NK-1
SKK=KK
CALL FACT(SKK,AFACT)
SUM=SUM+(S-KK)*PZERO*(1/AFACT)*(LAMBDA/MU)**KK
560 CONTINUE
LAMEFF=MU*(S-SUM)
L=LQ-LAMEFF/MU
W=L/LAMEFF
QD=LQ/LAMEFF

```

```

TYPE 810,LAMBDA,MU,L,LR,N,PN,PZERO
TYPE 812,W,WQ
TYPE 811,LAMEFF
810 FORMAT('Obrzina dolaska u sistem',T50,'=',F10.5/
1' brzina oesluzivanje ',T50,'=',F10.5/
2' prosecan broj Jedinica u sistemu',T50,'=',F10.5/
3' prosecan broj Jedinica u redu',T50,'=',F10.5/
4' ocekivani broj Jedinica',T50,'=',F10.5/
5'Overovatnoce da broj Jedinica bude '/'
6' veci od vrednostavljenos',T50,'=',F10.5/
7' verovatnoce da nema Jedinica u sistemu',T50,'=',F10.5/
FORMAT('Prosečno vreme Jedinica u sistemu',T50,'=',F10.5/
9' prosečno vreme Jedinica u redu',T50,'=',F10.5)
FORMAT(' efektivna brzina dolaska u sistem',T50,'=',F10.5//)
STOP
END
SUBROUTINE FACT(P,PROD)
NUM=P
PROD=1,
IF(NUM,EQ.0) GOTO 20
DO 10 K=1,NUM
10 PROD=PROD*K
20 RETURN
END

```

2.10. Primer korišćenja programa QPBES

Delovi dolaze iz pogona u odeljenje kontrole svakih 3 do 6 minuta (po jedan deo). Radnici koji kontrolisu delove mogu da pregledaju prosečno 5,5 pozicija na čas.

Koristeći teoriju redova čekanja izračunati:

- potreban broj radnih mesta kontrolora,
- prosečan broj delova u odeljenju kontrole (1),
- prosečan broj jedinica u redu čekanja (2),
- prosečno vreme jedinica u sistemu (3),
- prosečno vreme čekanja jedinice na kontrolu (4),
- verovatnoću da vreme bavljenja jedinice u odeljenju kontrole bude veće od 30 minuta (5),
- verovatnoću da nema ni jednog dela u odeljenju za kontrolu (6), i
- verovatnoću da su svi kontrolori zauzeti (7).

Rešenje zadatka za odeljenje sa 4 radna mesta kontrolora:

λ	20	18	16	14	12	10
(1)	11,698	6,105	4,167	3,132	2,447	1,928
(2)	8,062	2,832	1,258	0,586	0,266	0,110
(3)	0,584	0,339	0,260	0,223	0,203	0,192
(4)	0,403	0,157	0,078	0,041	0,022	0,011
(5)	0,449	0,228	0,137	0,097	0,079	0,070
(6)	0,010	0,023	0,043	0,069	0,106	0,158
(7)	0,806	0,629	0,471	0,335	0,221	0,132

3. M E T O D M O N T E K A R L O

Metod Monte Karlo /3/, /17/, /27/, /32/, /50/, dobio je naziv po gradu na Azurnoj obali sa mnogim kockarnicama u kojima je rulet vrlo popularna igra. Zadatak ruleta je da generiše slučajne brojeve po ravnomernoj raspodeli. Pojavni tok igre može se podeliti u četiri faze:

- ulaganje žetona,
- kretanje kuglice od trenutka bacanja do trenutka zastavljanja u jednoj od 37 rupa,
- prezentacija dogadjaja - sam broj, par ili nepar, crveno ili crno, skup brojeva itd., i
- donošenje odluke o dobitku ili gubitku.

Suštinski ove faze predstavljaju:

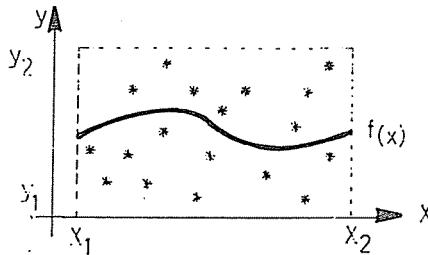
- postavljanje početnog stanja za igru,
- modeliranje ravnomerno rasporedjene nezavisne slučajne promenljive,
- modeliranje zavisne slučajne promenljive, i
- uticaj realizovanih dogadjaja na stanje sistema.

Potrebno je obratiti pažnju na odnos izmedju nezavisne i zavisne slučajne promenljive: jedna realizacija nezavisne slučajne promenljive može značiti i više od jedne realizacije zavisne slučajne promenljive ili po jednu realizaciju više zavisnih slučajno promenljivih. Ovo zavisi od konkrenog matematičkog modela (pravila igre), a fizička tumačenja mogu biti vrlo raznolika: broj jedinica koje dolaze u sistem, interval do sledećeg nailaska, vreme opsluživanja, nivo prioriteta, masa tereta na paleti, rastojanje izmedju lokacija, koordinate tačke, trenutna brzina, ubrzanje itd.

Metod Monte Karlo je sastavni deo simulacionih modela: ako sve četiri faze ruleta posmatramo kao jedan simulacioni eksperiment, tada metod Monte Karlo čini njegovu drugu i treću fazu. Šire gledano pod metodom Monte Karlo podrazumeva se svaki naučni metod koji koristi slučajne brojeve i njegove derivate.

U nizu sledećih simulacionih modela biće korišćen metod Monte Karlo. No, time se ne iscrpljuju mogućnosti njegove primene, jer je moguće i rešavanje determinističkih problema, npr.

rešavanja odredjenog integrala.



Slika 3.1. Izračunavanje odredjenog integrala

Postavljen je zadatak da se izračuna $\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$, (slika 3.1.). Pretpostavimo y_2 dovoljno veliko tako da važi:

$$y_2 > f(x), \forall x \in (x_1, x_2)$$

Površina pravougaonika P jednaka je:

$$P = (y_2 - y_1) \cdot (x_2 - x_1)$$

Izvršimo inicijalizaciju brojača (b) na nulu i odredimo (n) pokušaja.

Primenimo Monte Karlo metod na generisanje koordinata tačke $N(x, y)$, tako da su x i y ravnomerno rasporedjeni slučajni brojevi u intervalima $x \in (x_1, x_2)$ i $y \in (y_1, y_2)$. Na osnovu realizacije x izračunava se $f(x)$ i izvrši uporedjenje sa y .

Ako je:

$$f(x) \geq y \Rightarrow b=b+1, \quad i=i+1,$$

$$f(x) < y \Rightarrow b=b, \quad i=i+1,$$

Postupak se ponavlja generisanjem sledećeg para koordinata sve dok je $i < n$.

Za $i=n$ izračunava se ocena vrednosti integrala (I):

$$I=(b/n) \cdot P$$

Neka su na slici 3.1. definisane sledeće vrednosti:

$$x_1=3, \quad x_2=40, \quad y_1=0, \quad y_2=23.$$

Površina pravougaonika je

$$P=851$$

Izvršeno je $n=18$ eksperimenata, od kojih $b=10$ uspešnih. Vrednost odredjenog integrala na intervalu (x_1, x_2) je:

$$I=(10/18) \cdot 851=472,7$$

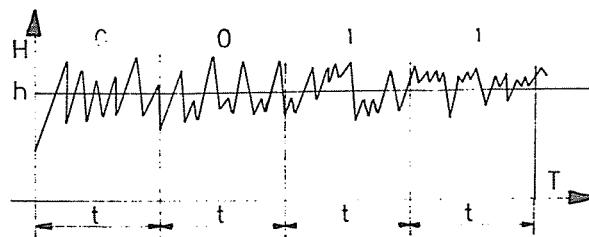
Što je veće n , to je ocena I preciznija. Tačna vrednost

I dobija se za $n=\infty$.

U praktičnim zadacima procena n vrlo je značajna, kako bi se metodom Monte Karlo dobila zadovoljavajuća tačnost u okviru datih vremenskih i računarskih resursa.

3.1. Generisanje slučajnih brojeva

Binarni slučajni brojevi /32/, /33/, generišu se elektronskim uredjajima tako što se meri broj vrhova šuma iznad zadanog nivoa (h) u unapred zadatom vremenskom intervalu (t).



Slika 3.2. Generisanje binarnih slučajnih brojeva

Ako je taj broj paran generiše se 0, a ako je neparan 1. Pri istovremenom radu m generatora dobija se m - cifarski binarni slučajni broj.

Ovaj generator može da se upotrebi za generisanje ravnomerno raspodeljenih slučajnih brojeva (S) na intervalu $(0,1)$.

$$S = \frac{x_1}{2^1} + \frac{x_2}{2^2} + \dots + \frac{x_n}{2^n} + \dots$$

Za $x_1=0$ broj S nalazi se u prvoj, a za $x_1=1$ u drugoj polovini. U okviru izabranog intervala vrši se podjela na podintervale u zavisnosti od x_2 . Proses se dalje ponavlja (slika 3.3.) sve do n -te podele. Dobijeni broj S slučajan je, jer su realizacije x_i međusobno nezavisne.

Sada prethodna jednačina po primeru sa slike 3.3. postaje:

$$S = \frac{0}{2^1} + \frac{0^2}{2^2} + \frac{1^3}{2^3} + \frac{1^4}{2^4} + \dots = 0,192$$

$x_1 = 0$	S €	(0; 0,499)
$x_2 = 0$	S €	(0; 0,249)
$x_3 = 1$	S €	(0,125; 0,249)
$x_4 = 1$	S €	(0,1875; 0,249)
$x_5 = \dots$	

Slika 3.3. Generisanje broja S u binarnoj reprezentaciji

Za generisanje dekadnih slučajnih brojeva sa m cifara potrebno je m ruleta sa po deset jednakih isečaka. Pri svakom zaustavljanju zapisuju se cifre sa svakog ruleta i koriste za formiranje tablica slučajnih brojeva. Ovakav proces je slučajan, ali posle izvesnog perioda generisane cifre nemaju ravnomernu raspodelu po χ^2 - testu. Drugi nedostatak ovakvih tabela je da ni najveće medju njima (sa milion slučajnih cifara) nisu u stanju da svojom brojnošću zadovolje zahteve mnogih realnih problema, čak i ako se eliminiše sporost spoljašnjih memorija (traka i diskova) na koje se smeštaju.

3.2. Generisanje pseudoslučajnih brojeva

Navedeni problemi mogu se prevazići brzim algebarskim algoritmima za generisanje niza brojeva na računaru /32/, /33/, /50/. Jasno je da za iste ulazne podatke i isti algoritam, računar uvek daje identičan i determinisan niz brojeva. Ako ovaj niz na nekom intervalu zadovolji statističke testove o ravnomernosti raspodele tada se naziva pseudoslučajnim. Kvalitet generatora pseudoslučajnih brojeva ocenjuje se na osnovu dužine ciklusa posle koga dolazi do ponavljanja. Što je ciklus duži to je generator kvalitetniji.

U računarskim primenama isključivo se koriste pseudoslučajni brojevi. Ima više razloga za to. Generatori pseudoslučajnih brojeva zahtevaju malo memorijskog prostora. Promenom seme na (S0 - početni podatak) ili parametara algoritma može se dobiti neki drugi niz pseudoslučajnih brojeva, što se može koristiti i u istom simulacionom eksperimentu. U fazi testiranja modela koristi se determinisanost redosleda niza pseudoslučajnih

brojeva u cilju otklanjanja različitih vrsta programerskih grešaka.

Postoji više različitih generatora pseudoslučajnih brojeva. Pred svakog od njih postavićemo zadatak da se generiše dvocifarski broj na intervalu (0, 99). Deljenjem sa 100 može se dobiti pseudoslučajni broj na jedinačnom intervalu (0, 1).

Najstariji je Nojmanov postupak poznat kao generator sredine kvadrata. Prvo se definiše seme (S_0) koje se kvadrira. Dobijeni broj iz sredine kvadrata predstavlja prvi slučajni broj (S_1). Postupak se dalje ponavlja na primer:

$$\begin{aligned} S_0 &= 93 \\ S_0^2 &= 8[64]9 \quad S_1 = 64, \\ S_1^2 &= 4[09]6 \quad S_2 = 09, \\ S_2^2 &= 0[08]1 \quad S_3 = 08... \end{aligned}$$

Glavni nedostatak postupka vidljiv je iz primera, jer postoji mogućnost vrlo brzog degenerisanja niza pseudoslučajnih brojeva.

Za generator sredine proizvoda potrebno je definisati dva broja: konstantu k , kojom se moguće sve sredine proizvoda, i seme niza S_0 . Na primer:

$$\begin{aligned} S_0 &= 67, \quad k = 23, \\ k \cdot S_0 &= 1[54]1 \quad S_1 = 54, \\ k \cdot S_1 &= 1[24]2 \quad S_2 = 24, \\ k \cdot S_2 &= 0[55]2 \quad S_3 = 55, \\ k \cdot S_3 &= 1[26]5 \quad S_4 = 26... \end{aligned}$$

Druga mogućnost je da se pseudoslučajni broj izračuna kao sredina dva prethodna pseudoslučajna broja, pa su potrebna dva semena S_0 i S_1 . Na primer:

$$\begin{aligned} S_0 &= 67, \quad S_1 = 23, \\ S_0 \cdot S_1 &= 1[54]1 \quad S_2 = 54, \\ S_1 \cdot S_2 &= 1[24]1 \quad S_3 = 24, \\ S_2 \cdot S_3 &= 1[29]6 \quad S_4 = 29, \\ S_3 \cdot S_4 &= 0[69]6 \quad S_5 = 69... \end{aligned}$$

Obe varijante generatora sredine proizvoda vrlo su osjetljive na izbor semena odnosno konstante. U mnogim slučajevima dolazi do brzog degenerisanja. Generisanje pseudoslučajnih brojeva manje je osjetljivo na pojavu istog broja, jer ne može da

dodje do ponavljanja ciklusa kao u prvoj varijanti.

Najefikasniji je Lemerov kongruencijski generator: pseudoslučajni broj se brzo izračunava, a za dobro izabrane početne podatke mogući su vrlo dugi nizovi pseudoslučajnih brojeva. Osim semena S_0 , definišu se i tri konstante: a , b , m . Pseudoslučajni broj S_{i+1} jednak je:

$$S_{i+1} = (a \cdot S_i + b) \pmod{m},$$

što znači da je novi pseudoslučajni broj jednak ostatku po izvršenom deljenju.

Za $a=1$ mešoviti kongruencijski generator se svodi na aditivni:

$$S_{i+1} = (S_i + b) \pmod{m},$$

a za $b=0$ na multiplikativni:

$$S_{i+1} = (a \cdot S_i) \pmod{m}.$$

Izbor konstanti a, b, m i S_0 vrlo je važan. Za dekadne pseudoslučajne brojeve preporučuje se:

$$\begin{aligned} m &= 10^d, \text{ gde je } d \text{ broj bitova u reči;} \\ a &= 200t \pm k, \end{aligned}$$

tako da važi

$$[a] \approx 10^{d/2},$$

gde je t proizvoljan pozitivan ceo broj, a k jedna od vrednosti iz skupa $(3, 11, 13, 19, 21, 27, 29, 37, 53, 59, 61, 67, 69, 77, 83, 91)$.

Seme S_0 ne sme biti proizvod od 2 i 5.

Za binarne pseudoslučajne brojeve preporučuje se:

$$\begin{aligned} m &= 2^d, \\ a &= 8 \cdot t \pm 3, \end{aligned}$$

tako da važi:

$$[a] \approx 2^{d/2}.$$

Seme S_0 ne sme biti proizvod od 2.

Kvadratni kongruencijski generator je oblika:

$$S_{i+1} = [a \cdot S_i + b \cdot S_i + c] \pmod{m}$$

Fibonačijev generator je oblika:

$$S_{i+1} = [S_i + S_{i-1}] \pmod{m}$$

Za svaki tip računara treba ispitati uticaj konstanti na uniformnost i nezavisnost niza pseudoslučajnih brojeva. Kolmogo-

rov-Smirnov test /50/ koristi se za ispitivanje uniformnosti, a ran-test /50/ za ispitivanje nezavisnosti niza.

3.3. Testovi za verifikaciju neparametarske hipoteze

Pirsonov test χ^2 /25/, /30/ služi za utvrđivanje odstupanja između empirijskih i očekivanih teorijskih frekvencija:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(f_i - f_{ti})^2}{f_{ti}}$$

gde je

f_i - frekvencija i-te klase,

f_{ti} - odgovarajuća teorijska frekvencija,

r - broj klasa.

Broj stepeni slobode k računa se kao:

$$k=r-1-l$$

gde je l - broj nepoznatih parametara pretpostavljene raspodele izračunate iz uzorka (npr. $l=0$ za ravnomernu, a $l=2$ za normalnu raspodelu).

Kritični koeficijent λ hipoteze o slaganju empirijske i teorijske raspodele predstavlja verovatnoću da uzoračka vrednost χ^2 bude veća od teorijske

$$\lambda = P(\chi^2 > \chi_\lambda^2),$$

što znači da je λ rizik prihvatanja hipoteze, a $1-\lambda$ pouzdanost hipoteze. Dve vrednosti su u najčešćoj upotrebi $\lambda=0,05$ i $\lambda=0,01$.

Teorijska vrednost χ_λ^2 za k - stepeni slobode očitava se iz odgovarajućih tablica. Na osnovu odnosa između χ^2 i χ_λ^2 donosi se jedan od dva sledeća zaključka:

- ako je $\chi^2 > \chi_\lambda^2$

hipoteza se odbacuje, jer su u pitanju bitna odstupanja empirijske od teorijske raspodele;

- ako je $\chi^2 < \chi_\lambda^2$

hipoteza se prihvata sa rizikom λ i ako ima mogućnosti hipotezu treba proveriti na drugim uzorcima.

Test Romanovskog takođe služi za verifikaciju neparametarskih hipoteza. Izračunavanje uzoračke vrednosti χ^2 vrši se na

opisan način. Proces zaključivanja glasi:

- ako je

$$\frac{|\chi^2 - k|}{\sqrt{2k}} < 3$$

odstupanja su slučajna i hipoteza se prihvata,

- ako je

$$\frac{|\chi^2 - k|}{\sqrt{2k}} > 3$$

odstupanja su bitna i hipoteza se odbacuje.

Na osnovu brojnih verifikacija neparametarskih hipoteza uočeni su sledeći odnosi:

- ako je po testu Romanovskog izračunata vrednost manja od 2, test χ^2 se po pravilu prihvata sa rizikom od $\alpha = 0,01$;

- ako je po testu Romanovskog izračunata vrednost između 2 i 3,5, postoji mogućnost da se test χ^2 prihvati sa rizikom $\alpha = 0,05$.

Primer:

U jednom skladištu izmerena su vremena ciklusa viljuškara u 180 slučajeva. U sledećoj tabeli prikazan je proces izračunavanja uzoračke vrednosti χ^2 , a na slici 3.4. dat je grafički prikaz suštine χ^2 testa. Testirana je hipoteza o slaganju empirijske sa ravnomerom teorijskom raspodelom.

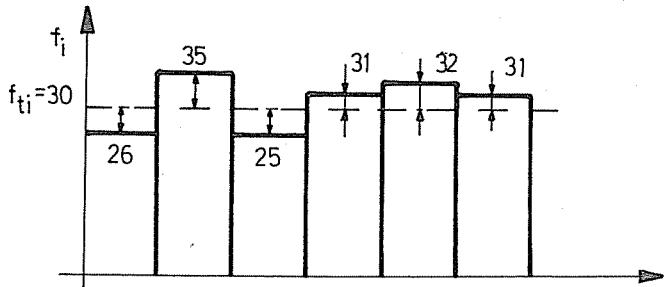
Broj minuta (ciklus) x_i	Broj putovanja f_i	Teorijske frekvencije f_{ti}	$\frac{(f_i - f_{ti})^2}{f_{ti}}$
11	26	30	4
12	35	30	5
13	25	30	5
14	31	30	1
15	32	30	2
16	31	30	1
Ukupno	180		$\chi^2 = 2,38$

Po testu Romanovškog

$$\frac{|2,38 - 6|}{\sqrt{12}} = 1,05 < 3$$

Iz statističkih tabela može se videti da je za 6 stepeni slobode $\chi^2_{0,05} = 12,592$, a $\chi^2_{0,01} = 16,812$

Zaključak je da su odstupanja slučajna, pa se hipoteza o slaganju empirijske sa teorijskom ravnomernom raspodelom može prihvati i po χ^2 testu i po testu Romanovskog.



Slika 3.4. Grafički prikaz χ^2 testa.

Verifikacija neparametarskih hipoteza od posebnog je značaja, jer se u zavisnosti od dobijenog rezultata koriste različiti postupci za modeliranje slučajne promenljive po eksperimentalnoj ili po nekoj od teorijskih raspodela.

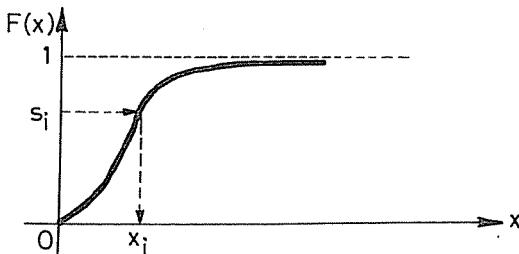
3.4. Modeliranje slučajne promenljive po teorijskoj raspodeli

Neka je $F(x)$ funkcija raspodele /30/, /50/ neprekidne slučajne promenljive (x) (slika 3.5.), a (S) ravnomerne raspodeljeni slučajni broj na jedinačnom intervalu $(0,1)$. Realizacija (x_i) može se u opštem slučaju dobiti generisanjem (s_i):

$$x_i = F^{-1}(s_i),$$

gde je $F^{-1}(x)$ funkcija inverzna funkciji $F(x)$.

U daljem tekstu biće prikazano modeliranje neprekidne slučajne promenljive za različite teorijske raspodele, a konkretni numerički algoritmi dati su u obliku potprograma u okviru programa FREK na kraju poglavlja.

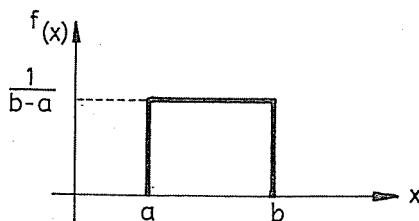


Slika 3.5. Modeliranje slučajne promenljive po teorijskoj raspodeli.

3.4.1. Ravnomerna raspodela

Na intervalu (a, b) , neprekidna slučajna promenljiva x ima konstantnu vrednost. Funkcija gustine $f(x)$ definiše vrednost funkcije u tački x . U konkretnom slučaju (slika 3.6.) ima oblik:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases}$$

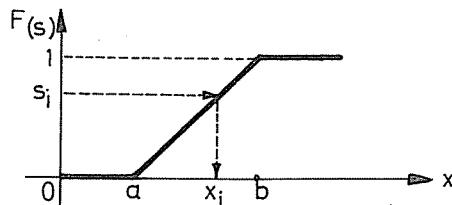


Slika 3.6. Funkcija gustine ravnomerne raspodele

Funkcija raspodele $F(x)$ je oblika:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$$

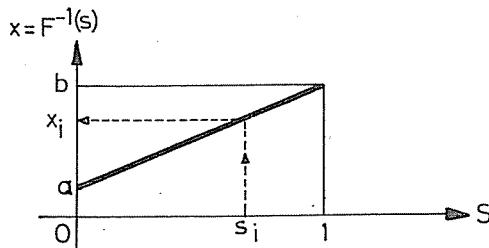
Funkcija raspodele definiše verovatnoću da slučajna promenljiva x ima vrednost manju ili jednaku od x_i .



Slika 3.7. Funkcija ravnomerne raspodele

Inverzna funkcija raspodele $F^{-1}(x)$ je simetrična funkciji raspodele $F(x)$ u odnosu na pravu $y=x$. Za slučaj ravnomerne raspodele inverzna funkcija ima oblik:

$$F^{-1}(s) = x = a + (b-a) \cdot s$$



Slika 3.8. Inverzna funkcija ravnomerne raspodele

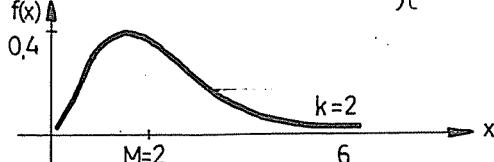
U praksi ravnomerna raspodela sreće se pri određivanju redosleda kod slučajne discipline opsluživanja i izbora lokacija u automatizovanim skladištima.

3.4.2. Erlangova raspodela k-tog reda

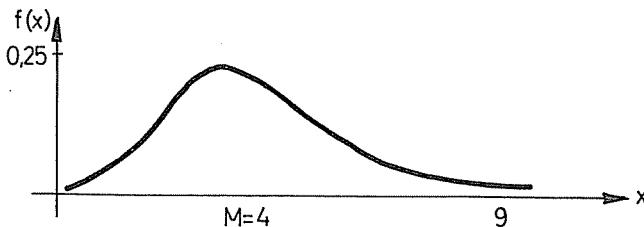
Funkcija gustine je oblika:

$$f(x) = \frac{1}{(k-1)!} \lambda^k \cdot x^{k-1} \cdot e^{-\lambda x}, \quad x > 0, \quad k > 0, \quad \lambda > 0$$

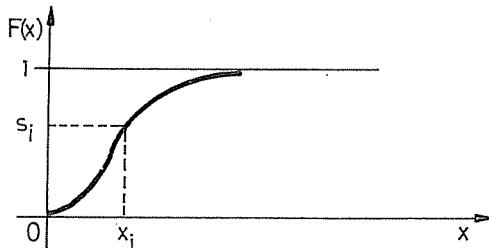
sa matematičkim očekivanjem $M = \frac{k}{\lambda}$ i disperzijom $\delta^2 = \frac{k}{\lambda^2}$



Slika 3.9. Funkcija gustine Erlangove raspodele 2. reda



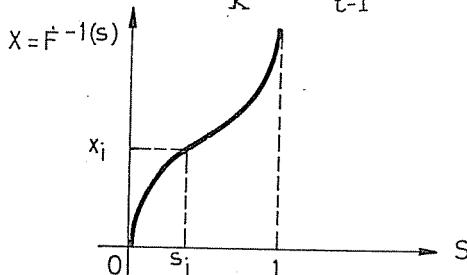
Slika 3.10. Funkcija gustine Erlangove raspodele 4. reda



Slika 3.11. Funkcija Erlangove raspodele

Inverzna funkcija raspodele ima oblik:

$$F^{-1}(s) = -\frac{m}{k} \ln \prod_{i=1}^k s_i$$



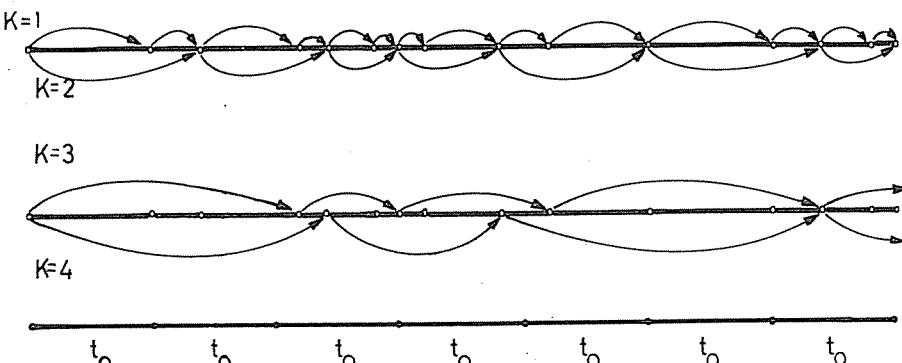
Slika 3.12. Inverzna funkcija Erlangove raspodele

Parametar k je stepen slobode Erlangove raspodele. Specijalan slučaj Erlangove raspodele za $k=1$ je eksponencijalna raspodela, a sa povećanjem k teži normalnoj raspodeli. Uopštenje Erlangove raspodele za realno k je gama raspodela.

Erlangova raspodela k -tog reda sa srednjom vrednošću k/λ može se predstaviti kao sumu k nezavisnih eksponencijalnih raspodela sa srednjom vrednošću $1/\lambda$. (slika 3.13.)

Tipični primjeri Erlangove raspodele su: vreme opsluživanja u transportnim i skladišnim sistemima u industriji, operac-

ije pretovara u lukama itd. Manje vrednosti k (npr. k=2) po pravilu se sreću u procesima kod kojih je dominantan uticaj ljudskog rada, a za veće vrednosti (npr. k=30) očit je uticaj rada automatskih uredjaja u stohastičkom okruženju (npr. uskladišteњe visokoregalnom dizalicom).



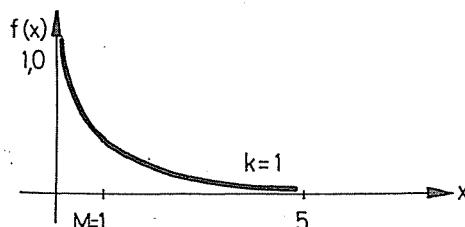
Slika 3.13. Erlangovi potoci k-tog reda

3.4.3. Eksponencijalna raspodela

Eksponencijalna raspodela je poseban slučaj Erlangove raspodele za k=1. funkcija gustine ima oblik:

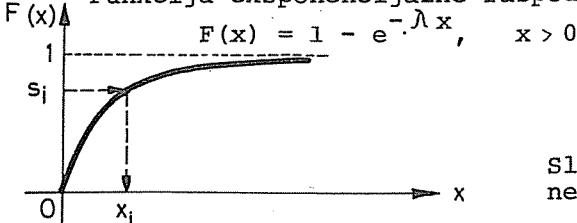
$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x > 0, \quad \lambda > 0$$

sa matematičkim očekivanjem $M = \frac{1}{\lambda}$ i disperzijom $\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}$, gde je λ brzina dolaska u sistem.



Slika 3.14. Funkcija gustine eksponencijalne raspodele

Funkcija eksponencijalne raspodele je oblika:



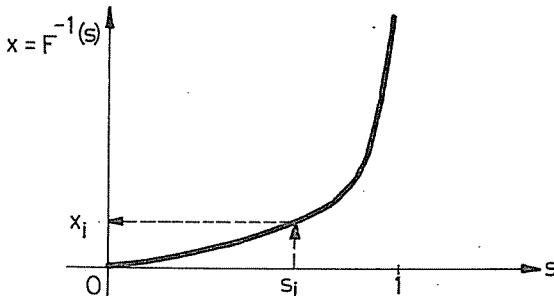
Slika 3.15. Funkcija eksponencijalne raspodele

Inverzna funkcija eksponencijalne raspodele je oblika:

$$F^{-1}(S) = x = (-1/\lambda) \cdot \ln(1-S),$$

što se s obzirom na ravnomernu raspodelu slučajne promenljive može pojednostaviti.

$$F^{-1}(S) = x = -\ln(S)/\lambda$$



Slika 3.16. Inverzna funkcija eksponencijalne raspodele

Eksponencijalna raspodela po pravilu se verifikuje za intervale uzastopnih dolazaka u neki opslužni sistem.

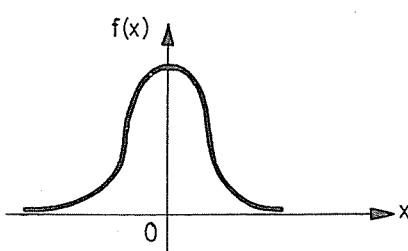
3.4.4. Normalna raspodela

Funkcija gustine normalne raspodele je oblika:

$$f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\delta^2} (x-M)^2}$$

Standardizovana normalna raspodela za $M=0$ i $\delta^2=1$ ima funkciju gustine:

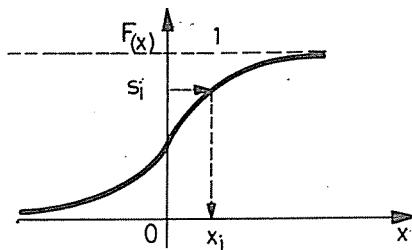
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$



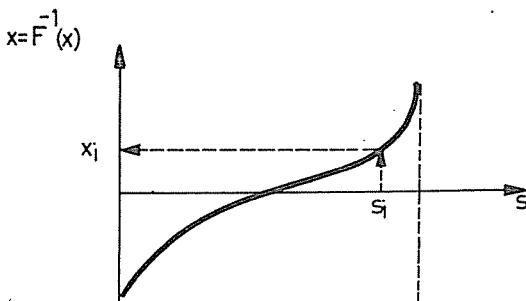
Slika 3.17. Funkcija gustine normalne raspodele

Funkcija normalne raspodele je oblika:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$



Slika 3.18. Funkcija normalne raspodele



Slika 3.19. Inverzna funkcija normalne raspodele

Normalna raspodela u industriji uočena je pri izvodjenju proizvodnih operacija, kod obrade i montaže, u procesu kontrole kvaliteta itd.

3.4.5. Poasonova raspodela

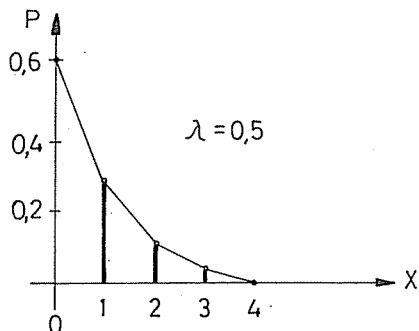
Poasonova raspodela je diskretna teorijska raspodela. Opisuje slučajne dogadjaje koji se realizuju u fiksnim vremenskim intervalima. Neka je $(\frac{1}{\lambda})$ prosečno vreme izmedju dva uzastopna nailaska. Tada je verovatnoća da će u konstantnom vremenskom intervalu (to) biti (x) nailazaka:

$$P_{to}(x) = \frac{(\lambda \cdot to)^x}{x!} e^{-\lambda \cdot to}$$

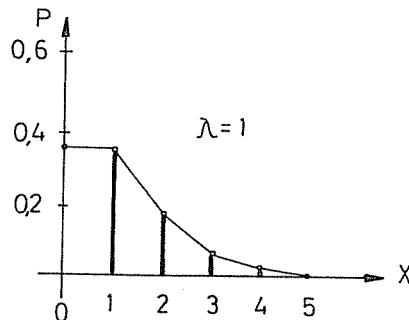
sa parametrima

$$\bar{x} = \lambda \cdot t_0, \quad \delta^2 = \lambda \cdot t_0$$

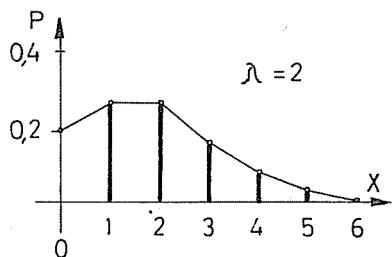
Na slikama 3.20. - 3.23. prikazana je gustina Poasonove raspodele za različite vrednosti λ .



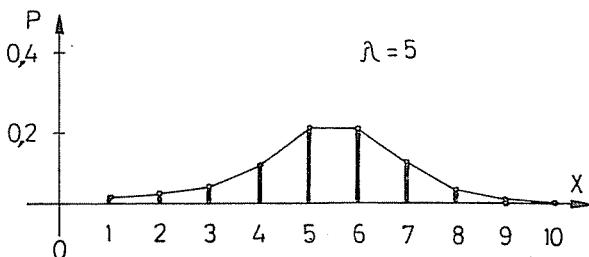
Slika 3.20. Gustina Poasonove raspodele



Slika 3.21. Gustina Poasonove raspodele



Slika 3.22. Gustina Poasonove raspodele



Slika 3.23. Gustina Poasonove raspodele

Poasonova raspodela sreće se u industrijskim i transportnim procesima kod pojave grupnog nailaska u sistem u istoj vremenskoj jedinici. Interesantan je odnos izmedju Poasonove i eksponencijalne raspodele. Ako je broj nailazaka u sistem definisan Poasonovom raspodelom, tada su intervali izmedju nailazaka eksponencijalno raspodeljeni.

3.5. Modeliranje slučajne promenljive po empirijskoj raspodeli

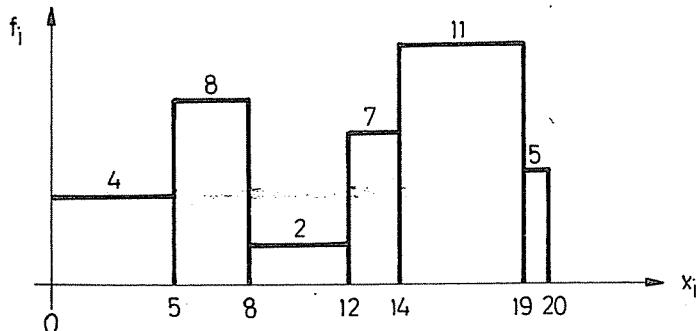
U procesu verifikacije empirijske sa nekom teorijskom

raspodelom može se desiti da se hipoteza ne prihvati. Zato je potrebno da se modelira slučajna promenljiva po empirijskoj raspodeli /23/, /32/, /50/. Postoje tri osnovna načina modeliranja: po neprekidnoj, diskretnoj ili redoslednoj empirijskoj raspodeli.

3.5.1. Modeliranje slučajne promenljive po neprekidnoj empirijskoj raspodeli

Za modeliranje slučajne promenljive po neprekidnoj empirijskoj raspodeli potrebni su podaci o:

- frekvencijama po klasama (f_i), i
- granicama klasa (g_i).



Slika 3.24. Empirijske frekvencije i granice klasa

Podaci sa slike 3.24. mogu se zadati i tabelarno:

klasa	frekvencija	leva granica	desna granica
1	4	0	5
2	8	5	8
3	2	8	12
4	7	12	14
5	11	14	19
6	5	19	20

Originalni histogram sa slike 3.24. transformišemo u fu-

nkciju raspodele na jediničnom intervalu, tako što širine klasa po x osi ostaju, a projekcija na y osi zavisi od relativne frekvencije, (verovatnoće realizacije) dogadjaja iz pojedine klase.

Ako sa (n) označimo ukupan broj pojava, tada je:

$$n = \sum_{i=1}^r f_i$$

gde je r broj klasa.

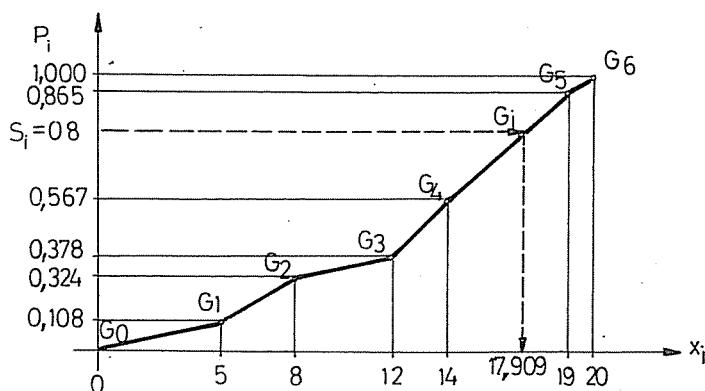
Verovatnoća (P_i) realizacije dogadjaja iz i-te klase jednaka je:

$$P_i = \frac{f_i}{n}$$

Leva granica prvog intervala (g_0) jednaka je 0, a odgovarajuća verovatnoća $P_0=0$. Desna granica intervala (j) je:

$$g_j = \sum_{i=0}^j P_i$$

Sada se na osnovu histograma 3.24. može dobiti kumulativna funkcija neprekidne empirijske raspodele.



Slika 3.25. Kumulativna funkcija neprekidne empirijske raspodele

Postupak modeliranja odvija se na principijelno isti način kao i u opštem slučaju modeliranja slučajne promenljive po teorijskoj raspodeli, slika 3.5.

Potrebno je definisati niz prelomnih tačaka G_j (x_j, g_j). Na slici 3.25. koordinate tačaka su: $G_0 (0; 0)$, $G_1 (5; 0,108)$, $G_2 (8; 0,324)$, $G_3 (12; 0,378)$, $G_4 (14; 0,567)$, $G_5 (19; 0,865)$ i

G₆ (20; 1). Uzastopne tačke povezuju se pravim linijama. Po generisanju slučajnog broja (S_i) vrši se ispitivanje pripadnosti jednom od intervala. Ispunjene uslova:

$$g_{j-1} \leq S_i < g_j, \quad j = 1, 2, \dots, r,$$

znači da je u pitanju interval (j) i da treba iskoristiti pravu između tačaka G_{j-1} i G_j . Opštu jednačinu prave izmedju dve tačke:

$$\frac{x_i - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} = \frac{S_i - g_{j-1}}{g_j - g_{j-1}}$$

rešimo po x_i ,

$$x_i = x_{j-1} + \frac{S_i - g_{j-1}}{g_j - g_{j-1}} \cdot (x_j - x_{j-1})$$

što u primeru sa slike 3.25. za $S_i = 0,8$ daje

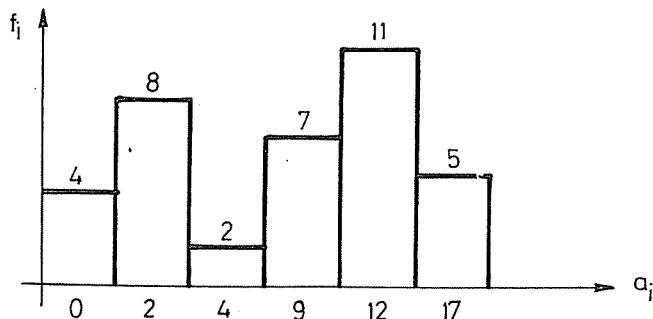
$$x_i = 14 + \frac{0,8 - 0,567}{0,865 - 0,567} \cdot (19 - 14) = 17,909$$

Neprekidna empirijska raspodela koristi se za interpoliranje neprekidnih teorijskih raspodela.

3.5.2. Modeliranje slučajne promenljive po diskretnoj empirijskoj raspodeli

Za modeliranje slučajne promenljive po diskretnoj empirijskoj raspodeli potrebni su podaci o:

- frekvencijama po klasama (f_i), i
- atributi po klasama (a_i).



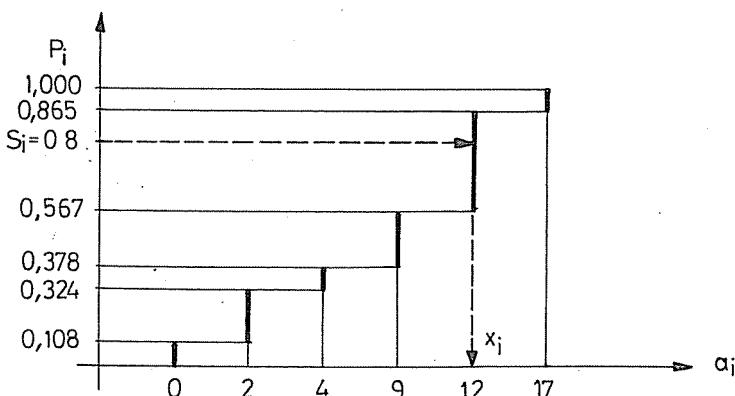
Slika 3.26. Histogram empirijske raspodele

Podaci sa slike 3.26. mogu se zadati i tabelarno:

klasa	frekvencija	atribut
1	4	0
2	8	2
3	2	4
4	7	9
5	11	12
6	5	17

Za razliku od histograma sa slike 3.24., širine klasa su ekvidistantne. Klase se mogu urediti po monotono rastućim atributima, kao na primeru sa slike 3.26. i tabeli, ali to u opštem slučaju nije obavezno.

Postupak određivanja granica jediničnog intervala na ordinati isti je kao i u slučaju modeliranja slučajnog broja po neprekidnoj empirijskoj raspodeli. Funkcija raspodela je skokovita.



Slika 3.27. Funkcija diskretne empirijske raspodele

Slučajni broj (S_i) koji se nadje u intervalu

$$g_{j-1} \leq S_i < g_j, \quad j = 1, 2, \dots, r$$

realizuje atribut a_j .

U primeru sa slike 3.27. za slučajni broj $S_i=0,8$ realizuje se atribut 5. klase, pa je $x_i=a_5=12$.

Atributi mogu biti svi brojevi iz skupa prirodnih brojeva, obeležja populacije (npr. vrsta viljuškara iz nehomogenog pretovarnog parka) itd.

Primenjuje se za sve vrste snimljenih empirijskih raspodela.

3.5.3. Redosledna empirijska raspodela

Redosledna empirijska raspodela poseban je slučaj diskretnе empirijske raspodele, za koju je vrednost atributa (a_j) jednaka rednom broju intervala (j)

$$a_j = j$$

Za primer sa slike 3.27. za slučajni broj $S_i=0,8$ realizuje se atribut 5. klase, pa je $x_i=5$.

3.6. Sistemski generator pseudoslučajnih brojeva

Računar PDP 11/34 na programskom jeziku FORTRAN IV ima već realizovan generator pseudoslučajnih brojeva na jediničnom intervalu (0, 1). Postoje dva oblika pozivanja: kao običan ili funkcijski potprogram. Inicijalizacija se vrši tako što se pri prvom korišćenju generatora pseudoslučajnih brojeva promenljive IX i IY postavljaju na nulu. Potprogram SLUCAJ generiše pseudoslučajne brojeve na jediničnom intervalu. Ovo izdvajanje izvršeno je da bi se omogućilo zagrevanje modela i korišćenje pseudoslučajnih brojeva za modeliranje slučajnih promenljivih.

Većina programa koristi sistemski generator pseudoslučajnih brojeva. U ostalima je primenjen brzi aritmetički generator sa ciklusom ponavljanja od oko 10000 pseudoslučajnih brojeva. Inicijalizacija i pozivanje obavljaju se na isti način kao i za potprogram SLUCAJ (isto im je i ime), tako da im je po potrebi moguće menjati mesta. Serijom eksperimenata sa primenom jednog ili drugog generatora, moguće je istraživati uticaj generatora na brzinu i tačnost simulacionih eksperimenata.

3.7. Struktura i funkcije programa FREK

Program generiše izabranu teorijsku raspodelu, definiše frekvencije po klasama i grafički prikazuje dobijeni histogram. Glavni program poziva potprograme UCIT i GRAF.

Potprogram UCIT učitava podatke o vrsti raspodele (IZ:1-normalna, 2-ravnometerna, 3-Erlangova, 4-simetrična Erlangovoj ili 5-eksponencijalna), broju klase (KL) i matematičkom očekivanju (A). Za normalnu raspodelu unosi se i standardno odstupanje (S), a za Erlangovu i raspodelu simetričnu Erlangovoj učitava se stepen raspodele (K). Na kraju se učitava podatak o zagrevanju modela (IZAG), te se odgovarajući broj puta poziva potprogram SLUCAJ.

Potprogram GRAF postavlja niz frekvencija po klasama (N) na nulu. U zavisnosti od izabrane raspodele pozivaju se potprogrami NOR, RAV, ERL i SIMERL. Za eksponencijalnu raspodelu koristi se potprogram ERL za $k=1$. Ako se realizovani pseudoslučajni broj (LC) po izabranoj neprekidnoj raspodeli nadje u intervalu

$$1 \leq LC \leq KL$$

tada frekvencija u klasi LC raste za 1:

$$N(LC) = N(LC) + 1$$

Kada frekvencija u maksimalnoj klasi dostigne vrednost 760 prelazi se na grafičko predstavljanje frekvencija po klasama.

```

C      FREK - Program za graficko prikazivanje
C      frekvencija po klasama za
C      neprekidne raspodele
COMMON /GR/ N(20),K,A,S,IZ,KL
COMMON /IMEIII/ II
CALL UCIT
CALL GRAF
STOP
END
SUBROUTINE GRAF
COMMON /GR/ N(20),K,A,S,IZ,KL
DO 11 I=1,20
N(I)=0
11 CONTINUE
DO 1 I=1,20000
IF(IZ.EQ.1)CALL NOR(A,S,LC)
IF(IZ.EQ.2)CALL RAV(KL,LC)
IF(IZ.EQ.3)CALL ERL(A,K,LC)
IF(IZ.EQ.4)CALL SIMERL(A,K,LC,KL)
IF(IZ.EQ.5)CALL ERL(A,1,LC)
IF(LC.GT.0.AND.LC.LE.KL)N(LC)=N(LC)+1
IF(N(LC).EQ.760)GOTO 4
CONTINUE
DO 37 I=1,KL
N(I)=INT(FLOAT(N(I))/10.)
37 CONTINUE
WRITE(5,20)
DO 5 I=1,KL
DO 6 J=1,N(I)
JJ=N(I)-J+1
IF(JJ.LT.1)JJ=1
WRITE(5,10)
6 CONTINUE
5 CONTINUE
10 FORMAT('+',T<JJ>,'*')
20 FORMAT('1')
RETURN
END
SUBROUTINE UCIT
COMMON /GR/ N(20),K,A,S,IZ,KL
COMMON /IMEIII/ II
WRITE(5,10)
10 FORMAT('Program za prikazivanje frekvencija po klasama ')
1 WRITE(5,15)
15 FORMAT(' 1-normalna raspodela'
1' 2-ravnomerna raspodela'
2' 3-Erlansova raspodela'
3' 4-simetrična Erlansova '
4' 5-eksponencijalna raspodela')
READ(5,20)IZ
20 FORMAT(1S)
IF(IZ.GT.5.OR.IZ.LT.1)GO TO 1
2 WRITE(5,25)
25 FORMAT(' broj klase od 1 do 20 u formatu 1S')

```

```

READ(5,20)KL
IF(KL,LT,1,OR,KL,GT,20)GOTO 2
3      WRITE(5,30)
30     FORMAT(' matematičko očekivanje u formatu F10,0')
      READ(5,35)A
35     FORMAT(F10,0)
      IF(A,LE,1,E-4)GOTO3
40     FORMAT(' standardno odstupanje u formatu F10,0')
45     FORMAT(' stepen Erlansove raspodele u formatu 15')
      IF(IZ,EQ,3,OR,IZ,EQ,4)GO TO 110
      IF(IZ,EQ,5)GO TO 120
100    WRITE(5,40)
      READ(5,35)S
      IF(S,LT,1,E-4)GOTO 100
      GOTO 120
110    WRITE(5,45)
      READ(5,20)K
      IF(K,LT,1,OR,K,GT,99)GOTO 110
120    WRITE(5,50)
50     FORMAT(' zastreševanje modela u formatu 15')
      READ(5,20)IZAG
      IF(IZAG,LT,1)GOTO 120
      IZAG=IZAG+1
      II=0
      DO 481 I=1,IZAG
      CALL SLUCAJ(SL)
481    CONTINUE
      II=1
      RETURN
      END
      SUBROUTINE NOR(A,S,LC)
      AL=0
      DO 1 I=1,12
      CALL SLUCAJ(SL)
      AL=AL+SL
1      CONTINUE
      LC=INT(S*(AL-6.0)+A)+1
      RETURN
      END
      SUBROUTINE RAV(KL,LC)
      CALL SLUCAJ(SL)
      LC=INT(SL*KL)+1
      RETURN
      END
      SUBROUTINE SIMERL(A,K,LC,KL)
      AMI=1./A
      PR=1.
      DO 2 I=1,K
      CALL SLUCAJ(SL)
      PR=PR*SL
2      CONTINUE
      IF(PR,LT,1,E-4)PR=1.E-4
      LC=INT((-1/(AMI*K))*KALOG(PR))
      LC=INT(KI/2.)-LC
      RETURN

```

```
END
SUBROUTINE SLUCAJ(SL)
COMMON /IMEII/ II
IF(II.EQ.0)IX=0
IF(II.EQ.0)IY=0
SL=RAN(IX,IY)
RETURN
END
SUBROUTINE ERL(A,K,LC)
AMI=1./A
PR=1.
DO 2 I=1,K
CALL SLUCAJ(SL)
PR=PR*SL
CONTINUE
2 IF(PR.LT.1.E-4)PR=1.E-4
LC=INT((-1/(AMI*K))* ALOG(PR))
RETURN
END ..
```

4. SIMULACIJA

Simulacija je postupak rešavanja problema koji se koristi za definisanje i analizu modela nekog sistema i može da po kaže kako će stvarni sistem da reaguje na promene. Gillet navodi: "Simulacija je jedan od najznačajnijih alata operacionih istraživanja koji su danas u upotrebi. ... to je jedna tehnika za vodjenje eksperimenata na modelu sistema". Postupak simulacije Pritsker naziva "veštačka" laboratorija.

U daljem tekstu će se navesti još nekoliko definicija iz literature /1/, /50/, itd.:

"Simulacija je proces oblikovanja modela realnog sistema i sprovodenja eksperimenata sa modelom u cilju razumevanja ponašanja sistema ili izračunavanja različitih strategija u radu sistema" (Šenon).

"Simulacija je predstavljanje dinamičkog ponašanja sistema koji se menja od stanja do stanja prema dobro definisanim operacionim pravilima" (Pritsker i Pegden).

"Simulacija je tehnika konstruisanja modela realnog sistema u nameri da se prouče ponašanja tog sistema, a da se pri tome njegova okolina ne ometa" (Bobijer, Kahan i Probst).

"Simulacija je eksperimentisanje s apstraktnim modelom realizovanim kao program za računar, u kome se procesi odvijaju u nekom određenom vremenskom intervalu". U širem smislu "simulacija je sklop aktivnosti počev od eksperimenta na realnom sistemu, modeliranja, programiranja, eksperimentisanja sa modelom, do analize eksperimentalnih rezultata" (Žiljak).

Pri studiranju kompleksnog sistema postoje dve alternative: jedna je da se analizira ponašanje stvarnog sistema, što zahteva dugačak period vremena, velike troškove ili je uopšte nemoguće, a druga je da se posmatra ponašanje modela datog sistema. Svrha analize je da se: predviđi rad i ponašanje sistema pri zadatim uslovima, prikažu tehničke prednosti i nedostaci razmatranih alternativa i stvari podloga za ekonomsku analizu projekta. Postupak analize dat u okviru ove knjige obuhvata primenu modela teorije redova čekanja i procesa simulacije sistema.

Kompleksnost mnogih transportnih i skladišnih sistema često čini da je predviđanje rada sistema pomoću analitičkih modela nemoguće ili nepraktično. U slučaju kada se dolazak transportnih jedinica ne ponaša po Poisson-ovom procesu, kada se raspodela vremena dolazaka menja nekoliko puta u toku dana, ili ako se redovi formiraju ispred više uređaja za opsluživanje koji imaju različita vremena opsluživanja analitičke metode nisu više primenljive, jer zahtevaju unošenje dodatnih restriktivnih pretpostavki. Takođe kada se analiziraju kompleksni transportni sistemi koji se sastoje od više uređaja za opsluživanje povezanih u radu paralelno i serijski, nije moguće koristiti teoriju redova čekanja. Rezultat je da se, kao zajednička sistemska metodologija za predstavljanje rada i ponašanja sistema, koristi simulacija.

Pored navedenih uslova, postupak simulacije je neophodno koristiti u sledećim slučajevima:

- kada sistem radi sa velikim opterećenjem; intenzitet protoka $\rho > 0,9, /38/, /39/,$
- pri ispitivanju reagovanja sistema na povremena preopterećenja,
- pri ispitivanju ponašanja sistema u slučaju otkazivanja pojedinih uređaja, i
- pri empirijskoj raspodeli vremena dolaska TJ u sistem i vremena opsluživanja.

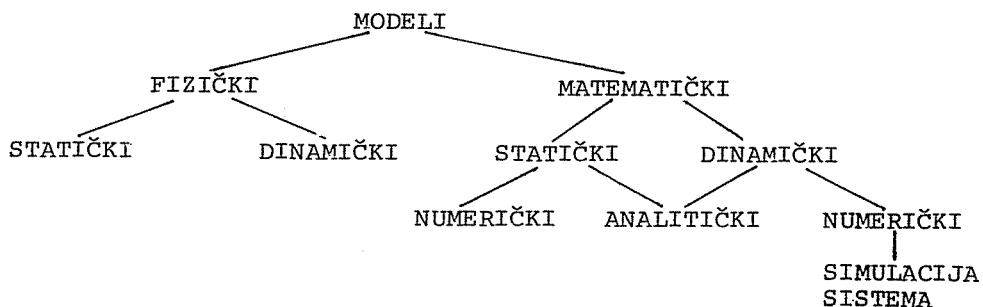
Kada je sistem definisan i problem postavljen, simulacioni projekat sastoји se iz četiri osnovna dela:

- ~ odluka o primeni simulacije, na koju utiču sledeći faktori: troškovi potrebnii za simulaciju procesa, mogućnost izvođenja stvarnog eksperimenta i mogućnost primene matematičke analize,
- ~ konstruisanje formalnog modela,
- ~ izrada programa za računar kojim se model pretvara u radni program za simulaciju procesa; i
- ~ primena simulacionog programa kao eksperimentalnog uređaja za istraživanje problema.

4.1. Osnovni pojmovi

Danas postoji težnja da se složeni zadaci u raznim stručnim oblastima tako uproste, odnosno razlože, da se mogu rešavati pomoću proverenih modela. To znači, da se primenom načina razmišljanja i postupaka koje daje oblast sistem inženjerstva mogu rešavati i složeni problemi kretanja materijala. U daljem tekstu će se dati tumačenja nekih osnovnih pojmljiva.

Model je imitacija nekog realnog sistema. Modeli mogu da se podeli u dve osnovne grupe, na fizičke i matematičke (slika 4.1.) Predmet ove knjige su matematički modeli.



Matematički model sistema je skup matematičkih operacija i podataka koji verno opisuju ponašanje toga sistema u okolnostima koje se proučavaju. Pošto su realni sistemi u opštem slučaju veoma komplikovani, matematički formalizovani modeli mogu ih podražavati samo u određenom domenu. Stvar je iskustva, znanja, veštine i postavke zadatka koliko će verno matematički model prikazati objekat ili proces koji nas interesuje. Svrha modela je, ukratko, sledeća:

- da opiše ponašanje realnog sistema,
- da pomogne u objašnjavanju ponašanja sistema u okolnostima različitim od onih za koje je prvobitno modeliran.

Matematički model mora da poseduje sledeće osobine /14/:

- da je konceptualski jasan i dosledan,
- da je svrshodan i da daje potpun odgovor na sva važna pitanja,
- da se može lako i pouzdano koristiti,
- da se može dogradjivati i razvijati saglasno novim

iskustvima.

Matematički modeli se obično razvrstavaju prema svojim osobinama. U literaturi (/5/ i dr.) sreću se sledeće podele:

- statički ili dinamički modeli,
- deterministički ili stohastički modeli, i
- diskretni ili kontinualni modeli.

Ponekad se modeli dele i prema metodi koja se koristi za rešavanje problema, pa se tako pominju modeli zasnovani na linearnom i dinamičkom programiranju, teoriji čekanja itd. U principu model je bolje razvrstati na prvi način, prema osobinama, jer je matematička metoda samo oruđje za rešavanje problema i može se zameniti nekim drugim /14/.

Matematički model nikada nije sam sebi cilj, već je samo sredstvo koje se često mora dopunjavati drugim sredstvima, na primer izvodjenjem eksperimentata. Ipak, to je moćno sredstvo u poslovima vezanim za razjašnjenje ponašanja složenih sistema transporta i usklađenja, tako da se matematičko modeliranje koristi, sa velikim uspehom u projektovanju ovih sistema.

Sistem predstavlja ograničen i sredjen kompleks elemenata odredjene funkcije koje se nalaze u pogodnim međusobnim odnosima za postizanje odredjenog cilja. Opšta teorija sistema počiva na stavu da postoje takva svojstva sistema koja nisu direktno izvedena iz delova ili komponenti koje čine celinu. Ova svojstva čine celinu - sistem, dodajući nečemu više nego što je jednostavna suma njegovih delova: "Kombinacija pojedinih komponenti sistema sa jedinstvenim odnosima između njih stvara celinu koja je jedinstvena" /2/. Pritisker daje sledeću definiciju /19/ "Sistem je skup elemenata ograničenog dela stvarnosti, koji je predmet studiranja ili interesovanja". Zato se može smatrati da je jedan sistem relativna stvar. U nekoj situaciji poseban skup elemenata može da bude samo mali deo nekog većeg skupa sistema, i predstavlja podsistem; u drugoj situaciji, isti skup elemenata može da bude u žiži interesa i razmatrao bi se kao samostalan sistem.

Sistemski prilaz problemima uključuje sledeće /2/:

- definisanje problema za ceo sistem,
- polazna tačka je sistem kao celina,

- predstavljanje kompleksne interakcije izmedju pojedinih komponenti sistema,
- primena višekriterijumske optimizacije,
- predviđanje ponašanja sistema kao celine, koja predhodi stvaranju nekog realnog sistema.

Definisanje nekog problema je dinamički proces i mora da ostane otvoreno da prihvati promene koje su bazirane na novim informacijama //2/. Ukoliko je problem kompleksniji, često će biti potrebno da se definicija problema modifikuje u toku razvijanja procesa zbog novih nepredviđenih informacija. Značajan deo definisanja problema je postavljanje granica sistema. Obim svakog sistema i modela utvrđen je samo da sistem bude identifikovan i izolovan. Spoljni faktori mogu da deluju na sistem na nekoliko načina:

- mogu da budu razmatrani kao ulaz u sistem,
- mogu da budu ignorisani, i
- mogu da promene definiciju sistema; obim sistema može da se uveća i da ih uključi u sistem.

U sistemskoj terminologiji, predmeti koji su izvan granica sistema, ali koji mogu da utiču na njega, konstituišu okolinu sistema. Odnos izmedju onoga što čini sistem i onoga što čini njegovu okolinu proizvoljan je. Granice, pomoću kojih istraživač definiše predmet svog studiranja, takodje određuju šta je okolina sistema.

Važno svojstvo nekog sistema je u tome da njegovi elementi dejstvuju funkcionalno zajednički radi ostvarenja postavljenog cilja. Na osnovu delimičnih ciljeva ne može se zaključiti o cilju celokupnog sistema, jer se celina kvalitativno razlikuje od delova i ne predstavlja njihov prosti zbir. Međutim, delimični ciljevi su određeni ciljem sistema.

Svaki sistem može se razložiti na podsisteme, ali je i on podistem nekog kompleksnijeg sistema višega reda i uklapa se kao takav u neki još složeniji sistem. Kao sistem višeg nivoa može se smatrati i okolina u kojoj treba da dejstvuje sistem nižega nivoa. Kako se okolinom ili ciljem sistema višega nivoa određuju ciljevi datog sistema, stvara se hijerarhija ciljeva. Ciljevi na pojedinim nivoima sistema nalaze se u medj-

usobnoj vezi, pa pri projektovanju sistema treba tu saglasnost uzeti u obzir.

U predstavljanju sistema kao celine, upotrebljavaju se izvesne tehnike koje su efektivne za predstavljanje interakcija izmedju svih komponenti ili podsistema. Sistem može da se opiše i predstavi pomoću blok dijagrama, karti toka, mrežnih dijagrama, analitičkih i simulacionih modela, kojima se predstavljaju kompleksne interakcije izmedju komponenti sistema. Svi navedeni modeli sistema opisuju sistem na neki način, ali njihove funkcije u sistemskim metodima nisu identične. U kartama toka, blok dijagramima i mrežnim dijagramima metodično se postavljaju, korak po korak, transformacije koje će zauzeti mesto u projektovanju sistema. Svaki korak ima ulaz i izlaz, i definišući korake, ulaze i izlaze, definišu se međusobni odnosi. Prikazivanjem odnosa pomoću analitičkih i simulacionih modela, odnosi se reduciraju na oblik koji može da predvidi ponašanje i rad nekog sistema.

Korišćenje podsistema koji su prethodno planirani omogućava da se pri analizi modela celog sistema isti predstavi pomoću njihovih ulaznih i izlaznih parametara čime se redukuje problem na odnose izmedju podsistema. Ako je podsistem pregledan i ako su definisani pojedini njegovi elementi, kao i odnosi i zavisnosti izmedju njih, područje koje reprezentuje može da se optimizuje relativno lako. Zbog višestrukih odnosa izmedju pojedinih podsistema nije sigurno da suma optimalnih podsistema daje i optimalno rešenje ukupnog sistema. Na pojedinačne podsisteme često utiču veličine koje su neposredno vezane sa određivanjem nekog drugog podsistema. To znači, da je potrebno da se razvije postupak koji osigurava traženje ukupnog optimuma, ili rešenja koje je blizu optimalnom.

Elementi sistema su najmanji delovi datog skupa koji se razmatraju. Oni mogu da se sastoje od objekata: materijali (roba), transportna oprema ili ljudi; aktivnosti kretanja: transport, pretovar, uskladištenje; ili transformacionih aktivnosti: paletizacija, homogenizacija itd. Skup elemenata definiše sadržaj sistema /18/. U jednom transportnom sistemu odnosi izmedju elemenata mogu da se razmatraju iz različitih uglova, kao njihov

funkcionalni, strukturalni, ekonomski, socijalni ili ekološki aspekt. Skup odnosa definiše strukturu sistema.

Svaki element sistema ima osobine koje se mogu opisati numeričkim ili logičkim vrednostima. Po svojoj prirodi elementi sistema mogu biti statički (ne menjaju svoj fizički položaj u sistemu) ili dinamički (kreću se u sistemu u zavisnosti od vremena). Stanje sistema definisano je stanjem svih elemenata sistema. Hronološki redosled stanja sistema čini njegovu istoriju. Stanje sistema u dva vremenska trenutka identično je samo ako su stanja svih elemenata ista. Sistem se nalazi u ravnotežnom stanju kada se verovatnoća da bude u nekom od svojih stanja ne menja sa vremenom. Prelazno stanje nastaje nekom spoljašnjom pobudom. Sistem je stabilan ako se vraća u ravnotežno stanje posle svake spoljašnje pobude.

Programiranje je proces kodiranja modela u obliku instrukcija na izabranom programskom jeziku. Verifikacija modela je ispitivanje formalnog slaganja modela i programa. Manje celine proračunavaju se analitički, a zatim se porede sa rezultatima tog dela programa. Verifikovane celine najnižeg reda uvrste se na viši hijerarhijski nivo, te je na taj način moguće usložnjavanje modela. Jasan je zaključak da simulacioni modeli moraju biti maksimalno struktuirani u programskom smislu.

Kada je program verifikovan prelazi se na eksperimentisanje (izvršavanje programa za jedan skup ulaznih podataka) u cilju provere valjanosti modela. Ako se izlazni rezultati simulacionog eksperimenta nalaze u granicama tolerancije, o čijoj veličini odlučuje istraživač na osnovu svog empirijskog i teoretskog iskustva, tada se zaključuje da postoji slaganje između modela i realnog sistema.

4.2. Vrste simulacije

Postoje dve osnovne vrste simulacija: kontinualna i diskretna. Svaka od njih ima poseban pristup za stvaranje modela zasnovan na različitim matematičkim osnovama, koriste različite programske jezike i rešavaju različite probleme.

Kontinualna simulacija bavi se sistemima koji se neprekidno menjaju u vremenu (na pr. let rakete). Merenjem rezultata i povratnom spregom nastoji se da sistem bude stabilan. Ovi modeli imaju oblik algebarskih ili diferencijalnih jednačina i prvo su razvijeni na analognim i hibridnim, a kasnije i na digitalnim računarima. Rezultat kontinualne simulacije je kontinualan. Diskretna simulacija, koja je korišćena za izradu modela prikazanih u ovoj knjizi, zasnovana je na skokovitim promenama stanja sistema koja se dešavaju u jednom vremenskom trenutku. Dogadjaj koji prouzrokuje promenu stanja sistema naziva se kritičan dogadjaj. U jednom simulacionom trenutku moguća je realizacija većeg broja dogadjaja, ali se mora voditi računa o redosledu obrade. Kretanje sata u modelu može se realizovati na dva načina: metodom kritičnog dogadjaja, kada se sat pomera na trenutak kritičnog dogadjaja, i metodom jednakog vremenskog intervala, kada se sat pomera u jednakim intervalima, pa se za sve potencijalne dogadjaje proverava da li su kritični u tom vremenskom intervalu. Simulacija rada regalne dizalice realizovana je metodom kritičnog dogadjaja, a ostali modeli metodom jednakog vremenskog intervala.

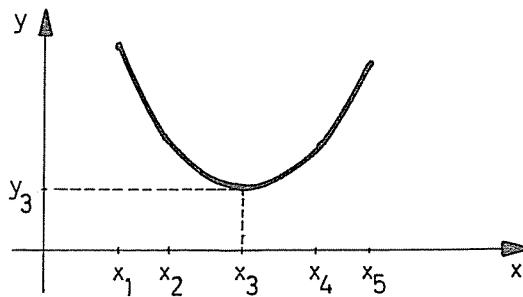
Diskretna simulacija dešava se ili u okviru zadatog broja kritičnih dogadjaja odredjene vrste ili u okviru zadatog simulacionog vremena. Dok izabrani kriterijum završetka simulacionog eksperimenta ne bude ostvaren, stalno se ponavljaju procesi: generisanja dogadjaja i vremena njegovog trajanja, ispitivanja vremena kritičnog dogadjaja i uslova koji ga omogućavaju, promena stanja sistema prouzrokovanim kritičnim dogadjajem i obračunavanja statistika.

Izlazni rezultati zasnovani su na podacima koji su prikupljeni u toku simulacionog eksperimenta. Osnovni tipovi izlaznih rezultata su: brojači ponavljanja dogadjaja određenog tipa, sumarni izveštaji u obliku ekstremnih i srednjih vrednosti, iskorišćenje pojedinih statičkih elemenata u modelu, distribucije izlaznih promenljivih i distribucije vremenskih intervala kroz pojedine tačke sistema za dinamičke jedinice.

4.3. Mogućnosti i ograničenja simulacionih modela

Simulacija se upotrebljava kada ne postoje drugi metodi koji mogu obezbediti rešavanje postavljenog problema. Pojedini delovi simulacionog modela opisuju se analitički kad god je to moguće, jer determinističke relacije verifikovane na realnom sistemu zahtevaju kraće vreme izvršavanja u kompleksnim simulacionim modelima.

Simulacija ne garantuje optimalno rešenje. Na slici 4.2. prikazani su izlazni rezultati pet simulacionih eksperimenata. Može se zaključiti da zavisno promenljiva (y) ima minimalnu vrednost za $x \approx x_3$, ali se ne može tvrditi da je to baš x_3 . Čak pri ponovljenom simulacionom eksperimentu sa istim ulaznim podatkom $x = x_3$ i drugim periodom zagrevanja generatora niza pseudoslučajnih brojeva ili drugom trajanju simulacionog eksperimenta, vrednost promenljive (y'_3) biće po pravilu različita od prvodobijene vrednosti (y_3).



Slika 4.2.

Nezavisnost izlaznih rezultata od generatora pseudoslučajnih brojeva raste sa povećanjem dužine simulacionog eksperimenta. Ograničeni računarski resursi u vremenskom i finansijskom smislu utiču, pa se i to mora uzeti u obzir kod tumačenja rezultata.

Simulacioni modeli mogu se višestruko primenjivati. U fazi razvoja modela istraživač stiče nova saznanja postavljanjem i proveravanjem različitih hipoteza. Kada se program verifikuje a model oceni valjanim, prelazi se na korisnički nivo, gde postoje tri cilja primene: obučavanje korisnika, istraživanje

postojećih i budućih sistema.

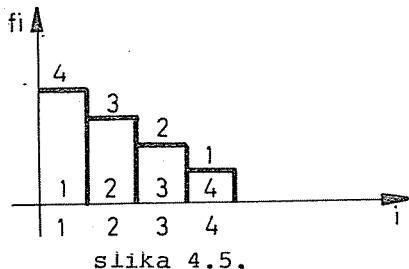
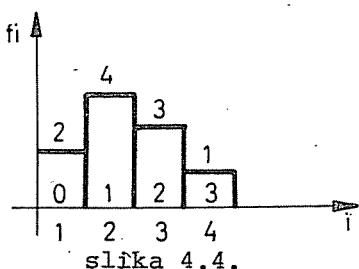
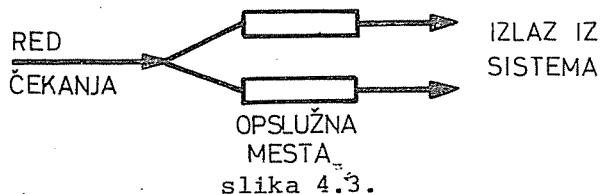
Obučavanje korisnika, igrača u simulacionom eksperimentu, značajno je, jer omogućava da se, bez straha od negativnih posledica po realni sistem, istražuju različite strategije. Poredjenjem izlaznih rezultata korisnik stiče predstavu o uspešnosti izabranih strategija, čime povećava svoju sposobnost ispravnog reagovanja u realnom sistemu.

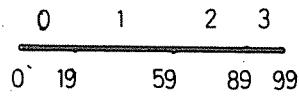
Postojeći sistemi ispituju se da bi se uočila uska grla ili problematične strategije. Simulacioni eksperimenti ukazuju na mogućnosti poboljšanja performansi sistema.

Posebno su značajna istraživanja budućih projektovanih sistema, kako s aspekta minimizacije ukupnih troškova, tako i s aspekta vremena trajanja simulacionog eksperimenta u odnosu na realizaciju realnog sistema.

4.4. Primer simulacije korišćenjem tablice slučajnih brojeva

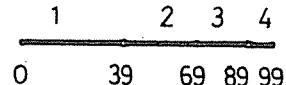
Neka je dat sistem opsluživanja za istovar kamiona sa dva opslužna mesta, neograničenim redom čekanja i FIFO disciplinom. Strukturni dijagram prikazan je na slici 4.3. Raspodela broja istovremenih dolazaka u sistem (slika 4.4.) i raspodela vremena opsluživanja (slika 4.5.) su empirijske raspodele dobite snimanjem na realnom sistemu. Diskretizacija ravnomerno





Diskretna slučajna promenljiva istovremenih dolazaka u sistem

slika 4.6.



Diskretna slučajna promenljiva vremena opsluživanja

slika 4.7.

rasporedjene slučajne promenljive vrši se definisanjem intervala, koji realizuju pojedini dogadjaj, kao odnos $\frac{f_i}{n} \cdot 10^m$, gde je:

f_i - frekvencija i-te klase,

n - ukupan broj realizacije ($n = \sum_{i=1}^s f_i$),

m - broj cifara slučajnog broja iz tabele slučajnih brojeva, i

s - broj klasa.

Za empirijske raspodele sa slike 4.4. i 4.5. važi $s=4$, $n=10$, $m=2$, pa se histogrami transformišu na brojnu osu (slike 4.6. i 4.7.) odnosno tabele 4.1. i 4.2.

Tabela 4.1. - broj nailazaka u sistem

klasa	realizuje dogadjaj	opseg slučajnih brojeva
1	0	00 - 19
2	1	20 - 59
3	2	60 - 89
4	3	90 - 99

Tabela 4.2. - vreme opsluživanja

klasa	realizuje dogadjaj	opseg slučajnih brojeva
1	1	00 - 39
2	2	40 - 69
3	3	70 - 89
4	4	90 - 99

Tablicu slučajnih brojeva koristimo horizontalno. Zagrevanje iznosi pet slučajnih brojeva, što znači da brojeve 85, 74, 54, 90 i 40 preskačemo. U sledećem nizu tabela primenjene su sl-

edeće oznake:

- (1) - simulaciono vreme,
- (2) - slučajni broj koji realizuje broj nailazaka u sistem,
- (3) - realizacija (2),
- (4) - slučajni brojevi koji realizuju vreme završetka opsluživanja,
- (5) - realizacija (4),
- (6) - broj jedinica na opslužnim mestima, i
- (7) - broj jedinica u redu čekanja.

Korak 1:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	69	2	02,63	2,3	.2	0

Generisane su dve dinamičke jedinice (02,63), jer broj 69 pada u treću klasu. Prva (02) opslužuje se jednu vremensku jedinicu, pa će napustiti sistem u trenutku 2. Druga dinamička jedinica (63) opslužuje se dve vremenske jedinice i sistem će napustiti u trećem trenutku. Stanje sistema: dve jedinice (02,63) opslužuje se, a u redu čekanja nema jedinica.

Korak 2:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	69	2	02,63	2,3	.2	0
2	12	0	-	-	1	0

U drugom trenutku nije se pojavila ni jedna nova dinamička jedinica, a jedna jedinica (02) napušta sistem, jer je njen vreme napuštanja sistema jednak simlacionom vremenu. Stanje sistema: jedna jedinica (63) opslužuje se, a u redu čekanja nema jedinica.

Korak 3:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	69	2	02,63	2,3	2	0
2	12	0	-	-	1	0
3	41	1	12	4	1	0

Generisana je nova dinamička jedinica (12). Jedna jedinica (63) napušta sistem. Stanje sistema ostaje nepromenjeno: jedna jedinica (12) opslužuje se, a u redu čekanja nema jedinica.

Korak 4:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	69	2	02,63	2,3	2	0
2	12	0	-	-	1	0
3	41	1	12	4	1	0
4	70	2	37,61	5,6	2	0

Generisane su dve dinamičke jedinice (37,61). Jedna jedinica (12) napušta sistem. Stanje sistema: dve jedinice (37,61) opslužuju se, a u redu čekanja nema jedinica.

Korak 5:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	69	2	02,63	2,3	2	0
2	12	0	-	-	1	0
3	41	1	12	4	1	0
4	70	2	37,61	5,6	2	0
5	42	1	87	8	2	0

Generisana je jedna dinamička jedinica (87). Jedna jedinica (37) napušta sistem. Stanje sistema ostaje nepromenjeno: dve jedinice (61,87) opslužuju se, a u redu čekanja nema jedi-

nica.

Korak 6:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	69	2	02,63	2,3	2	0
2	12	0	-	-	1	0
3	41	1	12	4	1	0
4	70	2	37,61	3,6	2	0
5	42	1	87	8	2	0
6	84	2	86,93	9,10+1	2	1

Generisane su dve dinamičke jedinice (86,93). Jedna jedinica (61) napušta sistem. Jedinica koja se pojavila (86) u ovom vremenskom trenutku zauzima opslužno mesto, a druga (93) svrstava se u red čekanja, gde ostaje bar još jedan trenutak. Da nije ovog dodatnog čekanja jedinica bi napustila sistem u 10. trenutku, a ovako najranije u $10+1=11$. Stanje sistema: dve jedinice se opslužuju (87,86), a jedna se nalazi u redu čekanja (93).

Korak 7:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	69	2	02,63	2,3	2	0
2	12	0	-	-	1	0
3	41	1	12	4	1	0
4	70	2	37,61	3,6	2	0
5	42	1	87	8	2	0
6	84	2	86,93	9,10+1+1	2	1
7	70	2	45,75	9+1, 10+1	2	3

Generisane su dve nove dinamičke jedinice (45,75). U ovom trenutku nema napuštanja sistema, pa nove jedinice zauzimaju

ju mesta u redu čekanja. Jedinica koja je već bila u redu čekanja (93) ostaje u njemu još jedan trenutak. Stanje sistema: Dve jedinice se opslužuju (87,86) a tri se nalaze u redu čekanja (93,45,75).

Korak 8:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	69	2	02,63	2,2	2	0
2	12	0	-	-	1	0
3	41	1	12	4	1	0
4	70	2	37,61	3,3	2	0
5	42	1	87	8	2	0
6	84	2	86,93	9,10+1+1	2	1
7	70	2	45,75	9+1+1,10+1+1	2	3
8	62	2	76,27	11+1, 9+1	2	4

Generisane su dve dinamičke jedinice (76,27), a jedna jedinica (87) napušta sistem. Opslugno mesto zauzima jedinica (93), a njeno vreme napuštanja sistema biće 12 trenutak. Stanje sistema: dve jedinice se opslužuju (86,93), a četiri se nalaze u redu čekanja (45,75,76,27).

Pretpostavimo da je postavljen zadatak da simulacija traje 8 vremenskih jedinica. Na osnovu istorije stanja sistema, kolone (6) i (7), izračunaćemo maksimalne i prosečne statistike na mestima opslugivanja i u redu čekanja.

Maksimalan broj zauzetih mesta opslugivanja je 2 i jednak je broju mesta opslugivanja. Realizovan je u 1,4,5,6,7 i 8. vremenskom trenutku.

Maksimalan broj jedinica u redu čekanja je 4 i realizovan je u 8. vremenskom trenutku.

Prosečan broj jedinica na mestima opslugivanja iznosi

$$\bar{q}_o = \frac{\sum_{i=1}^t (6)_i}{t} = \frac{14}{8} = 1,75$$

Prosečno iskorišćenje uređaja (I) je

$$I = \frac{\sum_{i=1}^t (6)_i}{m \cdot t} = \frac{14}{16} = 0,875$$

Prosečan broj jedinica u redu čekanja iznosi

$$\bar{q}_r = \frac{\sum_{i=1}^t (7)_i}{t} = \frac{8}{8} = 1,00$$

Ovim je simulacioni eksperiment završen. Poredjenjem sa izlaznim rezultatima drugih eksperimenata mogu se analizirati performanse sistema.

Kretanje sata u navedenom primeru bilo je ravnomerno, pa je u svakom trenutku vršeno ispitivanje postojanja dogadjaja koji svojom realizacijom menjaju stanje sistema. Takav način efikasan je u slučajevima kada postoji velika verovatnoća realizacije bar jednog dogadjaja u svakom trenutku. Ako su ti intervali veći, efikasnije je da se sat kreće skokovito. Navedimo jedan primer:

Neka je dat sistem opsluživanja za istovar brodova sa jednim opslužnim mestom, neograničenim redom čekanja i FIFO disciplinom u redu čekanja. Raspodela intervala izmedju uzastopnih nailazaka u sistem (tabela 4.3.) i raspodela vremena opsluživanja (tabela 4.4.) su transformisane empirijske raspodele na koje je primenjen isti postupak kao i u prethodnom primeru.

Tabela 4.3. - intervali izmedju uzastopnih nailazaka u sistem:

klasa	realizuje dogadjaj	opseg slučajnih brojeva
1	2	00 - 24
2	3	25 - 59
3	5	60 - 90
4	7	91 - 99

Tabela 4.4. - vreme opsluživanja:

klasa	realizuje dogadjaj	opseg slučajnih brojeva
1	3	00 - 55
2	4	56 - 59
3	5	60 - 83
4	6	84 - 99

Tablicu slučajnih brojeva koristimo horizontalno. Zagrevanje iznosi 40 slučajnih brojeva, pa preskačemo prva dva reda. Samo oznaka (2) menja značenje:

(2) - slučajni broj koji realizuje interval izmedju uzastopnih nailazaka u sistem.

Korak 1:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0

Prva osnovna situacija: na početku simulacije određuje se trenutak nailaska prve jedinice u sistem. Može se postaviti i druga osnovna situacija da se istovremeno generiše trenutak nailaska druge jedinice i vreme opsluživanja prve. Izbor jedne od ovih mogućnosti zavisi od opredeljenja eksperimentatora - postupci su ravnopravni.

Korak 2:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0
4	99	11	88	10	1	0

Sledeća jedinica pojaviće se u 11 trenutku, a jedinica koja je sada ušla u sistem ostaće do 10. trenutka. Precrtali smo dogadjaj koji se realizovao (49). Ovo je druga osnovna situacija, jer se generišu slučajni brojevi i za interval sledećeg nailaska i za vreme opsluživanja.

Korak 3:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0
4	99	11	88	10	1	0
10	-	-	-	-	0	0

Jedinica je napustila sistem. Ovo je treća osnovna situacija: pošto nema novog nailaska u sistem, ne generiše se ni jedan slučajni broj.

Korak 4:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0
4	99	11	88	10	1	0
10	-	-	-	-	0	0
11	29	14	02	14	1	0

Realizuje se druga osnovna situacija

Korak 5:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0
4	99	11	88	10	1	0
10	-	-	-	-	0	0
11	29	14	02	14	1	0
14	91	21	02	17	1	0

Ovaj korak predstavlja kombinaciju izmedju druge i treće osnovne situacije, jer istovremeno jedna jedinica odlazi a druga dolazi u sistem. Kao što se vidi, postupa se kao u slučaju druge osnovne situacije, ali je razlika u tome da se stanje sistema sada ne menja.

Korak 6:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0
4	99	11	88	10	1	0
10	-	-	-	-	0	0
11	29	14	02	14	1	0
14	91	21	02	17	1	0
17	-	-	-	-	0	0

Realizuje se treća osnovna situacija. Stanje sistema se menja: broj jedinica u sistemu smanjuje se za 1.

Korak 7:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0
4	99	11	88	10	1	0
10	-	-	-	-	0	0
11	29	14	02	14	1	0
14	91	21	02	17	1	0
17	-	-	-	-	0	0
21	58	24	94	27	1	0

Realizuje se druga osnovna situacija: Stanje sistema se menja: broj jedinica u sistemu se povećava za 1.

Korak 8:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0
4	99	11	88	10	1	0
10	-	-	-	-	0	0

11	29	14	02	14	1	0
14	91	21	02	17	1	0
17	-	-	-	-	0	0
21	58	24	94	27	1	0
24	30	27	22	27+3	1	1

Realizuje se druga osnovna situacija. Po prvi put se pojavljuje čekanje u sistemu. Kao i kod ravnomernog kretanja sata i ovde dodajemo razliku izmedju tekućeg vremena i vremena prethodnog koraka. Samo ovde je razlika u načinu kretanja sata, pa je razlika $24-21=3$.

Korak 9:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	49	4	-	-	0	0
4	99	14	88	10	1	0
10	-	-	-	-	0	0
11	29	14	02	14	1	0
14	91	21	02	17	1	0
17	-	-	-	-	0	0
21	58	24	94	27	1	0
24	30	27	22	27+3	1	1
27	81	32	81	32+3	1.	1

Simulacija se može i dalje produžiti. Sledeći korak je u 30 ($27+3$) vremenskom trenutku. Pretpostavimo da je simulacija završena u 27 trenutku. Statistike ćemo izračunati na sledeći način.

Prosečan broj jedinica na mestima opsluživanja iznosi

$$\bar{q}_o = \frac{\sum_{i=2}^{k-1} [(6)_i \cdot (t_{i+1} - t_i)]}{t_k}$$

gde je :

k - broj koraka

i - tekući korak

$$q_o = \frac{0(4-1)+1(10-4)+0(11-10)+1(14-11)+1(17-11)+0(21-17)+1(24-21)+1(27-24)}{27}$$

$$q_o = \frac{4+3+6+3+3}{27} = 0,703$$

Prosečno iskorišćenje uređaja (I) je

$$I = \frac{\sum_{i=2}^{k-1} [(6)_i \cdot (t_{i+1} - t_i)]}{m \cdot t_k} = 0,703$$

$I = \bar{q}_o$ jer je broj mesta $m=1$.

$$\bar{q}_r = \frac{\sum_{i=2}^{k-1} [(7)_i \cdot (t_{i+1} - t_i)]}{t_k} = 0,111$$

TABLICA SLUČAJNIH BROJEVA

8574	5490	4069	0263	1241	1270	3761	4287	8486	9370
4575	6276	2709	4732	0301	8730	1672	5474	1585	1237
4999	8829	0291	0258	9430	2281	8148	7695	6015	3112
7627	6090	9592	0416	1278	4703	9764	3171	7567	1210
4315	5778	1508	9166	7012	1845	6474	4830	9659	9171
6987	8055	0026	8093	7121	8061	0152	2984	6916	6010
0387	9994	0103	3755	4252	5806	1301	4848	9949	1027
5581	2184	9763	8160	5917	1851	3464	6626	8904	1004
6531	8780	1572	1400	6529	1274	4844	9649	0976	4698
5735	5350	9828	5652	3698	5365	1580	7026	2630	9280
6092	0979	6190	2410	0650	3211	2402	4702	9315	3013
1791	3893	7019	3530	4468	6165	9063	5292	4224	4345
9746	5248	3866	3797	8070	5221	2595	2072	1334	5398
0118	1348	6571	0497	4376	2543	3898	0534	4308	2171
0986	3888	4252	5736	7693	8166	1869	4680	0564	8616
8057	9706	1402	3354	3701	8928	9353	3909	5738	6473
5161	0803	4073	7434	7356	1305	4898	1645	3646	5986
2961	0338	2608	2693	3476	2440	2977	4174	7437	9074
1494	7129	7673	2919	4907	5589	3983	8411	5153	7307
8153	7758	3428	3110	1047	6293	8630	0712	4302	5871
0703	8148	7855	2170	5015	0953	7071	2357	1511	4598
6028	1015	4895	1516	6818	5694	5275	1714	3953	9486
6961	1672	8765	3065	1761	2424	2032	8957	8525	2920
2030	5510	1801	8771	2035	4242	4375	9175	0284	5533
3503	5668	5292	1721	4272	9143	3494	7080	1727	4707
9005	5857	2126	7494	5584	3955	1727	0076	4320	3578
4518	7818	9407	9389	6034	0656	6966	8356	7842	6585
8195	5225	3978	7487	5701	8067	2010	7387	7510	4794
7982	9039	8109	1998	9275	0267	8939	5878	6254	0464
1114	4173	7596	0203	5920	3676	0579	1230	2415	5492
9333	2932	6679	2076	3280	1962	2502	2071	1210	3246
1998	5372	7533	0019	3413	2367	5592	7010	4641	6270
1837	1007	6405	3418	4942	7972	3785	3519	2542	1894
4217	9944	6682	0837	0956	3219	7426	2489	7487	3091
3384	8305	6196	3525	1063	5664	8678	6198	5745	1637
1047	5198	5523	0396	1968	6818	1652	9855	0798	2025
1900	0292	1773	4123	7839	3961	3979	1686	4775	5959
1508	3332	8316	5256	1709	0512	0672	6986	8938	1721
4493	6440	9044	0508	7337	2065	7251	7023	1727	4626
3200	2490	0853	5070	2255	8360	2759	5668	2989	3184
1656	0859	0712	1918	0928	0237	7873	6094	1613	1280
6171	7326	6113	2654	2431	7684	5468	6224	3525	0686
2698	6736	7814	4784	6130	5475	9295	0945	4685	2585
0692	8519	5987	1562	8988	7649	7389	7846	8060	8951
2484	1468	2655	1306	8861	8324	5760	5872	1541	9695
9602	8305	5958	0511	9078	6906	1569	0315	5254	7829
6521	2651	0366	3104	7570	5470	1782	2131	3409	1444
3678	0731	0969	1343	4359	1436	7927	9316	4380	9309
1683	3172	5662	7490	8414	3896	0449	7647	0072	7941
2614	0462	2591	9675	1616	0154	7874	0752	7601	4049

TABLICA SLUČAJNIH BROJEVA (nastavak)

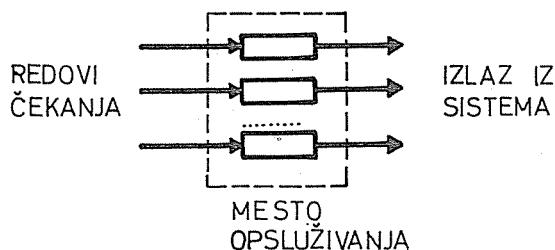
1894	1248	0416	0745	6642	7078	3121	3171	3895	7675
7032	8036	2050	2484	4669	0690	0205	9539	0482	5797
1426	1252	0709	4218	4375	6363	0624	1397	7561	4018
4865	7453	4070	4465	5486	8897	5237	0600	1052	5251
2339	9395	9457	8558	5913	6325	2640	9597	3482	2056
4247	2149	0753	0965	0095	1826	0903	1412	9436	7089
2910	1727	8461	4465	7209	6594	5105	3270	6554	8376
4731	2591	7894	3148	7462	4435	1951	0423	0433	1164
6454	5232	0503	7255	4742	5819	1820	6019	7111	9741
5146	3267	9615	9488	6043	7436	8931	0885	7967	3564
8196	0946	4332	3956	1508	4586	6036	6286	1570	9748
0649	8619	5031	5236	6617	9369	7037	5865	2189	1963
8704	9814	3726	7721	3814	4953	7309	8439	9967	8492
2560	6405	7827	3187	7465	3278	5102	5161	8169	1102
3476	7047	9251	2851	1559	5795	6076	4626	3729	9343
1515	7193	2522	2263	0487	8444	6186	5410	5927	3205
9124	8972	0800	1484	0623	1397	0628	6046	1930	5932
1013	5262	0488	8593	8261	3179	8058	0101	3205	9069
2594	1831	4170	4983	8174	0435	1881	3212	1377	8757
0961	6698	0498	3894	5685	5690	8316	1829	6782	7063
0190	1751	4847	8577	1315	0043	8150	5217	5684	5161
8548	8291	8603	2036	8937	6919	0478	0293	0360	8050
1935	2972	8282	2552	7667	5282	5415	3586	4556	6981
7322	9143	5959	9318	8438	6220	3707	9760	6938	7619
2532	5953	6386	7040	1086	9268	5246	5494	3459	5661
3523	2326	8175	0600	1750	5812	4367	5159	5847	4636
7293	6383	6969	0677	2302	1300	1646	7587	8076	8346
1027	6265	8287	6544	0141	4398	5055	6762	0283	0020
2229	5941	5867	8265	1431	1593	6272	0738	5890	1038
0882	2398	6361	4666	4455	0467	0149	9013	3693	6859
2059	8752	9434	0464	0748	0201	5345	1619	8606	8647
5626	5815	4147	6787	4882	7567	6775	1797	9501	0140
8516	1049	0190	3232	6398	1662	2754	8860	1024	2389
6476	2952	6968	2422	3998	5991	0721	9806	4653	4877
5685	6782	3294	0126	0807	7996	9689	6526	7480	8292
0206	5368	9049	0311	7973	5764	1345	1676	1461	2130
0517	8823	0745	5303	3242	4758	2141	4677	2940	6923
6494	9271	6508	1637	3722	7319	3142	3861	4137	8371
1798	1491	9262	2734	6121	2671	2564	4579	9503	0635
8965	7171	1613	1605	1801	9855	3652	9492	3293	1327
4534	1953	4792	7968	1941	5420	1473	0921	8934	0850
5460	5249	5811	4234	8463	3586	4871	7803	0868	1791
9197	9878	3810	4330	6101	7771	7232	2142	5423	8060
6917	7780	6692	4591	2572	7228	3183	4924	4807	7439
1558	6173	2451	5303	1474	8656	0344	1653	1010	2352
1810	4621	6176	2435	2789	1797	8488	6815	5297	9013
2737	7676	8155	9129	0474	5819	3961	1070	9418	6564
8762	0867	6013	0067	0727	0914	6774	0182	8321	2890
6906	3708	7091	7989	1116	4594	0393	6201	5051	0734
4940	8482	1916	4646	2981	3241	8943	2729	4156	7497

5. VIŠEFAZNI VIŠEKANALNI SISTEMI

Primena analitičkih modela /11/, /30/, /31/, /50/, za proračun efikasnosti sistema opsluživanja ograničena je na jednofazne (faza predstavlja jedinstven skup operacija opsluživanja) višekanalne sisteme sa Erlangovom raspodelom na ulazu i mestima opsluživanja oblika ($E_x/E_y/C/K$), zato što ne postoje jedinstveni razradjeni modeli za praktičnu primenu u slučaju: opšte raspodele nailaska i opsluživanja, jedno i višekanalnih sistema i opšte discipline u redu čekanja. Simulacioni model koji obuhvata sve navedene zahteve pogodniji je u odnosu na analitičke modele, zato što efikasno istražuje sisteme opsluživanja nezavisno od zadatih statičkih elemenata modela.

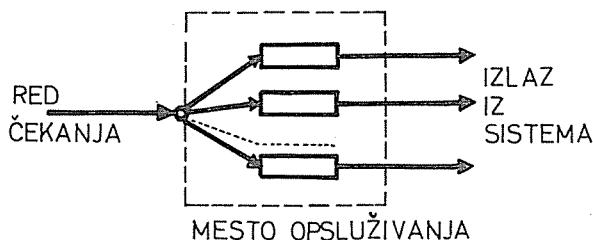
Poredjenjem rezultata analitičkih modela teorije redova čekanja i simulacionog modela za jednofazni višekanalni sistem utvrđena je približna jednakost dobijenih rezultata /29/.

Programi dati u radovima /11/ i /20/ opisuju funkcionisanje jednofaznog višekanalnog sistema, pri čemu /11/ima mogućnost prelaska iz reda veće dužine u red sa manjom dužinom predu istom fazom. Optimizacija brzine izvršavanja programa postignuta je orijentacijom modela na vremenske trenutke u kojima dolazi do promene stanja bilo kog elementa u modelu. U oba slučaja standardni ulaz u sistem je eksponentijalnoj raspodeli, dok u programu /20/ postoji mogućnost da korisnik sam definiše svoju raspodelu, ali se to radi izmenom početnih uslova u samom programu što je dosta nezgodno. Na slici 5.1. prikazan je strukturni dijagram jednofaznog višekanalnog sistema sa redom čekanja pred svakim kanalom.

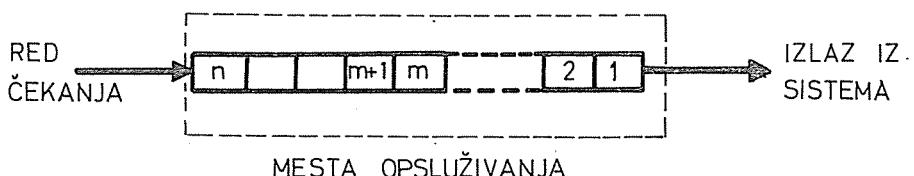


slika 5.1.

U radu /23/ definisana su dva strukturno različita modela jednofaznog višekanalnog sistema. Prvi od njih (slika 5.2.) realizuje paralelne kanale opsluživanja, ali za razliku od modela /11/ jedinice pristupaju opslužnim mestima iz beskonačnog izvora preko jedinstvenog reda čekanja.



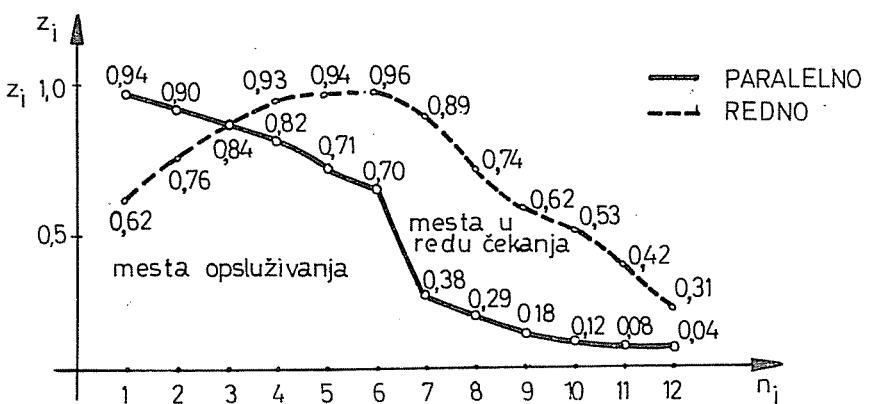
slika 5.2



slika 5.3.

Vrema na jednom mjestu opsluživanja nezavisno je od operacija na ostalim kanalima. Drugi model (slika 5.3.) realizuje više rednih mesta opsluživanja. Treba napomenuti da strukturni dijagram jednofaznog sistema sa više rednih kanala podseća na strukturni dijagram višefaznog jednokanalnog sistema, ali se od njega bitno razlikuje po tome što jedinica koristi samo jedno mjesto opsluživanja ignorirajući sva ostala. Neka je dat sistem sa n rednih kanala i neka je u trenutku pojave k -te jedinice u sistemu zauzeto m -to mjesto. Tada će se k -ta jedinica opsluživati na $m+1$ kanalu. Pretpostavimo da je vreme završetka opsluge $k-1$ jedinice (t_{k-1}) veće od (t_k). Tada k -ta jedinica ima dodatno zadрžavanje od $t_{k-1} - t_k$ (u opštem slučaju $t_{k-m} - t_k$), pa napušta sistem istovremeno sa svim prethodnim jedinicama, odnosno ako su sva opslužna mesta sa manjim indeksom slobodna. Očit nedostatak ovakvih sistema je da u trenutku nailaska k -te jedi-

nice može samo n-to mesto biti zauzeto, pa da se k-ta jedinica svrsta u red čekanja pored n-1 slobodnih kanala. Primjenjuju se u slučaju kada postoje prostorna ograničenja za realizaciju paralelnih opslužnih modela. Oba modela /23/ koriste empirijske raspodele na ulazu u sistem i na mestu opsluživanja. Na slici 5.4. prikazana je zauzetost (z_i) opslužnih mesta i mesta u redu čekanja, pri 6 kanala (1-6) i 6 mesta za čekanje (7-12).

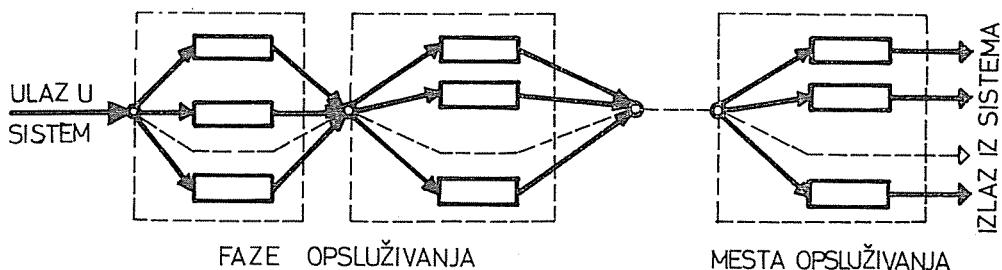


slika 5.4.

Iskorišćenje mesta u opslužnom sistemu

U radu /24/ definisan je model višefaznog višekanalnog sistema sa ograničenim ili neograničenim redovima čekanja pred svakom fazom (bez otkaza), slika 5.5. Svaka jedinica pri nailasku u sistem pristupa redu čekanja pred prvom fazom, koji je uvek neograničen, što je u praksi slučaj kada ne postoji alternativni sistem opsluživanja. U redu čekanja jedinica gubi identitet, pa se prelaz na mesto opsluživanja vrši po slučajnoj disciplini (ovim se postiže značajna ušteda memorijskog prostora) i tu se zadržava najmanje za generisano vreme opsluživanja. Dodatno zadržavanje posledica je nepostojanja slobodnih mesta u sledećem redu čekanja i mestima opsluživanja. Tok jedinica kroz model jedinstven je: svaka jedinica mora biti opslužena u svakoj od faza, a po potrebi boravi u redovima čekanja. Jedinica napušta sistem kada je završeno opsluživanje u poslednjoj fazi. Ovo su osnovne razlike u odnosu na model koji će biti detaljno

opisan u daljem tekstu.



slika 5.5.

Strukturni dijagram višefaznog višekanalnog sistema bez otkaza

5.1. Simulacioni model

U transportnim i skladišnim sistemima često se postavlja zahtev za višefaznim opsluživanjem sa mogućnošću otkaza pri ulasku u sistem i napuštanju sistema posle neke od faza opsluživanja. Navešće se neki primjeri iz prakse.

1. Dnevna nega i tehničko održavanje vozila:

1. faza - tankovanje goriva,
2. faza - kontrola ispravnosti,
3. faza - pranje,
4. faza - opravke,

Napuštanje sistema moguće je posle 1. i 3. faze.

2. Istovar robe u skladištima:

1. faza - istovar robe iz kamiona,
2. faza - kontrola robe,
3. faza - paletizacija,
4. faza - postavljanje paleta na prijemni rolgang,
5. faza - kontrola gabarita paleta.

Napuštanje sistema je moguće posle druge i pete faze.

3. Proces pripreme robe za distribuciju (komisioniranje):

1. faza - prikupljanje narudžbina u zoni 1 skladišta,
2. faza - prikupljanje narudžbina u zoni 2,

3. faza - prikupljanje narudžbina u zoni 3, itd.

Napuštanje sistema je moguće posle svake faze opsluživanja zavisno od broja traženih artikala.

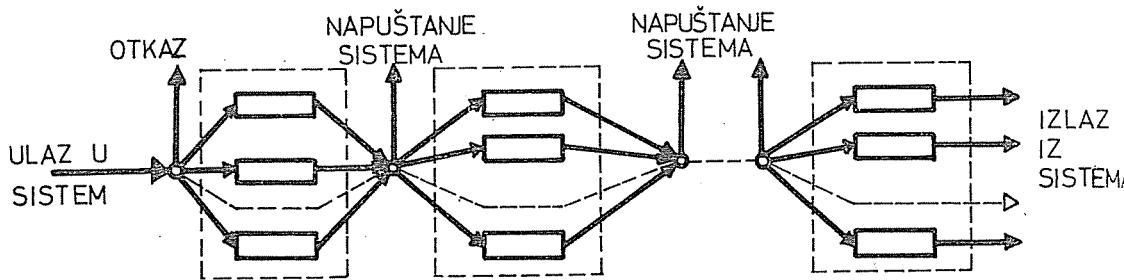
Na slici 5.6. prikazan je strukturni dijagram višefaznog višekanalnog sistema sa otkazima.

Statički elementi modela su: broj kanala opsluživanja i broj mesta u redu čekanja po fazama. Promena ovih elemenata je moguća po želji eksperimentatora, ali su fiksni u okviru jednog simulacionog eksperimenta.

Dinamički elementi modela:

- raspodela intervala nailazaka u sistem i raspodela vremena opsluživanja po fazama zadaju se stepenom Erlangove raspodele i srednjim vremenom opsluživanja.

- verovatnoća napuštanja sistema posle svake od faza (u ekstremnim slučajevima za $P_i=0$ sve jedinice prelaze u fazu $i+1$. a za $P_i=1$ sve jedinice napuštaju sistem posle i -te faze);
- disciplina u redu čekanja.



slika 5.6.

Strukturni dijagram višefaznog višekanalnog sistema sa otkazima

Na početku simulacionog eksperimenta svi kanali opsluživanja i sva mesta u redovima čekanja u svim fazama su slobodni. Zagrevanjem modela početno stanje procesa više odgovara realnosti, jer su pojedina mesta opsluživanja i mesta u redu čekanja zauzeta.

Metod Monte Karlo koristi se za generisanje intervala nailazaka u sistem i vremena opsluživanja za svaku fazu i opslužno mesto po datoj raspodeli, kao i za generisanje pseudoslučajnog broja za ispitivanje napušta li jedinica sistem posle neke

neke faze ili ne.

Stanje sistema opsluživanja odredjeno je:

- trenutkom pojave sledeće jedinice u sistemu,
- brojem jedinica koje se istovremeno opslužuju po pojedinim fazama,
- brojem jedinica koje istovremeno čekaju pred pojedinim fazama,
- brojem jedinica koje u datom trenutku napuštaju sistem posle neke od faza.

Za tok simulacionog eksperimenta posebno su značajni vremenski trenuci u kojima aktivnosti započinju ili završavaju, jer se tada dešavaju svi dogadjaji u modelu, čime se menjaju stanje sistema.

Pretraživanje završetaka aktivnosti počinje od poslednje faze. Sve jedinice čije je vreme završetka aktivnosti jednakost tekućem simulacionom vremenu, napuštaju sistem. Zatim se vrši ispitivanje reda čekanja. Za prelazak iz reda čekanja na opslužno mesto potrebno je da se ispune dva uslova: da postoji bar jedna jedinica u redu čekanja i da bude bar jedno slobodno opslužno mesto. Ako u redu čekanja postoji više jedinica, izbor jedinice koja će preći na slobodno opslužno mesto vrši se u skladu sa izabranom disciplinom u redu čekanja. Trajanje aktivnosti na opslužnom mestu jednakost je očekivanim vremenu napuštanja faze opsluživanja. Proces prelaza iz reda čekanja na opslužna mesta produžava se sve dok postoji i slobodna opslužna mesta i red čekanja.

Sledeći korak je analiza završetka aktivnosti u pretposlednjoj fazi. Kada se vreme završetka aktivnosti izjednači sa tekućim simulacionim vremenom vrši se jedno od dva alternativna ispitivanja.

U prvom slučaju, ako nije bilo nikog u redu čekanja ili postojanje reda čekanja nije predvidjeno tehničkim procesom, ispituje se da li ima slobodnih opslužnih mesta. Ako je odgovor pozitivan generiše se pseudoslučajan broj čija realizacija održeduje da li jedinica napušta sistem ili prelazi na opslužno mesto kada se generiše vreme opsluživanja, odnosno vreme napuštanja faze. Ako je odgovor negativan jedinica ostaje još jedan

vremenski trenutak u pretposlednjoj fazi.

U drugom slučaju, kada red čekanja postoji, ispituje se da li je dužina reda maksimalno dozvoljena. Ako jeste onda se jedinica zadržava u pretposlednjoj fazi još jedan trenutak, a ako nije onda se generiše pseudoslučajan broj čija realizacija određuje da li jedinica napušta sistem ili prelazi u red čekanja (u ovom slučaju generiše se očekivano vreme napuštanja faze). Postupak napuštanja opslužnog mesta po završenom opsluživanju ponavlja se rekurzivno za sve faze idući u nazad ka prvoj.

Red čekanja pred prvom fazom formira se iz beskonačnog izvora, tako što se po datoj raspodeli na slučajan način generiše interval nailaska dve uzastopne jedinice. Red čekanja pred prvom fazom ograničen je. U slučaju da su sva mesta u redu čekanja zauzeta, novogenerisana jedinica otkazuje od opsluživanja.

Ovim je završeno ispitivanje završetaka svih aktivnosti i generisanje trajanja novih. Sat u modelu pomera se za jednu simulacionu jedinicu, pa se ceo proces ponavlja sve dok ne istekne zadato simulaciono vreme.

Promene stanja sistema statistički se prate. Kada se simulaciono vreme izjednači sa vremenom zagrevanja modela sve ukupne i maksimalne statistike izjednačuju se sa trenutnim, a vreme dodatnog zadržavanja na opslužnom mestu po završenom opsluživanju, broj jedinica koje su napustile sistem, ukupno vreme u redu čekanja i na opslužnim mestima izjednačavaju se sa nulom.

5.2. Organizacija podataka

Ulagni i statistički podaci (ukupno ih ima 17 tipova), smešteni su u matrici MM ($N+1$, 17), gde je N-broj faza opsluživanja. Podaci po kolonama imaju sledeće značenje:

- 1 - broj mesta opsluživanja,
- 2 - srednje vreme opsluživanja,
- 3 - stepen Erlangove raspodele,
- 4 - broj mesta u redu čekanja,
- 5 - verovatnoća napuštanja sistema,
- 6 - disciplina u redu čekanja,
- 7 - trenutni broj jedinica na mestu opsluživanja,

- 8 - ukupan broj jedinica na mestu opsluživanja od početka simulacije,
- 9 - maksimalan broj jedinica na mestu opsluživanja,
- 10 - trenutni broj jedinica u redu čekanja,
- 11 - ukupan broj jedinica u redu čekanja od početka simulacije,
- 12 - maksimalan broj jedinica u redu čekanja,
- 13 - ukupno vreme na mestu opsluge,
- 14 - ukupno vreme u redu čekanja,
- 15 - dodatno zadržavanje na mestu opsluživanja,
- 16 - broj jedinica koje su napustile sistem,
- 17 - broj jedinica koje nisu čekale u redu čekanja (broj nultih ulaza).

Očekivano vreme napuštanja faze opsluživanja nalazi se u matrici NN (N, N) za jedinice koje se nalaze na opslužnim mestima, odnosno u matrici KK (N, N) za jedinice u redu čekanja (u priloženom listingu N ima vrednost 10, a po želji može se menjati).

Niz B(11) služi za memorisanje rezultata simulacionog eksperimenta. Ostale promenljive su:

- ISV - simulaciono vreme,
- IZV - vreme zagrevanja modela,
- IZ - izbor opcije za ispitivanje medjurezultata,
- N - broj faza opsluživanja,
- SRV - srednje vreme nailaska u sistem,
- IVR - stepen Erlangove raspodele nailazaka u sistem,
- JTT - trenutak pojave sledeće jedinice u sistemu,
- K - tekuće simulaciono vreme,
- JD - broj jedinica koje su otkazale od opsluživanja,
- LC - generisano vreme opsluživanja ili interval nailaska,
- I - faza koja se trenutno ispituje,
- IZI - naredna faza,
- J - opslužno mesto,
- IP, IQ - redni broj slobodnog ili aktivnog mesta opsluživanja ili mesta u redu čekanja,
- KQ - najranije vreme završetka opsluživanja u tekućoj fazi (definiše se pri prelasku na opslužno mesto).

Ostale promenljive su lokalnog značaja.

5.3. Struktura programa OPS

Glavni program poziva potprograme za učitavanje podataka P 100, postavljanje matrica na nulu P 650, i postavlja vreme pojave prve jednačine u sistemu. Simulacioni proces odvija se u petlji po K. Kada je tekuće vreme jednak vremenu zagrevanja poziva se potprogram za reinicijalizaciju statistika P 650. Ispitivanje kritičnih dogadjaja vrši se sa p 3000. Ako je vreme pojave sledeće jedinice jednak tekućem simulacionom vremenu poziva se P 1100 za generisanje sledećeg vremena nailaska. Potom se pozivaju: P 1000 za traženje maksimalnih dužina reda čekanja i broja jedinica po fazama, i P 1700 za obračunavanje ukupnog vremena u redu čekanja i opslužnim mestima po fazama. Opciono se poziva P 1600 za ispisivanje trenutnog stanja sistema na ekranu. Proces se ponavlja sve dok ne istekne zadato simulaciono vreme (ISV), a potom se sa P 1150 izračunavaju i ispisuju rezultati simulacionog eksperimenta.

P 100 učitava: broj faza opsluživanja, srednje vreme nailaska i stepen Erlangove raspodele, a za svaku od faza: broj mesta u redu čekanja, broj mesta opsluživanja, srednje vreme opsluživanja, stepen Erlangove raspodele, verovatnoću napuštanja sistema i disciplinu u redu čekanja. Treba napomenuti da su srednje vreme opsluživanja i verovatnoća napuštanja sistema realni brojevi, a sve ostale promenljive su celobrojne. Matrica MM definisana je kao celobrojna, pa se obe realne promenljive svode na celobrojne množenjem sa 1000, odnosno sa 100, što čini nužnom inverznu operaciju deljenja u trenutku njihove primene. Na kraju se učitava: vreme zagrevanja modela, simulaciono vreme i opcija za ispitivanje medjurezultata. U cilju zagrevanja generatora ravnomerno rasporedjenih pseudoslučajnih brojeva poziva se potprogram SLUCAJ odgovarajući broj puta.

P 600 reinicijalizuje statistike po fazama, tako što ukupan i maksimalan broj jedinica postaje jednak trenutkom (važi i za red čekanja i za mesta opsluživanja), dok se: ukupno vreme

na mestu opsluživanja i redu čekanja, dodatno zadržavanje na mestu opsluge, broj jedinica koje su napustile sistem i broj jedinica koje nisu čekale u redu čekanja izjednačuju se nulom.

P 650 postavlja na nulu: sve tekuće statistike (7-17) iz matrice MM po fazama, kao i sve članove matrica NN i KK čime se definiše početno stanje sistema takvo da su sva opslužna mesta i mesta u redu čekanja slobodna.

P 1000 ispituje maksimalnu dužinu reda čekanja i broja jedinica po fazama, tako što se trenutne vrednosti porede sa maksimalnim do tog trenutka, pa ako je trenutna vrednost veća ona postaje novi maksimum.

P 1100 poziva potprogram ERL, a zbir novogenerisanog intervala i tekućeg simulacionog vremena definiše trenutak pojave sledeće jedinice u sistemu. Sledеće pozivanje potprograma ERL služi za odredjivanje vremena opsluživanja za novu jedinicu. Zatim se ispituje stanje opslužnih mesta u prvoj fazi ($I = 1$) pomoću P 3400. Ako postoji slobodno opslužno mesto (IP), tada ga novogenerisana jedinica zauzima i ostaje u njemu bar za vreme opsluživanja. Obračunavaju se statistike: trenutni i ukupni broj jedinica na opslužnim mestima, kao i broj nultih ulaza (rastu za po 1). U slučaju da su sva opslužna mesta zauzeta ($IP=0$) poziva se P 3700 za ispitivanje slobodnih mesta u redu za čekanje. Ako su sva mesta zauzeta ($IQ=0$) jedinica otkazuje od opsluge, a ako postoji slobodno mesto jedinica ga zauzima. Najranije vreme napuštanja faze za jedan je veće od vremena koje bi bilo potrebno da je jedinica mogla odmah da stupi na opslužno mesto. Trenutan i ukupan broj jedinica u redu čekanja povećavaju se za jedan.

P 1150 izračunava i ispisuje rezultate simulacionih eksperimenata - broj i procenat jedinica koje su otkazale od opsluživanja, a za svaku od faza prosečno vreme; opsluživanja, u redu čekanja sa i bez nultih izlaza; prosečan i maksimalan broj jedinica na opsluživanju i redu čekanja; procenat iskorišćenja: mesta opsluživanja i mesta u redu čekanja; procenat: nultih ulaza i jedinica koje su napustile sistem. Posle svake faze poziva se dinamički stop P 5000.

P 1600 na ekranu ispisuje tekuće simulaciono vreme i trenutak nailaska sledeće jedinice. Stanje sistema, opisano očeki-

vanim vremenom završetka opsluživanja, ispisuje se po fazama za svako mesto opsluživanja i svako mesto u redu čekanja. Po završetku kompletног ispisa poziva se dinamički stop P 5000.

P 1700 za svaku fazu obračunava ukupno vreme u redu čekanja i na mestima opsluživanja kao zbir dotadašnje vrednosti i trenutnog broja jedinica u redu čekanja, odnosno na opslužnim mestima.

P 3000 ispituje kritične dogadjaje po fazama. Definiše tekuću i narednu fazu. Poziva P 3200 za ispitivanje aktivnosti na opslužnim mestima i P 3100 za prelazak jedinice iz reda čekanja na opslužno mesto.

P 3100 ako red čekanja ne postoji ili u njemu nema nikog ovaj potprogram se napušta. U suprotnom za aktuelnu fazu ispituje se ima li slobodnih opslužnih mesta P 3400. Ako su sva mesta zauzeta poziva P 3800. Ako je bar jedno opslužno mesto slobodno opcionalno se poziva jedan od potprograma P 4100, P 4200 P 4300, P 4400 ili P 4500 u zavisnosti od izabrane discipline u redu čekanja. Izabrana jedinica zauzima opslužno mesto (IP) i ostaje bar do trenutka KQ. Trenutni broj jedinica u redu čekanja opada za jedan, a trenutni i ukupni broj jedinica na opslužnim mestima povećava se za jedan.

P 3200 ispituje redom sve aktivnosti na opslužnim mestima u okviru jedne faze. Počinje se od prvog opslužnog mesta. Ako opsluživanje nije završeno prelazi se na sledeće opslužno mesto. U suprotnom postoje tri mogućnosti: a) ako red čekanja pred sledećom fazom ne postoji ili postoje slobodna opslužna mesta čiji je broj veći od broja jedinica u redu čekanja poziva se P 3500 za prelazak jedinice u sledeću fazu bez boravka u redu čekanja; b) ako je trenutni broj jedinica u redu čekanja jednak broju mesta u redu, onda se jedinica koja bi trebala da napusti sistem zadržava još jednu vremensku jedinicu, a statistika dodatnog zadržavanja raste za jedan; c) ako nisu ispunjeni uslovi pod a) ili b) poziva se P 3300 za prelazak jedinice u red čekanja pred sledećom fazom.

P 3300 oslobođa opslužno mesto i smanjuje trenutni broj jedinica u tekućoj fazi za jedan. Generisani pseudoslučajni broj poredi se sa verovatnoćom napuštanja sistema. Ako je manji

jedinica napušta sistem. U suprotnom trenutni i ukupni broj jedinica raste za jedan. Jediniča zauzima poslednje mesto u redu čekanja, a trenutak najranijeg napuštanja faze jednak je zbiru tekućeg vremena, generisanog vremena opsluživanja i jedinice (zbog zadržavanja u redu čekanja).

P 3400 ispituje ima li slobodnih opslužnih mesta. Ako postoji bar jedno takvo mesto promenljiva IP postaje jednak njegovom rednom broju. Ako su sva opslužna mesta zauzeta promenljiva IP postaje jednak nuli.

P 3500 za prelazak iz faze u fazu bez boravka u redu čekanja. Prvo se pomoću P 3400 ispituje ima li slobodnih opslužnih mesta. Ako su sva zauzeta jedinica provodi još jedan trenutak na opslužnom mestu. U suprotnom ga napušta i broj jedinica opada za jedan. Generisani pseudoslučajni broj poredi se sa verovatnoćom napuštanja sistema. Ako je manji jedinica napušta sistem, a ako je veći ili jednak trenutni i ukupni broj jedinica, kao i broj nultih ulaza povećavaju se za jedan, a vreme napuštanja faze postaje jednak zbiru tekućeg simulacionog vremena i generisanog vremena opsluživanja.

P 3600 jedinica ostaje još jedan trenutak na mestu opsluživanja, a statistika dodatnog zadržavanja na mestu opsluživanja raste za jedan.

P 3700 ispituje ima li slobodnih mesta u redu čekanja. Ako postoji bar jedno takvo mesto promenljiva IQ postaje jednak njegovom rednom broju, a ako takvo mesto ne postoji IQ ostaje jednak nuli.

P 3800 za zauzeta mesta u redu čekanja uvećava najranije vreme napuštanja faze za jedan.

P 4100 odredjuje jedinicu koja prelazi na opslužno mesto po FIFO disciplini. Pošto prva jedinica iz reda čekanja prelazi na opslužno mesto, to KQ postaje jednakom njenom vremenu najranijeg završetka aktivnosti. Sve ostale jedinice pomeraju se za jedno mesto unapred, tako da poslednje (ranije zauzeto) mesto ostaje slobodno.

P 4200 odredjuje jedinicu koja prelazi na opslužno mesto po LIFO disciplini. Na opslužno mesto prelazi poslednja jedinica iz reda čekanja, pa to mesto ostaje slobodno.

P 4300 određuje jedinicu koja prelazi na opslužno mesto po slučajnoj disciplini. Pošto su sve jedinice ravnopravne generiše se ceo broj (KU) na intervalu od jedan do broja jedinica u redu čekanja. Poslednja jedinica iz reda čekanja prelazi na mesto (KU), te poslednje mesto ostaje slobodno.

P 4400 određuje jedinicu koja prelazi na opslužno mesto po prioritetnoj disciplini sa najkraćim vremenom opsluge. Redni broj mesta (IP) postavlja se na nulu, a vreme najranijeg završetka aktivnosti (KQ) na dovoljno veliku vrednost. Poredjenjem KQ sa odgovarajućim vrednostima za sva zauzeta mesta u okviru faze dobija najmanje vrednost KQ i njemu pripadajuće mesto IP. Na kraju, kada je proces poredjenja završen, poslednja jedinica prelazi na mesto IP, a poslednje mesto ostaje slobodno. Interesantan je slučaj kada je izabrana poslednja jedinica jer ona prvo predje u samu sebe, pa tek u siedecem koraku oslobodi poslednje mesto.

P 4500 određuje jedinicu koja prelazi na opslužno mesto po prioritetnoj disciplini sa najdužim vremenom opsluge. Postupak je analogan prethodnom, sa tom razlikom da se KQ postavlja na nulu, a kasnije se traže veće vrednosti.

P 5000 predstavlja dinamički stop koji omogućava zadržavanje medjurezultata na ekranu.

ERL generiše pseudoslučajan broj po Erlangovoj raspodeli.

SLUCAJ generiše ravnomerno raspodeljeni pseudoslučajni broj na intervalu (0,1).

5.4. Verifikacija modela

Poredjenjem rezultata analitičkog modela za proračun jednokanalnog jednofaznog sistema sa neograničenim redom čekanja i simulacionog modela iste strukture dobijeni su vrlo bliski rezultati. Izvršeno je po šest simulacionih eksperimenata sa promenljivom dužinom trajanja eksperimenta (korak 2500) za $\lambda = 0,25$, $\mu = 0,5$ i $D(T) = 2$ sa eksponencijalnom raspodelom na ulazu. U tabeli 5.1. dati su izlazni rezultati analitičkog modela (A) i simulacionih eksperimenata pri promenljivom, a u tabeli 5.2. pri konstantnom zagrevanju generatora pseudoslučajnih

brojeva. Uticaj generatora najuočljiviji za simulaciono vreme 2500, jer su rezultati bliski, ali ne i identični. U tabelama su primenjene sledeće oznake:

- (1) - prosečno vreme opsluživanja,
- (2) - prosečno vreme u redu čekanja,
- (3) - prosečan broj jedinica na opsluživanju,
- (4) - prosečan broj jedinica u redu čekanja.

TABELA 5.1.

	A	2500	5000	7500	10000	12500	15000
(1)	2,000	2,559	2,452	2,502	2,522	2,500	2,489
(2)	1,500	1,908	1,163	1,273	1,446	1,249	1,313
(3)	0,500	0,610	0,533	0,540	0,549	0,545	0,538
(4)	0,375	0,454	0,252	0,275	0,315	0,272	0,284

TABELA 5.2.

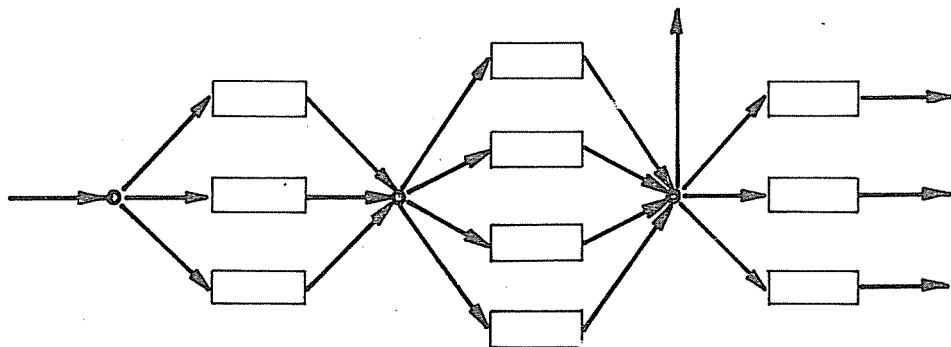
	A	2500	5000	7500	10000	12500	15000
(1)	2,000	2,488	2,490	2,504	2,508	2,498	2,488
(2)	1,500	1,305	1,296	1,182	1,216	1,249	1,266
(3)	0,500	0,589	0,567	0,553	0,551	0,549	0,550
(4)	0,375	0,308	0,295	0,261	0,267	0,274	0,280

5.5. Primer Korišćenja programa OPS

Palete se dovoze u visokoregalno skladište sa intervalom nailaska po eksponencijalnoj raspodeli. Istovar paleta obavlja se sa 3 viljuškara sa prosečnim vremenom opsluživanja $t_{s1}=2,4$ minuta (Erlangova raspodela 5. reda). Četiri radnika kontrolišu ispravnost dokumentacije sa prosečnim vremenom opsluživanja $t_{s2}=3$ minuta (Erlangova raspodela 2. reda). Posle kontrole palete odlaze u proizvodnju (25%) i u visoko regalno skladište (75%). Prosečno vreme ciklusa uskladištenja iznosi 2,2 minuta (Erlangova raspodela 15. reda). Pred svakom od faza opsluživanja nalazi se medjufazno skladište sa po 10 mesta.

Serijom simulacionih eksperimenata potrebno je odrediti uticaj intervala nailaska na odziv sistema.

Na slici 5.7. dat je strukturni dijagram zadatog sistema.



Slika 5.7.

Slika 5.7. Strukturni dijagram trofaznog višekanalnog sistema

Zadati sistem je trofazni višekanalni na ograničenim redovima čekanja od po 10 mesta pred svakom od faza. U prvoj fazi postoje 3 kanala opsluživanja, u drugoj 4 i u trećoj 3 kanala opsluživanja. U redovima čekanja vlada FIFO disciplina.

Za seriju simulacionih eksperimenata iskoristićemo program OPS pod operativnim sistemom DELTA/M na računaru PDP 11/34.

U cilju demonstracije mogućih problema sa definisanjem ulaznih podataka, pretpostavimo da je izvršni kod programa preveden sa standarnom opcijom I2, koja sve cele brojeve definiše

kao INTEGER*2, što znači da je najveća moguća vrednost celog broja 32767 (u opciji I4 ovih problema nema). Sada je zadatak dvostruko interesantan, jer nijedna od statistika (u matrici MM sve su celobrojne), i nijedan ulazni podatak ne smeju biti veći od 32767. Ukoliko se to desi sa statistikom u izlaznom rezultatu javiće se negativna vrednost, dok takav broj kao ulazni podatak ne može biti prihvaćen, greška se registruje i izvršavanje programa se prekida.

Neka je zadato 9 prosečnih intervala nailazaka od 24 do 72 sekunde sa korakom od 6 sekundi po eksponencijalnoj raspodeli.

Ako pokušamo sve ulazne podatke da pretvorimo u sekunde naći ćemo na problem. Kada npr. vreme opsluživanja svedemo na sekunde dobićemo vrednost 180 sekundi, pa bi u lokaciji MM (2,2) trebalo čuvati vrednost 180.000. Ovde je način organizacije podataka očigledno ograničenje.

Drugi pokušaj da se svi podaci svedu na minute rezultira novim problemom, jer je model orijentisan na pojedinačne, a ne na grupne nailaske u sistem.

Jednostavno rešenje svih navedenih problema je u pravom izboru simulacione jedinice i to je u ovom slučaju desetina minuta (6 sekundi).

Sada ulazni podaci glase:

- broj faza opsluživanja 3,
- faza 1
 - broj mesta opsluživanja 3,
 - broj mesta u redu čekanja 10,
 - verovatnoća napuštanja sistema 0,
 - disciplina u redu čekanja 1,
- faza 2
 - broj mesta opsluživanja 4,
 - broj mesta u redu čekanja 10,
 - verovatnoća napuštanja sistema 0,25,
 - disciplina u redu čekanja 1,
- faza 3
 - broj mesta opsluživanja 2,
 - broj mesta u redu čekanja 10,
 - verovatnoća napuštanja sistema 1,

- disciplina u redu čekanja 1,
- ulazna raspodela
- srednje vreme nailaska 4, (5,6,7,8,9,10,11,12),
- stepen Erlangove raspodele 1,
faza 1
- srednje vreme opsluživanja 24,
- stepen Erlangove raspodele 5,
faza 2
- srednje vreme opsluživanja 30,
- stepen Erlangove raspodele 2,
faza 3
- srednje vreme opsluživanja 22,
- stepen Erlangove raspodele 15,
- medjurezultati 2,
- simulaciono vreme 1000.

Na slikama 5.8. - 5.15. predstavljeni su neki od rezulta-
ta simulacionih eksperimenata. Na svim slikama zadržane su vre-
menske jedinice u skladu sa konvencijom usvojenom za ovu seriju
eksperimenata. Po želji može se izvršiti linearna transformaci-
ja rezultata u sekunde ili minute.

Pri tumačenju rezultata važno je uočiti činjenicu da za
 $t_n = 8$ simulacionih jedinica, iskorišćenje kapaciteta u prvoj fazi
(ρ_1) postaje jednako $\rho_1 = \frac{3 \cdot 8}{24} = 1$. Teoretski gledano za svako
 $t_n < 8$ sistem bi trebao da postane nestacionaran i da red čeka-
nja počne da teži beskonačnosti. U simulacionom modelu to se ne
dešava zbog ograničenog trajanja simulacionih eksperimenata. Sa
povećanjem simulacionog vremena bliskost rezultata za I fazu
izmedju analitičkog i simulacionog modela bila bi još izraženija.

Slika 5.8. jasno potvrđuje porast broja odbijenih jedin-
ica sa smanjivanjem intervala nailaska u sistem, za $\rho > 0,85$, a
naročito za $\rho > 1$.

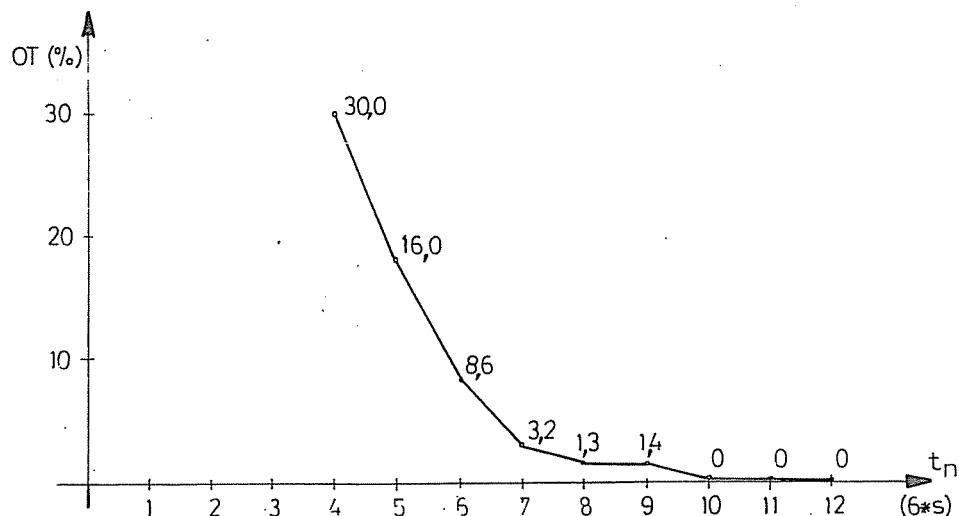
Slika 5.9. - 5.11. prikazuju različite fenomene iste po-
jave, pa otuda sličnost grafičkih prikaza.

Slika 5.12. prikazuje "drugu stranu medalje", pa otuda
druga karakteristika krive: što su intervali izmedju nailazaka
veći, veća je i šansa da jedinica stane direktno na opslužno

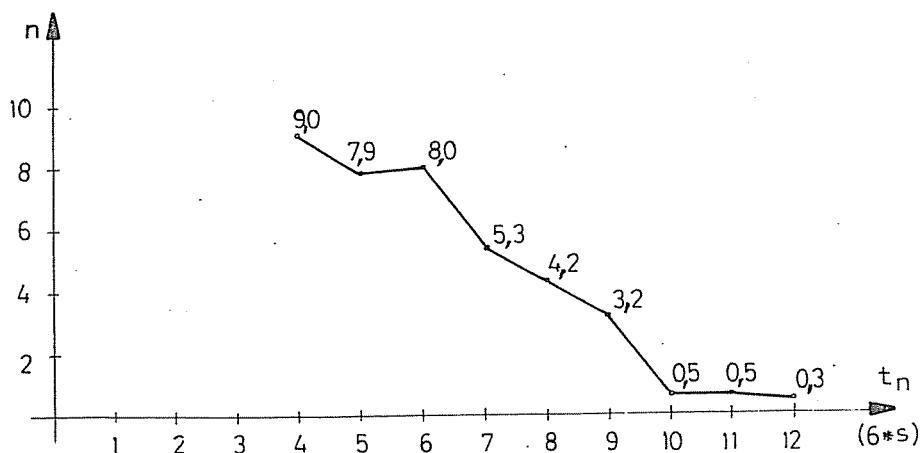
mesto.

Slika 5.13. prikazuje osciliranje generatora pseudoslučajnih brojeva oko zadate vrednosti. Kao što se sa ostalih slika može videti uticaj ovih oscilacija postoji i prvenstveno se ogleda u manjim odstupanjima od zakonitog trenda pojave.

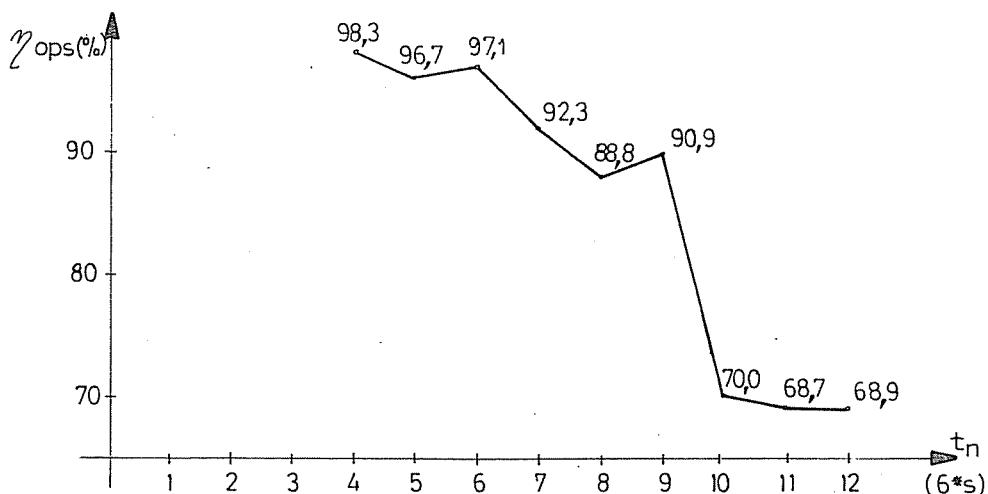
Rezultati prve faze najjasniji su, jer za razliku od ostalih faza, najmanji je uticaj okruženja. O tome se mora posebno voditi računa pri planiranju simulacionih eksperimenata, gde su ključni rezultati vezani za drugu ili neku od kasnijih faza. Na slikama 5.14. i 5.15. prikazani su tipični rezultati. Uporedjivanjem sa slikom 5.11. može se konstatovati da su tipovi krivih slični, ali da se bitno razlikuje interval odstupanja najmanje i najveće vrednosti na slikama. Razlika u iskorišćenju izmedju opslužnih mesta u II i III fazi posledica je napuštanja sistema od strane određenih jedinica posle II faze.



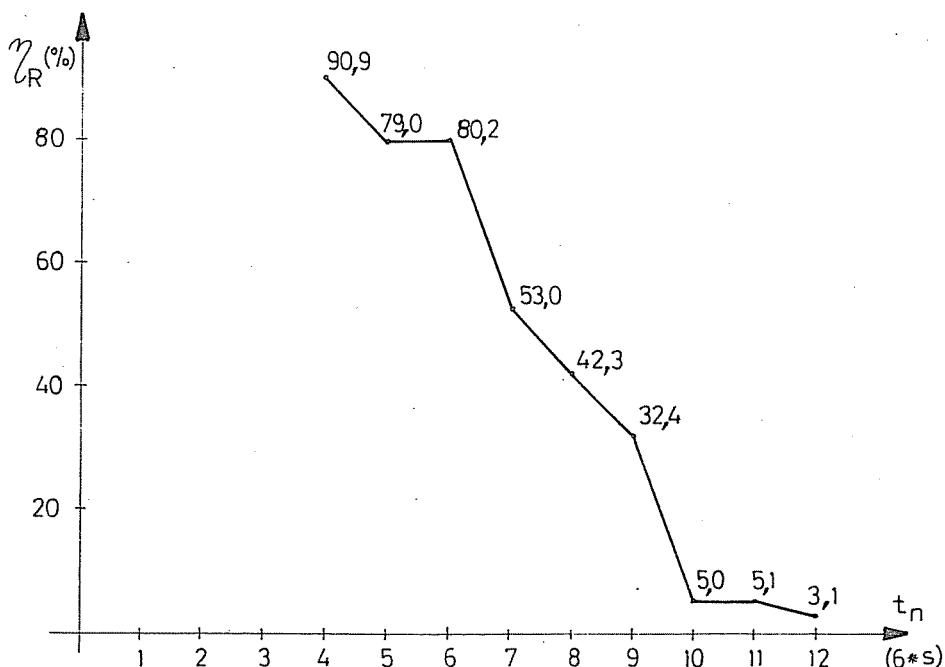
Slika 5.8. Procenat odbijenih jedinica



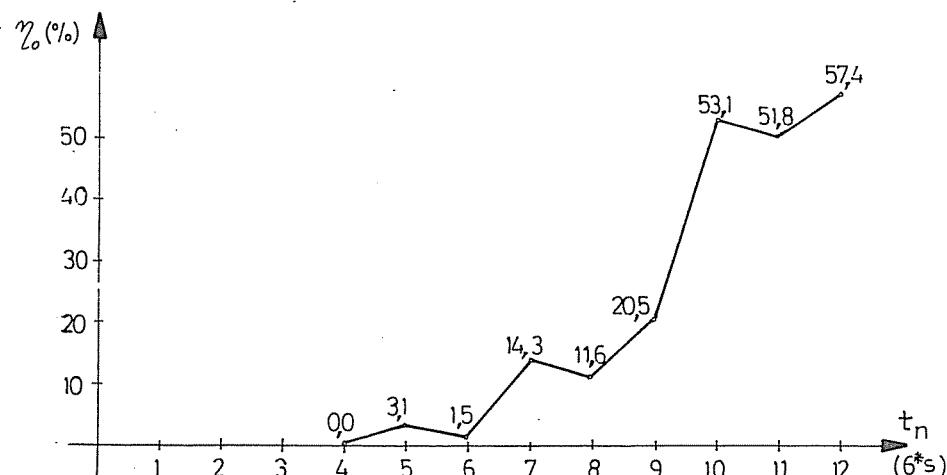
Slika 5.9. Prosečan broj jedinica u redu čekanja pred prvoj fazom



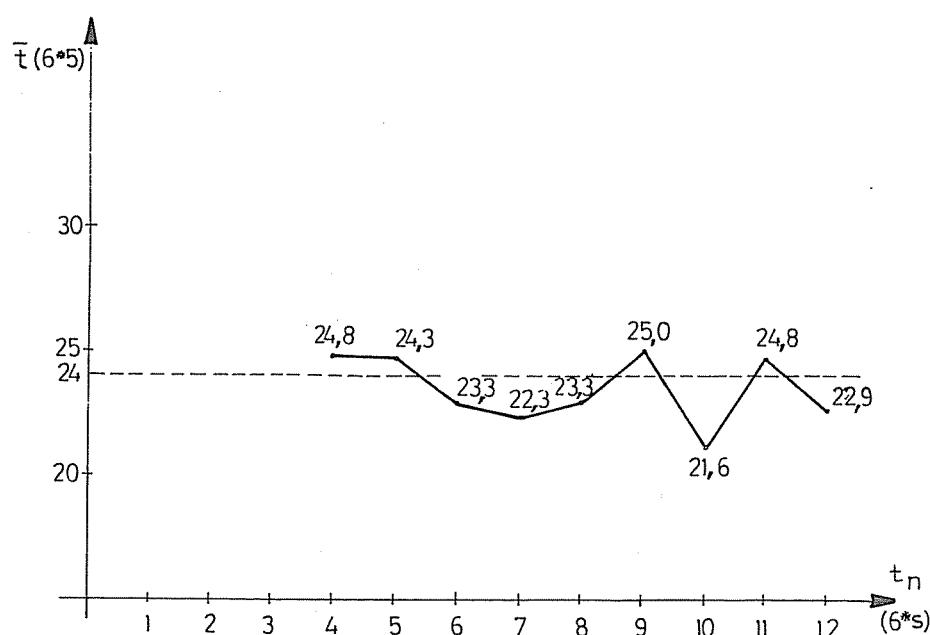
Slika 5.10. Procenat iskorišćenja mesta opsluživanja u prvoj fazi

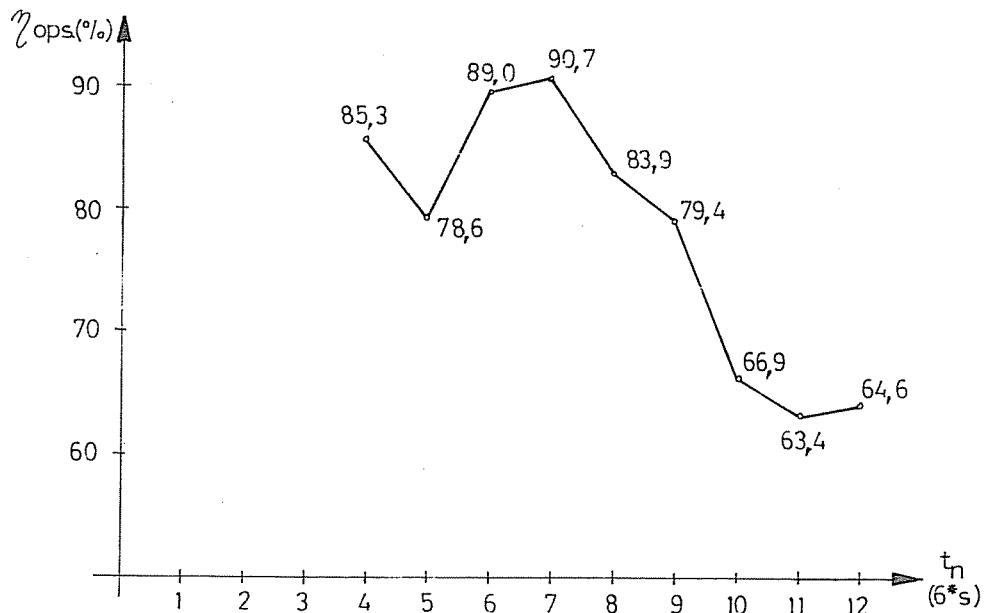


Slika 5.11. Procenat iskorišćenja mesta u redu čekanja pred prvom fazom

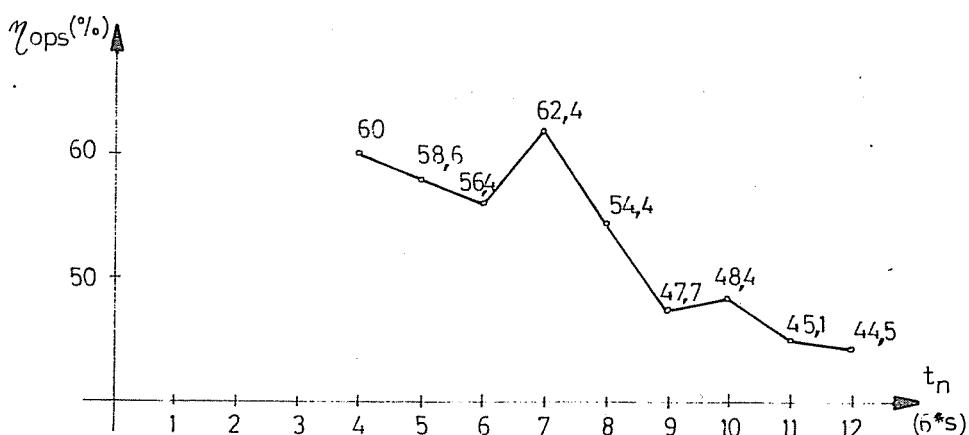


Slika 5.12. Procenat nultih ulaza u sistem

Slika 5.13. Prosečno vreme opsluživanja
u prvoj fazi



Slika 5.14. Procenat iskorišćenja mesta opsluživanja u drugoj fazi



Slika 5.15. Procenat iskorišćenja mesta opsluživanja u trećoj fazi

```

C OPS - Program za simulaciju rada
C visefaznih visekanalnih sistema
C sa otkazima
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
COMMON /B/ B(10)
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LG
COMMON /J/J
COMMON /S/ IZ,I,IC,IS,MZ,IP,IR,KQ
COMMON /I/ IT
CALL P100
CALL P650
JTT=1
DO 30 K=1,ISV
IF(K.EQ.IZV)CALL P600
CALL P3000
IF (JTT.EQ.K)CALL P1100
CALL P1000
CALL P1700
IF (IZ.EQ.1)CALL P1600
CONTINUE
CALL P1150
STOP
END
SUBROUTINE P100
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /I/ II
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
9 WRITE(5,10)
10 FORMAT(' broj faza opsluzivanja u formatu 12')
READ(5,11)N
FORMAT(I2)
IF (N.LT.1.OR.N.GT.10)GOTO 9
DO 20 I=1,N
WRITE(5,32)I
WRITE(5,15)
READ(5,11)MM(I,1)
IF (MM(I,1).LT.1.OR.MM(I,1).GT.10)GOTO 21
WRITE(5,16)
READ(5,11)MM(I,4)
IF (MM(I,4).LT.1.OR.MM(I,4).GT.10)GOTO 22
WRITE(5,17)
READ(5,13)C
IF (C.GT.1.OR.C.LT.0)GOTO 23
MM(I,5)=100*C
WRITE(5,18)
READ(5,11)MM(I,6)
IF (MM(I,6).GT.5.OR.MM(I,6).LT.1)GOTO 24
20 CONTINUE
MM(N+1,4)=32000
FORMAT(F10.0)
13 FORMAT(' broj mesta opsluzivanja u formatu 12 ')
15 FORMAT(' broj mesta u redu cekanja u formatu 12 ')
16 FORMAT(' verovatnoca napustanja sistema ')
17

```

```

1' u formatu F10,0')
18 FORMAT(' izbor discipline u redu cekanja'
1' 1 - FIFO'' 2 - LIFO'' 3 - slucejna''
2' 4 - prioritetna po najkracem vremenu opluse''
3' 5 - prioritetna po najduzem vremenu opluse')
40 WRITE(5,31)
31 FORMAT(' ulazne raspodela'' srednje vreme nelineaska'
1' u formatu F10,0')
READ(5,13)SRV
IF (SRV.LT.0.0001)GOTO 40
78 WRITE(5,79)
79 FORMAT(' stepen Erlansove raspodele')
READ(5,11)IVR
IF (IVR.LT.1.0R.IVR.GT.99)GOTO 78
DO 41 I=1,N
WRITE(5,32)I
42 WRITE(5,33)
READ(5,13)C
IF (C.LT.0.0001)GOTO 42
MM(I,2)=1000*C
43 WRITE(5,34)
READ(5,11)MM(I,3)
IF (MM(I,3).LT.1.0R.MM(I,3).GT.99)GOTO 43
44 CONTINUE
33 FORMAT(' srednje vreme opluse u formatu F10,0')
34 FORMAT(' stepen Erlansove raspodele u formatu I2')
32 FORMAT(' -----',
1'-----'
2' FAZA ',1B)
91 WRITE(5,92)
92 FORMAT(' vreme zagrevanja modela u formatu I2')
READ(5,11)IZV
IF (IZV.LT.1)GOTO 91
II=0
DO 93 I=1,IZV+2
CALL SLUCAJ(SI)
II=II+1
93 CONTINUE
94 WRITE(5,94)
FORMAT(' 1 - detaljni medjurezultati'
2' 2 - bez medjurezultata')
READ(5,11)IZ
95 WRITE(5,96)
FORMAT(' simulaciono vreme u formatu I5')
READ(5,97)ISV
96 FORMAT(I5)
IF (ISV.LT.10)GOTO 98
RETURN
97 END
SUBROUTINE F600
COMMON /M/ MN(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
DO 1 I=1,N
MM(I,8)=MM(I,7)
MM(I,9)=MM(I,7)

```

```

MM(I,11)=MM(I,10)
MM(I,12)=MM(I,10)
DO 1 J=13,17
MM(I,J)=0
1 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P650
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
DO 2 I=1,N+1
DO 2 J=1,MM(I,1)
NN(I,J)=0
2 CONTINUE
DO 4 I=1,N
DO 4 J=1,MM(I,4)
KK(I,J)=0
4 CONTINUE
DO 6 I=1,N+1
DO 6 J=7,17
MM(I,J)=0
6 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P1000
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
DO 10 I=1,N
IF (MM(I,9).LT.MM(I,7))MM(I,9)=MM(I,7)
IF (MM(I,12).LT.MM(I,10)) MM(I,12)=MM(I,10)
10 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P1100
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
COMMON /S/ IZI,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
CALL ERL(SRV,IVR,LC)
JTT=K+LC
AR=FLOAT(MM(1,2))/1000.
CALL ERL(AR,MM(1,3),LC)
IC=1
CALL P3400
IF (IP.EQ.0) GOTO 30
NN(1,IP)=K+LC
MM(1,7)=MM(1,7)+1
MM(1,17)=MM(1,17)+1
MM(1,8)=MM(1,8)+1
GOTO 45
30 CALL P3700
IF (IQ.EQ.0) JD=JD+1
IF (IQ.EQ.0) GOTO 45
KK(1,IQ)=K+LC+1
MM(1,10)=MM(1,10)+1

```

```

45      MM(1,11)=MM(1,11)+1
        CONTINUE
        RETURN
        END
        SUBROUTINE P1150
        COMMON /B/ B(11)
        COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
        COMMON /N/ ISV,JZV,IZ,N,SRV,IVR
        COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
        D=100*FLOAT(JD)/FLOAT(JD+MM(1,8)+MM(1,11))
        WRITE(5,29)JD,D
29      FORMAT(' ',17,' (',F7.3,', % )jedinica otkažalo od opsluzivanja')
        CALL P5000
        DO 2 I=1,N
        B(1)=FLOAT(MM(1,13))/FLOAT(MM(I,8))
        IGE=MM(I,11)+MM(I,17)
        IF (IGE.GT.0) GOTO 54
        B(2)=0,
        B(10)=0,
        GOTO 55
54      B(2)=FLOAT(MM(I,14))/FLOAT(IGE)
        B(10)=100.*FLOAT(MM(I,17))/FLOAT(IGE)
55      IF (MM(I,11).GT.0) GOTO 56
        B(3)=0,
        GOTO 58
56      B(3)=FLOAT(MM(I,14))/FLOAT(MM(I,11))
58      B(4)=FLOAT(MM(I,13))/FLOAT(ISV)
        B(5)=FLOAT(MM(I,14))/FLOAT(ISV)
        B(6)=FLOAT(MM(I,9))
        B(7)=FLOAT(MM(I,12))
        IF (MM(I,1).GT.0) GOTO 66
        B(8)=0,
        GOTO 67
66      B(8)=100.*FLOAT(MM(I,13))/(FLOAT(MM(I+1)*ISV))
67      IF (MM(I,4).GT.0)GOTO 70
        B(9)=0,
        GOTO 26
70      B(9)=(100./FLOAT(ISV))*(FLOAT(MM(I,14))/FLOAT(MM(I,4)))
26      AW=FLOAT(MM(I,2))/1000.
        Q=FLOAT(MM(I,5))/100.
        B(11)=100*FLOAT(MM(I,16))/FLOAT(MM(I,8))
        WRITE(5,5)I,MM(I,3),AW,MM(I,1)
5       FORMAT(' /
1' faza ',T50,I7/' Erlansova raspodela ',I4,', reda'
2' zadato srednje vreme opsluzivanja',T50,F10.3/
3' broj konsla opsluzivanja',T50,I7)
        WRITE(5,6)MM(I,4),Q,MM(I,6)
6       FORMAT(' broj mesta u redu cekanja ',I50,I7/
1' verovatnoca neustanja sistema',T50,F10.3/
2' discipline u redu cekanja',T50,I7)
        WRITE(5,7)(B(L),L=i,5)
        WRITE(5,8)MM(I,9),MM(I,12)
        WRITE(5,9)(B(L),L=8,11)
7       FORMAT(' prosečno vreme opsluzivanja',T50,F10.3/
1' prosečno vreme u redu cekanja',T50,F10.3/

```

```

2' prosecano vreme u redu cekanja bez multih',T50,F10.3/
3' prosecan broj Jedinica na osluzivandju',T50,F10.3/
4' prosecan broj Jedinica u redu cekanja',T50,F10.3)
8 FORMAT(' maksimalan broj Jedinica na osluzivanju',T50,I7/
6' maksimalan broj Jedinica u redu cekanja',T50,I7)
9 FORMAT(' Procenat iskoristjenje osluzivnih mesta',T50,F10.3/
1' Procenat iskoristjenja mesta u redu cekanja',T50,F10.3/
2' Procenat multih ulaza',T50,F10.3/
3' Procenat Jedinica koje su napustile sistem',T50,F10.3)
CALL P5000
2 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE P1600
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
COMMON /I/ JTT,JTW,K,JD,LC
WRITE(5,1)K,JTT
1 FORMAT(' simulacione vreme',T22,I7/
2' sledecii napisak',T22,I7)
DO 10 L=1,N
IF (MM(L,4),EQ,0)GOTO 4
WRITE(5,2)L,(KK(L,LW),LW=1,MM(L,4))
4 WRITE(5,3)L,(NN(L,LW),LW=1,MM(L,1))
10 CONTINUE
CALL P5000
2 FORMAT(' ',J2,'. red cekanja',12I5)
3 FORMAT(' ',I2,'. mesta osl.',12I5)
RETURN
END

SUBROUTINE P1700
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
DO 10 I=1,N
MM(I,13)=MM(I,13)+MM(1,7)
MM(I,14)=MM(I,14)+MM(1,10)
10 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE P3000
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /J/ J
COMMON /N/ ISV,IZV,IZ,N,SRV,IVR
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IR,KR
DO 10 LI=1,N
I=N-LI+1
IZI=I+1
CALL P3200
CALL P3100
10 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE P3100
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)

```

```

COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
COMMON /J/J
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
IF (MM(I,4).EQ.0.OR.MM(I,10).EQ.0)GOTO 80
2 IC=I
CALL P3400
IF (IP.EQ.0)CALL P3800
IF (IP.EQ.0)GOTO 80
IF (MM(I,6).EQ.1)CALL P4100
IF (MM(I,6).EQ.2)CALL P4200
IF (MM(I,6).EQ.3)CALL P4300
IF (MM(I,6).EQ.4)CALL P4400
IF (MM(I,6).EQ.5)CALL P4500
NN(I,IP)=KQ
MM(I,10)=MM(I,10)-1
MM(I,7)=MM(I,7)+1
MM(I,8)=MM(I,8)+1
GOTO 2
80 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P3200
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /J/ J
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IR,KR
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
DO 10 J=1,MM(1,1)
IF (NN(I,J).NE.K)GOTO 10
MZ=MM(IZI,1)-MM(IZI,7)
IF (MM(IZI,4).EQ.0.OR.MM(IZI,10).LT.MZ)CALL P3500
IF (MM(IZI,4).EQ.0.OR.MM(IZI,10).LT.MZ)GOTO 10
IF (MM(IZI,4).EQ.MM(IZI,10))CALL P3600
IF (MM(IZI,4).EQ.MM(IZI,10))GOTO 10
CALL P3300
10 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P3300
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /J/ J
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
MM(I,7)=MM(I,7)-1
NN(I,J)=0
CALL SLUCAJ(SL)
P=FLOAT(MM(I,5))/100.
IF (SL.LT.P)MM(I,16)=MM(I,16)+1
IF (SL.LT.P)GOTO 20
MM(IZI,10)=MM(IZI,10)+1
IS=IZI
AR=FLOAT(MM(IZI,2))/1000.
CALL ERL(AR,MM(IZI,3),LC)
KK(IZI,MM(IZI,10))=K+LC+1
MM(IZI,11)=MM(IZI,11)+1
20 CONTINUE

```

```

RETURN
END
SUBROUTINE P3400
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
IP=0
DO 1 L=1,MM(IC,1)
IF (NN(IC,L),EQ,0)GOTO 2
1 CONTINUE
GOTO 3
2 IF=L
3 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P3500
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
COMMON /J/ J
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
IC=IZI
CALL P3400
IF (IP.GT.0)GOTO 1
CALL P3600
GOTO 20
1 NN(I,J)=0
MM(I,7)=MM(I,7)-1
CALL SLUCAJ(SL)
P=FLOAT(MM(I,5))/100.
IF (SL.GE.P)GOTO 2
MM(I,16)=MM(I,16)+1
GOTO 20
2 IS=IZI
R=FLOAT(MM(IZI,2))/1000.
CALL ERL(R,MM(IZI,3),LC)
NN(IZI,IP)=K+LC
MM(IZI,7)=MM(IZI,7)+1
MM(IZI,8)=MM(IZI,8)+1
MM(IZI,17)=MM(IZI,17)+1
20 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P3600
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /J/J
COMMON /T/ JTT,JTW,K,JD,LC
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
NN(I,J)=K+1
MM(I,15)=MM(I,15)+1
RETURN
END
SUBROUTINE P3700
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
IQ=0

```

```

DO 3 L=1,MM(IC,4)
IF (KK(IC,L),EQ,0)GOTO 5
3
CONTINUE
GOTO 7
5
IQ=L
CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P3800
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /J/J
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
DO 6 J=1,MM(I,10)
KK(I,J)=KK(I,J)+1
6
CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P4100
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
KQ=KK(IC,1)
IF (MM(IC,10),EQ,1) GOTO 10
DO 12 LP=2,MM(IC,4)
KK(IC,LP-1)=KK(IC,LP)
12
CONTINUE
KK(IC,MM(IC,10))=0
10
RETURN
END
SUBROUTINE P4200
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
KQ=KK(IC,MM(IC,10))
KK(IC,MM(IC,10))=0
RETURN
END
SUBROUTINE P4300
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
CALL SLUCAJ(SL)
KU=INT(SL*FLOAT(MM(IC,10)))+1
KQ=KK(IC,KU)
KK(IC,KU)=KK(IC,MM(IC,10))
KK(IC,MM(IC,10))=0
RETURN
END
SUBROUTINE P4400
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KQ
IF=0
KQ=32000
DO 2 L=1,MM(IC,10)
IF (KK(IC,L),GE,KQ)GOTO 2
KQ=KK(IC,L)
IF=L
2
CONTINUE

```

```

KK(IC,IP)=KK(IC,MM(IC,10))
KK(IC,MM(IC,10))=0
RETURN
END
SUBROUTINE P4500
COMMON /M/ MM(11,17),NN(10,10),KK(10,10)
COMMON /S/ IZI,I,IC,IS,MZ,IP,IQ,KC
IP=0
KQ=0
DO 3 L=1,MM(IC,10)
IF (KK(IC,L),LE,KQ)GOTO 3
KQ=KK(IC,L)
IP=L
CONTINUE
KK(IC,IP)=KK(IC,MM(IC,10))
KK(IC,MM(IC,10))=0
RETURN
END
SUBROUTINE P5000
WRITE(5,1)
READ(5,2)A
1 FORMAT('-----',
1'-----// Prtisnre RETURN//',
2'-----',
3'-----')
2 FORMAT(A2)
RETURN
END
SUBROUTINE ERL(AMI,L)
AMI=1./A
PR=1.
DO 2 I=1,L
CALL SLUCAJ(SL)
PR=PR*SL
2 CONTINUE
IF(PR.LT.1.E-4)PR=1.E-4
T=(-1/(AMI*L))*ALOG(PR)
LC=INT(T)+1
RETURN
END
SUBROUTINE SLUCAJ(SL)
COMMON /I/ II
IF (II.EQ.0)IX=0
IF (II.EQ.0)IY=0
SL=RAN(IX,IY)
RETURN
END

```

6. SIMULACIJA PROCESA USKLADIŠTENJA

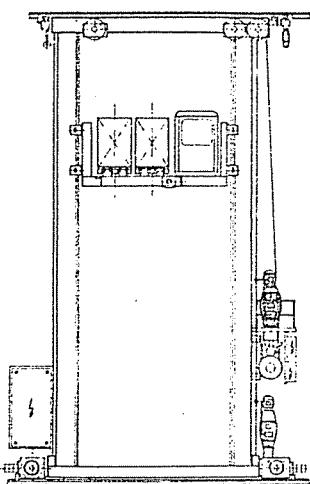
Težnja ka povećanju efikasnosti procesa uskladištenja diktira neophodnost korišćenja savremenih naučnih metoda za analizu transportnih tokova. Jedna od takvih metoda je digitalna simulacija procesa, koja omogućava da se detaljno ispituju tokovi robe u procesu uskladištenja. Preim秉stvo postupka simulacije procesa u odnosu na analitičke metode je u tome da ima širi opseg primene, a da pri tome nije potrebna skupa i dugotrajna prevera rezultata dobijenih u eksploracionim uslovima. Primena ovog postupka omogućuje da se izučavaju kako procesi koji se javljaju u postojećim uslovima, tako i procesi koji bi mogli da nastanu u hipotetičkim uslovima koji odgovaraju razmotrenim predloženim varijantama skladišnog sistema. Razvijeni simulacioni model opisuje realne procese kretanja paleta po skladištu, odnosno može da predviđa ponašanje i rad sistema. Program simulira rad regalne dizalice sa dva paletna mesta. Korišćenje ovog modela je posebno interesantno kada postoje potencijalne mogućnosti integrisanja višoko-regalnog skladišta u proizvodni proces.

6.1. Opis rada visoko-regalne dizalice

Regalna dizalica sa jednim ili dva paletna mesta (slika 6.1a i 6.1b - pr. DEMAG - Nemačka) opslužuje skladišni hodnik /6/, /28/, /43/, /44/. Položaj ulaza i izlaza unapred je zadat i u opštem slučaju ima različite koordinate. U toku procesa skladištenja postoje stalni zahtevi za unošenjem i iznošenjem paleta. Dužina ciklusa opsluživanja promenljiva je veličina i zavisi od lokacije datog paletnog mesta. Tehničke karakteristike regalne dizalice (brzine i ubrzanja) se uzimaju da su konstantne veličine na koje masa tereta ne utiče. Operacije obuhvaćene dopunskim vremenom (zahvatanje ili odlaganje tereta, pomeranje viljuški, uključivanje mehanizma, traženje lokacije itd.) jednake su po trajanju bez obzira da li se paleta unosi na paletno mesto ili se iz njega iznosi.

U toku radnog vremena regalna dizalica obavlja veći broj ciklusa. Pre svakog ciklusa poznat je broj ulaznih i izlaznih pa-

leta, kao i njihova lokacija u skladišnom prostoru. Pretpostavlja se da je redosled unošenja i iznošenja paleta optimalan po kriterijumu minimalnog vremena trajanja ciklusa.



slika 6.1.a

la spremna za početak sledećeg ciklusa.

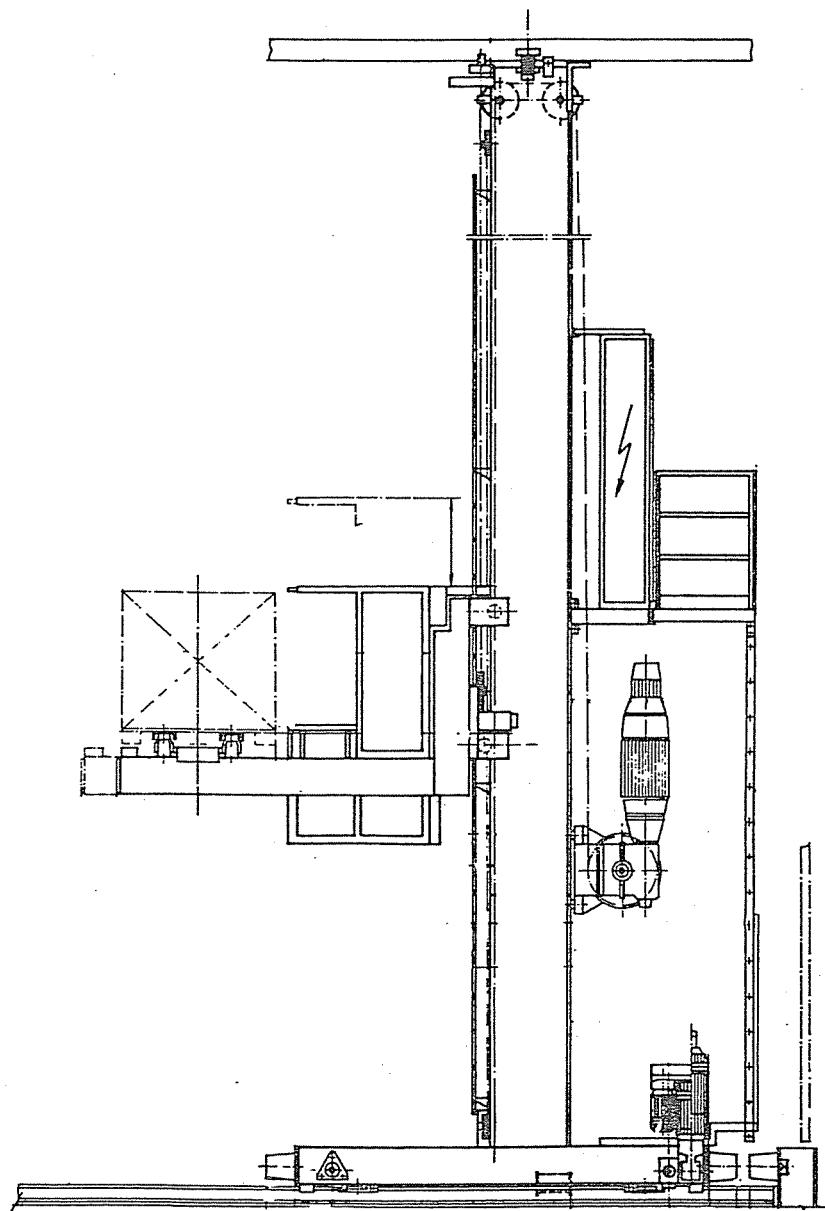
Osnovni algoritam procesa uskladištenja dat je na blok dijagramu (slika 6.2.)

U osnovi su moguća dva načina kretanja visoko regalne dizalice:

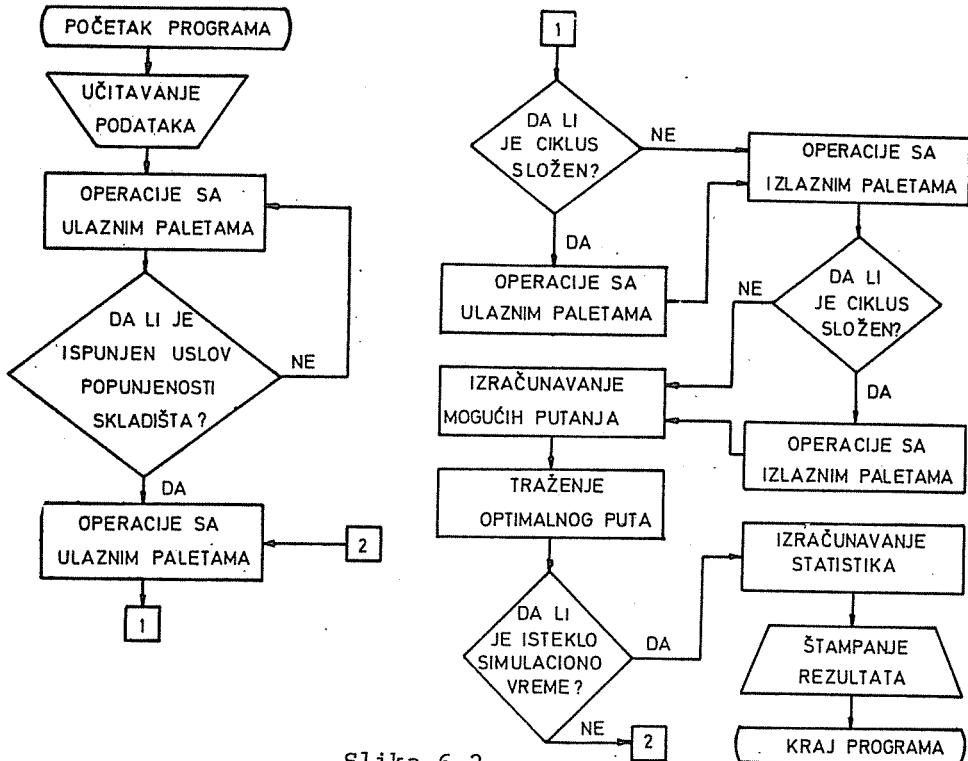
- svaka narudžbina se posebno opslužuje (jednostruki ciklus), i
- svako kretanje je kombinacija operacija uskladištenja i iskladištenja (složeni ciklus).

Na slici 6.3. je prikazana šema kretanja dizalice pri jednostrukom i složenom ciklusu.

Svaki ciklus počinje analizom stanja na ulazu u skladište. Regalna dizalica zahvata ulazne palete, ako postoje, i odnosi ih u skladište. Za kretanje izmedju dve uzastopne lokacije uvek se koriste nominalne tehničke karakteristike regalne dizalice. Po završetku operacija na paletnom mestu, regalna dizalica kreće se ka sledećoj lokaciji (za složeni ciklus) ili se vraća u polazni položaj. Ako je položaj ulaza i izlaza različit, javlja se dodatno kretanje bez palata kako bi regalna dizalica bi-



Slika 6.1b.



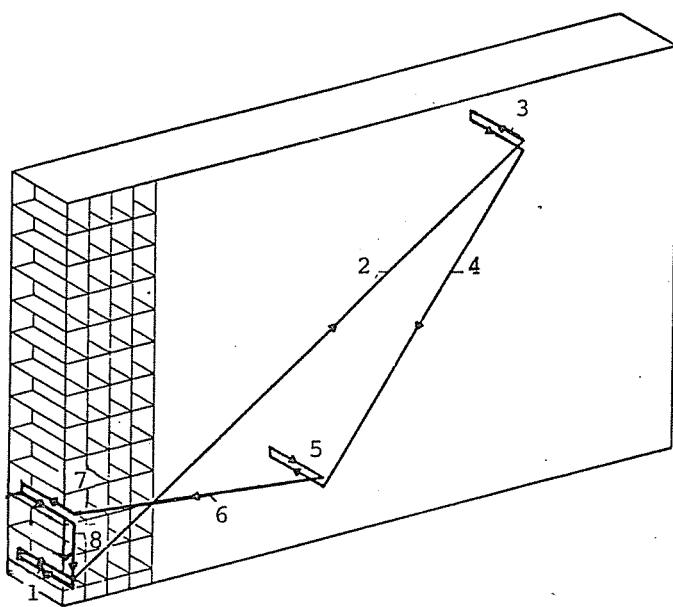
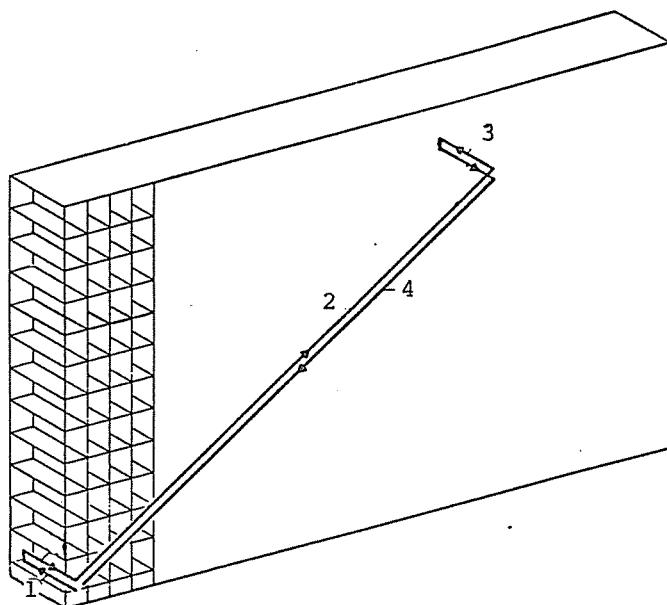
Slika 6.2.

6.2. Prosečno vreme opsluživanja

Predloženi postupak^{*} za određivanje ciklusa rada dizalice može da se koristi za proračun pretovarnog kapaciteta kod izrade idejnih rešenja skladišta. Fabrika DEMAG ga primenjuje za testiranje dizalica u već izgradjenim skladištima. Pošto se u datom modelu polazi od pretpostavki da je celo skladište popunjeno robom, da sva roba ima isti obrt i da je ulaz/izlaz konstantna veličina njegova primena je ograničena.

Određivanje prosečnog vremena opsluživanja zavisno od vrste ciklusa (jednostruki ili složeni) i položaja ulazno/izlaznih koordinata je dato u daljem tekstu. Za određivanje pojedinih elementarnih vremena se koristi matematički model dat u poglavljju 6.3.

^{*}"Testspiele zum leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen", Demag Systemtechnik



Slika 6.3

U proračunu se koriste sledeće oznake;

L , H - dužina i visina radne zone regala,

P_u , P_i , L_u , L_i - odgovarajuće koordinate mesta uskladištenja i iskladištenja (P_u , P_i),

v_x , v_y i v_z - maksimalne brzine kretanja regalne dizalice u pravcu x , y i z .

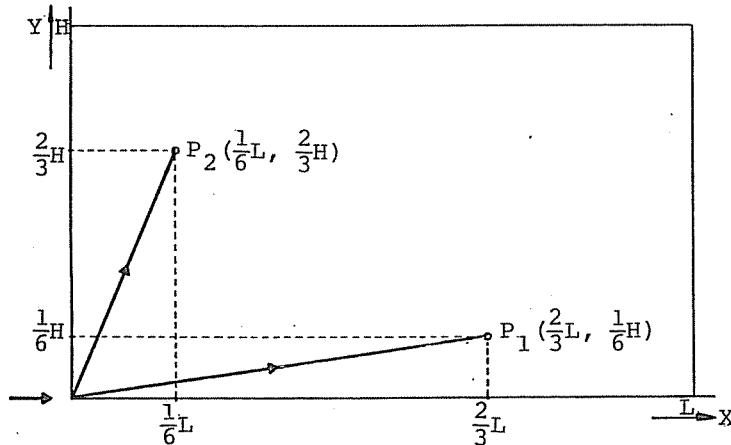
Prosečno vreme jednostrukog ciklusa (slika 6.4.) je dano izrazom:

$$T_{cj} = \frac{1}{2} / t_1 (P_1) + t_2 (P_2) / + 2t_d$$

gde je:

t_1 - vreme ciklusa dizalice pri vožnji od P_u do tačke $P_1 (\frac{2}{3}L, \frac{1}{6}H)$ i povratka u P_u (ako je $P_u = P_i$),

t_2 - isto za tačku P_2 ($\frac{1}{6}L, \frac{2}{3}H$)



Slika 6.4.

Prosečno vreme složenog ciklusa je dano izrazom;

$$T_{cs} = t_s (P_1, P_2) + 4t_d$$

gde je:

t_s - vreme ciklusa vožnje regalne dizalice ($P_0 - P_1 - P_2 - P_0$)

složeni ciklus obuhvata sledeće aktivnosti:

- zahvatanje TJ (transportne jedinice) u P_u ,

- vožnja do PM (paletnog mesta) P_1 ,

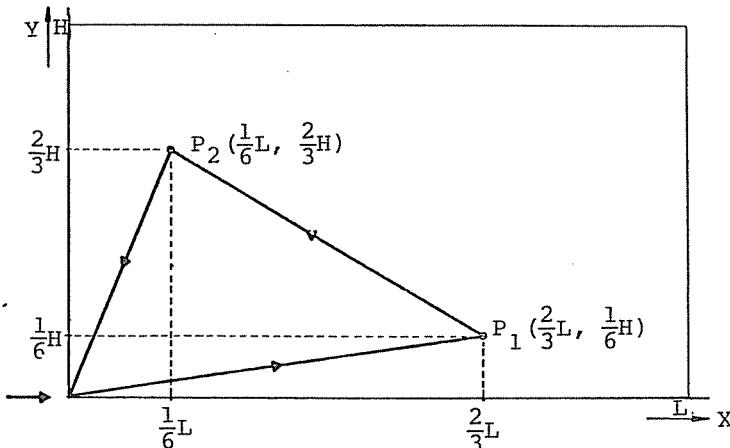
- odlaganje TJ u P_1 ,

- vožnja od P_1 do P_2 ,

- zahvatanje TJ koja treba da se iznese iz skladišta u

tački P_2 ,

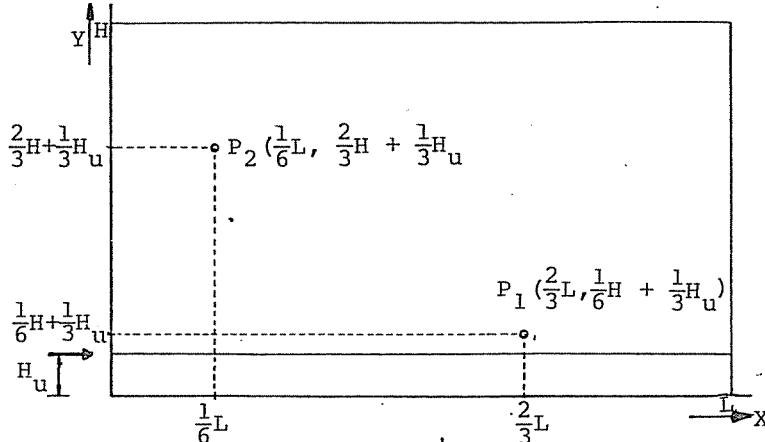
- vožnja od P_2 do P_i
- odlaganje TJ u P_i
- dopunsko vreme (t_d) (uključivanje, traženje lokacije, pozicioniranje, kontrola, zahvatanje ili odlaganje tereta)



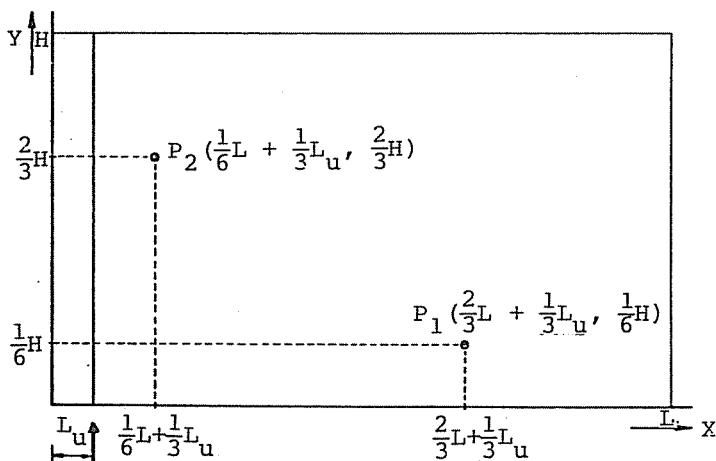
Slika 6.5.

Proračun važi kada su artikli ravnomerno rasporedjeni po površini regala i kada ne postoji specijalna zona brzih artikala u blizini mesta ulaza i izlaza robe.

U slučaju kada mesto ulaza/izlaza robe odstupa od nultog položaja za izračunavanje srednjeg ciklusa se koriste palpetna mesta sa sledećim koordinatama (slika 6.6. i slika 6.7.):



Slika 6.6.



Slika 6,7.

$$P_1 \left(\frac{2}{3}L, \frac{1}{6}H + \frac{1}{3}H_u \right) \quad \text{za } H_u \leq \frac{H}{2}$$

$$P_2 \left(\frac{1}{6}L + \frac{1}{3}L_u, \frac{2}{3}H \right) \quad L_u = 0$$

ili

$$P_1 \left(\frac{2}{3}L + \frac{1}{3}L_u, \frac{1}{6}H \right) \quad \text{za } L_u \leq \frac{L}{2}$$

$$P_2 \left(\frac{1}{6}L + \frac{1}{3}L_u, \frac{2}{3}H \right) \quad H_u = 0$$

Ukoliko su različite koordinate mesta ulaza i izlaza palete iz skladišta prosečna vremena uskladištenja i iskladištenja se razlikuju kod jednostrukog ciklusa:

$$\bar{t}_{lu} = \frac{1}{2} / t_{lu} (P_1) + t_{2u} (P_2) / + 2t_d$$

$$\bar{t}_{li} = \frac{1}{2} / t_{li} (P_1) + t_{2i} (P_2) / + 2t_d$$

pri tome se uzimaju odgovarajuće koordinate tačaka P_1 i P_2 .

Prosečno vreme složenog ciklusa u ovom slučaju je dato izrazom:

$$T_{cs} = \frac{1}{2} / t_s (P_{lu}, P_{2u}) + t_s (P_{li}, P_{2i}) / + 4t_d$$

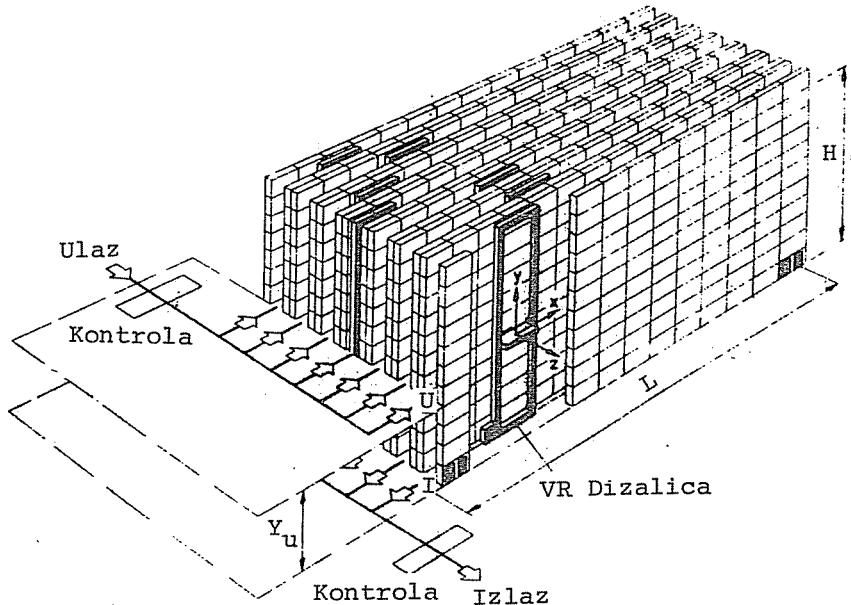
gde je:

t_s - vreme trajanja složenog ciklusa, zavisno od usvojenih koordinata ulaza i izlaza.

Navedeni proračun daje približne vrednosti prosečnog ciklusa i može da se primeni u slučaju kada je:

$$0,5 < \frac{H}{L} \cdot \frac{Vx}{Vy} < 2$$

Na slici 6.7a je prikazana prostorna struktura visokoregalnog skladišta sa označenim mestima za ulaz/izlaz robe, a na slici 6.7b izgled visokoregalnog skladišta SHELL MONTREAL.



Slika 6.7 a

6.3. Osnovni matematički model

Matematički model kretanja regalne dizalice za jednostruki ciklus je dat sledećim izrazom:

$$T_{cj} = \max \{ t_x ; t_y \} + 2 \cdot t_d$$

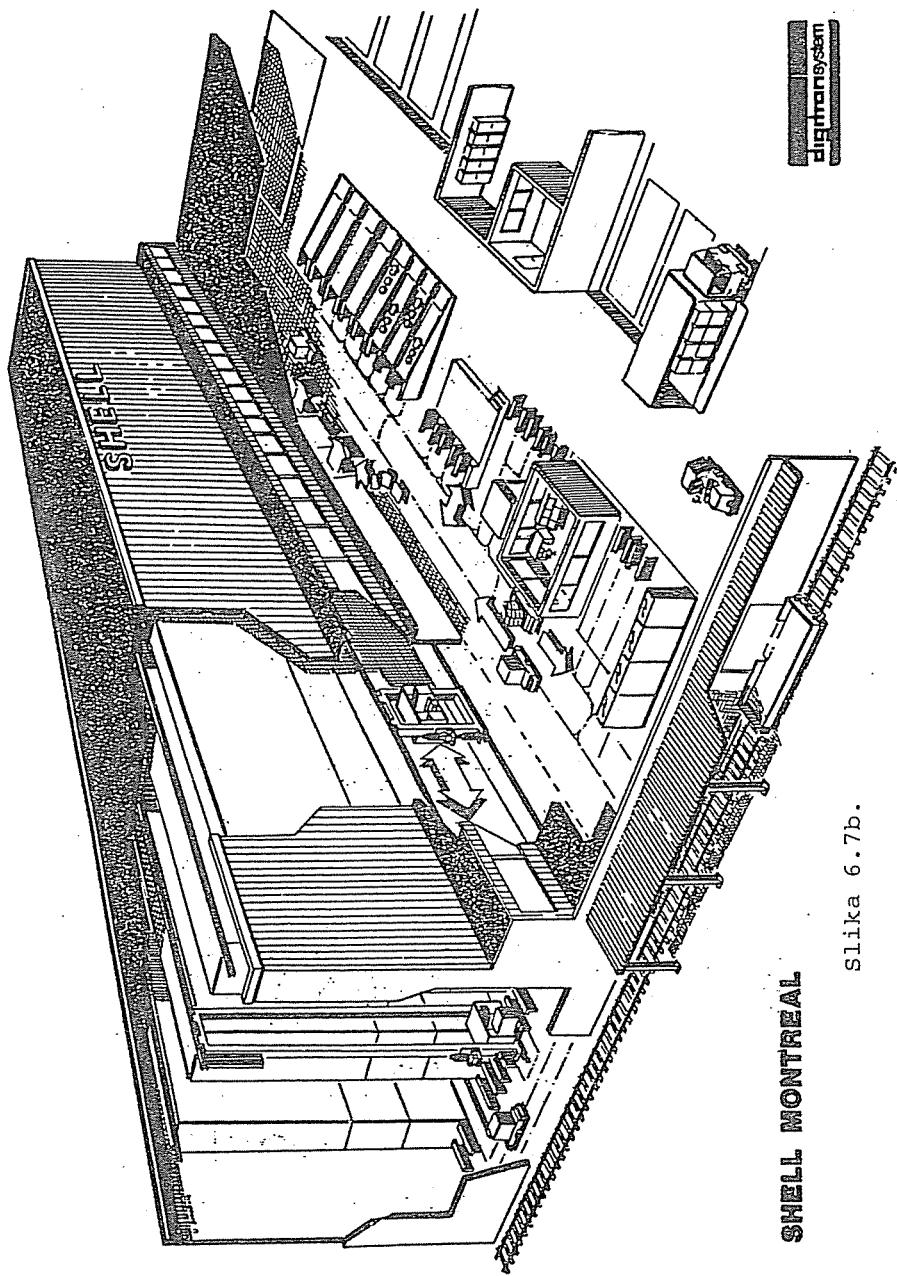
gde je:

T_{cj} - vreme ciklusa .

t_x - vreme kretanja dizalice u horizontalnom pravcu ,

t_y - vreme kretanja dizalice u vertikalnom pravcu ,

t_d - dopunsko vreme, koje obuhvata: vreme potrebno za uključivanje mehanizama, vreme traženja lokacije, vreme pomeranja viljuški, vreme zahvatanja ili odlaganja tereta, vreme potrebno za prigušivanje oscilacija noseće konstrukcije pri zau-



stavljanju, itd.

U slučaju kada regalna dizalica radi sa složenim ciklusima (ima više zahvatanja tereta u jednom ciklusu), vreme ciklusa iznosi:

$$T_{CS} = \sum \max \{ t_x ; t_y \} + (n+2) t_d$$

Dijagram kretanja regalne dizalice je prikazan na slici 6.4. i pri tome su primjenjene sledeće oznake:

V_c - konstantna brzina (s obzirom na uslove zadatka ovo je ujedno i maksimalna brzina - v_{max}) u (m/s),

a_u - ubrzanje u (m/s^2), a_k - usporenje pri kočenju u (m/s^2),

t - vreme u (s),

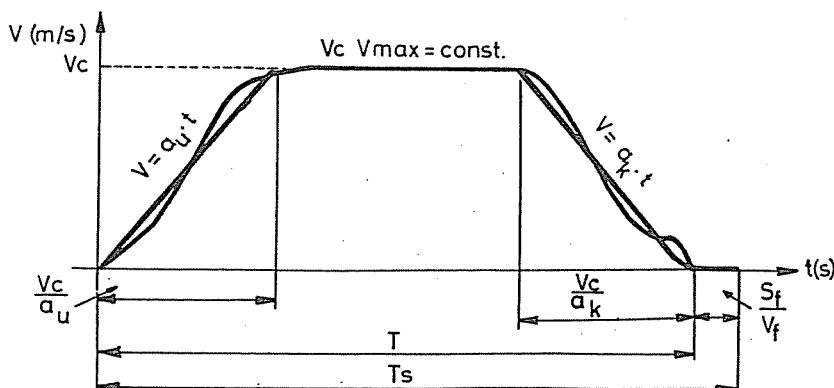
S_f - put fine vožnje u (m),

V_f - brzina fine vožnje u (m/s),

T - vreme kretanja izmedju dve lokacije bez vremena fine vožnje u (s),

T_s - ukupno vreme kretanja izmedju dve lokacije uključujući i vreme fine vožnje (s).

n - broj lokacija koji se obidje u ciklusu.



slika 6.8.

Brzina kretanja regalne dizalice u funkciji od vremena je data izrazom: $V(t) = \begin{cases} a_u \cdot t, & 0 < t < \frac{V_c}{a_u} \\ V_c, & \frac{V_c}{a_u} \leq t \leq T - \frac{V_c}{a_k} \\ a_k \cdot (T-t), & T - \frac{V_c}{a_k} < t < T \\ V_f, & T < t < T_s \end{cases}$

$$V_c, \quad \frac{V_c}{a_u} \leq t \leq T - \frac{V_c}{a_k}$$

$$a_k \cdot (T-t), \quad T - \frac{V_c}{a_k} < t < T$$

$$V_f, \quad T < t < T_s$$

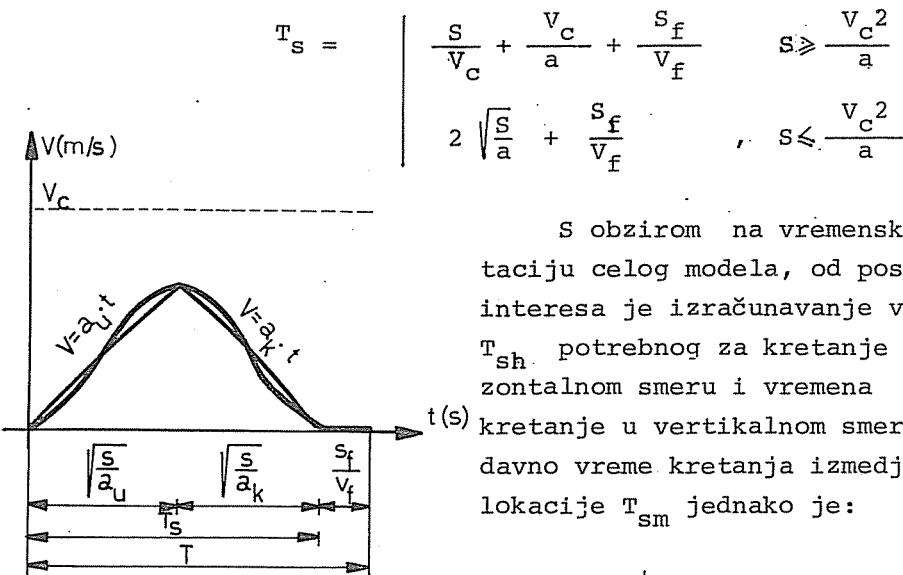
Ako se uvede prosečna vrednost ubrzanja /9/:

$$a = 2 \cdot \frac{a_u + a_k}{a_u + a_k}$$

Put $S(T_s)$ u (m) ostvaren izmedju dve lokacije iznosi:

$$S(T_s) = \begin{cases} V_c T - \frac{V_c^2}{a} + s_f, & T \geq 2 \frac{V_c}{a} \\ \frac{1}{4} a T^2 + s_f, & T \leq 2 \frac{V_c}{a} \end{cases}$$

Prva jednačina koristi se kada regalna dizalica realizuje kretanje opisano dijagramom (slika 6.8.), a druga kada se zbog bliskosti lokacija ne postiže maksimalna brzina odnosno kada radi u nestacionarnom režimu (slika 6.9). Fina vožnja se koristi pri podešavanju položaja dizalice u odnosu na paletno mesto tako da je uvek prisutna. Analogni su uslovi i kod proračuna ukupnog vremena kretanja izmedju dve lokacije.



slika 6.9.

S obzirom na vremensku orijentaciju celog modela, od posebnog interesa je izračunavanje vremena T_{sh} potrebnog za kretanje u horizontalnom smeru i vremena T_{sv} za kretanje u vertikalnom smeru. Mero-davno vreme kretanja izmedju dve lokacije T_{sm} jednako je:

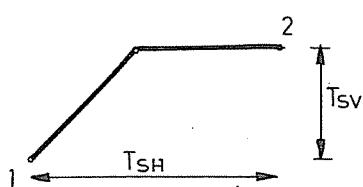
$$T_{sm} = \begin{cases} T_{sh}, & T_{sh} \geq T_{sv} \\ T_{sv}, & T_{sh} \leq T_{sv} \end{cases}$$

Na slici 6.10. prikazan je slučaj kod koga je $T_{sh} > T_{sv}$. Od početnog trenutka (lokacija 1) pa do isteka vremena T_{sv} re-

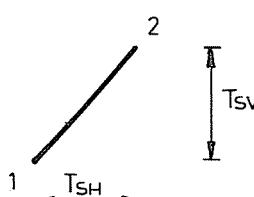
galna dizalica se kreće dijagonalno i u horizontalnom i u vertikalnom smeru, a posle toga samo horizontalno do lokacije 2.

Na slici 6.11 prikazan je granični slučaj za $T_{sh} = T_{sv}$ kada se regalna dizalica sve vreme kreće i u horizontalnom i u vertikalnom smeru. Po završetku kretanja regala dizalica se nalazi na lokaciji 2.

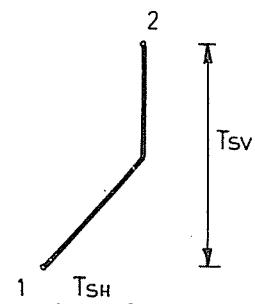
Na slici 6.12. prikazan je slučaj kod koga je $T_{sh} < T_{sv}$. Od početnog trenutka (lokacija 1), pa do isteka vremena T_{sh} regalna dizalica kreće se i u horizontalnom i u vertikalnom smeru, a posle toga samo vertikalno do lokacije 2.



Slika 6.10.



Slika 6.11.



Slika 6.12.

6.4. Simulacioni model

Hodnik regalnog skladišta opslužuje regalna dizalica sa 2 paletna mesta. Na ulazu u skladište nezavisno od ostalih procesa u modelu formiraju se:

- red dolaznih paleta, i
- red izlaznih zahteva.

Stanje regalnog skladišta definisano je zauzetošću svake pojedine lokacije. Promene stanja moguće su u svakom ciklusu na dva načina:

- dovozom novih paleta, i
- odnošenjem već uskladištenih.

Uuskadištenje paleta vrši se iz reda dolaznih paleta po redosledu njihovog pristizanja - FIFO disciplina. Ako je sklad-

ište popunjeno, palete "strpljivo" čekaju trenutak oslobađanja ma koje lokacije. Tada se na slučajan način generiše jedna lokacija od koje počinje horizontalno i vertikalno pretraživanje u potrazi za slobodnom lokacijom. Paleta zauzima prvu slobodnu lokaciju smeštajući u nju šifru vrste robe. Koordinate ove lokacije se pamte i služe za odredjivanje trajanja ciklusa.

Opsluživanje reda izlaznih zahteva takodje se vrši po FIFO disciplini. Izlazni zahtevi se opslužuju samo ako roba tražene vrste postoji u skladištu. U suprotnom izlazni zahtev postaje "nestrpljiv" i napušta sistem neopslužen. Odredjivanje početne lokacije od koje počinje traganje za traženom vrstom robe vrši se na isti način kao i kod ulazne palete. Razlika je u tome što je pozicija izlazne palete oko pozicija na kojoj se tražena roba nalazi i u tu lokaciju smešta se šifra Ø - znak da je lokacija prazna. Koordinate lokacije se pamte i služe za odredjivanje trajanja ciklusa.

U jednom ciklusu maksimalno učestvuje 4 palete. Moguće je da bude i manji broj ako se ispunе neki od navedenih restriktivnih uslova. Skup svih mogućih dogadjaja je:

- postoje obe ulazne (A i B) i obe izlazne (C i D) palete;
- postoje dve ulazne (A i B) i jedna izlazna (C ili D) paleta, ili jedna ulazna (A ili B) i dve izlazne (C i D) palete;
- postoje dve ulazne (A i B) i nijedna izlazna paleta; ili jedna ulazna (A ili B) i jedna izlazna (C ili D) paleta; ili nijedna ulazna i dve izlazne (C i D) palete;
- postoji jedna ulazna (A ili B) i nijedna izlazna paleta ili nijedna ulazna i jedna izlazna (C ili D) paleta;
- ne postoji ni jedna ni ulazna ni izlazna paleta.

Navedeni slučajevi daju 4,3,2,1,0 paleta po ciklusu respektivno. Analiziraćemo realizaciju sve četiri palete u jednom ciklusu. Postoji osam mogućih redosleda: ABCD, ABDC, ACBD, ADBC, BACD, BADC, BCAD, BDAC. Ostali redosledi zahtevaju istovremeni prenos više od dve palete, pa se ne mogu ostvariti. Poseban problem, označavanje nepostojećih paleta, u modelu je rešen tako što se prilikom svakog od osam proračuna izjednačavaju koordinate nepostojeće sa prethodno postojećom paletom.

Na primer: neka je nepostojeća paleta B. Tada se u prva dva slučaja koordinate palete B izjednačavaju sa koordinatama palete A, u trećem sa C, u četvrtom sa D, a u poslednja četiri slučaja sa koordinatama ulaza. Pošto je ovako definisano rastojanje postojeće i nepostojeće palete jednak nuli, tada je i merodavno vreme jednak nuli. Tako se slučajevi sa manjim brojem paleta vrlo efikasno svode na slučaj sa četiri palete. Osim jedinstvenih statistika vode se i posebne u funkciji broja postojećih paleta.

Za svih osam mogućih redosleda potrebno je izračunati vreme ciklusa (T_c). Izbor optimalnog ciklusa (T^*) vrši se po kriterijumu minimalnog vremena ciklusa.

$$T^* = \min_{c=1,8} (T_c)$$

Sat na modelu napreduje za T^* . Statistike se obračunavaju i ciklus je završen.

Posle svakog završenog ciklusa ispituje se da li je planirano simulaciono vreme manje od tekućeg. Ako nije, proces se produžava sledećim ciklusom, a ako jeste izračunavaju se izvedene prosečne i maksimalne statistike čime je simulacioni proces završen.

Primena ovog modela omogućava ispitivanje različitih uticaja na izbor dizalice za uskladištenje, kao:

- uticaj oblika skladišnog prostora (visine skladišta H prema dužini regalnog hodnika L, za jedan zadati broj paletnih mesta) na broj radnih ciklusa skladišne dizalice,
- uticaj radnih brzina dizalice na promenu pretovarnog kapaciteta,
- uticaj odnosa vertikalne i horizontalne brzine na promenu pretovarnog kapaciteta,
- uticaj položaja ulaznih i izlaznih koordinata na promenu pretovarnog kapaciteta dizalice,
- uticaj ubrzanja dizalice na broj radnih ciklusa, i
- uticaj uvodjenja dizalica koje prenose jednovremeno više od jedne palete, na povećanje radnog kapaciteta.

6.5. Organizacija podataka

U matrici D (2,7) nalaze se tehničke karakteristike regionalne dizalice u smeru I:

- D (I,1) - brzina kretanja,
- D (I,2) - ubrzanje (usporenje),
- D (I,3) - put fine vožnje,
- D (I,4) - brzina fine vožnje,
- D (I,5) - minimalni put za dostizanje konstantne brzine,
- D (I,6) - vreme fine vožnje.

U matrici MQR (6,2) nalaze se koordinate paletnih mesta koja učestvuju u ciklusu, ulaza i izlaza.

U matrici NTR (100,3) nalaze se podaci za I-tu ulaznu ili izlaznu jedinicu (paletu).

- NTR (I,1) - red u kome se nalazi jedinica,
- NTR (I,2) - vreme dolaska u red,
- NTR (I,3) - vrsta robe.

U matrici M (2,9) nalaze se podaci o redovima:

- M (I,1) - dimenzija skladišta,
- M (I,2) - srednje vreme nailaska u red,
- M (I,3) - stepen Erlangove raspodele,
- M (I,4) - prosečan broj vrsta artikala,
- M (I,5) - stepen Erlangove raspodele
- M (I,6) - trenutni broj jedinica u redu,
- M (I,7) - ukupan broj jedinica u redu,
- M (I,8) - maksimalan broj jedinica u redu,
- M (I,9) - ukupno vreme jedinica u redu.

U nizu KSR (5) nalaze se podaci o trenutku realizacije sledećih aktivnosti:

- KSR (1) - vreme nailaska sledeće palete,
- KSR (2) - vreme sledećeg zahteva za izlaznom paletom,
- KSR (3) - vreme završetka ciklusa na regalnoj dizalici,
- KSR (4) - vreme zagrevanja modela,
- KSR (5) - simulaciono vreme.

U nizu JR3 (5) čuva se broj realizacija odredjene vrste

ciklusa. U članovima JR3(1) do JR3(4) čuva se broj ciklusa sa jednom do četiri palete, U članu niza JR3(5) čuva se ukupan broj realizovanih ciklusa.

U nizu JR4(5) čuva se ukupno vreme svih ostvarenih ciklusa. Struktura indeksa u potpunosti odgovara strukturi u nizu JR3(5).

Matrica MQR(7,2) je matrica koordinata lokacija na kojima regalna dizalica treba da se pojavi u toku ciklusa.

Matrica NN(7,2) je radna matrica u odnosu na matricu MQR(7,2) formira neposredno pre izračunavanja svakog alternativnog kretanja u okviru jednog ciklusa.

Niz MALI(10) ima dvojaku funkciju: prvih osam članova niza služe za memorisanje dužine trajanja alternativnih ciklusa, a deveti i deseti član za medjurezultate trajanja kretanja u horizontalnom i vertikalnom pravcu.

Pojedinačne promenljive imaju sledeća značenja:

KODL - registruje broj nerealizovanih izlaznih zahteva koji su nastali zbog nedostatka traženih vrsta roba u skladištu.

IPA - definiše trajanje operacija na paletnom mestu.

SIS - definiše početno iskorišćenje skladišta.

MR - izbor eksperimenta sa ili bez praćenja medjurezultata.

IS - tekuće simulaciono vreme,

Ostale promenljive u programu su lokalnog značaja.

6.6. Struktura programa NOVIREG

Glavni program poziva potprograme za učitavanje (P1000), simulaciju (P3000) i ispis rezultata (P5300).

P1000 poziva potprograme za učitavanje podataka: o tehničkim karakteristikama regalne dizalice (P1100), karakteristikama raspodele na ulazu i izlazu (P1200), zagrevanju i trajanju simulacionog eksperimenta (P1300), i potprogram za inicijalizaciju i zagrevanje generatora pseudoslučajnih brojeva (SLUCAJ).

P3000 poziva potprograme za: inicijalizaciju početnog stanja (P3100), izbor sledećeg kritičnog dogadjaja (P4500), re-inicijalizaciju (P3200), dolazak jedinice u red (P3300), završ-

etak ciklusa (P3400).

Ovo je glavni simulacioni potprogram iz koga se izlazi tek po isteku simulacionog vremena.

P3300 poziva potprograme: za izbor slobodne transakcije (P3500), za generisanje slučajnog broja po Erlangovoj raspodeli (ERL), za prikupljanje statistike pri dolasku jedinice u red (P3600) i generisanje trenutka sledećeg nailaska u red (P3900).

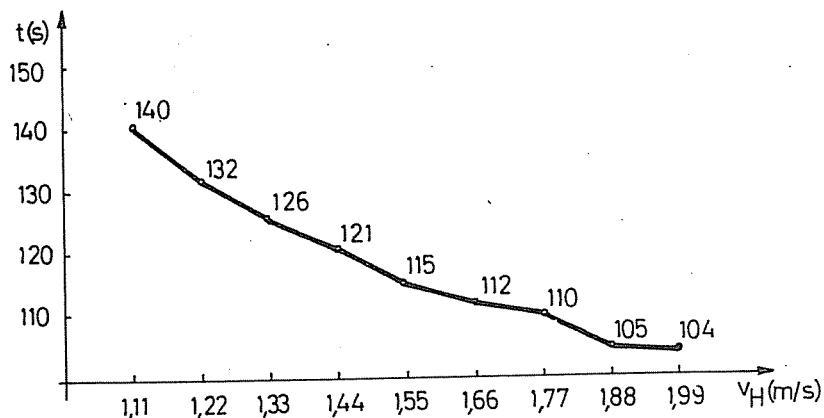
P3400 za svaki red poziva potprogram: za izbor prioriteta (P4100) i za obračunavanje statistika (P3700), a zatim poziva potprogram za izračunavanje trajanja ciklusa (P4200).

P4100 poziva potprogram za pretraživanje skladišta (P4400).

P5100 ispisuje medjurezultate.

P5300 računa i ispisuje rezultate simulacije.

U tabeli 6. 1. prikazani su izlazni rezultati serije simulacionih eksperimenata. Korišćeni su test podaci zadati u potprogramu P2000. Promenljiva veličina bila je horizontalna brzina regalne dizalice i ona se menjala za po 0,11 m/s od 1,11 m/s do 1,99 m/s. Na slici 6.13. prikazano je prosečno trajanje ciklusa u sekundama u funkciji horizontalne brzine regalne dizalice.



Slika 6.13.

Tabela 6.1. izlazni rezultati serije simulacionih eksperimenata

Horizontalna brzina (m/s)	1,11	1,22	1,33	1,44	1,55	1,66	1,77	1,88	1,99
red 1 dolazne palete									
prosečan broj jedi- nica u redu čekanja	2,066	1,470	1,857	1,716	1,904	1,349	1,195	1,078	1,014
prosečno vreme čekanja jedinica	159,984	122,035	137,455	128,000	141,312	104,752	94,052	83,941	81,108
maksimalan broj je- dinica u redu čekanja	9	7	6	7	8	6	6	5	6
red 2 izlazni zahtevi									
prosečan broj jedi- nica u redu čekanja	2,810	1,468	1,630	1,430	1,212	1,002	0,906	0,946	0,908
prosečno vreme čekanja jedinica	219,295	121,839	127,899	110,720	92,838	81,034	72,052	76,345	71,033
maksimalan broj je- dinica u redu čekanja	12	6	7	6	6	6	5	6	5
odbijeno izlaznih zahteva	45	17	24	17	22	12	9	6	4
prosečno trajanje ciklusa	140,215	132,722	126,110	121,886	115,092	112,520	110,181	105,661	104,256

```

C      SIMULACIJA REGALNE DIZALICE
COMMON /REG/ D(2,6), IPA
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /OST/ SIS, MR
COMMON /TRA/ NTR(100,3)
COMMON /IZB/ KSR(5), IS
COMMON /TEK/ JR3(5), JR4(5), KODL
COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50), MQR(7,2)
COMMON /NOS/ NN(7,2), MALI(10)
COMMON /IMEIII/ II
CALL P1000
CALL P3000
CALL P5300
STOP
END
SUBROUTINE P1000
C      ucitavanje
COMMON /IMEIII/ II
1 FORMAT(' 1 - sopstveni podaci')
2 FORMAT(' 2 - test podaci')
3 FORMAT(I5)
WRITE(5,1)
WRITE(5,2)
READ(5,3) IC
IF (IC.EQ.1) CALL P1100
IF (IC.EQ.1) CALL P1200
IF (IC.EQ.1) CALL P1300
IF (IC.EQ.2) CALL P2000
II=0
CALL SLUCAJ(SL)
II=1
RETURN
END
SUBROUTINE P1100
C      podaci o regalnoj dizalici
COMMON /REG/ D(2,6), IPA
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50), MQR(7,2)
16 FORMAT(' aritmeticka sredina')
18 FORMAT(F10.0)
19 FORMAT(I5)
21 FORMAT(' dimenzija skladista')
22 FORMAT(' brzina m/s ')
23 FORMAT(' ubrzanje m/s**2 ')
24 FORMAT(' put fine voznje m ')
25 FORMAT(' brzina fine voznje m/s')
26 FORMAT(' horizontalno ')
27 FORMAT(' vertikalno ')
28 FORMAT(' vreme za operacije na paletnim mestima s')
29 FORMAT(' koordinate mesta ulaska paleta')
31 FORMAT(' koordinate mesta izlaska paleta')

```

```

DO 15 I=1,2
WRITE(5,21)
IF (I.EQ.1) WRITE(5,26)
IF (I.EQ.2) WRITE(5,27)
READ(5,19) M(I,1)
15 CONTINUE
DO 40 J=1,2
DO 40 I=1,2
IF (J.EQ.1) WRITE(5,29)
IF (J.EQ.2) WRITE(5,31)
IF (I.EQ.1) WRITE(5,26)
IF (I.EQ.2) WRITE(5,27)
MT=1
IF (J.EQ.2) MT=6
READ(5,19) MQR(MT,I)
IF (MT.EQ.1) MQR(7,I)=MQR(1,I)
40 CONTINUE
DO 20 J=1,4
DO 20 I=1,2
IF (J.EQ.1) WRITE(5,22)
IF (J.EQ.2) WRITE(5,23)
IF (J.EQ.3) WRITE(5,24)
IF (J.EQ.4) WRITE(5,25)
IF (I.EQ.1) WRITE(5,26)
IF (I.EQ.2) WRITE(5,27)
READ(5,18) D(I,J)
20 CONTINUE
DO 30 I=1,2
D(I,5)=D(I,1)*D(I,1)/D(I,2)
D(I,6)=D(I,3)/D(I,4)
30 CONTINUE
WRITE(5,28)
READ(5,19) IPA
RETURN
END
SUBROUTINE P1200
C
podaci o paletama
COMMON /PAL/ M(2,9)
11 FORMAT(' palete u dolasku ')
12 FORMAT(' palete u odlasku ')
13 FORMAT(' raspodela intervala')
14 FORMAT(' vrsta uskladistene robe')
15 FORMAT(' stepen Erlangove raspodele')
16 FORMAT(' aritmeticka sredina')
18 FORMAT(F10.0)
19 FORMAT(I5)
DO 10 I=1,2
DO 10 L=1,2
IF (I.EQ.1) WRITE(5,11)
IF (I.EQ.2) WRITE(5,12)
IF (L.EQ.1) WRITE(5,13)
IF (L.EQ.2) WRITE(5,14)

```

```

      WRITE(5,15)
      READ(5,19) M(I,2*I+1)
      WRITE(5,16)
      READ(5,19) M(I,2*I)
10   CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE P1300
C      opsti podaci
      COMMON /OST/ SIS,MR
      COMMON /IZB/ KSR(5),IS
18   FORMAT(F10.0)
19   FORMAT(I5)
29   FORMAT(' pocetno iskoriscenje skladista (0-1)')
31   FORMAT(' simulaciono vreme')
32   FORMAT(' zagrevanje modela')
33   FORMAT(' 1 za medjurezultate')
      WRITE(5,29)
      READ(5,18) SIS
      WRITE(5,31)
      READ(5,19) KSR(5)
      WRITE(5,32)
      READ(5,19) KSR(4)
      WRITE(5,33) MR
      RETURN
      END
      SUBROUTINE P2000
C      test podaci
      COMMON /REG/ D(2,6),IPA
      COMMON /PAL/ M(2,9)
      COMMON /OST/ SIS,MR
      COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50),MQR(7,2)
      COMMON /IZB/ KSR(5),IS
      D(1,1)=1.66
      D(2,1)=.33
      D(1,2)=.27
      D(2,2)=.5
      D(1,3)=.5
      D(2,3)=.1
      D(1,4)=.08
      D(2,4)=.03
      M(1,1)=72
      M(2,1)=14
      M(1,2)=80
      M(2,2)=80
      M(1,3)=2
      M(2,3)=2
      M(1,4)=3
      M(2,4)=3
      M(1,5)=2
      M(2,5)=2
      IPA=14

```

```

DO 30 I=1,2
D(I,5)=D(I,1)*D(I,1)/D(I,2)
D(I,6)=D(I,3)/D(I,4)
30 CONTINUE
DO 50 J=1,7
DO 50 I=1,2
MQR(J,I)=0
50 CONTINUE
SIS=.5
KSR(4)=1
KSR(5)=28800
WRITE(5,61)
61 FORMAT(' 1 - za medjurezultate')
READ(5,62) MR
62 FORMAT(I3)
73 FORMAT(' horizontalna brzina regalne dizalice')
FORMAT(F10.3)
19 WRITE(5,73)
READ(5,19) D(1,1)
RETURN
END
SUBROUTINE P3000
C simulacija
CALL P3100
10 CALL P4500(MD)
IF (MD.LE.2) CALL P3300(MD)
IF (MD.EQ.3) CALL P3400
IF (MD.EQ.4) CALL P3200
IF (MD.NE.5) GOTO 10
RETURN
END
SUBROUTINE P3100
C inicializacija
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /TRA/ NTR(100,3)
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
COMMON /TEK/ JR3(5),JR4(5),KODL
DO 10 I=1,2
DO 10 J=6,9
M(I,J)=0
10 CONTINUE
DO 12 I=1,5
JR3(I)=0
JR4(I)=0
12 CONTINUE
DO 20 I=1,100
DO 20 J=1,3
NTR(I,J)=0
20 CONTINUE
IS=0
KODL=0
DO 30 I=1,2
CALL P3900(I)
30 CONTINUE
KSR(3)=KSR(5)+1
CALL P4900
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE P3200
C reinicijalizacija
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
COMMON /TEK/ JR3(5),JR4(5),KODL
DO 10 I=1,2
M(I,7)=M(I,6)
M(I,8)=M(I,6)
10 CONTINUE
DO 12 I=1,5
JR3(I)=0
JR4(I)=0
12 CONTINUE
KSR(4)=KSR(5)+1
KODL=0
RETURN
END
SUBROUTINE P3300(MD)
C dolazak u red
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /TRA/ NTR(100,3)
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
CALL P3500(JST)
NTR(JST,1)=MD
NTR(JST,2)=IS
CALL ERL(FLOAT(M(JST,4)),M(MD,5),LC)
NTR(JST,3)=LC + 1
CALL P3600(MD)
CALL P3900(MD)
IF (KSR(3).EQ.KSR(5)+1) KSR(3)=IS
RETURN
END
SUBROUTINE P3400
C zavrsetak ciklusa
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50),MQR(7,2)
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
DO 30 J=2,5
DO 30 I=1,2
MQR(J,I)=0
30 CONTINUE
LPC=0
IX=1
DO 10 I=1,2
DO 10 J=1,2
IX=IX+1
IF (M(I,6).EQ.0) GOTO 10
CALL P4100(I,IX)
LPC=LPC + 1
10 CONTINUE
IF (LPC.EQ.0) KSR(3)=KSR(5)+1
IF (LPC.GT.0) CALL P4200(LPC)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE P3500 (JST)
C   slobodna transakcija
COMMON /TRA/ NTR(100,3)
DO 10 JST=1,100
IF (NTR(JST,1).EQ.0) GOTO 20
10 CONTINUE
WRITE(5,30)
30 FORMAT(' nema vise transakcija')
CALL P5300
STOP
20 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE P3600(I)
C   statistike pri dolasku u red
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /TRA/ NTR(100,3)
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
M(I,6)=M(I,6) + 1
M(I,7)=M(I,7) + 1
IF (M(I,6).GT.M(I,8)) M(I,8)=M(I,6)
RETURN
END

SUBROUTINE P3700(I,KT)
C   statistike pri odlasku iz reda
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /TRA/ NTR(100,3)
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
M(I,6)=M(I,6) - 1
M(I,9)=M(I,9)+IS-NTR(KT,2)
DO 10 IY=1,3
NTR(KT,IY)=0
10 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE P3900(I)
C   sledeci nailazak u red
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
CALL ERL(FLOAT(M(I,2)),M(I,3),LC)
KSR(I)=IS + LC + 1
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE P4100(IRED, IX)
C izbor sledece transakcije
COMMON /TRA/ NTR(100,3)
COMMON /IZB/ KSR(5), IS
COMMON /TEK/ JR3(5), JR4(5), KODL
COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50), MQR(7,2)
IPL=KSR(5)+1
KT=101
DO 10 I1=1, 100
IF (NTR(I1,1).NE. IRED) GOTO 10
IF (NTR(I1,2).GE. IPL) GOTO 10
IPL=NTR(I1,2)
KT=I1
10 CONTINUE
IF (KT.EQ.101) GOTO 20
K3=0
IF (IRED.EQ.2) K3=NTR(KT,3)
CALL P4400(K3, IX, IRED, KT)
20 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P4200(LPC)
C trajanje ciklusa
COMMON /IZB/ KSR(5), IS
COMMON /TEK/ JR3(5), JR4(5), KODL
COMMON /REG/ D(2,6), IPA
ISL=2 * IPA * LPC
DO 10 I=1, 8
CALL P4800
CALL P4300(I)
CALL P4600(I)
10 CONTINUE
CALL P4700(MA)
JR3(LPC)=JR3(LPC)+1
JR4(LPC)=JR4(LPC)+MA
JR3(5)=JR3(5)+1
JR4(5)=JR4(5)+MA
KSR(3)=IS + MA
IF (MA.EQ.0) KSR(3)=KSR(5)+1
RETURN
END
SUBROUTINE P4300(K)
C eliminacija nepostojecih paleta
DIMENSION NIZ(5)
COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50), MQR(7,2)
COMMON /NOS/ NN(7,2), MALI(10)
IF (K.LT.5) NIZ(2)=1
IF (K.GT.4) NIZ(2)=2
IF (K.LT.3) NIZ(3)=2
IF (K.EQ.3.OR.K.EQ.7) NIZ(3)=3
IF (K.EQ.4.OR.K.EQ.8) NIZ(3)=4
IF (K.EQ.5.OR.K.EQ.6) NIZ(3)=1
IF (K.EQ.1.OR.K.EQ.5) NIZ(4)=3
IF (K.EQ.2.OR.K.EQ.6) NIZ(4)=4

```

```

IF (K.EQ.3.OR.K.EQ.4) NIZ(4)=2
IF (K.GT.6) NIZ(4)=1
IF (K.EQ.2.OR.K.EQ.4.OR.K.EQ.6.OR.K.EQ.8) NIZ(5)=3
IF (K.EQ.1.OR.K.EQ.3.OR.K.EQ.5.OR.K.EQ.7) NIZ(5)=4
DO 10 I=2,5
NN(I,1)=MQR(NIZ(I),1)
NN(I,2)=MQR(NIZ(I),2)
IF (MQR(NIZ(I),1).GT.0) GOTO 10
NN(I,1)=NN(I-1,1)
NN(I,2)=NN(I-1,2)
10 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P4400(K3,IX,IRED,KT)
C pretrazivanje skladista
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /TEK/ JR3(5),JR4(5),KODL
COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50),MQR(7,2)
CALL SLUCAJ(SL)
K1=INT(M(1,1)*SL)+1
CALL SLUCAJ(SL)
K2=INT(M(2,1)*SL)+1
DO 10 I1=K1,M(1,1)
DO 10 I2=K2,M(2,1)
IF (K3.EQ.KSKLAD(I1,I2)) GOTO 30
10 CONTINUE
DO 20 I1=1,M(1,1)
DO 20 I2=1,K2
IF (K3.EQ.KSKLAD(I1,I2)) GOTO 30
20 CONTINUE
DO 25 I1=1,K1
DO 25 I2=K2,M(2,1)
IF (K3.EQ.KSKLAD(I1,I2)) GOTO 30
25 CONTINUE
I1=0
I2=0
IF (IRED.EQ.2) KODL=KODL+1
30 MQR(IX,1)=I1
MQR(IX,2)=I2
CALL P3700(IRED,KT)
40 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P4500(MD)
C izbor sledece aktivnosti
COMMON /OST/ SIS,MR
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
C ISW=IS
ISL=KSR(5)+1

```

```

DO 10 J=1,5
IF (ISL.LT.KSR(J)) GOTO 10
ISL=KSR(J)
MD=J
10 CONTINUE
IS=ISL
C IF (IS.EQ.ISW) GOTO 20
IF (MR.EQ.1) CALL P5100
20 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P4600(I)
C trajanje alternativnog ciklusa
COMMON /REG/ D(2,6),IPA
COMMON /NOS/ NN(7,2),MALI(10)
MALI(I)=0
DO 10 J=1,6
DO 20 K=1,2
K3=ABS(NN(J+1,K)-NN(J,K))
MALI(K+8)=0
IF (K3.EQ.0) GOTO 20
AK3=FLOAT(K3)
MALI(K+8)=INT(2*SQRT(AK3/D(K,2))+D(K,6))
IF (AK3.LE.D(K,5)) GOTO 20
MALI(K+8)=INT(AK3/D(K,1)+D(K,1)/D(K,2)+D(K,6))
20 CONTINUE
MAL=MALI(9)
IF (MALI(10).GT.MAL). MAL=MALI(10)
MALI(I)=MALI(I)+MAL
10 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P4700(MA)
C optimalni ciklus
COMMON /NOS/ NN(7,2),MALI(10)
MA=MALI(1)
DO 10 I=2,8
IF (MALI(I).LT.MA) MA=MALI(I)
10 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P4800
C postavljanje radne matrice
COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50),MQR(7,2)
COMMON /NOS/ NN(7,2),MALI(10)
DO 10 I=1,7
DO 10 J=1,2
NN(I,J)=MQR(I,J)
10 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE P4900
C inicijalizacija skladista
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /SKL/ KSKLAD(100,50),MQR(7,2)
COMMON /OST/ SIS,MR
LT2=M(2,1)
LT1=M(1,1)
DO 10 K2=1,LT2
DO 20 K1=1,LT1
KSKLAD(K1,K2)=0
CALL SLUCAJ(SL)
IF (SL.GT.SIS) GOTO 20
CALL ERL (FLOAT(M(1,4)),M(1,5),LC)
KSKLAD(K1,K2)=LC + 1
20 CONTINUE
10 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE P5000
C dinamicki stop
WRITE(5,1)
WRITE(5,3)
READ(5,2) A
1 FORMAT('-----')
3 FORMAT(' pritisnite return')
2 FORMAT(A2)
RETURN
END

SUBROUTINE P5100
C medjurezultati
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /IZB/ KSR(5),IS
WRITE(5,1) IS
1 FORMAT(' simulaciono vreme',I9)
WRITE(5,2)
WRITE(5,3)
2 FORMAT('-----')
3 FORMAT(' red      jedinica      nailazak')
WRITE(5,2)
DO 10 I=1,2
WRITE(5,4) I,M(I,6),KSR(I)
10 CONTINUE
WRITE(5,5) KSR(3)
4 FORMAT(3I12)
5 FORMAT(' zavrsetak ciklusa',I9)
CALL P5000
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE P5300
C      rezultati
COMMON /PAL/ M(2,9)
COMMON /IZB/ KSR(5), IS
COMMON /TEK/ JR3(5), JR4(5), KODL
1      FORMAT(' red',I9)
2      FORMAT(' _____')
3      FORMAT(' prosecan broj jedinica',T45,F10.3)
4      FORMAT(' prosecno vreme jedinica',T45,F10.3)
5      FORMAT(' maksimalan broj jedinica',T45,I7)
6      FORMAT(' odbijeno',I4,' izlaznih zahteva')
7      FORMAT(' prosecno trajanje ciklusa',T45,F10.3)
8      FORMAT(' prosecno trajanje ciklusa za ',I3,' paleta',T45,F10.3)
DO 10 I=1,2
WRITE(5,1) I
WRITE(5,3) FLOAT(M(I,9))/FLOAT(IS)
WRITE(5,4) FLOAT(M(I,9))/FLOAT(M(I,7))
WRITE(5,5) M(I,8)
WRITE(5,2)
10    CONTINUE
      WRITE(5,6) KODL
      WRITE(5,7) FLOAT(JR4(5))/FLOAT(JR3(5))
DO 20 I=1,4
IF (JR3(I).EQ.0) GOTO 20
      WRITE(5,8) I,FLOAT(JR4(I))/FLOAT(JR3(I))
20    CONTINUE
      RETURN
      END

SUBROUTINE SLUCAJ(SL)
COMMON /IMEII/ II
IF (II.GT.0) GOTO 1
KRM=32749
KRO=15537
KRB=1467
1      KRO=KRB*KRO-INT(KRB*KRO/KRM)*KRM
      SL=FLOAT(KRO)/FLOAT(KRM)
      RETURN
      END

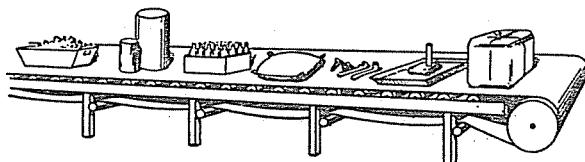
SUBROUTINE ERL(A,K,LC)
C      generisanje slucajnog broja po Erlangovoj raspodeli
PR=1.
DO 2 I=1,K
CALL SLUCAJ(SL)
PR=PR*SL
2      CONTINUE
IF (PR.LT.1.E-4) PR=1.E-4
LC=INT(-A/FLOAT(K))*ALOG(PR)
RETURN
END

```

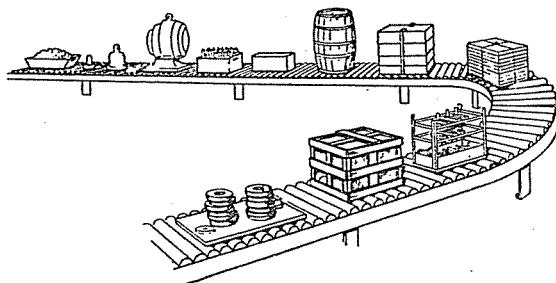
7. SIMULACIJA RADA UREDJAJA NEPREKIDNOG TRANSPORTA

Uredjaji neprekidnog transporta prenose materijal po utvrdjenim putanjama i izmedju utvrdjenih tačaka. Mogu da se koriste za transport različitih vrsta komadnih tereta koji su ujednačeni po masi i dimenzijama. Nalaze veliku primenu kod linijske proizvodnje, rada u skladištima, procesu pakovanja proizvoda, utovaru (istovaru) vagona i kamiona itd. Sledeći primeri treba da ilustruju različite mogućnosti korišćenja ovih transporterera:

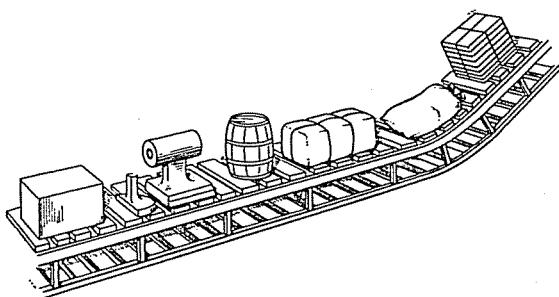
- transport trakastim transporterom; slika 7.1,
- transport rolgangom; slika 7.2,
- transport pločastim konvejerom; slika 7.3,
- istovar (utovar) pokretnim trakastim transporterom; slika 7.4,
- transport na skladištu u procesu pripreme robe za distribuciju (komisioniranje); slika 7.5 i 7.6, i td.



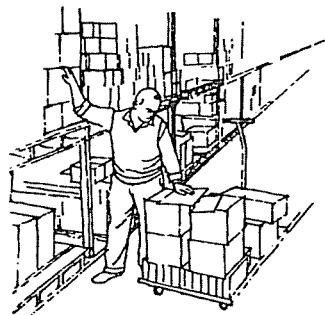
slika 7.1.



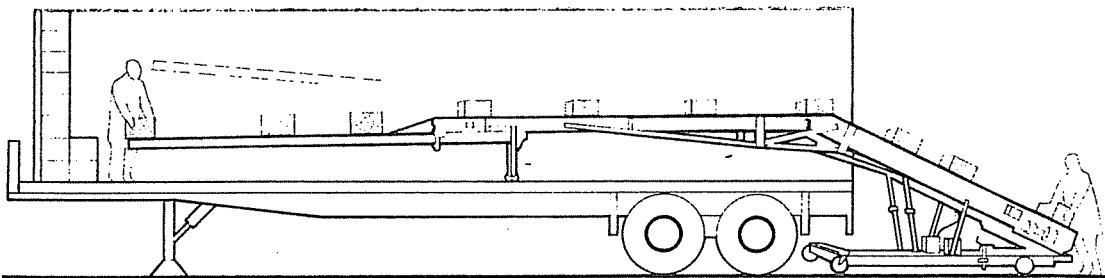
slika 7.2.



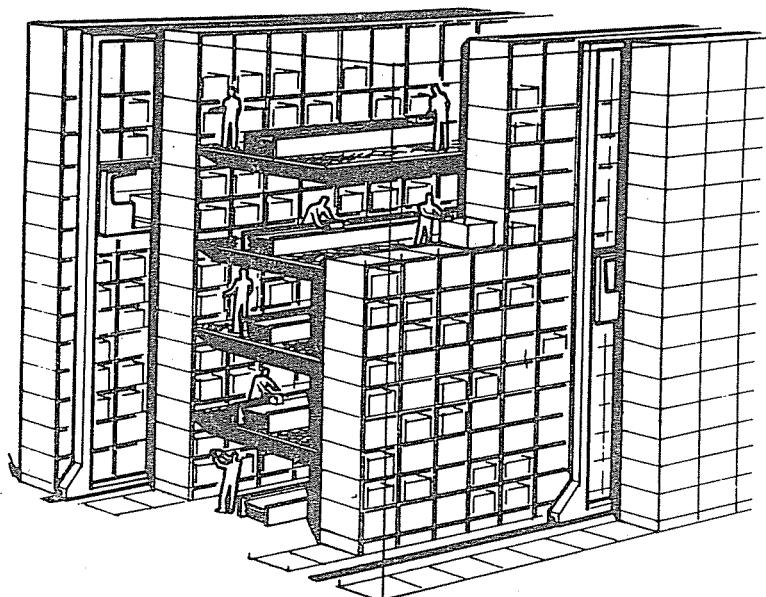
slika 7.3.



slika 7.5.



slika 7.4.



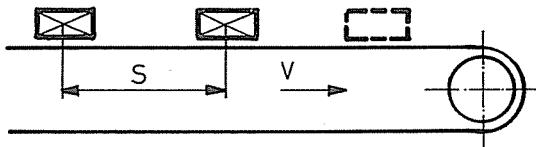
slika 7.6.

Teorijski kapacitet uredjaja kontinualnog transporta je dat izrazom :

$$Q_t = \frac{V}{S} \quad (\text{kom/s}), \quad \text{gde je}$$

V - brzina transporterja u (m/s), i

S - korak, odnosno rastojanje izmedju tereta u (m); slika 7.7.



slika 7.7.

Odstupanja od teorijskog kapaciteta mogu da nastanu u sledećim slučajevima:

- kod konvejera ($S=\text{Const}$) kada nisu popunjena sva kolica, i

- kod trakastih transporterja, rolganga itd. ($S \neq \text{Const}$) kada korak varira zavisno od procesa opsluživanja (brzine rada i broja radnih mesta na transporteru).

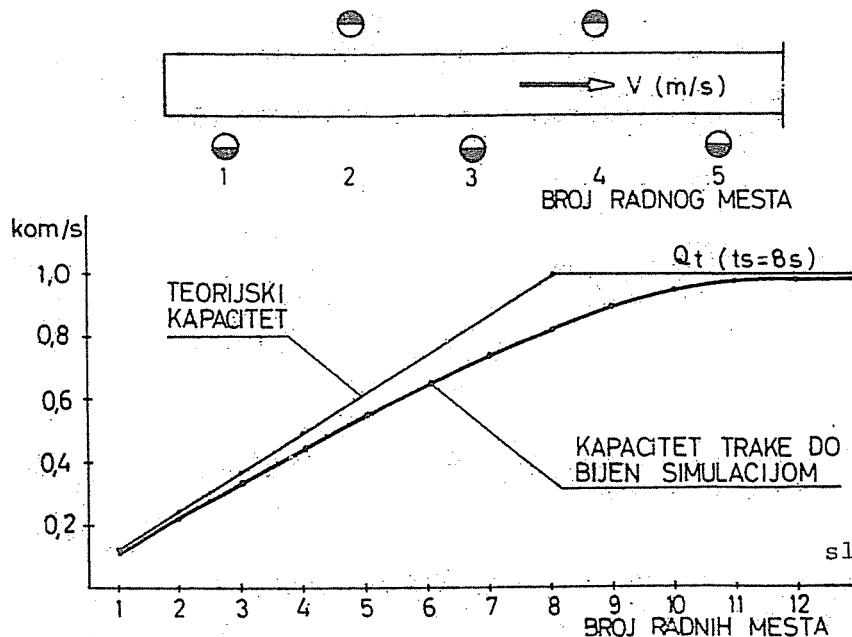
Na slici 7.8. je dat primer uporedjenja teorijskog kapaciteta i kapaciteta trake dobijenog simulacijom zavisno od broja radnih mesta koja opslužuju traku, a na slici 7.9. su dati osnovni parametri rada za svako radno mesto /46/.

Razvijeni simulacioni model može da analizira tri slučaja (slika 7.10.):

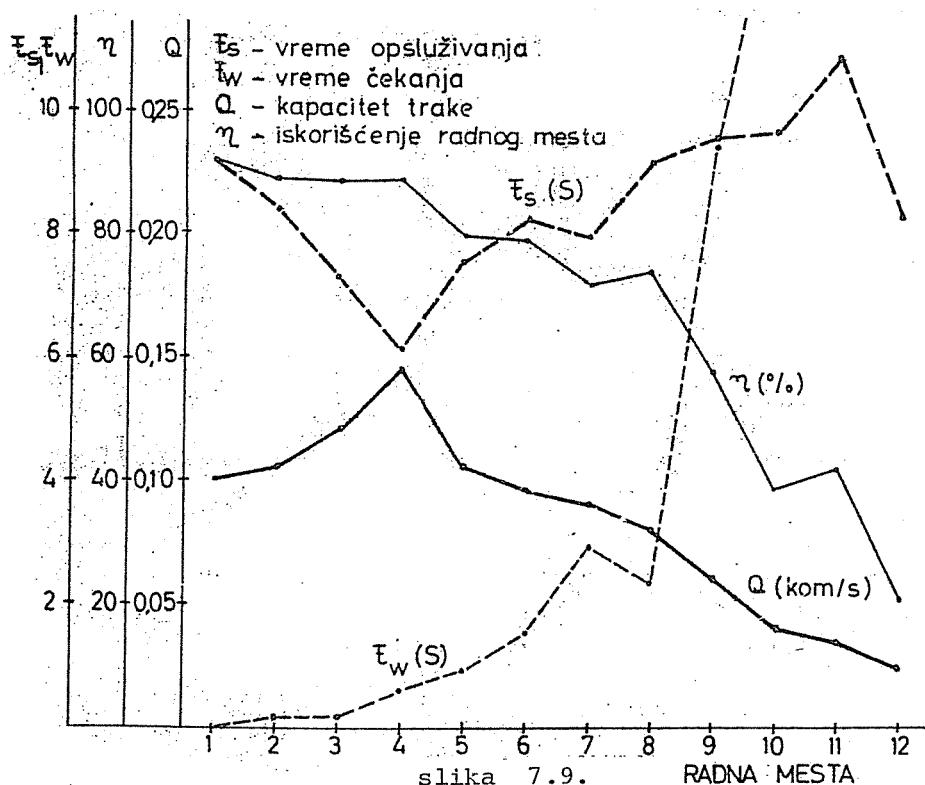
- dovoz robe železnicom ili tegljačem sa prikolicama,
- dovoz robe kamionima, elektrokolicima i sl., i
- uzimanje robe iz regala skladišta ili polica u procesu komisioniranja.

U sva tri navedena slučaja za istovar i otpremu robe se koriste kontinualni transporterji.

Nailazak vozila (vagoni, kamion, kolica itd.) sa komadnom robom dešava se na slučajan način. Pretvarne operacije obavljaju transportni uredjaji ili ljudi. U svakom ciklusu pretovaruje se po jedan komad (transportna jedinica - TJ) i posta-

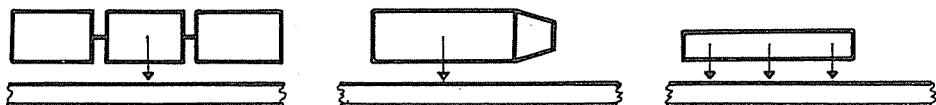


slika 7.8.



slika 7.9.

vlja na trakasti transporter ili konvejer. Vreme opsluživanja je slučajna promenljiva definisana nekom empirijskom ili teorijskom raspodelom. Traka se kreće kontinualno u toku celog procesa konstantnom brzinom. Ukoliko je mesto na traci (konvejera) zauzeto, operacija se odlaže sve dok se na uredaju neprekidnog transporta ne nadje dovoljno prostora za odlaganje datog komada (TJ). Po odlaganju, radnik (opslužni uredjaj) spreman je za izvodjenje sledećeg ciklusa. Kada traka prenese teret pored poslednjeg predviđenog opslužnog mesta, transportna jedinica napušta sistem i odlazi dalje na neke druge transportne ili skladišne operacije.



slika 7.10.

7.1. Matematički model

Nailazak komadnog tereta (TJ) i vreme opsluživanja po svojoj prirodi su diskretne veličine, ali kretanje uredjaja nije, pa je potrebna njegova diskretizacija. Površina trake podeљena je na polja konstantne dužine od 1 dm. Brzina trake može biti samo celobrojna vrednost u dm/s. Kretanje trake u svakoj sekundi svodi se na dinamičke skokove jednakе zadatoj brzini.

Pretovarni uredjaji nalaze se na jednakim rastojanjima. Dužina istovarnog fronta zavisi od dužine radnih mesta na traci i njihovog broja. Dužina radnog mesta je ulazni podatak koji zavisi od prostora potrebnog za opsluživanje i gabarita tereta. Širina uredjaja neprekidnog transporta nije bitna, jer je uvedena pretpostavka da je traka dovoljne širine za predviđene vrste komadne robe. Slobodni pretovarni uredjaj uzima jedan komad i prenosi ga do trake. Vreme opsluživanja jednako je pseudoslučajnom broju po datoј raspodeli. Stavljanje komadnog tereta na traku biće izvršeno po isteku vremena opsluživanja ukoli-

ko su sva mesta na tom delu pretovarnog fronta slobodna. Ako je i jedno mesto zauzeto pretovarni uredjaj čeka jednu vremensku jedinicu, pa se postupak ponavlja. Stanje trake u svakom trenutku definisano je stanjem svakog pojedinog mesta. Slobodno mesto ima stanje 0, a zauzeto 1.

Kada se TJ (komad) stavi na traku proces opsluživanja je završen, a čovek ili uredjaj koji radi na istovaru u stanju je da preuzme sledeći teret. Usvojeno je da svako radno mesto može da opsluži bilo koji teret (TJ), bez obzira na njegov položaj u odnosu na sredstvo kojim se dovozi roba. Slobodno radno mesto ima stanje 0, a ono koje trenutno opslužuje, stanje 1.

Trajanje simulacionog eksperimenta zavisi od izabranog kriterijuma. Ako je to broj nailazaka transportnih sredstava kojima se dovozi roba, onda se u prvoj vremenskoj jedinici povavljuje sredstvo (ili kompozicija) sa nekim brojem transportnih jedinica, slučajnim po dатој raspodelи. Proces se produžava sve dok se ne opsluže sve transportne jedinice iz sredstva (kompozicije) koje su generisane na početku simulacije. Potom se generiše vreme nailaska sledećeg sredstva i odgovarajući broj komadne robe. Proces se ponavlja sve dok se ne završi opsluživanje i poslednje palete iz poslednjeg sredstva.

Ako se za kriterijum izabere simulaciono vreme, onda se pretpostavlja beskonačan izvor paleta u prvom sredstvu. Trajanje simulacionog eksperimenta unapred je poznato, a broj pretovarenih komada je promenljiv. Za svako radno mesto (transportni uredjaj) izračunavaju se statistike:

- srednje vreme opsluživanja,
- srednje vreme u redu čekanja,
- ukupan broj pretovarenih transportnih jedinica u apsolutnom iznosu i procentualno u odnosu na celu pretovarnu liniju, i
- vremensko iskorišćenje radnog mesta.

Za uredjaj neprekidnog transporta izračunavaju se statistike maksimalnog i prosečnog iskorišćenja.

7.2. Struktura i funkcije programa TRAKA

Glavni program učitava broj radnih mesta (IRM), razmak radnih mesta u decimetrima (IRA), brzinu trake dm/s (IBT) i dužinu mesta na traci (IDU). Odnos učitanih podataka mora biti takav da broj mesta (ME) na traci (ITR) mora biti manji od dimenzionisanog. Potom se bira jedan od dva kriterijuma (KR). Ako je izabran kriterijum broj nailazaka sredstva (kompozicije), tada se maksimalno trajanje simulacionog eksperimenta (ISI) postavlja na dovoljno veliki broj (u programu na 30.000), a onda se poziva potprogram VAGON za učitavanje podataka o sredstvima. U drugom slučaju učitava se simulaciono vreme (ISI). Dalji tok glavnog programa nezavisan je od izabranog kriterijuma. Učitava se zagrevanje generatora pseudoslučajnih brojeva (IZ) i opcija za medjurezultate (MRK). Pomoćne promenljive postavljaju se na nulu, generator pseudoslučajnih brojeva se zagreva, a potprogram ERL za generisanje pseudoslučajnih brojeva po Erlangovoj raspodeli u slučaju da je izabran kriterijum broj nailazaka sredstava. Na kraju pozivaju se potprogrami SIMUL za simulaciju celokupnog procesa i STAMPA za ispisivanje izlaznih rezultata na ekranu.

Potprogrami obavljaju sledeće funkcije:

TU učitava srednje vreme opsluge komadne robe (SIM) i odgovarajući stepen Erlangove raspodele (KK);

VAGON učitava broj (IVO), srednje vreme (SNV) i stepen Erlangove raspodele broja nailazaka sredstava (kompozicija) (ICK), kao i prosečan broj (BK) i stepen Erlangove raspodele broja komada (ISK) u svakom sredstvu (kompoziciji);

ERL generiše ceo pseudoslučajan broj (LC) po Erlangovoj raspodeli stepena (K) i aritmetičke sredine (A);

SLUCAJ generiše pseudoslučajan broj (SL) po ravnomernoj raspodeli na intervalu (0,1);

STAMPA izračunava i ispisuje srednje vreme opsluge (A1), srednje vreme čekanja (A2), ukupan broj paleta MA (I,5), procent učešća (GC) u odnosu na celu pretovarnu liniju i vremensko iskorišćenje (A3) za sva opslužna mesta, a za uredjaj neprekidnog transporta ispisuje maksimalno (QP) i prosečno iskorišćenje trake (AP);

MEREZ. ispisuje detaljne medjurezultate;

SIMUL realizuje kompletan simulacioni proces po navedenom matematičkom modelu. Simulaciono vreme (J) teče od 1 do (ISI) po petlji 500. U okviru matrice MA za svako pretovarno mesto po kolonama se vode sledeći podaci:

- 1- trenutno stanje pretovarnog uredjaja (1-opslužuje,
- 0- ne opslužuje),
- 2- ukupno vreme opsluživanja od početka simulacije,
- 3- ukupno vreme čekanja da se već opslužena paleta stavi na traku (nastaje usled trenutne zauzetosti pretovarnog fronta),
- 4- simulacioni trenutak kada će se pretovarna operacija završiti,
- 5- ukupan broj pretovarenih paleta.

Petlja 60 generiše vreme opsluge ukoliko je pretovarni uredjaj slobodan da uzme paletu. U petlji 110 pretovarni uredjaj stavlja paletu (petlja 93) na traku ako su ispunjena dva uslova: opsluga je završena i nijedno mesto na pretovarnom frontu (petlja 83) nije zauzeto. U petlji 230 traka (niz ITR) dinamički se pomera za vrednost brzine (IBT). U petlji 280 izračunava se trenutno iskorišćenje trake (JOP), a zatim se poređi sa do tada maksimalnom vrednošću (IQP). Ako u kompoziciji nema više paleta generiše se vreme nailaska sledeće kompozicije (LBG). Proces se produžava sve dok se ne ispunи zadati kriterijum.

7.3. Primer simulacionog eksperimenta sa programom TRAKA

Na slikama 7.8. i 7.9. prikazani su rezultati simulacionih istraživanja sa programom TRAKA, na osnovu kojih je utvrđena valjanost modela u odnosu na realni sistem. Sledeći primer ukazuje na jedan od mogućih puteva istraživanja uticaja pojedinih parametara na funkcionisanje celog pretovarnog sistema.

Roba se dovozi upakovana u kartonske kutije. Istovar i postavljanje kutija na trakasti transporter obavljaju tri radnika. Prosечно vreme opsluživanja jedne kutije iznosi 8s i ponaša se po Erlangovoj raspodeli 2. reda. Brzina trake iznosi 0,5 m/s. Potrebno je odrediti uticaj dinamike dovoza na vreme-

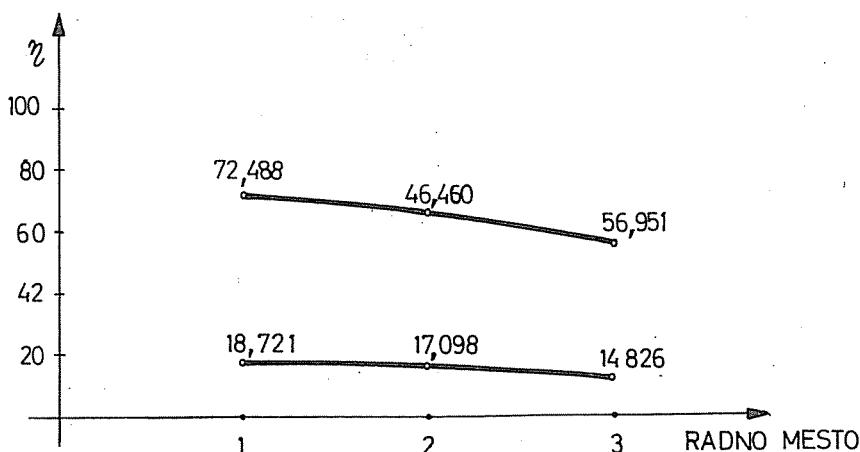
nsko iskorišćenje radnih mesta u sledećim slučajevima:

- robu dovozi 10 kamiona sa prosečnim intervalom od 45 minuta između odlaska prethodnog i nailaska sledećeg kamiona (eksponencijalna raspodela),

- roba se dovozi kompozicijom od 10 vagona; vreme potrebno za pomeranje vagona u toku istovara iznosi 4 minuta po vagonu i ponaša se po eksponencijalnoj raspodeli.

U oba slučaja u jednom kamionu, odnosno vagonu, nalazi se prosečno 300 kutija (Erlangova raspodela 10. reda).

Izvršena su dva simulaciona eksperimenta. U prvom slučaju pretovareno je 2694 kutija za 41243 s (oko 11,5 sati). Maksimalan protok na traci iznosio je 0,9; a prosečan 0,075. U drugom slučaju pretovareno je 2748 kutija za 10832 s (oko 3 sata). Maksimalan protok je bio takodje 0,9; dok je prosečan bio znatno veći i iznosio je 0,291. Na slici 7.11. prikazano je iskorišćenje radnih mesta u zavisnosti od dinamike dovoza.



slika 7.11.

```

C      TRAKA - program za simulaciju rade
C      uredjaja nosrekihdos transporta
COMMON /IME/ ITR(1500),MA(20,5)
COMMON /IMEII/ II
COMMON /TUK/ SIM,KK
COMMON /IM=UGZ/ IVO,SNV,ICK,BK,ISK
COMMON /IMESIM/ IRM,IRA,TB,IIDU,KR,IS,IZ
COMMON /IMFUL/ LK,L2G,MG,JOH+IRW,TB+KRN,J,ME
COMMON /OP/ MRK
COMMON /M/ M
WRITE(5,5)
5   FORMAT(' program za simulaciju nosrekihdos trake')
WRITE(5,11)
10  FORMAT(' broj rednih mesta - do 20 u formatu i2 ')
READ(5,12)IRM
11  FORMAT(I5)
12  IF(IRM.GT.20)WRITE(5,18)
    IF(IRM.GT.20)GO TO 10
    WRITE(5,13)
    READ(5,12)IRA
13  FORMAT(' razmak izmedju rednih mesta u decimetrima'
1' u formatu i5')
    WRITE(5,14)
14  FORMAT(' brzina trake u dm/s u formatu i5')
    READ(5,12)IBT
    WRITE(5,15)
15  FORMAT(' duzina mesta na treći u dm'
1' u formatu i5')
    READ(5,12)IDU
    ME=2*IDU+IRAK(IRM-1)
    IF(ME.GT.1500)WRITE(5,17)ME
17  FORMAT(' traka je predudarke, ima ',I5,' pozicija'
1' a dozvoljeno je 1500')
    IF(ME.GT.1500)GO TO 700
18  FORMAT(' maksimalan broj rednih mesta je 20')
    WRITE(5,19)
20  FORMAT(' izbor kriterijuma'
1' 1-broj nailazaka kompozicije// 2-simulaciono vreme')
    READ(5,12)KR
    IF(KR.EQ.1.OR.KR.EQ.2)GO TO 21
    GO TO 20
21  IF(KR.EQ.1)ISI=30000
    IVO=1
    IF(KR.EQ.1)CALL VAGON
    IF(KR.EQ.2)WRITE(5,4)
4   FORMAT(' simulaciono vreme u formatu i5')
    IF(KR.EQ.2)READ(5,12)ISI
    CALL TU
    WRITE(5,8)
86  FORMAT(' zasrevanje modela u formatu i5 ')
    READ(5,12)IZ
    IF(IZ.LT.1)GO TO 86
    WRITE(5,91)
91  FORMAT(' 1 za novdjurezultate ')

```

```

READ(5,12)MRK
II=0
IQP=0
MG=0
DO 100 I=1,IZ+2
CALL SLUCAJ(SL)
II=II+1
100 CONTINUE
CALL SIMUL
CALL STAMPA
700 STOP
END
SUBROUTINE SIMUL
COMMON /M/ M
COMMON /TUR/ SIM,KK
COMMON /IME/ ITR(1500),MA(20,5)
COMMON /IMEVDZ/ IVO,SNV,ICK,BK,ISK
COMMON /IMESTM/ IRM,IRA,IBT,IIU,KR,ISI,ITR
COMMON /IMEUL/ LK,LBG,MG,JOF,IQP,IDI,KRAJ,ME
COMMON /OP/ MRK
IDU=0
LBG=1
IF (KR.EQ.2) LBG=ISI+1
IF (KR.EQ.2) LK=30000
DO 500 J=1,ISI
IF(J.EQ.LBG)CALL ERL(BK,TSK,LK)
IF(J.EQ.LBG)LBG=0
IF(LBG.GT.0)GOTO 20
IF (LK.EQ.0)CALL ERL(SNV,ICK,LTG)
IF (LK.EQ.0)LBG=LTG+J+2
IF (LK.EQ.0)IVO=IVO-1
20 DO 60 I=1,IRM
IF(MA(I,1).EQ.1.OR.LK.EQ.0)GOTO 60
CALL ERL(SIM,KK,LCG)
MA(I,4)=J+LCG
IF(MG.LT.MA(I,4))MG=MA(I,4)
MA(I,2)=MA(I,2)+LCG
MA(I,1)=1
LK=LK-1
CONTINUE
70 DO 110 I=1,IRM
IF(MA(I,4).NE.0)GOTO 110
IDC=IDU
IC1=IDC+((I-1)*IRA)
IC2=IC1-IDC+1
DO 83 IH=IC2,IC1
IF(ITR(IH).EQ.1)GOTO 100
83 CONTINUE
MA(I,1)=0
MA(I,5)=MA(I,5)+1
MA(I,4)=0
DO 93 IH=IC2,IC1
ITR(IH)=1
93 CONTINUE
GOTO 110

```

```

100  MA(I,3)=MA(I,3)+1
    MA(I,4)=MA(I,4)+1
    IF(MG.LT.MA(I,4))MC=MA(I,4)
110  CONTINUE
    IF(MRK.EQ.1) CALL MEREZ(J)
    ID1=MF
    ID2=IBT+1
    DO 230 I7=ID2, ID1
    I=ID1+ID2-I7
    N=I-IBT
    IF(N.LT.1)GOTO 225
    ITR(I)=ITR(N)
    GOTO 230
225  ITR(I)=0
230  CONTINUE
232  DO 233 I=1,IBT
    ITR(I)=0
233  CONTINUE
    JOP=0
    DO 280 I=1,ME
    JOP=JOP+ITR(I)
280  CONTINUE
    M=J
    IF(JOP.GT.IQP)IHP=JOP
    IDP=IDP+JOP
    IF(KR.EQ.2)GOTO 500
    IF (JOP.EQ.0,ANU,LK,EQ.0,ANU,IVO,EQ.0)GOTO 600
500  CONTINUE
600  KRAJ=M
    DO 688 I=1,IRM
    IF (MA(I,4),GT,M)MA(I,2)=MA(I,2)-MA(I,4)+M
688  CONTINUE
    RETURN
    END
    SUBROUTINE MEREZ(J)
    COMMON /TUK/ SIM,KK
    COMMON /IME/ ITR(1500),MA(20,5)
    COMMON /IMFV02/ JV0,SNV,ILK,BK,ISK
    COMMON /IMESIM/ IRM,IRA,INT,IND,KR,ISI,ISK,ISV
    COMMON /IMEUL/ LK,LBG,MB,JCP,TQH,IPH,KR,I,ME
    COMMON /OP/ MRK
1    FORMAT(' simulacion vreme ',T40,I10/
2    ' dolazeck sledice kompozicije ',T40,I10)
3    FORMAT(' -----')
3    FORMAT(' preostalo kompozicije ',T40,I10/
4    ' trenutno saleta ',T40,I10)
4    FORMAT(' ',20I4)
5    FORMAT(' ',40I2)
6    FORMAT(' pritisni RETURN ')
7    FORMAT(A4)
    WRITE(5,2)
    WRITE(5,1)J,LBG
    WRITE(5,3)IVO,LK
    WRITE(5,4)(I,I=1,IRM)
    WRITE(5,4)(MA(I,4),I=1,IRM)

```

```

      WRITE(5,2)
      WRITE(5,5)(ITR(J),J=1,ME)
      WRITE(5,2)
      WRITE(5,6)
      READ(5,7)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE TU
      COMMON /TUK/ SIM,KK
      WRITE(5,1)
1      FORMAT(' opsluge paleta'
     1' srednje vreme opsluge paleta'
     2' u formatu F10.0 ')
      READ(5,2)SIM
2      FORMAT(F10.0)
      WRITE(5,3)
3      FORMAT(' stepen E:landove raspodele opsluge paleta'
     1' u formatu I2 ')
      READ(5,4)KK
4      FORMAT(I2)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE STAMPA
      COMMON /IME/ ITR(1500),MA(20,5)
      COMMON /M/ M
      COMMON /IMEUL/ LK,LBG,MC,JOP,TGP,TDP,KRAJ,ME
      COMMON /IMESIM/ IRM,IRA,IHT,INU,KR,ISI,IRK
500    MLL=0
      DO 11 I=1,IRM
      WRITE(5,12)(MA(I,J),J=1,5)
11    CONTINUE
12    FORMAT(' sU110')
      DO 687 I=1,IRM
      MLL=MLL+MA(I,5)
687    CONTINUE
      DO 680 I=1,IRM
      IF(MA(I,5).EQ.0)GO TO 630
      A1=FLOAT(MA(I,2))/FLOAT(MA(I,5))
      A2=FLOAT(MA(I,3))/FLOAT(MA(I,5))
      A3=100.*FLOAT(MA(I,2))/FLOAT(IHT))
      GO TO 640
630    A1=0.
      A2=0.
      A3=0.
640    IF(LL.EQ.0)GC=0.
      IF(LL.EQ.0)GO TO 651
      GC=FLOAT(MA(1,1))/FLOAT(LL)*100.
651    WRITE(5,645)I,A1,A2,MA(I,5),GC,A3
645    FORMAT(' radno mesto ',T30,I6/
     1' srednje vreme opsluge ',T30,F10.3/
     2' srednje vreme cekanja ',T30,F10.3/
     3' ukupan broj paleta ',T30,I6/
     4' ili u procentima ',T30,F10.3,' %'/
     5' vremensko iskoriscenje ',T30,F10.3,' %')
      WRITE(5,650)

```

```

650  FORMAT(' Pritisnite RETURN ')
READ(5,655)ALI
655  FORMAT(A4)
680  CONTINUE
QP=FLOAT(IQP)/FLOAT(ME)
AP=(FLOAT(IJM)/FLOAT(M))/FLOAT(ME)
WRITE(5,690)QP,AP
690  FORMAT(' maksimalno iskoriscenje trake ',T30,F10.3/
1' prosečno iskoriscenje trake ',I30,F10.3)
RETURN
END
SUBROUTINE VAGON
COMMON /IMEVOZ/ IVO,SNV,ICK,BK,ISK
WRITE(5,1)
1  FORMAT(' broj nailazaka kompozicija u formatu I4 ')
READ(5,2)IVO
2  FORMAT(I4)
WRITE(5,3)
3  FORMAT(' srednje vreme nailaska kompozicija '//'
1' u formatu F10.0 ')
READ(5,4)SNV
4  FORMAT(F10.0)
WRITE(5,5)
5  FORMAT(' stepen Erlangove raspodele broja kompozicija '//'
1' u formatu I4 ')
READ(5,6)ICK
WRITE(5,6)
6  FORMAT(' ocekivani broj paleta po kompoziciji '//'
1' u formatu F10.0 ')
READ(5,7)BK
WRITE(5,7)
7  FORMAT(' stepen Erlangove raspodele broja komada '//'
1' u formatu I4 ')
READ(5,8)ISK
RETURN
END
SUBROUTINE ERL(A,K,LC)
AMI=1./A
PR=1.
DO 2 I=1,K
CALL SLUCAJ(SL)
PR=PR*SL
2  CONTINUE
IF(PR.LT.1.E-4)PR=1.E-4
LC=INT((-1/(AMI*K))*ALOG(PR))
RETURN
END
SUBROUTINE SLUCAJ(SL)
COMMON /IMEII/ II
IF(II.EQ.0)IX=0
IF(II.EQ.0)IY=0
SL=RAN(IX,IY)
RETURN
END

```

8. SIMULACIJA RADA POSTROJENJA ZA POVRŠINSKU ZAŠТИTU

8.1. Opis tehnološkog procesa

Postrojenje za površinsku zaštitu ima 4 komore redno povezane u kojima se odvija fazno organizovan proces.

Priprema - prva komora. Priprema sklopova i prikolica se sastoji od skidanja korozije i odmašćivanja.

Bojenje - druga komora. Sklopovi i prikolice se boje ručno vazdušnim pištoljima. Pojedini sklopovi se boje osnovnom bojom a gotov proizvod (prikolica) ide na završno bojenje. Treba napomenuti da pojedini tipovi poljoprivrednih prikolica se posle montaže prvo boje osnovnom bojom, a zatim ponovo prolaze ceo ciklus (dva puta prolaze kroz postrojenje) i boje se završno lak bojama.

Stabilizacija premaza - treća komora. Stabilizacija premaza se sastoji u isparavanju dela rastvarača, odnosno razredjivača iz boje.

Sušenje premaza - četvrta komora. Osnovno bojeni skloovi i završno bojene prikolice se suše na temperaturi od 80°C . Iz opisa rada postrojenja za površinsku zaštitu se vidi da postoji značajan uticaj posebnih ograničenja nametnutih potrebom da se u rad jednog kontinualnog procesa (finalno bojenje proizvoda) uklope i operacije osnovnog bojenja pojedinih sklopova datog tipa poljoprivredne prikolice. Pošto vreme takta projektoyane linije zavisi od kapaciteta postrojenja za površinsku zaštitu, potreбno je posvetiti posebnu pažnju optimizaciji protoka kroz ovo postrojenje. Ovaj problem postaje kompleksan kada postoji veći broj šarži sa različitim sklopovima za osnovno bojenje.

Sve šarže zadatog proizvodnog programa obavezno prolaze kroz sve četiri komore. U prve dve komore operacije se izvode ručno, a vreme opsluživanja zavisi od karakteristika pojedinih šarži (gabarin, ukupna površina, oblik, kvalitet površine i td.). U prvoj komori najčešće radi 1-4 radnika, eventualno 5 kada se norma smanjuje za 10-15%. U drugoj komori radi jedan ili dva radnika. U trećoj i četvrtoj fazi vreme opsluživanja isključi-

vo zavisi od šarže, vrste premaza i kvaliteta površine posle zaštite u drugoj komori, zato što se ovi procesi odvijaju bez direktnog učešća ljudi.

Prelazak šarže iz komore u komoru moguć je pod uslovom da je proces opsluživanja u obe komore završen. Zadatak je da se odredi redosled prolaska šarži koji omogućava najmanje vreme opsluživanja u svim komorama.

Na slici 8.1. je dat osnovni blok dijagram linije glavne montaže, a na slici 8.2. je prikazan deo projektovanog postrojenja za površinsku zaštitu (prve tri komore).

8.2. Odredjivanje S-te permutacije u leksičkom redosledu

Postoji više različitih metoda za odredjivanje permutacija /15/. Leksički ili alfabetski redosled generiše se po istim principima kao što se redaju reči u rečniku. Permutacija ABCD uvek će se naći ispred permutacije ACBD. Simbol ne menjao mesto sve dok se ne izvrši sve moguće permutacije simbola koji se nalaze iza njega.

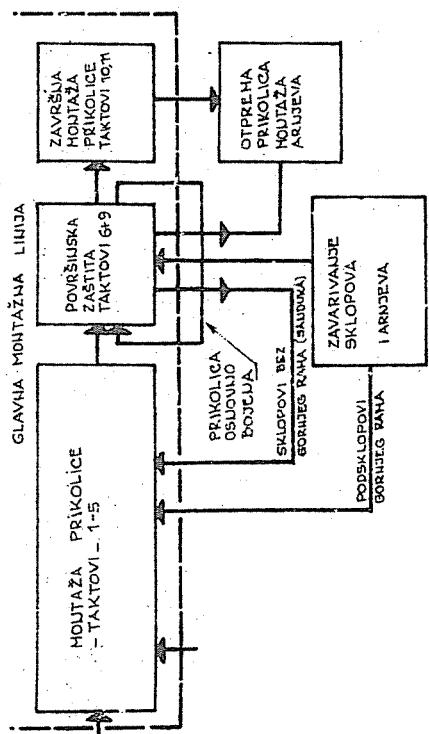
Neka je dato m simbola koje treba permutovati. Prvih $(m-1)!$ permutacija imaće prvi simbol na prvoj poziciji. Drugih $(m-2)!$ permutacija imaće drugi simbol na prvoj poziciji i tako dalje. Deljenjem $(S-1)$ sa $(m-1)!$ dodavanjem jedinice i zaokruživanjem na manji ceo broj definiše se redni broj člana niza simbola, koji će doći na prvo mesto permutacije, napuštajući svoje mesto u nizu, pri čemu se broj članova niza smanjuje za jedan. Postupak se zatim ponavlja sve dok u nizu simbola ne ostane samo jedan član koji zauzima poslednje mesto medju permutacionim simbolima.

8.3. Numerički primer

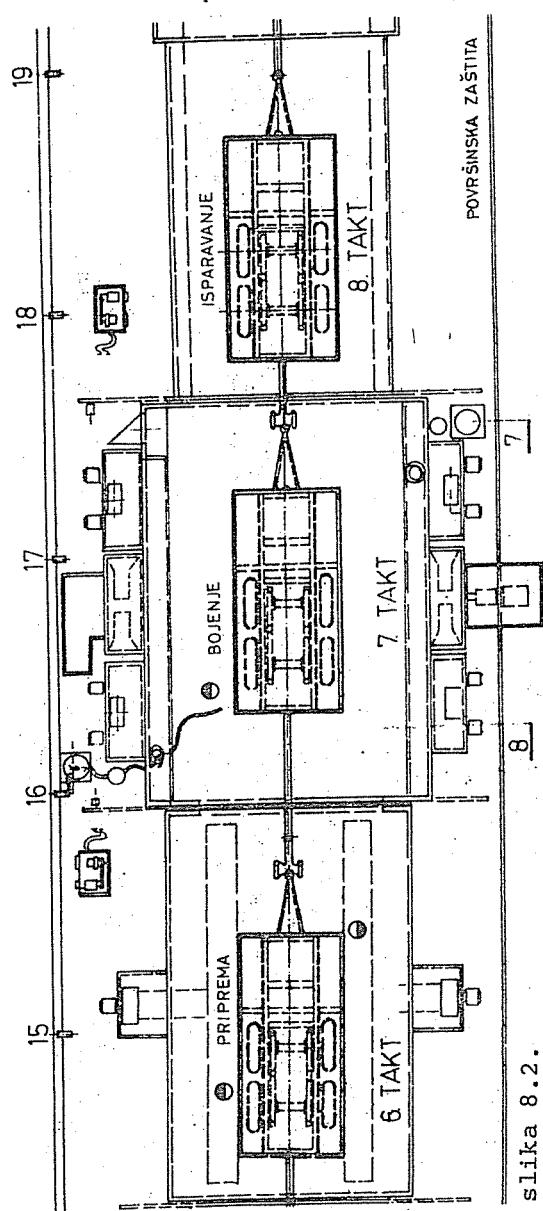
Neka je $m=4$, a niz simbola $(1, 2, 3, 4)$. Odredimo 9. permutaciju ($S=9$)

$$\underline{\text{korak 1: }} \left[(S-1)/(m-1)! \right] + 1 = \left[(9-1)/3! \right] + 1 = [8/6] + 1 = 2,$$

gde srednja zagradica označava ceo deo od izraza u zagradi; Prvi član 9. permutacije je 2 ($P_1=2$), a niz simbola ima tri čla-



slika 8.1.



slika 8.2.

na $(1, 3, 4)$

korak 2: na novom skupu praktično se traži treća kombinacija, jer je $S=S-(m-1)!=9-6=3$.

$$[(S-1)/(m-2)!] + 1 = [(3-1)/2!] + 1 = 2$$

drugi član 9. permutacije je drugi član niza simbola 3 ($P_2=3$), niz simbola smanjuje se za jedan i ima dva člana $(1, 4)$

korak 3: na novom skupu traži se prva kombinacija, jer je $S=S-(m-2)!=3-2!=1$

$$[(S-1)/(m-3)!] + 1 = [0/1] + 1 = 1,$$

treći član 9. permutacije je 1 ($P_3=1$), niz simbola smanjuje se za jedan i ostaje samo sa jednim članom (4) .

korak 4: pošto je u nizu simbola ostao samo jedan član to će četvrti član 9. permutacije biti 4 ($P_4=4$).

Ovim je u potpunosti odredjena 9. permutacija $(2, 3, 1, 4)$

8.4. Slučajne permutacije

Generisanje svih mogućih permutacija u leksičkom ili nekom drugom redosledu postaje vrlo obiman posao sa porastom m . Npr. $5!=120$, $10!=3,6 \cdot 10^6$, $15!=1,3 \cdot 10^{12}$, $20!=2,4 \cdot 10^{18}$, $25!=1,55 \cdot 10^{25}$. Pretpostavimo da nam je na raspolaganju računar izvanrednih performansi koji je u stanju da generiše milion operacija u sekundi. Za $m=15$ ceo proces će zahtevati 15 dana, a za $m=20$ potrebno je $2,4 \cdot 10^{12}$ sekundi ili oko 80 000 godina. Zato je vrlo ograničen broj primena u kojima se traži generisanje svih mogućih permutacija.

Izložićemo dva metoda. Definišimo m članova niza simbola a_j (npr. $a_j=j$, za $j=1, 2, \dots, m$). Iskoristimo generator ravnomerno rasporedjenih pseudoslučajnih brojeva (b) na intervalu $(0, 1)$. Neka je

$$C = [b * m] + 1,$$

gde je C indeks člana niza a_j .

Prvi član niza permutacije $P_1=a_C$. Zatim se vrši pomeranje svih članova niza a_j od člana $c+1$ do m za jedno mesto:

$$a_j = a_{j+1}, \text{ za } j=c, c+1, \dots, m-1$$

Postupak se ciklično ponavlja sve dok se niz a_j ne svede na jedan član.

8.5. Numerički primer:

Neka je $m=4$, a niz simbola $(1,2,3,4)$

korak 1: za slučajni broj $b=0,32$

$$c = [0,32 * 4] + 1 = [1,28] + 1 = 2$$

$p_1 = a_2 = 2$, a novi niz simbola je $(1,3,4)$.

korak 2: za slučajni broj $b=0,97$

$$c = [0,97 * 3] + 1 = [2,91] + 1 = 3$$

$p_2 = a_3 = 3$, a novi niz simbola je $(1,3)$.

korak 3: za slučajni broj $b=0,73$

$$c = [0,73 * 2] + 1 = [1,46] + 1 = 2$$

$p_3 = a_2 = 2$ a novi niz simbola ima samo jedan član (1) .

korak 4: za slučajni broj $b=0,17$

$$c = [0,17 * 1] + 1 = 1$$

$p_4 = a_1 = 1$

Ovim je postupak završen i dobijena je permutacija $(2, 4, 3, 1)$.

Drugi postupak vrlo je jednostavan. Ideja je da se odredi slučajan broj S na intervalu od 1 do $m!$

$$S = [b * m!] + 1 ,$$

a zatim se, ranije navedenim algoritmom, određuje S -ta permutacija u leksičkom redosledu.

U oba slučaja postoji mogućnost da se u okviru jednog eksperimenta generišu iste permutacije. Ima više razloga zašto se ne vrši pretraživanje istorijskog redosleda permutacije:

- zahteva se veliki memorijski prostor,
- poredjenje aktuelne sa prethodnim permutacijama usporava izvršavanje programa,
- verovatnoća pojave identičnih permutacija izuzetno je mala, a posebno za veliko m .

8.6. Matematička postavka problema

Uopštimo dimenzionalnost problema. Označimo sa n broj faza opsluživanja sa po jednim kanalom u svakoj fazi, a sa m broj jedinica (šarži) u sistemu. Vreme opsluge unapred je poznato

za svaku jedinicu u svakoj fazi i to: bilo kao slučajan broj zadat po nekoj teorijskoj ili empirijskoj raspodeli, bilo kao determinisan broj, po pravilu različit za razne jedinice u istoj fazi.

Sve ove podatke možemo svrstati u originalnu matricu T dimenzija $n \times m$. S obzirom da dalji postupak zahteva operacije nad članovima matrice T, pre svakog proračuna potrebno je prepisati originalnu matricu T u radnu matricu D. Pretpostavimo proizvoljan s-ti redosled jedinica u leksičkom redosledu

$$d_{ij} = t_{s(i),k} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = i, i+1, \dots, p \quad (1)$$

$$p = m - 1 + i \quad \dots (2)$$

$$k = j - i + 1 \quad \dots (3)$$

Radna matrica D ima dimenzije $n \times r$, gde je

$$r = m + n - 1 \quad \dots (4)$$

Označimo sa a_2 maksimalno potrebno vreme za istovremenu obradu svih jedinica na svim opslužnim mestima. Trivijalan slučaj dat je na početku procesa opsluge u prvom taktu, kada se samo jedna šarža nalazi na opsluživanju u prvoj fazi, dok su sva ostala opslužna mesta prazna, pa je

$$a_1 = d_{11} \quad \dots (5)$$

Isto se dešava i na kraju procesa opsluge.

U opštem slučaju za r-ti takt:

$$a_q = \max (d_{q1}, d_{q2}, \dots, d_{qr}) \quad \dots (6)$$

S obzirom da su za ceo proračun bitni i neki medjurezultati, biće izložen ceo tok proračuna.

Pretpostavimo da je vreme opsluživanja u prvoj fazi maksimalno

$$a_q = d_{q1} \quad \dots (7)$$

Pri ispitivanju odnosa a_q i sledećih d_{qi} moguća su tri slučaja:

a) ako je vreme opsluge u fazi (i) jednako maksimalnom

$$d_{qi} = a_q \quad \dots (8)$$

radna matrica D ostaje nepromenjena;

b) ako je vreme opsluge u fazi (i) manje od maksimalnog

$$d_{qi} < a_q \quad \dots (9)$$

radna matrica D transformiše se

$$d_{qi} = a_q \quad \dots (10)$$

što se fizički objašnjava čekanjem jedinice u fazi (i) po završetku opsluživanja, zbog nezavršenog opsluživanja neke od jedinica u nekoj od prethodnih faza;

c) ako je vreme opsluge u fazi (i) veće od maksimalnog

$$d_{qi} > a_q \quad \dots (11)$$

radna matrica D transformiše se

$$d_{q+1,j} = d_{qi+1,j} - (d_{qi} - a_q), \quad j=1, \dots, i-1 \quad \dots (12)$$

što se fizički objašnjava ranijim prelaskom u takt (q+1), pa se dešava da se u istom vremenskom trenutku vrši opsluživanje u različitim taktovima; postojanje negativnih vrednosti u radnoj matrici D označava da će se opsluživanje u fazi (j) takta (q+1) završiti pre započinjanja opsluživanja u fazi (i) takta (q); osim transformisanja matrice potrebno je definisati novu vrednost maksimuma

$$a_q = d_{qi} \quad \dots (13)$$

navedeni postupak provodi se za sve faze jednog takta. Vrednost a_q na kraju postupka predstavlja vreme trajanja takta (q). Zbir svih a_q definiše vreme protoka (t_s) za sve jedinice u datom redosledu S.

$$t_s = \sum_{q=1}^r a_q \quad \dots (14)$$

Optimizacija celokupnog procesa sastoji se u minimizaciji vremena protoka za sve jedinice. Kriterijumska funkcija F ima oblik:

$$F^* = \min (t_1, t_2, \dots, t_v) \quad \dots (15)$$

gde je v broj mogućih redosleda.

Za probleme malih dimenzija broj proračuna nije veliki, pa je moguće efikasno definisati sve t_s . Sa aspekta računarskog vremena porast broja jedinica i faza nije od bitnog uticaja, jer je u pitanju linearne veze, no to nije slučaj sa brojem mogućih redosleda

$$w = m ! \quad \dots (16)$$

što naglo povećava potrebno računarsko vreme.

Očito da navedeni pristup pretraživanja po celom skupu mogućih redosleda nije perspektivan u opštem slučaju, pa je potrebno izvršiti izbor uzorka. Efikasan izbor ograničenog uzorka $x \in w$ može se načiniti metodom Monte Karlo. Generisanjem slučajnog broja u intervalu $(1, w)$ bira se redni broj permutacije jedinica u leksičkom redosledu, te se za njega vrši proračun ukupnog vremena opsluživanja po algoritmu (1) - (14). Veličina skupa (x) može biti unapred zadata. Druga mogućnost je da se zada određen broj uzastopnih neuspelih pokušaja za koje je ispunjeno

$$F < ts \quad \dots (17)$$

posle čega se tekuće F proglašava za optimalno.

Dobijena vrednost F^* može se smatrati dovoljno dobrom aproksimacijom stvarne optimalne vrednosti kriterijumske funkcije.

8.7. Numerički primer

Pretpostavimo sistem opsluživanja sa četiri faze ($n=4$) i četiri jedinice ($m=4$). Neka je originalna matrica T (dimenzija 4×4) zadata na deterministički način

$$T = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 9 & 6 \\ 6 & 8 & 6 & 7 \\ 14 & 10 & 12 & 9 \\ 16 & 5 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

Korak 1. Izaberimo broj permutacija na slučajan način ili po redosledu u okviru pretraživanja po celom skupu. Za $s=1$ jedinice idu u redosledu $1, 2, 3, 4$, pa se matrica T transformiše u radnu matricu D (dimenzija 4×7)

$$D = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 9 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 8 & 6 & 7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 14 & 10 & 12 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16 & 5 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

za $S=9$ jedinice idu u redosledu $2, 3, 1, 4$. Radna matrica D_1 ima sledeći inicijalni oblik

$$D = \begin{bmatrix} 6 & 8 & 6 & 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 14 & 10 & 12 & 9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15 & 7 & 9 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16 & 5 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

analogno ovome može se definisati početna matrica za svaki S. Dalji tok proračuna biće radjen sa matricom D za s=1. Postavimo da je $t_s = 0$.

korak 2. Optimizacija prvog takta. Na osnovu jednačine (5) sledi

$$a_1 = 15, \quad t_s = 15$$

matrica D transformiše se tako da svi elementi prve kolone postaju jednaki 15.

$$D = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 9 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 6 & 8 & 6 & 7 & 0 & 0 \\ 15 & 0 & 14 & 10 & 12 & 9 & 0 \\ 15 & 0 & 0 & 16 & 5 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

korak 3. Optimizacija drugog takta analogna je prethodnom koraku, jer je maksimalan element u prvoj fazi

$$a_2 = 7, \quad t_s = a_1 + a_2 = 22$$

Matrica D se transformiše tako što svi elementi druge kolone postaju jednaki 7.

$$D = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 9 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 7 & 8 & 6 & 7 & 0 & 0 \\ 15 & 7 & 14 & 10 & 12 & 9 & 0 \\ 15 & 7 & 0 & 16 & 5 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

korak 4. Optimizacija trećeg takta. Pošto je

$$d_{13} > d_{23} \quad d_{23} = d_{13} = 9$$

Maksimalan član je d_{33} , pa je $d_{43} = d_{33}$, a sve prethodne jedinice o počeće sledeći takt ranije, pa je

$$d_{14} = d_{14} - (a_3 - d_{13}) = 6 - (14 - 5) = 1$$

$$d_{24} = d_{24} - (a_3 - d_{23}) = 6 - (14 - 5) = 1$$

$$a_3 = 14, \quad t_s = a_1 + a_2 + a_3 = 36$$

Matrica D transformiše se

$$D = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 9 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 7 & 9 & 1 & 7 & 0 & 0 \\ 15 & 7 & 14 & 10 & 12 & 9 & 0 \\ 15 & 7 & 14 & 16 & 5 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

korak 5. Optimizacija četvrtog takta. Maksimalan element je u četvrtoj fazi, pa nema transformacije elemenata četvrtog, već samo petog takta.

$$d_{15} = d_{15} - (a_4 - d_{14}) = 0 - (16 - 1) = -15$$

$$d_{25} = d_{25} - (a_4 - d_{24}) = 7 - (16 - 1) = -8$$

$$d_{35} = d_{35} - (a_4 - d_{34}) = 12 - (16 - 10) = 6$$

$$a_4 = 16, \quad ts = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 52$$

Matrica D transformiše se

$$D = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 9 & 1 & -15 & 0 & 0 \\ 15 & 7 & 9 & 1 & -8 & 0 & 0 \\ 15 & 7 & 14 & 10 & 6 & 9 & 0 \\ 15 & 7 & 14 & 16 & .5 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

korak 6. Optimizacija petog takta. Ovde se po prvi put pojavljuju negativni elementi, što znači da će opslužna mesta u prvoj i drugoj fazi biti slobodna 15 odnosno 8 vremenskih jedinica pre nego što počne peti takt za treću i četvrtu fazu. Pošto je

$$d_{35} > d_{45} \quad d_{45} = d_{35} = 6$$

$$a_5 = 6, \quad ts = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 58$$

$$d_{16} = d_{16} - (a_5 - d_{15}) = 0 - (6 + 15) = -21$$

$$d_{26} = d_{26} - (a_5 - d_{25}) = 0 - (6 + 8) = -14$$

Matrica D transformiše se

$$D = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 9 & 1 & -15 & -21 & 0 \\ 15 & 7 & 9 & 1 & -8 & -14 & 0 \\ 15 & 7 & 14 & 10 & 6 & 9 & 0 \\ 15 & 7 & 14 & 16 & 6 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

korak 7. Optimizacija šestog takta analogna je pre hodnom

$$d_{36} > d_{46} \quad d_{46} = d_{36} = 9$$

$$a_6 = 9; \quad ts = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 = 67$$

$$d_{17} = d_{17} - (a_6 - d_{16}) = 0 - (9 + 21) = -30$$

$$d_{27} = d_{27} - (a_6 - d_{26}) = 0 - (9 + 14) = -23$$

Matrica D transformiše se

$$D = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 9 & 1 & -15 & -21 & -30 \\ 15 & 7 & 9 & 1 & -8 & -14 & -23 \\ 15 & 7 & 14 & 10 & 6 & 9 & 0 \\ 15 & 7 & 14 & 16 & 6 & 9 & 8 \end{bmatrix}$$

korak 8. Optimizacija sedmog takta vrši se kao i optimizacija prvog sa tom razlikom što se tehnološki obavlja proces samo u poslednjoj fazi, pa je

$$a_7 = d_{47} = 8$$

$$ts = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 = 75$$

Matrica D se ne transformiše.

Ovim je postupak završen. Treba primetiti da važi

$$a_q = d_{nq},$$

pa se ukupno potrebno vreme za opslugu svih šarži t_s može izračunati i kao zbir vremena u poslednjoj fazi sistema

$$ts = \sum_{q=1}^r a_q = \sum_{q=1}^r d_{nq}$$

Za datu matricu T moguća su 24 različita redosleda

S	redosled	ts
1	1 2 3 4	75
2	1 2 4 3	83
3	1 3 2 4	75
4	1 3 4 2	75
5	1 4 2 3	82
6	1 4 3 2	83
7	2 1 3 4	74
8	2 1 4 3	82
9	2 3 1 4	70

S	redosled	ts
10	2 3 4 1	73
11	2 4 1 3	82
12	2 4 3 1	73
13	3 1 2 4	71
14	3 1 4 2	72
15	3 2 1 4	74
16	3 2 4 1	77
17	3 4 1 2	74
18	3 4 2 1	73
19	4 1 2 3	83
20	4 1 3 2	83
21	4 2 1 3	82
22	4 2 3 1	73
23	4 3 1 2	74
24	4 3 2 1	77

Optimalna vrednost F^* dobija se za $S=9$ (redosled 2, 3, 1, 4) i iznosi $F^* = 70$.

8.8. Organizacija podataka

U priloženom listingu izvršeno je dimenzionisanje na maksimalno 10 faza i deset šarži. Globalne promenljive smeštene su u odgovarajuće COMMON zone:

- NN (šarža, faza) matrica originalnih podataka,
- IHH (šarža, takt) radna matrica,
- MA (K) pomoći niz za određivanje K-te permutacije u leksičkom redosledu,
- NA (K) redosled šarži pri K-toj permutaciji,
- KBB (JOO) optimalni redosled šarži,
- SNA (ime, faza) naziv tehnoloških operacija po fazama,
- XMM (faza, J) matrica stepena Erlangove raspodele ($J=1$) i srednjeg vremena opsluživanja ($J=2$) po fazama,
- N broj šarži, KK - redni broj kombinacija,
- LUK ukupno vreme u fazi,
- JOP trenutno optimalno rešenje,
- JOO redni broj optimalne kombinacije,

- LF broj faza opsluživanja,
- IPC broj taktova,
- NF maksimalan broj permutacija,
- MR nivo detaljnosti medjurezultata,
- MW veličina skupa,
- KV broj slučajnih pokušaja.

Ostale promenljive su lokalnog značaja.

8.9. Struktura i funkcija programa SARZA

Glavni program poziva potprogram za učitavanje podataka o broju faza i šarži P 100 i naziva tehnoloških operacija P500. Ako se izabere opcija za slučajna vremena opsluge onda se poziva potprogram P400 za učitavanje aritmetičkih sredina i stepena Erlangove raspodele, i potprogram P600 za generisanje matrice originalnih podataka. Ako se izabere opcija za determinisana vremena opsluge onda se poziva potprogram za učitavanje matrice originalnih podataka P1400. Zatim se vrši izbor nivoa detaljnosti medjurezultata i izbor veličine skupa koji se optimizuje. Promenljiva JOP postavlja se na dovoljno veliku vrednost, a J00 na nulu. Potprogram P1600 inicijalizuje radnu matricu IHH na nulu. U zavisnosti od veličine izabranoj optimizacionog skupa opciono se pozivaju P2000 (za ceo skup), P2100 (za slučajan skup) ili P1900 (za poseban redosled). Po završetku proračuna na ekranu se ispisuje optimalno rešenje i kombinacija koja ga realizuje. Ako se želi produžetak rada sa istom grupom podataka onda se ide na izbor nivoa detaljnosti medjurezultata i dalje po navedenom algoritmu. Ako se ne želi produžetak rada onda se program završava.

P100 učitava broj šarži i broj fazu opsluživanja, a računa broj taktova.

P400 učitava stepen Erlangove raspodele i srednje vreme opsluživanja po fazama.

P500 učitava nazive tehnoloških operacija po fazama.

P600 generiše matricu originalnih podataka po datoj raspodeli, pri čemu se poziva potprogram ERL.

P900 određuje k-tu permutaciju u leksičkom redosledu.

P1100 ispisuje matricu originalnih početnih podataka.

P1400 učitava determinisana vremena opsluživanja za svaku šaržu i svaku fazu.

P1500 postavlja matricu tekućeg stanja (IHH) na početnu vrednost.

P1510 ispisuje matricu tekućeg stanja (IHH).

P1600 inicijalizuje matricu tekućeg stanja (IHH) na nulu.

P1800 izračunava ukupno vreme opsluživanja za k-tu permutaciju redosleda šarži; opcionalo se štampaju detaljni (pozivaju se P1510 i P2300) i globalni medjurezultati (poziva se P2300); nova vrednost uporedjuje se sa optimalnom i ako je manja postavlja se kao optimalna.

P1900 učitava se redni broj kombinacije po leksičkom redosledu; za proračun potrebnog vremena poziva se P2400.

P2000 za ceo skup mogućih kombinacija proračunava se potrebno vreme sa P2400.

P2100 učitava broj slučajnih pokušaja; kombinacije se generišu na slučajan način po potprogramom SLUCAJ; za svaku kombinaciju proračunava se potrebno vreme sa P2400.

P2300 dinamički stop.

P2400 poziva potprograme za inicijalizaciju matrice tekućeg stanja P1600, određivanje k-te permutacije u leksičkom redosledu P900 i postavljanje matrice tekućeg stanja na početnu vrednost. Ako se traže detaljni medjurezultati ispisuje se matrica početnog stanja P1510. Na kraju se izračunava ukupno vreme opsluživanja.

ERL generiše ceo broj po Erlangovoj raspodeli.

SLUCAJ generiše pseudoslučajan broj po ravnomernoj raspodeli.

```

C   SARZA - program za optimizaciju redosleda
C   u jednokanalnom visefaznom sistemu
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBB(10)
COMMON /IMEII/ II
LOGICAL *2 SNA
COMMON /N1/ SNA(40,10)
COMMON /X/ XMM(10,2)
COMMON /R/ JOP,JOO
COMMON /M/ MR
COMMON /W/ IFC,N,LF,RF
WRITE(5,1)
1 FORMAT(' Program "SARZA" ')
CALL P100
CALL P500
2 WRITE(5,10)
10 FORMAT(' 1-slucajna vremena opluse'/
' 2-determinisana vremena opluse')
READ(5,15)IYY
IF(IYY.EQ.1,OK,IYY,ER,2)GOTO 7
GOTO 2
7 WRITE(5,9)
9 FORMAT(' zastrevanje modela')
READ(5,15)IW
IF(IW.LT.1)GOTO 7
DO 314 IL=1,IW+2
CALL SLUCAJ(SL)
II=1
314 CONTINUE
15 FORMAT(I1)
IF(IYY.EQ.1)GOTO 20
27 CALL P1400
GOTO 3
20 CALL P400
CALL P600
3 WRITE(5,25)
25 FORMAT(' 1-detajlni medjurezultati'/
' 2-globalni medjurezultati'/
' 3-bez medjurezultata')
READ(5,15)MR
JOP=30000
JO0=0
IF(MR.LT.1,OR,MR.GT.3)GOTO 3
4 WRITE(5,30)
FORMAT(' 1-optimizacija po celom skupu'/
' 2-optimizacija na slucajnom skupu'/
' 3-proracun za proizvoljan redosled')
READ(5,15)MW
IF(MW.LT.1,OR,MW.GT.3)GOTO 4
CALL P1600
IF(MW.EQ.1)CALL P2000
IF(MW.EQ.2)CALL P2100
IF(MW.EQ.3)CALL P1900
WRITE(5,35)JOP,JO0
35 FORMAT(' optimalno resenje u datom skupu ',IS/

```

```

1' kombinacija ',I5)
40 WRITE(5,40)(KBB(l),l=1,N)
FORMAT(10I5)
WRITE(5,45)
45 FORMAT('// zelite li da radite sa istom grupom podataka da-
READ(5,15)IDN
IF(IDN.EQ.1)GOTO 3
WRITE(5,50)
50 FORMAT(' kraj programa')
STOP
END
SUBROUTINE P100
COMMON /W/ IFC,N,LF,NF
1 WRITE(5,10)
10 FORMAT(' broj sarzi u formatu I2 '$)
READ(5,11)IJ
IF(IJ.LT.2.OR.IJ.GT.10)GO TO 1
11 FORMAT(I2)
N=IJ
2 WRITE(5,12)
12 FORMAT(' broj faza otpluse u formatu I2')
READ(5,11)LF
IF(LF.GT.10.OR.LF.LT.1)GO TO 2
NF=1
481 DO 481 I=1,LF
NF=NF*I
IPA=LF-1
IPB=N-LF+1
IPC=2*IPA+IPB
RETURN
END
SUBROUTINE P400
COMMON /X/ XMM(10,2)
COMMON /N1/ SNA(40,10)
COMMON /W/ IFC,N,LF,NF
DO 481 I=1,LF
1 WRITE(5,10)I,(SNA(J,I),J=1,20)
10 FORMAT(' faza ',I2,' tehnička operacija: ',20A2/
1' stepen erlangove raspodele u formatu I3      '$)
READ(5,20)IJ
20 FORMAT(I3)
IF(IJ.GT.99.OR.IJ.LT.1)GO TO 1
XMM(I,1)=FLOAT(IJ)
2 WRITE(5,30)
30 FORMAT(' srednje vreme otpluse u formatu F10.0      ')
READ(5,40)S
IF(S.LT.0)GO TO 2
XMM(I,2)=S
481 CONTINUE
40 FORMAT(F10.0)
RETURN
END
SUBROUTINE P500
COMMON /N1/ SNA(40,10)
COMMON /W/ IFC,N,LF,NF

```

```

DO 481 I=1,LF
WRITE(5,10)I
10 FORMAT(' naziv tehnološke operacije u faziji ',12)
READ(5,20)(SNA(J,I),J=1,20)
20 FORMAT(20A2)
481 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P1510
COMMON /W/ IPC,N,LF,NF
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBB(10)
WRITE(5,1)
1 FORMAT(' -----')
DO 4 I=1,N
WRITE(5,10)(IHH(I,J),J=1,IPC)
4 CONTINUE
10 FORMAT(' ',10I5)
RETURN
END
SUBROUTINE P1600
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBB(10)
DO 4 I=1,10
DO 4 J=1,30
IHH(I,J)=0
4 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P1800(KK)
COMMON /R/JOP,JUU
COMMON /W/ IPC,N,LF,NF
COMMON /M/ MR
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBB(10)
LUK=0
DO 481 J=1,IPC
MX=IHH(1,J)
DO 1840 I=1,N
IF(IHH(I,J).LT.MX)IHH(I,J)=MX
IF(IHH(I,J).LT.MX)GO TO 1840
IF(J.EQ.IPC)GO TO 1820
MY=IHH(I,J)-MX
DO 483 K=1,1-1
IHH(K,J+1)=IHH(K,J+1)-MY
483 CONTINUE
MX=IHH(I,J)
1820 CONTINUE
1840 LUK=LUK+MX
IF(MR.EQ.2.OR.MR.EQ.3)GO TO 481
CALL P1510
WRITE(5,5)J,MX,LUK
5 FORMAT(' korak ',T15,T10,' vreme u faziji ',T15,T10/
1' ukupno ',T15,T10)
CALL P2300
481 CONTINUE
IF(JOP.GT.LUK)GO TO 48
62 IF(MR.EQ.3)GO TO 1890

```

```

      WRITE(5,7)(NA(I),I=1,N)
7       FORMAT(' redosled ',10I4)
      WRITE(5,6)KK
6       FORMAT(' kombinacija ',T5)
      WRITE(5,8)LUK,JOP,JO0
8       FORMAT(' vreme ',T20,I5/
1' trenutni optimum ',T20,I5/
2' kombinacija ',T20,I5)
      WRITE(5,9)(KBB(I),I=1,N)
9       FORMAT(' ',10I4)
      CALL P2300
      GO TO 1001
48      JOP=LUK
      JO0=KK
      DO 49 I=1,N
      KBB(I)=NA(I)
49      CONTINUE
      GO TO 62
1001    CONTINUE
1890    RETURN
      END
      SUBROUTINE P1900
      COMMON /W/ IFC,N,LF,NF
1900    WRITE(5,10)
      FORMAT(' izlaz sa 0/'
1' redni broj kombinacije ')
      READ(5,11)KK
11      FORMAT(I5)
      IF(KK.EQ.0)GO TO 1925
      IF(KK.GT.NF.OR.KK.LT.1)GO TO 1900
      CALL P2400(KK)
      GO TO 1900
1925    RETURN
      END
      SUBROUTINE P2000
      COMMON /W/ IFC,N,LF,NF
      DO 48 KK=1,NF
      CALL P2400(KK)
48      CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE P2100
      COMMON /W/ IFC,N,LF,NF
1      WRITE(5,10)
10     FORMAT(' broj slucajnih pokusa,ja ',\$)
      READ(5,20)KU
20     FORMAT(I5)
      IF(KU.GT.NF.OR.KU.LT.1)GO TO 1
      DO 482 KS=1,KU
      CALL SLUCAJ(SL)
      KK=INT(FLOAT(NF)*SL)+1
      CALL P2400(KK)
482    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE P2300
WRITE(5,21)
WRITE(5,10)
21  FORMAT(' -----')
10  FORMAT(' Pritisnite RETURN ')
READ(5,11)A
11  FORMAT(A6)
RETURN
END
SUBROUTINE P2400(KK)
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBB(10)
COMMON /R/ JOF,JCO
CALL P1600
K=KK
CALL P900(K,KK)
CALL P1500
IF(MR.EQ.1)CALL P1510
CALL P1800(KK)
RETURN
END
SUBROUTINE P600
COMMON /W/ IPC,N,LF,NF
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBB(10)
COMMON /X/ XMM(1C,2)
DO 481 I=1,N
DO 481 J=1,LF
K=INT(XMM(J,1))
CALL ERL(XMM(J,2),K,LC)
NN(I,J)=LC
481 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P900(K,KK)
COMMON /W/ IPC,N,LF,NF
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBB(10)
DO 481 I=1,N
MA(I)=I
481 CONTINUE
MA(N+1)=MA(N)
IQ=1
DO 482 I=1,N-1
IQ=IQ*I
482 CONTINUE
DO 483 J=1,N-1
LC=INT(FLOAT(K-1)/FLOAT(IQ))+1
NA(J)=MA(LC)
DO 484 I=LC,N-J
MA(I)=MA(I+1)
484 CONTINUE
K=K-IQ*(LC-1)
IF(J.EQ.N-1)NA(N)=MA(1)
IF(J.EQ.N-1)GO TO 483
IQ=INT(FLOAT(IQ)/FLOAT(N-J))
483 CONTINUE
RETURN

```

```

END
SUBROUTINE P1100
COMMON /W/ IPC,N,LF,NF
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBR(10)
DO 97 J=1,LF
WRITE(S,1)(NN(I,J),I=1,N)
97 CONTINUE
1 FORMAT(' ',10I5)
RETURN
END
SUBROUTINE P1400
COMMON /W/ IPC,N,LF,NF
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBR(10)
COMMON /N1/ SNA(40,10)
DO 481 I=1,N
DO 481 J=1,LF
1 WRITE(S,10)I,J,(SNA(I1,J),I1=1,20)
10 FORMAT(' sarza',I2,5X,'faza',I2/
1' tehnoloske operacija ',20A2/
2' vreme opluse u formatu I4 ',\$)
READ(S,20)KJ
20 FORMAT(I4)
IF(KJ.LT.1)GO TO 1
NN(I,J)=KJ
481 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE P1500
COMMON /W/ IPC,N,LF,NF
COMMON /N/ NN(10,10),MA(10),NA(10),IHH(10,30),KBR(10)
DO 1505 I=1,N
DO 1505 J=I,LF-1+I
J1=J-I+1
IHH(I,J)=NN(NA(I),J1)
1505 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE ERL(A,K,LC)
AMI=1./A
PR=1.
DO 2 I=1,K
CALL SLUCAJ(SL)
PR=PR*SL
2 CONTINUE
IF(PR.LT.1.E-4)PR=1.E-4
T=(-1/(AMI*K))*ALOG(PR)
LC=T
RETURN
END
SUBROUTINE SLUCAJ(SL)
COMMON /IMEII/ II
IF(II.EQ.0)IX=0
IF(II.EQ.0)IY=0
SL=RAN(IX,IY)
RETURN
END

```

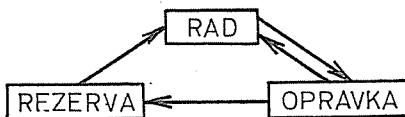
9. ZATVORENI SISTEM OPSLUŽIVANJA

U industrijskim i transportnim sistemima po pravilu postoje ograničenje radnih resursa: broja mašina ili broja transportnih sredstava. Optimizacija njihovog broja predstavlja osnovni zadatak kako pri projektovanju, tako i pri praćenju eksploatacionih pokazatelja. Postoje dva ograničavajuća faktora:

- nedovoljan broj ispravnih transportnih uredjaja prouzrokuje zastoje što ometa radni proces i smanjuje produktivnost,

- preveliki broj transportnih uredjaja povećava investiciona ulaganja i zahteva dodatni prostor za njihov smeštaj i čuvanje u rezervi.

Na slici 9.1. prikazana su tri osnovna stanja u kojima se može naći jedan transportni uredjaj.



Slika 9.1. Šema promena stanja sistema

Kao što se sa slike 9.1. vidi osnovni je kružni tok: rad - opravka - rezerva - rad. Sekundarni tok: opravka - rad - opravka, javlja se u slučajevima kada transportnih uredjaja nema u rezervi, a broj u radu je nedovoljan. Tada opravljeni transportni uredjaji prelaze direktno sa opravke u eksploataciju.

9.1. Simulacioni model

I u ovom slučaju simulacioni model bi mogao da koristi raspodele vremena trajanja radnog stanja i raspodele vremena opravke, te bi se primenom metoda kritičnog dogadjaja, uz ravnomerno ili skokovito kretanje sata, realizovali simulacioni eksperimenti na sličan način kao u prethodnim primerima.

No, postoji i drugi metod preko verovatnoće promene stanja i njega ćemo demonstrirati na ovom primeru.

Ulazni podaci su: broj transportnih uredjaja prema popisu,

potreban broj transportnih uredjaja za rad u stacionarnom režimu rada, verovatnoća početne ispravnosti, verovatnoća otkaza i verovatnoća opravke.

Verovatnoća početne ispravnosti predstavlja jedan vid zagrevanja sistema, ali ne isključuje potrebu za zagrevanjem generatora pseudoslučajnih brojeva. Ukoliko se javi potreba za simuliranjem procesa na čijem početku su svi transportni uredjaji ispravni (npr. uredjaji su novi i nalaze se na početku procesa eksplatacije), tada je verovatnoća početne ispravnosti jednaka jedinici. To znači da se i ovaj poseban slučaj može tretirati kao i svi drugi. Za svaki transportni uredjaj generiše se slučajni broj. Ako je on veći od verovatnoće početne ispravnosti uredjaj je neispravan, a ako je manji ili jednak onda je uredjaj ispravan.

Ako je više ispravnih nego što je mesta na radu, višak transportnih uredjaja odlazi u rezervu.

U svakom vremenskom trenutku u toku simulacionog vremena za svaki transportni uredjaj vrši se ispitivanje promene stanja. Generiše se slučajni broj i izvrši njegovo uporedjenje sa:

- verovatnoćom otkaza, ako je uredjaj ispravan,
- verovatnoćom opravke, ako je uredjaj neispravan.

Ukoliko je slučajni broj manji od odgovarajuće verovatnoće transportni uredjaj menja stanje:

- ispravan se kvari i odlazi na opravku,
- neispravan se opravlja i odlazi u rezervu.

Transportni uredjaji koji se u datom trenutku nalaze u rezervi ne mogu se pokvariti, što znači da se za njih ne generiše slučajni broj.

Kada se za sve transportne uredjaje ispita potreba za promenom stanja, nedostajući uredjaji se prebacuju iz rezerve na rad do potrebnog broja transportnih uredjaja na radu.

Sat u modelu se jednolikoj kreće i svakog trenutka prikupljaju se statistike. Po isteku simulacionog vremena izračunavaju se izlazni rezultati.

9.2. Organizacija podataka

Ulazni podaci su:

POC - verovatnoća početne ispravnosti transportnih uređaja (TU),

POTK - verovatnoća otkaza ispravnog TU,

POPR - verovatnoća opravke neispravnog TU,

U nizu NR (11) nalaze se ulazni podaci i statistike:

NR(1) - broj TU prema popisu,

NR(2) - potreban broj TU na radu,

NR(3) - trenutni broj TU na radu,

NR(4) - trenutni broj TU na opravci,

NR(5) - trenutni broj TU u rezervi,

NR(6) - minimalni broj TU na radu,

NR(7) - maksimalni broj TU na opravci,

NR(8) - maksimalni broj TU u rezervi,

NR(9) - ukupno vreme svih TU na radu,

NR(10) - ukupno vreme svih TU na opravci,

NR(11) - ukupno vreme svih TU u rezervi.

Ostale značajne promenljive su:

IZ - zagrevanje generatora pseudoslučajnih brojeva,

IS - simulaciono vreme

9.3. Struktura programa ZOPS

Glavni program poziva potprograme za: učitavanje (P1000), simulaciju (P3000) i ispis rezultata (P5300).

P1000 učitava sve podatke i poziva potprogram za inicijalizaciju i zagrevanje generatora pseudoslučajnih brojeva SLUCAJ.

P3000 upravlja simulacijom. Poziva potprogram za postavljanje početnog stanja (P3100), a zatim u svakom vremenskom trenutku poziva potprograme za: otkaz ispravnih transportnih uređaja (P3200), popravku pokvarenih mašina (P3300), prelaz iz rezerve na rad (P3400), obračunavanje statistika (P3500) i opcionalno ispis medjurezultata (P5100).

Potprogrami P3100, P3200 i P3300 pozivaju potprogram za generisanje pseudoslučajnog broja na jediničnom intervalu SLUCAJ.

Redosled pozivanja potprograma P3200, pa P3300 omogućava da jedan transportni uredjaj bude opravljen u istom trenutku

kada se i pokvari. Promenom redosleda P3300, pa P3200 stvorila bi se šansa da se transportni uredjaj može pokvariti u istom trenutku kada je i popravljen. Ove dve strategije međusobno su različite. Serijom eksperimenata može se utvrditi njihov uticaj na stanje sistema.

```

C Program za simulaciju zatvorenog
C sistema za opsluzivanje
C
COMMON /IMEII/ II
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
CALL P1000
CALL P3000
CALL P5300
STOP
END
SUBROUTINE P1000
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
WRITE(5,10)
10 FORMAT(' verovatnoca pocetne ispravnosti masina')
READ(5,20) POC
20 FORMAT(F10.0)
21 FORMAT(I5)
WRITE(5,11)
11 FORMAT(' verovatnoca otkaza')
READ(5,20) POTK
WRITE(5,12)
12 FORMAT(' verovatnoca opravke')
READ(5,20) POPR
WRITE(5,13)
13 FORMAT(' broj masina')
READ(5,21) NR(1)
WRITE(5,14)
14 FORMAT(' broj radnih mesta')
READ(5,21) NR(2)
WRITE(5,15)
15 FORMAT(' simulaciono vreme')
READ(5,21) IS
WRITE(5,16)
16 FORMAT(' zagrevanje generatora')
READ(5,21) IZ
WRITE(5,17)
17 FORMAT(' 1 - za medjurezultate')
READ(5,21) MR
RETURN
END
SUBROUTINE P3000
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
CALL P3100
DO 10 IG=1,IS
CALL P3200
CALL P3300
CALL P3400
CALL P3500
IF(MR.EQ.1) CALL P5100(IG)
10 CONTINUE
RETURN
END

```

```
SUBROUTINE P3100
COMMON /IMEII/ II
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
DO 10 I=3,11
NR(I)=0
10 CONTINUE
II=0
CALL SLUCAJ(SL)
II=1
DO 20 I=1,NR(1)
CALL SLUCAJ(SL)
IF (POC.GE.SL) NR(3)=NR(3)+1
20 CONTINUE
NR(4)=NR(1)-NR(3)
IF (NR(2).GE.NR(3)) GOTO 50
NR(5)=NR(3)-NR(2)
NR(3)=NR(2)
50 NR(6)=NR(2)
IG=0
IF (MR.EQ.1) CALL P5100(IG)
RETURN
END

SUBROUTINE P3200
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
IT=NR(3)
IF(IT.EQ.0) GOTO 90
DO 80 I=1,IT
CALL SLUCAJ(SL)
IF (POTK.LT.SL) GOTO 80
NR(3)=NR(3)-1
NR(4)=NR(4)+1
80 CONTINUE
90 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE P3300
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
IT=NR(4)
IF(IT.EQ.0) GOTO 90
DO 80 I=1,IT
CALL SLUCAJ(SL)
IF (POPR.LT.SL) GOTO 80
NR(4)=NR(4)-1
NR(5)=NR(5)+1
80 CONTINUE
90 CONTINUE
RETURN
END
```

```

SUBROUTINE P3400
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
IF (NR(3).EQ.NR(2)) GOTO 90
IT=NR(2)-NR(3)
IF (IT.GT.NR(5)) IT=NR(5)
NR(3)=NR(3)+IT
NR(5)=NR(5)-IT
90 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE P3500
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
IF (NR(6).GT.NR(3)) NR(6)=NR(3)
IF (NR(7).LT.NR(4)) NR(7)=NR(4)
IF (NR(8).LT.NR(5)) NR(8)=NR(5)
NR(9)=NR(9)+NR(3)
NR(10)=NR(10)+NR(4)
NR(11)=NR(11)+NR(5)
RETURN
END

SUBROUTINE P5000
WRITE(5,3)
READ(5,2) A
3 FORMAT(' pritisnite return')
2 FORMAT(A2)
RETURN
END

SUBROUTINE P5100(IG)
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
WRITE(5,10) IG
WRITE(5,11) NR(3)
WRITE(5,12) NR(4)
WRITE(5,13) NR(5)
WRITE(5,14)
10 FORMAT(' Simulaciono vreme',I5)
11 FORMAT(' na radu',I5)
12 FORMAT(' na opravci',I5)
13 FORMAT(' u rezervi',I5)
14 FORMAT(' -----')
CALL P5000
RETURN
END

```

```

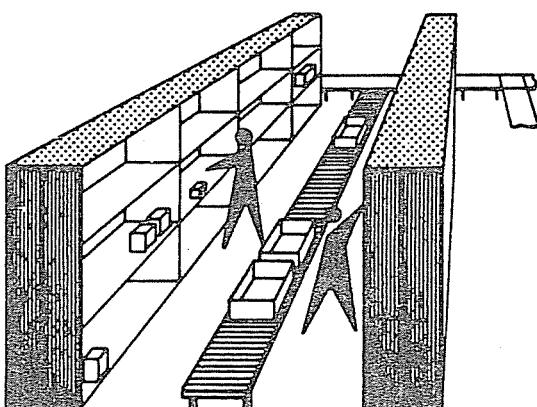
SUBROUTINE P5300
COMMON /SVE/ POC,POTK,POPR,NR(11),IZ,IS,MR
WRITE(5,20) NR(6)
WRITE(5,21) NR(7)
WRITE(5,22) NR(8)
20 FORMAT(' minimalan broj masina na radu',I5)
21 FORMAT(' maksimalan broj masina na opravci',I5)
22 FORMAT(' maksimalan broj masina u rezervi',I5)
A=FLOAT(NR(9))/FLOAT(IS)
B=FLOAT(NR(10))/FLOAT(IS)
C=FLOAT(NR(11))/FLOAT(IS)
D=FLOAT(NR(9))/(FLOAT(IS)*FLOAT(NR(2)))
WRITE(5,30) A
WRITE(5,31) B
WRITE(5,32) C
WRITE(5,33) D
30 FORMAT(' prosecan broj masina na radu',T45,F10.3)
31 FORMAT(' prosecan broj masina na opravci',T45,F10.3)
32 FORMAT(' prosecan broj masina u rezervi',T45,F10.3)
33 FORMAT(' pouzdanost radnog procesa',T45,F10.3)
RETURN
END
SUBROUTINE SLUCAJ(SL)
COMMON /IMEII/ II
IF (II.GT.0) GOTO 1
KRM=32749
KRO=15537
KRB=1467
1 KRO=KRB*KRO-INT(KRB*KRO/KRM)*KRM
SL=FLOAT(KRO)/FLOAT(KRM)
RETURN
END

```

10. PRIPREMA ROBE ZA DISTRIBUCIJU (KOMISIONIRANJE)

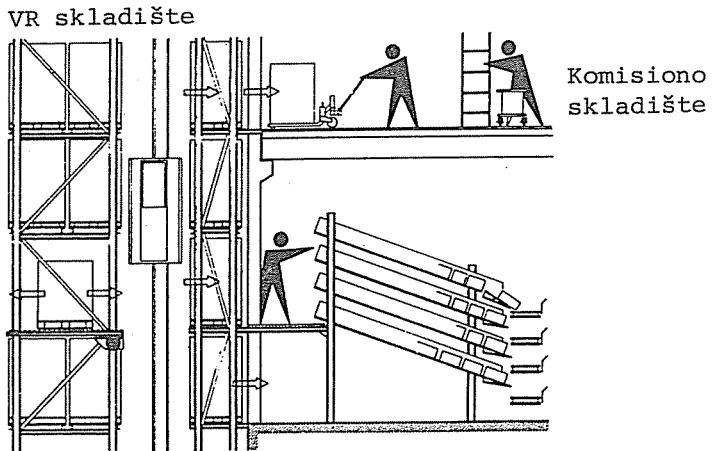
Osnovna funkcija ovog područja je odabiranje, sortiranje i akumulacija robe prema zahtevima potrošača. Ova aktivnost obuhvata uzimanje robe iz skladišnih lokacija i njeno sortiranje prema listi zahteva, prikupljanje i pripremu za otpremu iz skladišta. Jedinice (TJ) koje izlaze iz ovog područja mogu da budu različite od onih koje ulaze, to znači da napuštaju komisionu zonu u stanju različitom od onog u kome su bile uskladištene. Pored osnovne funkcije, zavisno od rešenja, ovo područje može da sadrži i funkciju vremenskog premošćavanja koje obuhvata interval od ulaska zaliha u ovu zonu do otpreme robe (materijala), koja je diktirana zahtevima potrošača (asortiman, količine i vreme isporuke).

Selekcija narudžbina može da se obavi direktno u glavnom skladištu (slika 7.6.) ili u posebnom tzv. komisionom skladištu (slika 10.1.), da bi se omogućio efikasniji rad. Izbor rešenja zavisi od asortimana, količina koje se naručuju i frekvencije naručivanja.



Slika 10.1.

U pojedinim slučajevima korisno je primeniti i kombinovani sistem (Slika 10.2.).



Slika 10.2.

Priprema robe za distribuciju uglavnom je manuelni postupak i zato je skup jer zahteva angažovanje velikog broja ljudi. Upotreba manipulatora je ograničena širinom assortimana i oblikom pakovanja, a robova visinom ulaganja. Praksa je pokazala da je proces komisioniranja često najkritičnija skladišna funkcija, zato što manipulacija malim narudžbinama velike frekvencije čini ovaj rad intenzivnim i zato što brzina selekcije narudžbina direktno utiče na kvalitet usluge potrošačima. Tako, da je najvažniji cilj pri rešavanju ovog područja minimizacija vremena prikupljanja i sortiranja narudžbina optimiziranjem puta i postupaka pojedinih zahvata. Položaj područja komisioniranja je prikazan na opštem modelu procesa uskladištenja (slika 10.3.).

Proces komisioniranja može da bude statički i dinamički /53/. Za statičku pripremu je karakteristično da se odvija u zoni uskladištenja, odakle se zahvataju i otpremaju pojedini artikli prema listi zahteva (slike 10.1., 10.2. i 10.4-b i c). Dinamički sistem predviđa odnošenje iz skladišta cele transportne jedinice do zone komisioniranja, gde se uzimaju željeni artikli a preostali deo robe se vraća u skladište (slike 10.9. i 10.4-d).

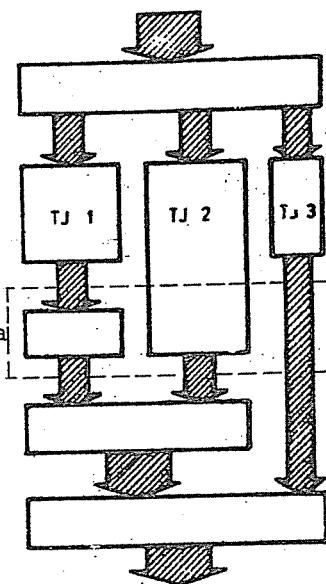
Prijem - istovar, identifikacija,
sortiranje, paletizacija

glavno skladište

prikupljanje i sortiranje porudžbina
(komisioniranje)

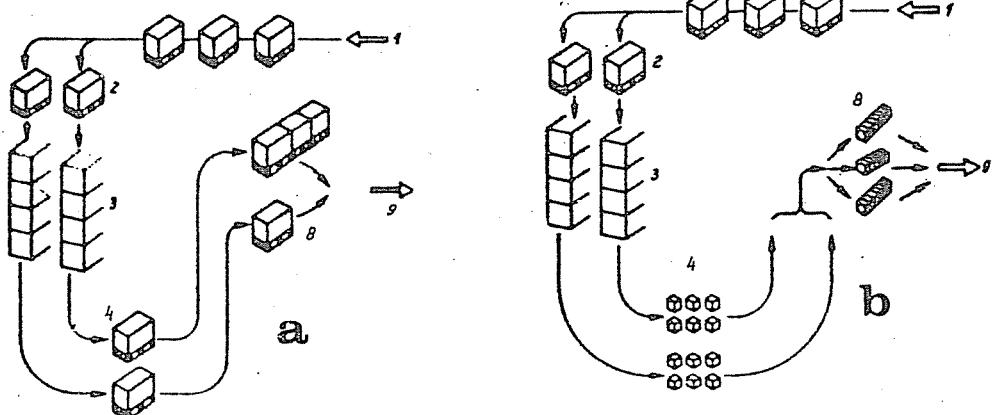
pakovanje

utovar i otprema



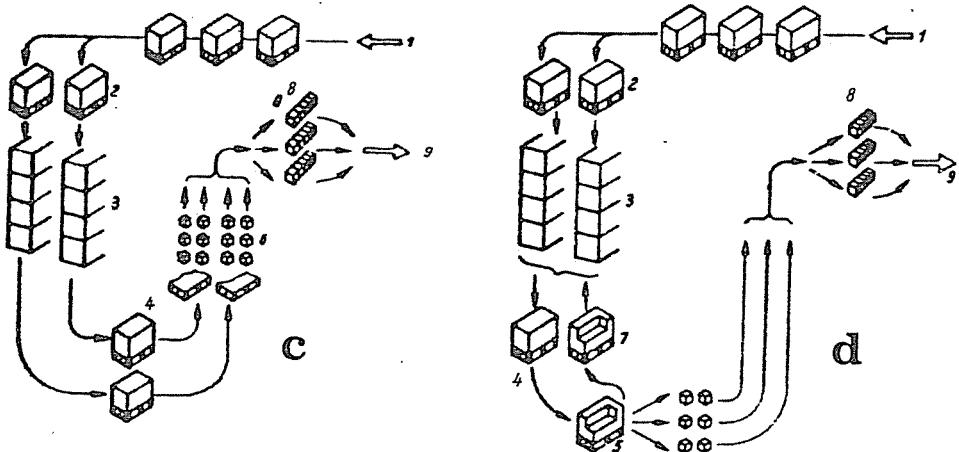
Slika 10.3.

Na slici 10.4. su date osnovne tehnološke šeme prikupljanja i sortiranja narudžbina u paletnim skladištima /52/. Kod varijante A, iz glavnog skladišta (3) se uzimaju cele transportne jedinice (4) i odnose do mesta gde se kompletiraju narudžbine (8). U ovom slučaju minimalna količina koja se poručuje ne sme da bude manja od količine robe koja se nalazi na jednoj paleti.



Slika 10.4. (A i B)

U varijanti B, naručene količine (4), (manje od količine koju prima transportna jedinica) se uzimaju direktno iz glavnog skladišta (3) i odnose na mesto kompletiranja narudžbina (8).



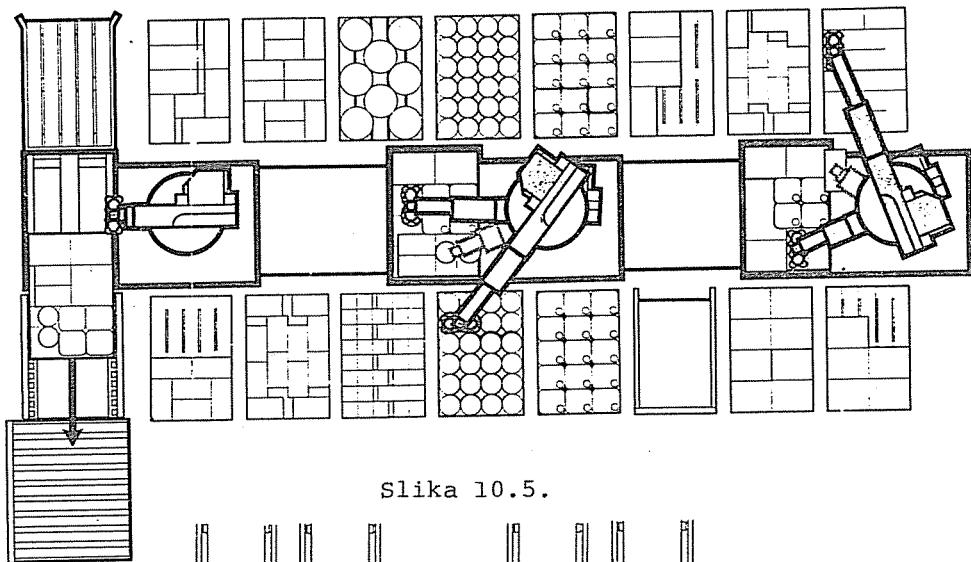
Slika 10.4. (C i D)

U varijanti C, iz glavnog skladišta (3) se odnose transportne jedinice (4) do skladišta za pripremu porudžbina (5), gde se izdvajaju naručene količine i odvoze do mesta kompletiranja (8). U varijanti D, sa skladišta (3) se uzimaju transportne jedinice (4), sa njih se izdvajaju naručene količine (5) i vraćaju natrag u skladište (7). Roba odlazi na kompletiranje (8). Na svim šemama slike 10.4., (1) označava mesto dovoza transportnih jedinica (2), a (9) odvoz narudžbina.

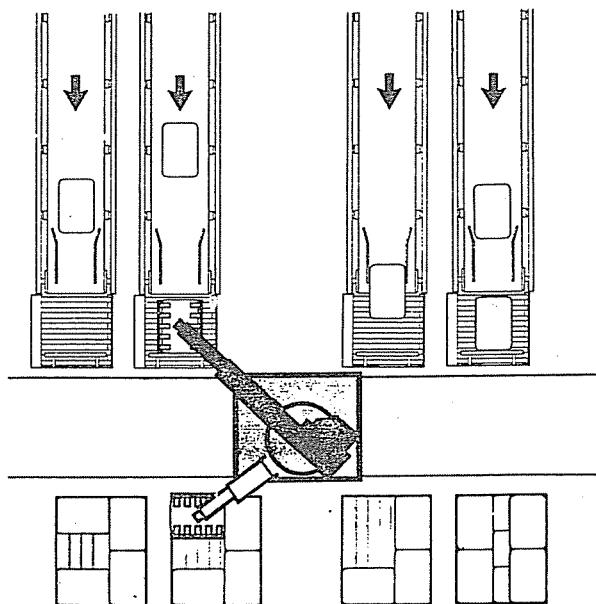
Zahvatanje robe u komisionoj zoni može da bude ručno ili mehanizovano [primena robota (Slika 10.5 i 6) ili manipulatora (slika 10.7.)]. U toku pripreme narudžbina kretanje radnika (i robe) može da bude jednodimenzionalno (slika 10.1.) kada se kretanje odvija u jednoj ravni ili dvodimenzionalno kada se za obavljanje procesa komisioniranja koriste specijalni viljuškari ili regalne dizalice. Na slici 10.8. je dat primer korišćenja regalne dizalice u procesu komisioniranja (statički sistem), ručno uzimanje robe, dvodimenzionalno kretanje i centr-

alizovana akumulacija). Na slici 10.8a je prikazana visokoregalna dizalica sa dva stola za komisioniranje (proizvodjač DEMAG - Nemačka), a na slici 10.8b je prikazan robot za automatsko komisioniranje celih kaseta (proizvodjač DEMAG - Nemačka).

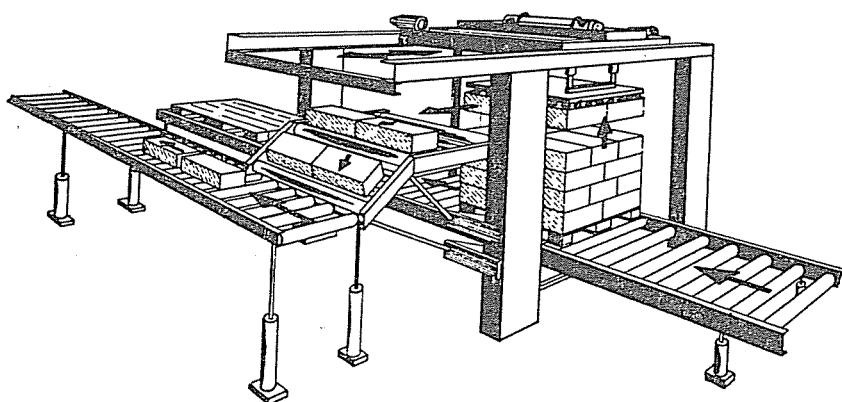
Akumulacija pripremljene robe može da bude centralizovana kada se sve narudžbine otpremaju u odredjene zone ili decentralizovana kada se predaja robe obavlja na više punktova.



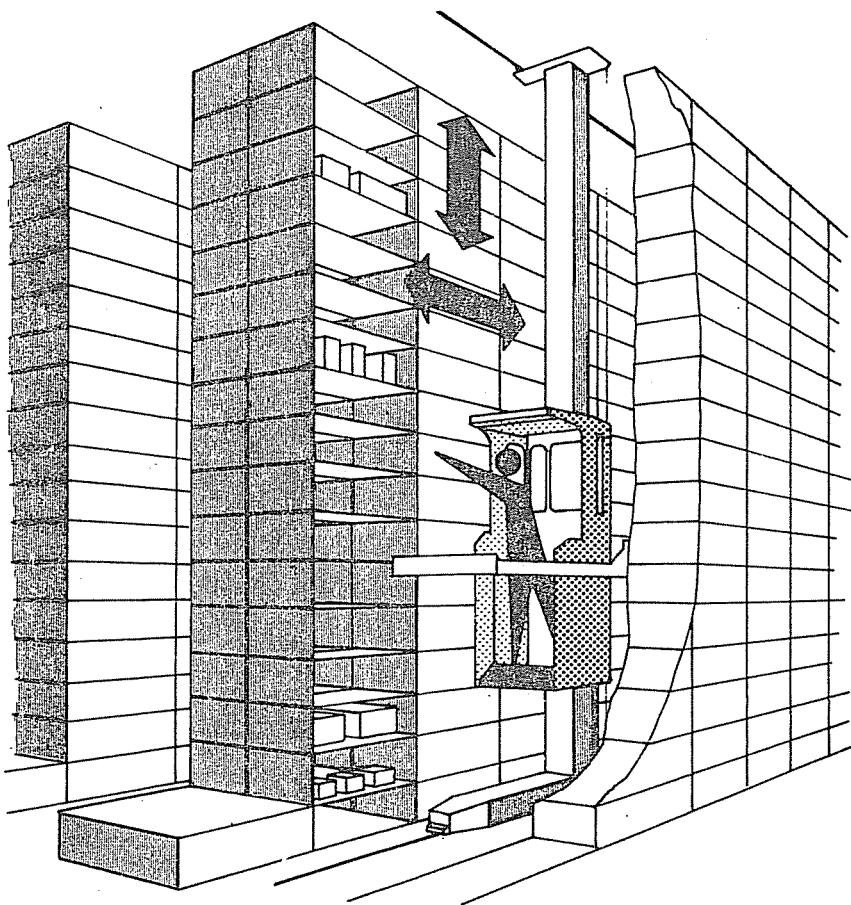
Slika 10.5.



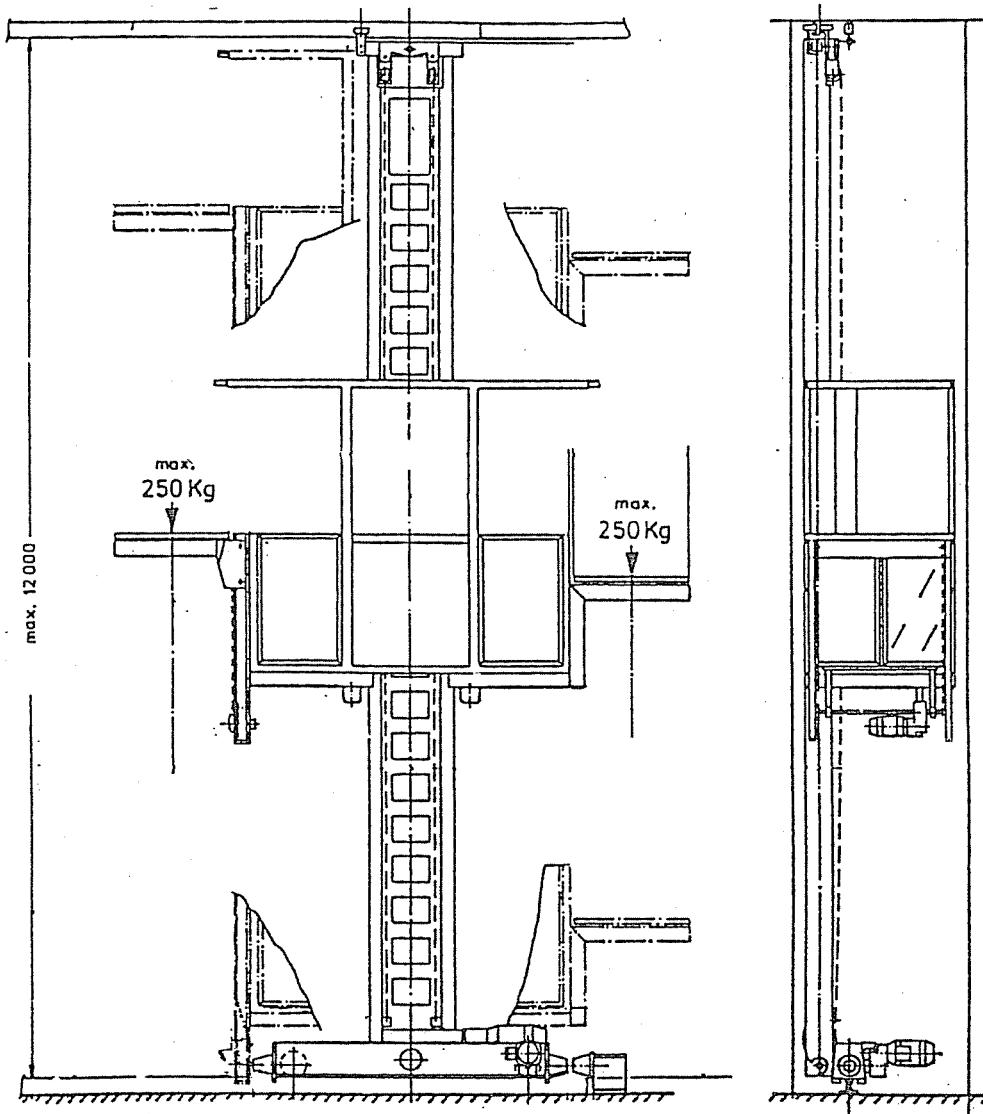
Slika 10.6.



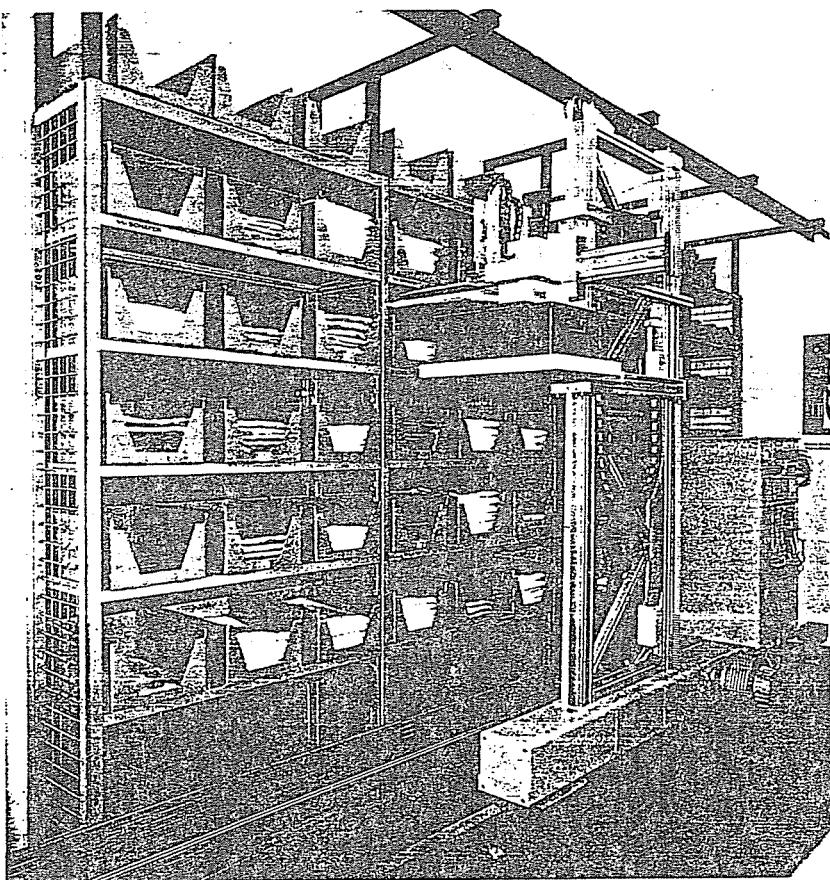
Slika 10.7.



Slika 10.8.

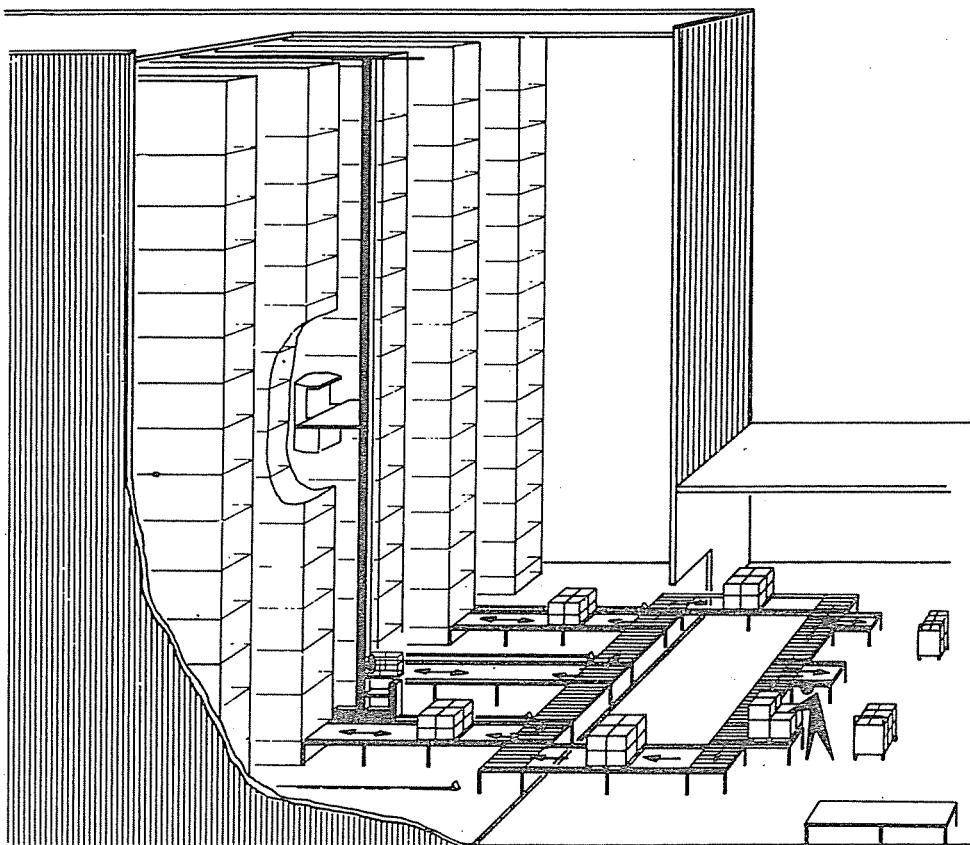


Slika 10.8a.



Slika 10.8b.

Na slici 10.9. je dat prikaz sistema za dinamičko komisioniranje, Predviđeno je ručno uzimanje robe, jednodimenzionalno kretanje radnika i centralizovano prikupljanja naručbina.



Slika 10.9.

10.1. Osnovni matematički model procesa komisioniranja

Struktura vremena komisioniranja (pripreme narudžbina) je data izrazom /53/:

$$t_{pn} = t_{st} + t_{din}$$

gde je:

t_{st} - statičko vreme, koje obuhvata sve poslove vezane za pripremu robe za distribuciju,

t_{din} - vreme kretanja radnika u procesu komisioniranja (peške ili transportnim sredstvom) od dobijanja naloga do predaje robe.

Statičko vreme je dano izrazom:

$$t_{st} = t_p + t_z + t_d$$

gde je:

t_p - pripremno vreme (obuhvata čitanje liste za pripremu robe, traženje lokacije, čitanje oznake na regalu i obradu naloga), iznosi u proseku 10-15 s/lokaciji,

t_z - vreme zahvatanja (uzimanje robe sa date lokacije, prenošenje i postavljanje robe na transportno sredstvo), za normalne uslove rada iznosi u proseku 3-6 s/poz., zavisno od mase i dimenzije pakovanja,

t_d - dodatno vreme obuhvata preuzimanje nove liste (narudžbenice) za pripremu robe, uzimanje transportnog sredstva kod ručnog komisioniranja, predaju pripremljene robe i sl.; zavisi od layout-a i vrste primjenjenog transportnog uredjaja;

$$t_d = 75-300 \text{ (za ručna paletna kolica)},$$

$$t_d = 70-250 \text{ (za specijalni viljuškar)},$$

$$t_d = 55-200 \text{ (za visokoregalnu dizalicu)}.$$

Ukupno vreme za pripremu narudžbina u toku danà iznosi:

$$T_{pn} = M \left[(\bar{t}_p + \bar{t}_z \cdot m + \bar{t}_{din})n + \bar{t}_d \right]$$

gde je:

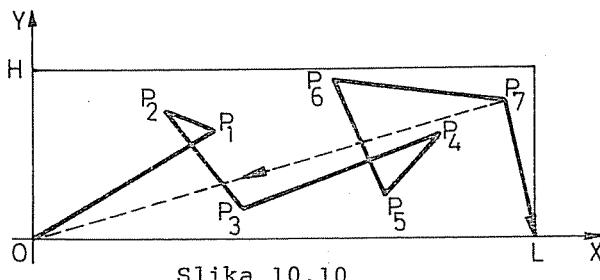
M - prosečan broj narudžbina,

\bar{t}_p - prosečno pripremno vreme po lokaciji koja se opslužuje,

- \bar{t}_z - prosečno vreme zahvatanja robe,
 m - prosečan broj artikala (ili pozicija) koji se uzima iz date lokacije,
 \bar{t}_{din} - prosečno vreme kretanja po jednoj lokaciji,
 n - prosečan broj lokacija koji se obidje u ciklusu komisioniranja,
 \bar{t}_d - dodatno vreme po jednoj narudžbini.

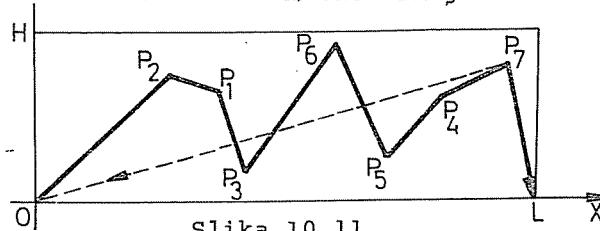
Kretanje radnika u procesu komisioniranja može da bude jednodimenzionalno ili dvodimenzionalno zavisno od načina obavljanja procesa pripreme narudžbina (osnovni matematički model kretanja je dat u poglavlju 6). Pri tome vreme kretanja zavisi od načina uzimanja robe iz pojedinih lokacija, koje može da se obavi na dva načina:

- uzimanje robe bez strategije, kada radnik na komisioniranju uzima robu prema redosledu na listi narudžbina bez prethodnog svrstavanja pozicija prema razdaljinama pojedinih lokacija, (slika 10.10.) i



Slika 10.10.

- uzimanje robe sa strategijom (slika 10.11.), kada su pozicije sa liste narudžbina poredjane prema njihovoj udaljenosti u odnosu na mesto ulaska komisionira u zonu za pripremu robe; ovakva organizacija zahteva dodatnu obradu liste ali se postiže znatna ušteda u dinamičkom vremenu komisioniranja.



Slika 10.11.

Prosečno dinamičko vreme pri jednodimenzionalnom kretanju i uzimanju robe bez strategije je dato izrazom:

$$\bar{t}_{\text{din}} = \frac{n+1}{n} \frac{v}{a} + \frac{n-1}{3n} \frac{L}{v} + \frac{L}{v \cdot n}$$

gde je:

- n - prosečan broj lokacija (najčešće odgovara broju artikala) koji se obidje u ciklusu komisioniranja,
- v - brzina kretanja radnika na komisioniranju,
- a - prosečna vrednost ubrzanja,
- L - dužina puta komisioniranja.

Kod uzimanja robe sa strategijom prosečno vreme kretanja je dato izrazom:

$$\bar{t}_{\text{din}} = \frac{n+1}{n} \frac{v}{a} + \frac{L}{v \cdot n}$$

Uobičajene vrednosti brzina (m/s) i ubrzanja (m/s²) kod jednodimenzionalnog kretanja iznose:

- peške bez tereta v = 1,1 - 1,4 a = 1,5 - 2,1
- peške sa teretom do 15 kg v = 1,1 - 1,2 a = 0,8 - 1,3
- peške sa kolicima i teretom mase do 250 kg v = 0,9 - 1,0 a = 0,8 - 1,3
- sa električnim paletnim kolicima v = 2,4 - 2,6 a = 1,1 - 1,9

Prosečno vreme za dvodimenzionalno kretanje kod uzimanja robe bez strategije (vidi sliku 10.10) je dato izrazom /53/:

$$\text{za } \frac{H}{L} \cdot \frac{\frac{v_x}{a_x}}{\frac{v_y}{a_y}} = 1$$

$$\bar{t}_{\text{din}} = \frac{n+1}{2n} \left(\frac{\frac{v_x}{a_x}}{\frac{v_y}{a_y}} + \frac{4}{3n} \frac{L}{v_x} \right) + \frac{n-1}{n} \frac{14}{30} \frac{L}{v_x}$$

gde je:

- H - visina regala,
- L - dužina regala,
- v_x - brzina horizontalnog kretanja,
- v_y - brzina dizanja tereta,

a_x - ubrzanje u horizontalnom pravcu,

a_y - ubrzanje u vertikalnom pravcu,

n - prosečan broj lokacija (artikala).

Prosečno vreme kretanja po lokaciji (artiklu) kod opsluživanja lokacija sa strategijom (vidi sliku 10.11) opada sa brojem lokacija koje dizalica obidje u toku jednog ciklusa. Uporedna analiza za regalnu dizalicu ($v_x = 1,33 \text{ m/s}$; $v_y = 0,2 \text{ m/s}$; $a_x = 0,4 \text{ m/s}^2$; $a_y = 0,4 \text{ m/s}^2$; $L=50 \text{ m}$ i $H=8 \text{ m}$) je prikazana tabelarno:

n	t_{din} (bez strat.)	t_{din} (sa strat.)	prednost (%)
2	39,0	39,0	0
5	29,2	22,0	25
10	25,9	14,6	44
15	24,8	11,9	52
20	24,3	10,6	56
25	24,0	9,9	59
30	23,7	9,4	60
35	23,6	9,0	62
40	23,5	8,8	63

10.2. Opis procesa komisioniranja u malim skladištima

Proces komisioniranja sastoji se od uzimanja robe iz skladišta na osnovu dobijenih narudžbenica. U jednoj narudžbenici nalazi se spisak stavki: niz artikala sa traženom količinom.

Narudžbenice pristižu u nejednakim vremenskim intervalima opisanim nekom raspodelom i smeštaju se u red čekanja. Radnik koji je završio opsluživanje neke prethodne narudžbenice, uzima jednu od narudžbenica iz reda čekanja i za svaku stavku očitava artikal i broj komada, odlazi do lokacije robe u skladишtu i smešta je u kolica. Postoje dva slučaja:

- ako robe nema u dovoljnoj količini onda radnik odlazi do sledeće lokacije sa tom vrstom robe i odatle uzima ostatak,
- ako nosivost kolica nije dovoljna za svu količinu, napunjena kolica se odvoze do izlaska iz skladišta, a zatim se radnik vraća do lokacije i utovaruje preostalu količinu.

Kada završi opsluživanje jedne stavke, radnik prelazi na opsluživanje sledeće i tako sve do kraja narudžbenice. Zatim se proces ponavlja sa sledećom narudžbenicom sve do isteka radnog vremena.

10.3. Simulacioni model

Simulacioni model i program uradjeni su kao seminarски rad /51/ u toku nastave iz predmeta "Fabrička postrojenja".

Skladište je trodimenzionalno, sastavljeno od paralelnih regala odredjene dužine i visine. Pregrade su međusobno jednake po zapremini i nosivosti.

Na početku procesa skladište se popunjava sa zadatom verovatnoćom i izabranim asortimanom roba. U svaku od zauzetih lokacija smešta se samo jedna vrsta robe.

Simulacioni eksperiment se odvija u okviru izabranog simulacionog vremena. Reinicijalizacija se realizuje po opsluživanju zadatog broja narudžbenica: sve izlazne statistike reda čekanja obavljenog transportnog rada po radniku i broja narudžbenica svode se na nulu, osim maksimalnih koje se svode na trenutne.

Vremenska jedinica je sekunda. Kretanje sata je skokovito.

Realizuju se samo oni vremenski trenuci u kojima će se desiti bar jedan kritični dogadjaj, čime je izvršena minimizacija trajanja programa po tom kriterijumu. Postoje dva osnovna tipa kritičnog dogadjaja u modelu:

- nailazak narudžbenice, kada se red čekanja narudžbenica povećava za jedan, i
- završetak opsluge prethodne narudžbenice, kada je radnik spreman da prihvati novu narudžbenicu; red čekanja se smanjuje za jedan; generiše se sadržaj narudžbenice i izračunava vreme potrebno za njeno opsluživanje.

U oba slučaja izračunavaju se odgovarajuće statistike.

Simulacioni proces se završava kada tekuće vreme postane veće ili jednak sa zadatim simulacionim vremenom. Rezultati simulacije se izračunavaju i ispisuju.

10.4. Organizacija podataka

U zajedničkoj zoni COMMON /NIZ/ nalaze se ulazni podaci, izlazne statistike, tekuće promenljive i generisane veličine:

NUL (25) - niz ulaznih podataka,

NSK (20,20,6) - matrice vrste artikala u skladištu,

NSK1 (20,20,6) - matrice količina (komada) robe u skladištu,

NRA (9) - niz trenutaka u kojima pojedini radnici završavaju opsluživanje narudžbenice,

NAR (24) - niz statistika narudžbenice,

TEZ (99) - niz masa svih vrsta artikala,

NPR (6) - niz tekućih promenljivih,

NZL (7) - niz izlaznih rezultata za red čekanja,

NST (9,12) - matrica izlaznih rezultata po radnicima,

NISK (9) - niz iskorišćenja radnog vremena po radniku,

NSUME (6) - niz realizovanih pokazatelja.

U navedenim nizovima i matricama, osim u NPA (9), NSK(20, 20,6), NSK1(20,20,6) i NISK (6), čuvaju se raznorodni podaci, i to:

NUL (1) - ukupan broj vrsta,

NUL (2) - simulaciono vreme,

NUL (3) - broj narudžbenica od početka eksperimenta do

reinicijalizacije,

NUL (4) - nosivost kolica,
 NUL (5) - broj radnika,
 NUL (6) - izbor medjurezultata,
 NUL (7) - izbor šeme skladišta,
 NUL (8) - izbor strategije,
 NUL (9) - broj regala,
 NUL (10) - dužina regala,
 NUL (11) - visina regala,
 NUL (12) - očekivani interval nailaska sledeće narudžbe-nice,
 NUL (13) - stepen Erlangove raspodele,
 NUL (14) - očekivana masa,
 NUL (15) - stepen Erlangove raspodele,
 NUL (16) - očekivani broj stavki na narudžbenici,
 NUL (17) - stepen Erlangove raspodele,
 NUL (18) - procenat popunjenoosti skladišta,
 NUL (19) - nosivost pregratka,
 NUL (20) - razmak izmedju regala,
 NUL (21) - dodatno vreme za preuzimanje nove narudžbenice i promenu kolica,
 NUL (22) - dodatno vreme za očitavanje jedne stavke,
 NUL (23) - brzina kretanja,
 NUL (24) - zagrevanje generatora pseudoslučajnih brojeva,
 NUL (25) - pomoćna veličina generatora pseudoslučajnih brojeva,

NAR (1) - NAR (9) - šifra artikala po stavkama,
 NAR (10) - NAR (18) - zahtevana količina u komadima po stavkama,
 NAR (19) - ukupan broj stavki
 NAR (20) - ukupan broj komada,
 NAR (21) - ukupna masa,
 NAR (22) - ukupno vreme opsluživanja,
 NAR (23) - ukupan transportni rad,
 NAR (24) - pokazatelj opsluženosti (1-ako je narudžbenica opslužena u celosti, 0 - ako nije).

NPR (1) - tekuće vreme,

NPR (2) - trenutak prethodnog kritičnog dogadjaja,

NPR (3) - trenutak reinicijalizacije,

NPR (4) - broj generisanih narudžbenica,

NPR (5) - trenutak pojave sledeće narudžbenice,

NPR (6) - dužina reda čekanja.

NZL (1) - maksimalan broj narudžbenica u redu čekanja,

NZL (2) - prosečan broj narudžbenica u redu čekanja,

NZL (3) - prosečno vreme opsluživanja narudžbenice,

NZL (4) - broj nepotpuno opsluženih narudžbenica,

NZL (5) - procentualno učešće nepotpuno opsluženih narudžbenica,

NZL (6) - broj potpuno opsluženih narudžbenica,

NZL (7) - procentualno učešće potpuno opsluženih narudžbenica,

Izlazni rezultati za I-tog radnika su:

NST (I,1) - ukupno radno vreme,

NST (I,2) - iskorišćenje,

NST (I,3) - ukupan broj stavki,

NST (I,4) - procentualno učešće NST (I,3),

NST (I,5) - izneta količina u komadima,

NST (I,6) - procentualno učešće NST (I,5),

NST (I,7) - broj nepotpuno opsluženih narudžbenica,

NST (I,8) - procentualno učešće NST (I,7),

NST (I,9) - izneta masa,

NST (I,10) - procentualno učešće NST (I,9),

NST (I,11) - ostvareni transportni rad,

NST (I,12) - procentualno učešće NST (I,11).

NSUME (1) - ukupno radno vreme svih radnika,

NSUME (2) - ukupan broj opsluženih stavki,

NSUME (3) - ukupna izneta količina u broju komada,

NSUME (4) - ukupan broj potpuno opsluženih narudžbenica,

NSUME (5) - ukupno izneta masa,

NSUME (6) - ukupan transportni rad.

10.5. Struktura i funkcije programa KOMISION

Glavni program poziva potprograme NULA, UPIS, TEŽINE i SKLAD. U trenutku reiničijalizacije poziva potprogram REINIT. U svakom ciklusu poziva potprogram MINIM i u zavisnosti od vrste sledećeg kritičnog dogadjaja poziva potprogram ALT1 (najlažak sledeće narudžbenice) ili PETLJA i ALT2 (završetak opsluživanja narudžbenice). Medjurezultati se štampaju opciono potprogramom MEDJU. Ciklus se ponavlja sve dok ne istekne simulaciono vreme. Po završetku simulacionog procesa pozivaju se potprogrami RACUN i STAMPA.

MINIM određuje prvi sledeći trenutak završetka opsluživanja neke narudžbenice.

ALT1 obračunava potrebne statistike za izračunavanje prosečne dužine reda čekanja. Poziva potprogram INTER i obračunava broj dotad generisanih narudžbenica, trenutnu i maksimalnu dužinu reda čekanja.

ALT2 određuje maksimalnu dužinu reda čekanja i statistiku za obračunavanje prosečne dužine reda čekanja.

PETLJA slobodnom radniku dodeljuje sadržaj narudžbenice pozivom potprograma LISTAL, određuje trenutak završetka opsluživanja narudžbenice i poziva potprograme ALT3 i ALT4.

ALT3 obračunava statistike potpuno opsluženih narudžbenica.

ALT4 obračunava tekuće vrednosti svih ostalih statistika.

REINIT reiničijalizuje sve statistike na nulu, a maksimálne na trenutke.

RACUN izračunava izlazne rezultate.

LISTAL generiše sadržaj narudžbenice i poziva potprogram VREME.

SKLAD generiše sadržaj skladista.

TEZINE generiše mase svih artikala po zadatoj Erlangovoј raspodeli.

UPIS učitava ulazne podatke sa terminala ili iz datoteke.

ERLANG generiše slučajnu promenljivu po Erlangovoј raspodeli.

INTER generiše interval do nailaska sledeće porudžbenice.

P5000 dinamički stop.

MEDJU ispisuje medjurezultate na ekranu.

STAMPA ispisuje na ekranu izlazne rezultate.

NULA inicijalizuje sve nizove na nulu.

SLUCAJ generiše pseudoslučajan broj na intervalu (0,1) po ravnomenoj raspodeli.

VREME definiše redosled kojim radnik opslužuje lokacije i količine iz svakog pregratka i obračunava statistike: potrebno vreme da se narudžbenica opsluži, ukupnu masu svih artikala, ostvareni transportni rad i nivo opsluženosti narudžbenice. Poziva potprograme PET1 i PET2.

PET1 pretražuje skladište i kada dodje do pregratka sa traženim artiklom poziva potprogram KOSMAS.

KOSMAS formira šemu kretanja po skladištu i registruje broj artikala koji ostaju u pregratku.

PET2 izračunava put i transportni rad pri svakom pojedinačnom kretanju izmedju dve uzastopne lokacije. Vodi računa o maksimalnoj nosivosti kolica i u slučaju potencijalnog prekoračenja poziva potprogram TOB.

TOB izračunava transportni rad i potrebno vreme za izmenu kolica.

```

C      KOMISION PROGRAM ZA SIMULACIJU PROCESA KOMISIONIRANJA
C      (PRIPREME RORE ZA DISTRIBUCIJU)
C      AUTORI PROGRAMA:
C          CUPIC-VOJNOVIC PETAR
C          COLAK MIJO
C          TOMIC BRANISLAV
C          KOTIVAS KOSMAS
COMMON IO
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
TYPE 2
2 FORMAT(' ID=',$)
ACCEPT S,IO
5 FORMAT(I1)
CALL NULA
CALL UPIS
CLOSE(UNIT=1)
CALL TEZINE
CALL SKLAD
D CALL INTER
D TYPE 1000,NUL(5)
1000 FORMAT(' NUL(5)',15)
D DO 180 LL=1,NUL(5)
D CALL LISTA1
D NRA(LL)=NAR(22)
180 CONTINUE
3 CONTINUE
D TYPE 1010,NPR(4),NUL(3),NPR(1),NUL(2)
1010 FORMAT(' NPR(4)',IS,' NUL(3)',IS,' NPR(1)',15,
$ ' NUL(2)',110)
IF(NPR(4).EQ.NUL(3))CALL REINIC
IF(NPR(1).GE.NUL(2))GO TO 4
CALL MINIM
15 CONTINUE
D TYPE 1020,NPR(1),NPR(5)
1020 FORMAT(' NPR(1)',15,' NPR(5)',15)
IF(NPR(1).LT.NPR(5))GO TO 10
CALL ALTI
GO TO 15
10 CALL PETLJA
CALL ALT2
NPR(2)=NPR(1)
D TYPE 1030,NUL(6)
1030 FORMAT(' NUL(6)',15)
IF(NUL(6).ER,1)CALL MEIRJU
GO TO 3
4 CALL RACUN
CALL STAMPA
STOP
END
SUBROUTINE MINIM
COMMON/NTZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
NPR(1)=NRA(1)

```

```

DO 5 I=1,NUL(5)
IF(NRA(I).LT.NPR(1))NPR(1)=NRA(I)
CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE ALT1
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
NZL(2)=NZL(2)+(NPR(5)-NPR(2))*NPR(6)
NPR(2)=NPR(5)
CALL INTER
NPR(4)=NPR(4)+1
NPR(6)=NPR(6)+1
IF(NPR(6).GT.NZL(1))NZL(1)=NPR(6)
RETURN
END
SUBROUTINE ALT2
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
IF(NPR(6).GT.NZL(1))NZL(1)=NPR(6)
NZL(2)=NZL(2)+(NPR(1)-NPR(2))*NPR(6)
RETURN
END
SUBROUTINE PETLJA
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
COMMON/I/I
DO 5 I=1,NUL(5)
TYPE 100,NPR(6),NRA(I),NPR(1)
FORMAT(' PETLJA//',NPR(6)',I10,' NRA(I)',I10,' NRP(1)',I10)
IF(NRA(I).NE.NPR(1))GO TO 5
IF(NPR(6).EQ.0)GO TO 8
CALL LISTA1
NRA(I)=NRA(I)+NAR(22)
CALL ALT3
CALL ALT4
NPR(6)=NPR(6)-1
CONTINUE
GO TO 10
8 NRA(I)=NPR(5)
CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE ALT3
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
COMMON/I/I
IF(NAR(24).NE.1)GO TO 5
NZL(6)=NZL(6)+1
NST(I,7)=NST(I,7)+1
CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE ALT4
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),

```

```

1  NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
COMMON/I/I
NZL(3)=NZL(3)+NAR(22)
NZL(7)=NZL(7)+1
NST(I,1)=NST(I,1)+NAR(22)
NST(I,3)=NST(I,3)+NAR(19)
NST(I,5)=NST(I,5)+NAR(20)
NST(I,9)=NST(I,9)+NAR(21)
NST(I,11)=NST(I,11)+NAR(23)
RETURN
END
SUBROUTINE REINIC
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1  NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
NZL(1)=NPR(6)
DO 5 I=2,7
NZL(I)=0
5  CONTINUE
DO 10 J=1,9
DO 10 K=1,12
NST(J,K)=0
10  CONTINUE
NPR(3)=NPR(1)
RETURN
END
SUBROUTINE RACUN
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1  NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
COMMON/F/F(3)
COMMON/SUME/NSUME(6)
COMMON/NISK/NISK(6)
IF(NPR(1),EQ,NPR(3))GO TO 558
F(1)=FLOAT(NZL(2))/(NPR(1)-NPR(3))
GO TO 888
558 F(1)=0
888 IF(NZL(7),EQ,0)GO TO 559
F(2)=FLOAT(NZL(3))/NZL(7)
NZL(4)=NZL(7)-NZL(6)
F(3)=(FLOAT(NZL(4))/NZL(7))*100
GO TO 563
559 F(2)=0
F(3)=0
NZL(4)=0
563 DO 5 I=1,6
NSUME(I)=0
5  CONTINUE
DO 10 K=1,6
DO 10 J=1,NUL(5)
NSUME(K)=NSUME(K)+NST(J,2*K-1)
10  CONTINUE
DO 515 LSI=1,NUL(5)
IF(NST(LSI,1),GT,(NPR(1)-NPR(3)))NST(LSI,1)=NPR(1)-NPR(3)
515 CONTINUE
DO 633 LBR=1,NUL(5)
NISK(LBR)=(FLOAT(NST(LBR,1))/(NPR(1)-NPR(3)))*100

```

```

633    CONTINUE
      DO 15 K=1,6
      DO 15 J=1,NUL(5)
      IF(NSUME(K),EQ,0)NST(J,K*2)=0
      IF(NSUME(K),NE,0)NST(J,K*2)=(NST(J,K*2-1)/FLOAT(NSUME(K)))*100
15    CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE LISTA1
      COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1     NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
      DO 1 K=1,24
      NAR(K)=0
1     CONTINUE
      BS1=FLOAT(NUL(16))
5     CALL ERLANG(BS1,NUL(17),M1JA,X)
      IF(X.GE.9)GO TO 5
      NAR(19)=INT(X)+1
      DO 10 J=1,NAR(19)
      CALL SLUCAJ(B)
      I1=INT(B*NUL(1))+1
      NAR(J)=I1
      CALL SLUCAJ(B1)
      I2=INT(B1*9)+1
      NAR(20)=NAR(20)+I2
      NAR(J+9)=I2
10    CONTINUE
      CALL VREME
      RETURN
      END
      SUBROUTINE SKLAD
      COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1     NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
      DO 10 I=1,NUL(9)
      DO 10 J=1,NUL(10)
      DO 10 K=1,NUL(11)
      CALL SLUCAJ(X)
      I1=INT(X*NUL(1))+1
C     TYPE 20,TEZ(11)
20    FORMAT(' ',E15.7)
      I2=INT(NUL(19)/(1000*TEZ(11)))
      I3=0
      DO 1 IK=1,I2
      CALL SLUCAJ(X1)
      IX1=INT(X1*100)+1
      IF(IX1.LE.NUL(18))I3=I3+1
1     CONTINUE
      NSK(I,J,K)=I1
      NSK1(I,J,K)=I3
10    CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE TEZINE
      COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1     NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)

```

```

A=FLOAT(NUL(14))/1000
DO 10 I=1,NUL(1)
CALL ERLANG(A,NUL(15),M1JA,TEZ(I))
C WRITE(5,2)I,TEZ(I)
2 FORMAT(' TEZ(' ,I2,')=' ,E15.7)
10 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE UPIS
COMMON IO
COMMON/N1Z/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
9 WRITE(5,10)
10 FORMAT(' BROJ RAZILICITIH VRSTA U FORMATU 13: ',\$)
READ(IO,41)NUL(1)
11 FORMAT(I2)
IF(NUL(1).GT.999)GO TO 9
WRITE(5,20)
20 FORMAT(' SIMULACIJSKO VРЕME U FORMATU 17: ',\$)
READ(IO,21)NUL(2)
21 FORMAT(I7)
IF(NUL(2).GT.9000000)GO TO 19
WRITE(5,30)
29 FORMAT(' BROJ NARUDZBENICA DO REINICIJALIZACIJE U FORMATU 13:
*,\$)
30 READ(IO,41)NUL(3)
31 FORMAT(I4)
IF(NUL(3).GT.999)GO TO 29
39 WRITE(5,40)
40 FORMAT(' NOSIVOST KOLICA U FORMATU F8.3: ',\$)
READ(IO,5)C1
NUL(4)=C1*1000
41 FORMAT(I3)
IF(C1.GT.500)GO TO 39
49 WRITE(5,50)
50 FORMAT(' BROJ RADNIKA U FORMATU 11: ',\$)
READ(IO,51)NUL(5)
51 FORMAT(I1)
IF(NUL(5).GT.9)GO TO 49
59 WRITE(5,90)
90 FORMAT(' BROJ REGALA U FORMATU I2: ',\$)
READ(IO,11)NUL(9)
IF(NUL(9).GT.20)GO TO 89
99 WRITE(5,100)
100 FORMAT(' DUZINA REGALA U FORMATU 12: ',\$)
READ(IO,11)NUL(10)
IF(NUL(10).GT.20)GO TO 99
109 WRITE(5,110)
110 FORMAT(' VISINA REGALA U FORMATU I1: ',\$)
READ(IO,51)NUL(11)
IF(NUL(11).GT.6)GO TO 109
119 WRITE(5,120)
120 FORMAT(' OCEKIVANI INTERVAL VREMENA DO NAIASKA SLEDECE
*,\$)
120 * READ(IO,31)NUL(12)

```

```

129      IF(NUL(12).GT.9999)GO TO 119
130      WRITE(5,130)
130      FORMAT(' PARAMETAR ERLANGOVE RASPODELE VREMENA NALASKA
* NARUDZBENICE U FORMATU I2: ',\$)
130      READ(IO,11)NUL(13)
130      IF(NUL(13).GT.99)GO TO 129
139      WRITE(5,140)
140      FORMAT(' OCEKIVANA TEZINA U FORMATU F8.3: ',\$)
140      READ(IO,5)C2
140      NUL(14)=C2*1000
140      IF(C2.GT.50)GO TO 139
149      WRITE(5,150)
150      FORMAT(' PARAMETAR ERLANGOVE RASPODELE TEZINA U
* FORMATU I2: ',\$)
150      READ(IO,11)NUL(15)
150      IF(NUL(15).GT.99)GO TO 149
159      WRITE(5,160)
160      FORMAT(' OCEKIVANI BROJ POZICIJA NA NARUDZBENICI U
* FORMATU I1: ',\$)
160      READ(IO,51)NUL(16)
160      IF(NUL(16).GT.9)GO TO 159
169      WRITE(5,170)
170      FORMAT(' PARAMETAR ERLANGOVE RASPODELE BROJA POZICIJA
* NA NARUDZBENICI U FORMATU I2: ',\$)
170      READ(IO,11)NUL(17)
170      IF(NUL(17).GT.99) GO TO 169
179      WRITE(5,180)
180      FORMAT(' KOEFICIJENT POPUNJENOSTI SKLADISTA U
* PROCENTIMA U FORMATU I3: ',\$)
180      READ(IO,41)NUL(18)
180      IF(NUL(18).GT.100)GO TO 179
189      WRITE(5,190)
190      FORMAT(' NOSIVOST PRETINCA U FORMATU I4: ',\$)
190      READ(IO,31)NUL(19)
190      IF(NUL(19).GT.2500)GO TO 189
199      WRITE(5,200)
200      FORMAT(' RAZMAK IZMEDJU REGALA (U CM) U FORMATU I3: ',\$)
200      READ(IO,41)NUL(20)
200      IF(NUL(20).GT.500) GO TO 199
69      WRITE(5,70)
70      FORMAT(' IZBOR SHEME SKLADISTA// 1-PRVA// 2-DRUGA//
* // 3-TRECA// 4-CETVRTA')
70      READ(IO,51)NUL(7)
79      WRITE(5,80)
80      FORMAT(' IZBOR STRATEGIJE// 1-REDOM PO NARUDZBENICI//'
* ' 2-NAJKRACI PUT')
80      READ(IO,51)NUL(6)
59      WRITE(5,60)
60      FORMAT(' OPCIJA ISPITIVANJA MEĐUREZULTATA// 1-DA// 2-NE')
60      READ(IO,51)NUL(6)
209      WRITE(5,210)
210      FORMAT(' DODATNO VРЕME U FORMATU I2: ',\$)
210      READ(IO,11)NUL(21)
210      IF(NUL(21).GT.99)GO TO 209
219      WRITE(5,220)

```

```

220      FORMAT(' POMOCNO VREME U FORMATU 121 ',\$)
        READ(IO,11)NUL(22)
        IF(NUL(22),GT,99)GO TO 219
229      WRITE(5,230)
230      FORMAT(' BRZINA KRETANJA(U CM/S) U FORMATU 131 ',\$)
        READ(IO,41)NUL(23)
        IF(NUL(23),GT,500)GO TO 229
5       FORMAT(F8.3)
239      WRITE(5,240)
240      FORMAT(' VREME ZAGREVANJA MODELA U FORMATU 121 ',\$)
        READ(IO,11)NUL(24)
        IF(NUL(24),LT,1)GO TO 239
        NUL(25)=0
0       WRITE(5,*)
         'NUL= ',(NUL(I),I=1,25)
        DO 93 I=1,NUL(24)+2
        CALL SLUCAJ(SL)
        NUL(25)=NUL(25)+1
93      CONTINUE
D       TYPE 1000,C1,C2,(NUL(L),L=1,25)
1000    FORMAT(' ',2F8.3/(' ',5I10))
        RETURN
        END
        SUBROUTINE ERLANG(A,L,LC,T)
        AMI=1./A
        PR=1.
        DO 2 I=1,L
        CALL SLUCAJ(SL)
        PR=PR*SL
2       CONTINUE
        IF(PR+LT,1,E-4)PR=1.E-4
        T=(-1/(AMI*L))*ALOG(PR)
        LC=INT(T)+1
        RETURN
        END
        SUBROUTINE INTER
        COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1      NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
        BS=FLOAT(NUL(12))
        CALL ERLANG(BS,NUL(13),MIJA,X)
        NPR(5)=NPR(5)+MIJA
        RETURN
        END
        SUBROUTINE P5000
        WRITE(5,1)
        READ(5,2) A
1       FORMAT(' -----')
*       '          PRITISNITE RETURN'/
*       ' -----')
2       FORMAT(A2)
        RETURN
        END
        SUBROUTINE MEIJIU
        COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1      NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
        WRITE(5,10) NPR(1)

```

```

10   FORMAT(' TEKUCE VРЕМЕ',X,I7)
15   WRITE(5,15) NPF(6)
20   FORMAT(' ИЗУЗНА РЕДА СЕКАЊА',X,I5)
25   WRITE(5,20) NPF(4)
30   FORMAT(' УКУПАН БРОЈ ГЕНЕРИСАНИХ ЛИСТИ',X,I5)
35   DO 5 I=1,NUL(5)
40   WRITE(5,6) I,NRA(I)
45   CONTINUE
50   FORMAT(' ',I2,X,'РАДНИК ЗАВРСАВА У ',I7,X,'ТРЕНУТКУ')
55   CALL P5000
60   RETURN
65   END
70   SUBROUTINE STAMPA
75   COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSKI(20,20,6),NRA(9),
80   1 NAR(24),TEZ(99),NPF(6),NZL(7),NST(9,12)
85   COMMON/F/F(3)
90   COMMON/SUME/NSUME(6)
95   COMMON/NISK/NISK(6)
100  WRITE(5,10) NZL(1)
105  FORMAT(' МАКСИМАЛАН БРОЈ НАРУДЖБЕНИЦА У РЕДУ СЕКАЊА',IX,I6)
110  WRITE(5,20) F(1)
115  FORMAT(' ПРОСЕЧАН БРОЈ НАРУДЖБЕНИЦА У РЕДУ СЕКАЊА',IX,F10.3)
120  WRITE(5,30) F(2)
125  FORMAT(' ПРОСЕЧНО ВРЕМЕ ОПСЛУЖИВАЊА НАРУДЖБЕНИЦЕ',IX,F10.3)
130  WRITE(5,40) NZL(4)
135  FORMAT(' БРОЈ НАРУДЖБЕНИЦА КОЈЕ НИСУ 100% ОПСЛУЖЕНЕ',IX,I6)
140  WRITE(5,50) F(3)
145  FORMAT(' ПРОЦЕНТ ИСТИХ У ОДНОСУ НА УКУПАН БРОЈ
150  * НАРУДЖБЕНИЦА',IX,F7.3)
155  WRITE(5,60) NZL(6)
160  FORMAT(' БРОЈ 100% ОПСЛУЖЕНИХ НАРУДЖБЕНИЦА',IX,I6)
165  WRITE(5,70) NZL(7)
170  FORMAT(' УКУПАН БРОЈ НАРУДЖБЕНИЦА',IX,I6)
175  CALL P5000
180  DO 8 I=1,NUL(5)
185  WRITE(5,18) I
190  FORMAT(' ',I2,2X,'РАДНИК')
195  WRITE(5,11) NST(I,1)
200  FORMAT(' УКУПНО ВРЕМЕ КОЈЕ ЈЕ РАДИО',IX,I6)
205  WRITE(5,21) NST(I,2)
210  FORMAT(' ИСКОРИСЦЕЊЕ РАДНИКА У %',IX,I3)
215  WRITE(5,121) NISK(1)
220  FORMAT(' ИСКОРИСЧЕЊЕ РАДНОГ ВРЕМЕНА',IX,I3)
225  WRITE(5,31) NST(I,3)
230  FORMAT(' БРОЈ СТАВКИ КОЈЕ ЈЕ ОПСЛУЖИО',IX,I6)
235  WRITE(5,200) NST(I,4)
240  WRITE(5,51) NST(I,5)
245  FORMAT(' БРОЈ КОМАДА КОЈЕ ЈЕ ИЗНЕО',IX,I6)
250  WRITE(5,200) NST(I,6)
255  WRITE(5,71) NST(I,7)
260  FORMAT(' БРОЈ НАРУДЖБЕНИЦА КОЈЕ ЈЕ 100% ОПСЛУЖИО',IX,I6)
265  WRITE(5,200) NST(I,8)
270  WRITE(5,91) NST(I,9)
275  FORMAT(' УКУПНА ТЕЗИНА КОЈУ ЈЕ ИЗНЕО',IX,I10)
280  WRITE(5,200) NST(I,10)

```

```

      WRITE(5,111) NST(I,11)
111   FORMAT(' UKUPNI TRANSPORTNI RAD',IX,I10)
      WRITE(5,200) NST(I,12)
      CALL P5000
8     CONTINUE
      WRITE(5,1888) NSUME(1)
1888  FORMAT(' UKUPNO VРЕМЕ',I10)
      WRITE(5,1999) NSUME(2)
1999  FORMAT(' BROJ OPSLUZENIH STAVKI',I10)
      WRITE(5,2111) NSUME(3)
2111  FORMAT(' BROJ IZNETIH KOMADA',I10)
      WRITE(5,2222) NSUME(4)
2222  FORMAT(' BROJ 100% OPSLUZENIH NARUDZBENICA',I10)
      WRITE(5,2333) NSUME(5)
2333  FORMAT(' IZNETA TEZINA',I10)
      WRITE(5,2444) NSUME(6)
2444  FORMAT(' IZRSEN RAD',I10)
      CALL P5000
200   FORMAT(' UVEO PRETHODNOG U %',I3)
      RETURN
      END

SUBROUTINE NULA
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1    NAR(24),TEZ(99),NFR(6),NZL(7),NST(9,12)
DO 21 I=1,25
NUL(I)=0
21   CONTINUE
DO 10 I=1,20
DO 10 J=1,20
DO 10 K=1,6
NSK(I,J,K)=0
NSK1(I,J,K)=0
10   CONTINUE
DO 9 I=1,9
NRA(I)=0
9    CONTINUE
DO 24 I=1,24
NAR(I)=0
24   CONTINUE
DO 99 I=1,99
TEZ(I)=0
99   CONTINUE
DO 6 I=1,6
NFR(I)=0
6    CONTINUE
DO 7 I=1,7
NZL(I)=0
7    CONTINUE
DO 12 I=1,9
DO 12 J=1,12
NST(I,J)=0
12   CONTINUE
      RETURN
      END

SUBROUTINE SLUCAJ(SI)

```

```

COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TE2(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
IF(NUL(25),EQ.0)IX=0
IF(NUL(25),EQ.0)IY=0
SL=RAN(IX,IY)
RETURN
END
SUBROUTINE VREME
C POTPROGRAM VREME OBRAČUNAVA VREME, RAD, TEZINU I DA LI JE
C NARUDZBENICA OPSLUŽENA 100%
INTEGER TU
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
COMMON/RANKO/LST(100,6),K,TU,L0,L1,L2,L3,TZU,PUT,TRAD,
* TK,R,V,L,KM,AP,TZUN,TS,UPUT,KK
DO 5 I=1,100
DO 5 J=1,6
LST(I,J)=0
CONTINUE
DO 555 I=1,20
C WRITE(5,*)
555 CONTINUE
C CALL PS000
C TU - UKUPNO VREME OPSLUŽIVANJA NARUDZBENICE
TU=0
C NAR(24)=1 AKO JE 100% OPSLUŽEN
NAR(24)=1
K=1
TU=TU+2*NUL(21)
C PET1 SE POZIVA I FRETRAZUJE SKLADISTE PO STAVKAMA KADA NAĐE
C PRETINAC SA TOM VRSTOM POZIVA KOSMAS, KOJI FORMIRA LST(K,6).
C AKO NARUDZBENICA NIJE OPSLUŽENA 100%, TADA NAR(24) DORELJUJE 0.
CALL PET1
IF(NUL(6),NE,1)GO TO 10
WRITE(5,8)
8 FORMAT(' MATRICA LST(100,6)')
WRITE(5,9)((LST(I,J),J=1,6),I=1,20)
9 FORMAT(' ',6I5)
CALL PS000
10 TZU=0
TZUN=0
PUT=0
TRAD=0
TK=FLOAT(NUL(4))/1000
R=FLOAT(NUL(20))/100
V=FLOAT(NUL(23))/100
IF(LST(2,1),NE,0)GO TO 204
NAR(21)=0
NAR(23)=0
NAR(24)=0
NAR(22)=NAR(19)*NUL(22)+TU
GO TO 104
204 CALL PET2
D TYPE 1007,TRAD,PUT,AP,UPUT
1007 FORMAT(' TRAD',E15.7,' PUT',E15.7,' AP',E15.7,' UPUT',E15.7)

```

```

KM=LST(K,3)
AF=FLOAT(LST(L,4))
UPUT=APUT(KM,R,1)+AF
C UPUT=APUT(KM,R,LST(L,3))+AF
PUT=PUT+UPUT
TRAD=TRAD+UPUT*TZU
D TYPE 1050,TRAD,UPUT,TZU
1050 FORMAT(' TRAD',E15.7,' UPUT',E15.7,' TZU',E15.7)
NAR(21)=INT(TZUN*1000)
NAR(22)=INT(PUT/V)+TU
NAR(23)=INT(TRAD)
IF(NUL(6).NE.1)GO TO 11
104 WRITE(5,7)
7 FORMAT(' TEZINA',X,'VREME',X,'RAD',X,'100%')
WRITE(5,6) NAR(21),NAR(22),NAR(23),NAR(24)
6 FORMAT(' ',415)
CALL P5000
11 RETURN
END
FUNCTION APUT(K,X,I)
APUT=K*(X/2+1)+MOD(K,2)*(MOD(I,2)*(1-X/2) +
* MOD(I-1,2)*(X/2-1))
D TYPE 10,APUT,K,X,I
10 FORMAT(' APUT U FUNKCIJI ',E15.7,' K ',IS,' X ',E15.5,
* ' I ',IS)
RETURN
END
SUBROUTINE PET1
INTEGER TU
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TE2(99),NPR(6),N2L(7),NST(9,12)
COMMON/RANKO/LST(100,6),K,TU,L0,L1,L2,L3,TZU,PUT,TRAD,
* TK,R,V,L,KM,AF,TZUN,TS,UPUT,KK
DO 5 LD=1,NAR(19)
TU=TU+NUL(22)
DO 10 L1=1,NUL(9)
DO 10 L2=1,NUL(10)
DO 10 L3=1,NUL(11)
IF(NSK(L1,L2,L3).NE.NAR(LD))GO TO 10
CALL KOSMAS
C WRITE(5,555) NAR(24)
555 FORMAT(' 1NAR(24)= ',I1)
CALL P5000
IF(NAR(LD+9).EQ.0)GO TO 7
CONTINUE
10 IF(NAR(LD+9).NE.0)NAR(24)=0
C WRITE(5,666) NAR(24)
666 FORMAT(' 2NAR(24)= ',I1)
CALL P5000
C CONTINUE
5 RETURN
END
SUBROUTINE KOSMAS
INTEGER TU
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),

```

```

1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
COMMON/RANKO/LST(100,6),K,TU,L0,L1,L2,L3,TZU,PUT,TRAD
* ,TK,R,V,L,KM,AP,TZUN,TS,UPUT,KK
K=K+1
C TYPE 1121,L1,L2,L3,NSK(L1,L2,L3)
1121 FORMAT(' L1 L2 L3 ',3I10,' NSK ',I10)
LST(K,1)=NSK(L1,L2,L3)
LST(K,2)=NSK1(L1,L2,L3)
LST(K,3)=L1
LST(K,4)=L2
LST(K,5)=L3
D TYPE 1060,K,(LST(K,II),II=1,5),L1,L2,L3
1060 FORMAT(' K= ',I5,' LST ',5I10,' L ',3I5)
IF(NSK1(L1,L2,L3).GE.NAR(LD+9))GO TO 8
LST(K,6)=NSK1(L1,L2,L3)
D TYPE 1070,LST(K,6)
1070 FORMAT(' LST(K,6) ',I10)
NSK1(L1,L2,L3)=0
NAR(LD+9)=NAR(LD+9)-LST(K,6)
C WRITE(5,555)
555 FORMAT(' 1TU SAM')
C CALL P5000
GO TO 9
B LST(K,6)=NAR(LD+9)
NSK1(L1,L2,L3)=NSK1(L1,L2,L3)-NAR(LD+9)
NAR(LD+9)=0
C WRITE(5,666)
666 FORMAT(' 2TU SAM')
C CALL P5000
9 RETURN
END
SUBROUTINE PET2
INTEGER TU
COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSK1(20,20,6),NRA(9),
1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
COMMON/RANKO/LST(100,6),K,TU,L0,L1,L2,L3,TZU,PUT,TRAD,
* ,TK,R,V,L,KM,AP,TZUN,TS,UPUT,KK
DO 15 L=2,K
KM=IABS(LST(L,3)-LST(L-1,3))
IF(KM.EQ.0)AP=FLOAT(IABS(LST(L,4)-LST(L-1,4)))
IF(KM.NE.0)AP=FLOAT(LST(L,4)+LST(L-1,4))
UFUT=APUT(KM,R,LST(L,3))+AP
FUT=PUT+UFUT
TRAD=TRAD+UFUT*TZU
C TYPE 1122,LST(L,1)
1122 FORMAT(' LST(L,1) ',I10)
TZUN=TZUN+LST(L,6)*TEZ(LST(L,1))
TU=TU+LST(L,6)*INT(TEZ(LST(L,1))/2+5)
18 TS=TK-TZU
KK=0
C TYPE 1111,L
1111 FORMAT(' VREDNOST ZA L ',I10)
IF(TS.LT.(LST(L,6)*TEZ(LST(L,1))))CALL TOB
IF(KK.EQ.1)GO TO 18
TZU=TZU+LST(L,6)*TEZ(LST(L,1))

```

```
15      CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE TOB
      INTEGER TU
      COMMON/NIZ/NUL(25),NSK(20,20,6),NSKI(20,20,6),NRA(9),
      1 NAR(24),TEZ(99),NPR(6),NZL(7),NST(9,12)
      COMMON/RANK0/LST(100,6),K,TU,L1,L1,L2,L3,TZU,PUT,TRAD,
      * TK,R,V,L,KM,AP,TZUN,TS,UPUT,KK
C      WRITE(5,555)
555      FORMAT(' TOB')
C      CALL P5000
      LST(L,6)=LST(L,6)-INT(TS/TEZ(LST(L,1)))
      TZU=TZU+TEZ(LST(L,6))*INT(TS/TEZ(LST(L,1)))
      AP=FLOAT(LST(L,4))
      KM=LST(L,3)
      UPUT=APUT(KM,R,LST(L,3))+AP
      PUT=PUT+2*UPUT
      TRAD=TRAD+TZU*UPUT
      TU=TU+NUL(21)
      TZU=0
      KK=1
      RETURN
      END
```

LITERATURA

1. Bronson, R.: Computer Simulation, Byte, March 1984.
2. Buffa, E.S.: Operations Management, New York 1976.
3. Ermakov, S.M.: Metod Monte Karlo i smežnie voprosi, Nauka, Moskva 1975.
4. Gillett, B.: Introduction to operations Research, Mc Graw - Hill, USA 1976.
5. Gordon, G.: System Simulation, Prentice - Hall, Inc., New York Jersey 1978.
6. Gudehus, T.: Regalförderzeuge für mehrere Ladeeinheiten, f+h, Nr. 11, 1972.
7. Gudehus, T.: Pufferplätze und Auslastbarkeit von Regalförderzeugen, f+h, Nr. 15, 1972.
8. Gudehus, T.: Warteschlangen und Wartezeiten, f+h, Nr. 5, 1973.
9. Gudehus, T.: Warteschlangen und Wartezeiten in Warenverteil und Lagersystemen, publ. DEMAG-Systemtechnik, Hagen.
10. Hillier,S.,Yu.O. Queuing Tables, North Holland, New York, 1981.
11. Krčevinac,Čupić,Nikolić i drugi: Algoritmi i programi iz operacionih istraživanja, Beograd 1983.
12. Martin, J.: Systems Analysis for Data Transmission, Prentice - Hall. Inc. New Jersey 1972.
13. Losen, M.: We baut man Warteschlangen in inner betrieblichen Transport ab., f+h, Nr. 15, 1972.
14. Obradović, D.,Zrnić,Dj.: Primena matematičkog modeliranja u tehnici, 3. seminar o transportnim procesima u industriji, SMEITS, Beograd 1979.
15. Page, E.S., Wilson, L.B.: An Introduction to Computational Combinatorics, Cambridge Universitypress, London, 1979.
16. Petrić,J., Šarenac,L.,Kojić,Z.: Operaciona istraživanja, zbirka rešenih zadataka 2., Beograd 1980.
17. Prabhu, N.: Stohastičeskie procesi teoriji zapasov, Mir, Moskva 1984.

18. Prins, G.: New Approaches to Goods Movement, Transport Systems and Activities, "Transportkunde", Publ. Nr. 126, Delft 1975.
19. Pritsker, A.B.: The GASP IV Simulation Language, J. Wiley and Sons, New York 1974.
20. Rasmussen, H.: Queue Simulation, Byte, March 1984.
21. Ruiz-Pala,E, Avila-Beloso,C, Hines,W.: Waiting-Line Models, Reinhold Publ. Corp., New York 1967.
22. Savić, D.: Simulacija kompjuterizovanog skladišta, III seminar o transportnim procesima u industriji, Beograd 1979.
23. Savić, D.Faragović,S.: Simulacija opsluge na dolaznoj autobuskoj stanici, SYMOPIS '83.
24. Savić, D.Faragović,S.: Simulacija dnevne nege vozila, SYMOPIS '84.
25. Simonović, V.: Uvod u teoriju verovatnoće i matematičku statistiku, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1986.
26. Sivazlian,B.D., Stanfel,L.E.: Analysis of Systems in Operations Research, Prentice-Hall Jnc., New Jersey, 1975.
27. Sobolj, I.M.: Čislennie metodi Monte - Karlo, Nauka, Moskva 1973.
28. Stemmer, G.: MFSP, a computer program to Simulate Warehouse problems, Proc. of the 2. nd ICAW, Keele, 1977.
29. Stojanović, S.: Dimenzionisanje sistema (SPPNK) opsluživanja autobusa u autobazi "Centrotrans" primenom teorije masovnog opsluživanja i metode Monte Karlo, Saobraćaj 3/81.
30. Vukadinović,S.: Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Naučna knjiga 1973.
31. Vukadinović,S.: Elementi teorije masovnog opsluživanja, Naučna knjiga, Beograd 1975.
32. Vukadinović,S., Popović, J.: Metoda Monte Karlo, Saobraćajni fakultet, Beograd 1977.

33. Whitneu, Ch.: Generating and Testing Pseudorandom Numbers, Byte, October 1984.
34. Zrnić, Dj.: Uticaj visine uskladištenja na izbor parletnog skladišta, Mašinstvo 1873-1973, Beograd 1973.
35. Zrnić, Dj.: Simulacija transportnih procesa, 2. seminar o transportnim procesima u industriji SMEITS, Beograd 1978.
36. Zrnić, Dj.: Analiza transportnih procesa u paletnim skladištima, Naučno-stručni skup Mašinstvo u procesnoj tehnici, Mašinski fakultet, Beograd 1978.
37. Zrnić, Dj.: Primena teorije čekanja, 3. seminar o transportnim procesima u industriji, SMEITS, Beograd 1979.
38. Zrnić, Dj.: A Method for Planning Materials Handling Systems in Warehousing, Proc. of the 3. rd International Conference on Automation in Warehousing - Part 1, Chichago (USA), November 1979.
39. Zrnić, Dj.: A Metod of Planning Materials Handling Systems in Warehousing, Proc. of the 3. rd ICAW - Part 2, Stratford - Upon - Avon, June 1980.
40. Zrnić, Dj.: Fabrička postrojenja I (projektovanje fabrika), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 1987.
41. Zrnić, Dj.: Design of a Bulk-Cargo Terminal System for a Steel Works, 1 er Congres International en France, LE GENIE INDUSTRIEL, Ecole Centrale des Arts et Manufac., Paris 1986.
42. Zrnić, Dj., Pavlović,M., Perušinović,B.: Projektovanje linije za montažu poljoprivrednih i kamskih prikolica, 8. stručni skup o transportnim procesima, SMEITS, Beograd 1984.

43. Zrnić,Dj., Savić,D.: Određivanje dimenzija regalnog skla-
dišta primenom postupka simulacije;
Naučno-stručni skup Projektovanje
proizvodnih sistema, Novi Sad 1980.
44. Zrnić,Dj., Savić,D.: Workshop - storage, an integrated ma-
terials handling system, 6. Internati-
onal Conference on production research,
Novi Sad 1981.
45. Zrnić,Dj., Savić,D.: Simulacija rada regalnih dizalica, 5.
stručni skup o transportnim procesima
u industriji, Beograd 1981.
46. Zrnić,Dj., Savić,D.: Analiza transportnih procesa u labora-
torijskim uslovima; 6. medjunarodni
simpozijum: Kompjuter na sveučilištu,
Dubrovnik 1984.
47. Zrnić,Dj., Savić,D.: Simulacija procesa unutrašnjeg transp-
orta, Univerzitet u Beogradu, Mašinski
fakultet, Beograd 1985.
48. Zrnić,Dj., Savić,D., Pavlović,M., Perušinović,B.: Problem
uravnoteženja montažne linije sa pose-
bnim ograničenjima, Naučno stručni
skup Industrijski sistemi - IS '84,
Novi Sad 1984.
49. Zrnić,Dj. i dr. Studija procesa montaže i zavarivanja
kod proizvodnje kamionskih i poljopri-
vrednih prikolica, sveska 1,3,4,5, ra-
djeno za GIO "Napredak" T. Vrbas, Maš-
inski fakultet, Beograd 1983/84.
50. Žiljak, V.: Simulacija računalom, školska knjiga,
Zagreb 1982.
51. - Seminarski rad urađen u okviru nasta-
ve iz Fabričkih postrojenja (autori:
Čupić-Vojinović,P., Tomicić,B., Čolak,M.,
i Kotivas,K.).

52. Zrnić,Dj., Prokić,M., Milović,P.; Projektovanje livnica
4. izdanje, Univerzitet u Beogradu, Mašinski
fakultet, Beograd 1985.
53. Gudehus,T.: Grundlagen der Kommissioniertechnik, Verlag
W.G., Essen 1973.
54. Borsuk,V.A. i dr.: Ekonomiko-matematičeski metodi i mode-
li v planirovani i upravlenii v otrazli svj-
azi, "Radio i svjaz", Moskva 1984.