

**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET - BEOGRAD**

UGLJEŠA S. BUGARIĆ

**MODELIRANJE NESTACIONARNOG REŽIMA RADA
SISTEMA MEHANIZOVANOG TRANSPORTA PRIMENOM
TEORIJE REDOVA**

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

BEOGRAD, 2002.

Mentor: dr Slobodan Tošić, redovni profesor
Mašinski fakultet - Beograd

Članovi komisije: dr Josif Vuković, redovni profesor
Mašinski fakultet - Beograd

dr Srđan Bošnjak, vanredni profesor
Mašinski fakultet - Beograd

dr Ljubomir Protić, redovni profesor
Matematički fakultet - Beograd

dr Milivoj Klarin, redovni profesor
Mašinski fakultet - Beograd

Datum odbrane: _____

MODELIRANJE NESTACIONARNOG REŽIMA RADA SISTEMA MEHANIZOVANOG TRANSPORTA PRIMENOM TEORIJE REDOVA

U radu je razvijena metodologija za analizu rada jednopozicionih transportnih mašina (uređaja), koja sadrži proceduru za tačnije (optimalno) određivanje vremena trajanja srednjeg radnog ciklusa kao i proceduru za analizu parametara tehnološke funkcije transportnog uređaja (sistema) u stacionarnom odnosno nestacionarnom režimu rada.

U radu je prikazana analiza nestacionarnog i stacionarnog režima rada pojedinih uređaja mehanizovanog transporta (sistema) i to: visokoregalne dizalice i lifta. Analiziran je nestacionarni režim rada, posmatranih uređaja, izazvan početnim uslovima tj. popunjenosti sistema na početku rada. Analiziran je slučaj kada je sistem na početku rada prazan.

Većina uređaja mehanizovanog transporta, pa tako i visokoregalna dizalica i lift, rade na principu ciklusa. Optimalno vreme trajanja ciklusa opsluživanja visokoregalnom dizalicom i liftom određeno je primenom Pontrjaginovog principa maksimuma.

Analiza rada liftovskog postrojenja u nestacionarnom i stacionarnom režimu rada vršena je primenom jednokanalnog modela teorije redova (sistema opsluživanja) sa pojedinačnim dolaskom jedinica, grupnim opsluživanjem jedinica i ograničenim brojem mesta u sistemu.

Sve veća primena računara pri upravljanju radom visokoregalnih dizalica, u smislu minimalnog vremena trajanja ciklusa uskladištenja/iskladištenja, dovela je do toga da se rad visokoregalne dizalice može analizirati promenom jednokanalnog modela teorije redova (sistema opsluživanja) sa ograničenim brojem mesta u redu.

Rešenja sistema diferencijalnih jednačina, koji opisuju promenu, u vremenu, verovatnoća stanja primenjenih modela, u slučaju modela koji opisuje rad lifta dobijena su primenom numeričkih metoda, dok je u slučaju modela koji opisuje rad visokoregalne dizalice rešenje dobijeno analitički.

Dato analitičko rešenje sistema diferencijalnih jednačina jednokanalnog sistema teorije redova sa ograničenim brojem mesta u redu, predstavlja originalan postupak rešavanja sistema diferencijalnih jednačina u opštem slučaju. U sklopu rešavanja datog sistema diferencijalnih jednačina prikazan je i postupak određivanja integracionih konstanti u zavisnosti od proizvoljnih početnih uslova. Transformacija izraza za vremenski zavisne verovatnoće stanja u slučaju kada broj mesta u redu teži beskonačnosti takođe je prikazan.

Analiza rada liftovskog postrojenja vršena je za konfiguracije sistema sa maksimalnom veličinom grupe koja se opslužuje od 5, 8 i 10 putnika i brojem mesta u sistemu jednakim počevši od veličine grupe pa do dvostruke veličine grupe koja se opslužuje.

Analiza rada visokoregalne dizalice vršena je za konfiguracije sistema sa različitim brojem mesta u redu u to od 0 do 10.

Rezultati analize, i u jednom i u drugom slučaju dati su u obliku dijagrama u zavisnosti od koeficijenta opterećenja sistema. Rezultati analize predstavljaju vreme trajanja nestacionarnog režima, kao i promenu posmatranih karakteristika modela (performansi realnog sistema) u stacionarnom i nestacionarnom režimu kao i njihove relativna razlike.

Ključne reči: sistemski prilaz, teorija redova, optimizacija, visokoregalna dizalica, lift.

MODELLING OF NON-STATIONARY WORK REGIMES OF TRANSPORTATION SYSTEMS DEVICES USING QUEUEING THEORY

The author's Ph.D. thesis develops a new methodology for analysis of work of single position transport machines (devices), which contain procedure for obtaining most precise (optimal) duration of average working cycle as well as procedure for analyze of technological function parameters of transport machines (devices) in non-stationary and stationary work regimes.

The author's Ph.D. thesis shows the analysis of non-stationary and stationary work regimes of some transport system devices such as: S/R - machines and elevators. Non-stationary work regime of those devices, caused by initial conditions i.e. number of units (customers) in the system at the beginning of work. Case when there is no units (customers) in the system at the beginning of work is analyzed.

Work of most transportation system devices, as well as S/R - machines and elevators, is based on working cycle. Optimal working cycle in the sense of cycle duration is obtained by using the Pontryagin's principle of maximum.

Analysis of elevator's work in non-stationary and stationary regimes is done by using single channel, bulk service model of queueing theory with finite storage (limited number of places in the system).

Computer application in control process of S/R - machines work in the sense of minimal duration of storage/retrieval cycles, enables that work of S/R - machine can be analyzed by using single channel model of queueing theory with finite storage (limited number of places in the queue).

Time dependent state probabilities, which are solutions of differential equations systems, in the case of used model for elevator work analyze are obtained by application of numerical methods, while in the case of used model for analyze of S/R - machine work are obtained in analytical way.

Given analytical solution of differential equation system of single channel model of queueing theory with finite storage, represents genuine procedure in the field of solutions of differential equations in the general case. As the part of given solution, procedure of determining the integration constants according to initial conditions is also given. Transformation of expressions for time dependent probabilities, when number of places in the queue transients to infinity is also shown.

Analyze of elevator's work is done for system configurations with maximal bulk size of 5, 8 and 10 customers (passengers) and the number of places in the system from equal to bulk size to double bulk size.

Analyze of S/R - machine work is done for system configurations with different number of places in the queue from 0 to 10.

Results of analyze, in both cases are shown on diagrams as the function of system offered load. Results of analyze are duration of non-stationary regime, change of observed characteristic of used models (system performances) in stationary and non-stationary regime of work, as well as their relative difference.

Keywords: systems approach, queueing theory, optimization, S/R - machine, elevator.

SADRŽAJ:

PREGLED KORIŠĆENIH OZNAKA	VIII
1. UVOD	1
1.1. RAZVOJ I PROJEKTOVANJE TEHNIČKIH SISTEMA - (definicija problema razvoja discipline)	2
1.1.1. PREDUZEĆE - RAZVOJ PROIZVODA KLJUČNA FUNKCIJA	2
1.1.2. PROCES PROJEKTOVANJA - PROMENE U METODOLOGIJI	2
1.1.3. OBLASTI PROJEKTOVANJA - OBJEKTI, METODOLOGIJE I METODI	4
1.1.4. KRITERIJUMI EFEKTIVNOSTI I EFIKASNOSTI	5
1.1.5. ZAHTEVI ZA POBOLJŠANJE METODOLOGIJA I RAZVOJEM NOVIH/BOLJIH METODA I ALATA	5
1.2. SISTEM RAZVOJA I PROJEKTOVANJA - SISTEMSKI PRILAZ I SISTEMSKA METODOLOGIJA	6
1.2.1. PROJEKTOVANJE SISTEMA - SISTEMSKO INŽENJERSTVO	6
1.2.2. SISTEMSKI PRILAZ	7
1.2.3. METODOLOGIJA SISTEMSKOG INŽENJERSTVA	9
1.2.4. METODOLOGIJA REŠAVANJA PROBLEMA REALNOG SVETA ZASNOVANA NA SISTEMSKOJ IDEJI	11
1.3. PROJEKTOVANJE - RAZVOJ METODA ANALIZE I OPTIMIZACIJE VREMENA RADNOG CIKLUSA	12
1.3.1. DEFINICIJA RADNOG CIKLUSA	13
1.3.2. ODREĐIVANJE PERFORMANSI - RADNE SPOSODNOSTI SISTEMA	15
1.3.3. METODOLOGIJA ANALIZE VREMENA RADNOG CIKLUSA	15
1.4. SISTEM KRETANJA I TRANSPORTA	17
1.4.1. KRETANJE MATERIJALA	17
1.4.2. TRANSPORTNA JEDINICA - JEDINIČNI TERET	19
1.4.3. KRETANJE LJUDI U OBJEKTIMA	20
1.4.4. ČVORNE TAČKE	21
1.5. OSNOVNE HIPOTEZE I CILJ RADA	22
1.5.1. REZULTATI KOJI SE OČEKUJU	25
1.5.2. PROGRAM RADA	25
1.6. KARAKTERISTIKE VISOKOREGALNE DIZALICE - DEFINISANJE SISTEMA	26
1.7. KARAKTERISTIKE LIFTOVSKOG POSTROJENJA - DEFINISANJE SISTEMA	30
1.8. PREGLED LITERATURE IZ OBLASTI TEORIJE REDOVA	34
2. OPTIMALNO TRAJANJE CIKLUSA RADA POJEDINIH UREĐAJA MEHANIZOVANOG TRANSPORTA	42
2.1. CIKLUS RADA VISOKOREGALNE DIZALICE	43
2.1.1. DINAMIČKI MODEL VRD	43
2.1.2. OPTIMALNO KRETANJE VRD U Y(X) PRAVCU	43
2.1.3. PROSEČNO VREME TRAJANJA JEDNOSTRUKOG CIKLUSA VRD	50
2.1.4. PRIMER PRORAČUNA JEDNOSTRUKOG CIKLUSA VRD PREMA FEM-u	51
2.2.1. DINAMIČKI MODEL LIFTA	53
2.2.2. OPTIMALNO KRETANJE LIFTA	54

2.2.3. PROSEČNO VREME TRAJANJA CIKLUSA LIFTA.....	78
2.2.4. PRIMER PRORAČUNA ULAZNOG CIKLUSA LIFTA	82
2.3. ODREĐIVANJE ZAKONA RASPODELE RADA UREĐAJA MEHANIZOVANOG TRANSPORTA.....	83
2.3.1. ZAKON RASPODELE RADA VRD	83
2.3.2. ZAKON RASPODELE RADA LIFTOVSKOG POSTROJENJA	86
3. FORMIRANJE DIFERENCIJALNIH JEDNAČINA STANJA SISTEMA OPSLUŽIVANJA SA OGRANIČENIM REDOM.....	87
3.1. SLUČAJNI (STOHAISTIČKI) PROCESI	87
3.2. SLUČAJNI PROCES MARKOV-a.....	88
3.2.1. NEHOMOGENI SLUČAJNI PROCES MARKOV-a.....	89
3.2.2. HOMOGENI SLUČAJNI PROCES MARKOV-a.....	94
3.2.3. JEDNOKANALNI SISTEM OPSLUŽIVANJA SA GRUPNIM DOLASKOM, GRUPNIM OPSLUŽIVANJEM JEDINICA I OGRANIČENIM BROJEM MESTA U SISTEMU.....	98
3.2.4 JEDNOKANALNI SISTEM OPSLUŽIVANJA SA POJEDINAČNIM DOLASKOM, GRUPNIM OPSLUŽIVANJEM JEDINICA I OGRANIČENIM BROJEM MESTA U SISTEMU.....	102
3.3. PROCES RAĐANJA I UMIRANJA	104
3.3.1. PROCES RAĐANJA	106
3.3.2. PROCES UMIRANJA	109
3.4. JEDNOKANALNI SISTEM OPSLUŽIVANJA SA OGRANIČENIM REDOM.....	112
3.5. NESTACIONARNOST KOD MODELA TEORIJE REDOVA ZASNOVANIH NA SLUČAJNOM PROCESU MARKOV-a.....	114
4. ANALITIČKO REŠENJE SISTEMA DIFERENCIJALNIH JEDNAČINA STANJA JEDNOKANALNOG SISTEMA OPSLUŽIVANJA SA OGRANIČENIM REDOM (M/M/1/m).....	116
4.1. POSTUPAK REŠAVANJA	116
4.2. ODREĐIVANJE INTEGRACIONIH KONSTANTI.....	121
4.3. GRANIČNE VREDNOSTI VEROVATNOĆA STANJA JEDNOKANALNOG SISTEMA OPSLUŽIVANJA.....	142
4.3.1. GRANIČNE VREDNOSTI VEROVATNOĆA STANJA KAD $t \rightarrow \infty$	142
4.3.2. GRANIČNE VREDNOSTI VEROVATNOĆA STANJA KAD $m \rightarrow \infty$	143
4.3.3. ODREĐIVANJE VEROVATNOĆA STANJA JEDNOKANALNOG SISTEMA OPSLUŽIVANJA SA BESKONAČNIM BROJEM MESTA U REDU PRIMENOM SIMULACIONOG MODELA.....	158
5. KARAKTERISTIKE JEDNOKANALNOG SISTEMA OPSLUŽIVANJA SA OGRANIČENIM REDOM (M/M/1/m) U NESTACIONARNOM I STACIONARNOM REŽIMU RADA	163
5.1. VREME TRAJANJA NESTACIONARNOG REŽIMA IZAZVANOG POČETNIM USLOVIMA.....	163
5.2. KARAKTERISTIKE JEDNOKANALNOG SISTEMA OPSLUŽIVANJA SA OGRANIČENIM REDOM U TOKU TRAJANJA NESTACIONARNOG REŽIMA IZAZVANOG POČETNIM USLOVIMA...	166
5.3. ANALIZA REZULTATA	181

6. KARAKTERISTIKE JEDNOKANALNOG SISTEMA OPSLUŽIVANJA SA POJEDINAČNIM DOLASKOM, GRUPNIM OPSLUŽIVANJEM I OGRANIČENIM REDOM U NESTACIONARNOM I STACIONARNOM REŽIMU RADA	185
6.1. VREME TRAJANJA NESTACIONARNOG REŽIMA IZAZVANOG POČETNIM USLOVIMA.....	185
6.2. KARAKTERISTIKE JEDNOKANALNOG SISTEMA OPSLUŽIVANJA SA POJEDINAČNIM DOLASKOM, GRUPNIM OPSLUŽIVANJEM I OGRANIČENIM BROJEM MESTA U SISTEMU U TOKU TRAJANJA NESTACIONARNOG REŽIMA IZAZVANOG POČETNIM USLOVIMA....	187
6.3. ANALIZA REZULTATA	218
7. ZAKLJUČAK	221
8. LITERATURA	207

PREGLED KORIŠĆENIH OZNAKA

a - ubrzanje,
 $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i, G_i$ - integracione konstante,
 $B_{i,j}$ - konstante,
 br_{sim} - broj simulacionih eksperimenata (generisanih cikusa),
 c_i - proizvoljne konstante,
 c_z - srednji broj zauzetih kanala za opsluživanje,
dh - rastojanje između dve susedne odredišne stanice putnika u kabini,
 d_{int} - dužina intervala za histograme apsolutne i relativne učestanosti stanja sistema,
 E_i - i-to stanje sistema,
 E_k - kinetička energija,
 E_p - potencijalna energija,
 $f_{\tau_i}(t)$ - gustina raspodele vremena koje proces provede u stanju E_i ,
 F_x - pogonska sila VRD u horizontalnom (x) pravcu,
 F_y - pogonska sila VRD u vertikalnom (y) pravcu,
H - optimizaciona funkcija,
h - visina dizanja lifta,
 $H(s,t)$ - tranziciona matrica,
 $h(t)$ - funkcija čiji je argument dodatno vreme,
 h_x - put u x pravcu koju treba ostvariti,
 h_y - put u y pravcu koju treba ostvariti,
 $I_n(x)$ - modifikovana Beselova funkcija prve vrste reda n,
 i_r - prenosni odnos reduktora,
j - trzaj; izvod ubrzanja po vremenu,
 J_{em} - moment inercije rotora elektromotora,
 J_k - moment inercije doboša,
K - ograničenje ubrzanja po apsolutnoj vrednosti,
L, H - dužina i visina regala,
 L_i - konstante,
m - kapacitet reda,
M - ograničenje trzaja po apsolutnoj vrednosti,
 m_1 - mase svih čvrsto povezanih ili pokretnih delova i pogonskih mehanizama VRD,
 m_2 - masa tereta i palete, mase delova za prihvatanje i nošenje tereta VRD,
 m_k - masa kabine lifta,
 M_p - pogonski moment
 m_t - masa kontratega,
N - broj spratova zgrade,
n - maksimalni broj jedinica u sistemu,
 N_w - srednji broj jedinica u redu,
 N_{ws} - srednji broj jedinica u sistemu,
P - nosivost kabine, ljudi,
 $p_{ij}(s,t)$ - verovatnoća prelaska sistema iz stanja i u trenutku s u stanje j u trenutku t,
 p_j - relativna učestanost (verovatnoća) j-tog stanja sistema u zavisnosti od vremena,
 p_i - i-ta verovatnoća stanja sistema u stacionarnom režimu,
 $p_j(t)$ - verovatnoća da će se sistem (proces) naći u trenutku t u stanju E_j ,
 P_k - trenutni broj putnika u kabini,
 P_{ops} - verovatnoća opsluživanja,
 P_{pr} - verovatnoća postojanja reda,

$p_{i,j}$ - osnovni sistem partikularnih rešenja (integrala),
 \bar{p}_i - osrednjena verovatnoća i-tog stanja na intervalu $[0, t_{stac}]$,
 $\bar{P}_{ops}, \bar{c}_Z, \bar{P}_{pr}, \bar{N}_w, \bar{t}_w, \bar{N}_{ws}, \bar{t}_{ws}$ - osrednjene vrednosti karakteristika na intervalu $[0, t_{stac}]$,
 Q - nosivost kabine, kg,
 $Q(s)$ - matrica intenziteta prelaska (tranzicije),
 Q_M - generalisana sila od pogonskog momenta lifta,
 Q_{mg} - generalisana sila izazvana silom zemljine teže,
 Q_y - ukupna generalisana sila,
 r - maksimalna veličina grupe koja se može jednovremeno opslužiti,
 R - poluprečnik doboša,
 $R(n)$ - konstanta u zavisnosti od n ,
 r_k - rešenja karakteristične jednačine,
 s - vreme koje je proces već proveo u tekućem stanju,
 SL - slučajan broj generisan po ravnomernoj raspodeli u intevalu od 0 do 1,
 S_p - pređeni put u toku pozicioniranja,
 $Sprat[j]$ - odredišna stanica (sprat) j-tog putnika u kabini,
Stanje - stanje kanala za opsluživanje, "Č" - čekanje, "R" - rad,
 t - dodatno vreme (deo do ukupnog vremena koje će proces provesti u tekućem stanju),
 t_b - vreme potrebno za otvaranje kočnice,
 T_c - vreme trajanja ciklusa VRD,
 $t_{d/s}$ - vreme dizanja/spuštanja palete,
 t_{dolj} - vremenski trenutak dolaska nove jedinice u sistem,
 t_f - vreme držanja otvorenih vrata posle presecanja svetlosnog zraka fotoćelije,
 t_{iz} - vreme potrebno za izlazak putnika iz lifta,
 t_k - optimalno vreme trajanja ciklusa uređaja mehanizovanog transporta,
 $t_{ko}^{P_1, P_2}$ - optimalno vreme kretanja VRD, između dve lokacije $P_1(x_1, y_1)$ i $P_2(x_2, y_2)$,
 t_{krit} - vremenski trenutak promene stanja kanala za opsluživanje,
 t_{kx} - vreme kretanja VRD u x pravcu,
 t_{ky} - vreme kretanja VRD u y pravcu,
 t_{ops} - vreme trajanja opsluživanja,
 t_{ov} - vreme potrebno za otvaranje vrata,
 t_p - vreme pozicioniranja VRD za zahvatanje/odlaganje palete,
 t_{sim} - vreme trajanja simulacionog eksperimenta,
 t_{stac} - vreme dostizanja stacionarnog režima,
 t_{tel} - vreme teleskopiranja,
 $t_{uk/is}$ - vreme potrebno za kontrolu funkcija i uključanje/isključenje,
 t_{ul} - vreme potrebno za ulazak putnika u lift,
 t_w - srednje vreme koje jedinica provede u redu,
 t_{ws} - srednje vreme koje jedinica provede u sistemu,
 t_{zv} - vreme potrebno za zavarivanje vrata,
 u^0 - optimalno upravljanje,
 v - brzina,
 V^* - maksimalna brzina,
 V_p - brzina pozicioniranja,
 V_x - maksimalna brzina kretanja VRD u horizontalnom pravcu,
 V_y - maksimalna brzina kretanja VRD u vertikalnom pravcu
 x - horizontalni pravac kretanja VRD,
 X_j - apsolutna učestanost j-tog stanja sistema u zavisnosti od vremena,
 X_{sist} - vektor stanja sistema za svaki simulacioni eksperiment u zavisnosti od vremena,

y - vertikalni pravac kretanja VRD (lifta),
 ε - apsolutna razlika verovatnoća stanja,
 λ - intenzitet dolaznog toka,
 $\lambda_{\text{eff}}(t)$ - int. dolaznog toka jedinica koje se opsluže u sistemu u zavisnosti od vremena,
 λ_{eff} - intenzitet dolaznog toka jedinica koje se opsluže u sistemu,
 μ - intenzitet opsluživanja,
 ρ - opterećenje sistema,
 δ - relativna razlika verovatnoca stanja,
 φ - ugao obrtanja doboša,
 $\Gamma(x)$ - gama funkcija argumenta x ,
 τ_i - vreme trajanja i -te etape kretanja uređaja mehanizovanog transporta.