

MODELIRANJE PROCESA OTKAZA I ODRŽAVANJA PRIMENOM PETRIJEVIH MREŽA

MODELING OF FAILURE AND MAINTENANCE PROCESSES USING PETRI NETS

Mirko Vujošević, Dragana Makajić-Nikolić
Fakultet organizacionih nauka, Jove Ilića 154, Beograd



Rezime

U ovom radu daje se kratak pregled primene Petrijevih mreža u modeliranju, analizi i simulaciji problema iz oblasti pouzdanosti, efektivnosti, rizika i održavanja sistema. Najpre se ukazuje na ograničenja metoda klasične teorije pouzdanosti u analizi dinamike otkaza i akcija održavanja u realnim sistemima. Zatim se izlažu osnovni pojmovi iz oblasti Petrijevih mreža i prikazuju neki rezultati saopšteni u javnim publikacijama o njihovim primenama u pouzdanosti. Na kraju se ukazuje na sopstvena istraživanja i rezultate u ovoj oblasti.

Ključne reči: Pouzdanost, Rizik, Petrijeve mreže, Modeliranje

Abstract

This paper presents a short review of Petri net capabilities and application in modeling, analysis

and simulation of reliability, availability and risk problems. Reliability block diagram, fault tree analysis, event tree analysis and Markov chains are standard and powerful techniques in reliability theory and practice. However they suffer of serious disadvantage when system dynamics is considered. Petri nets, especially colored Petri nets may be considered as a universal tool for modeling, analysis and simulation of complex systems. Some results from graph theory are directly applicable for analyzing so called structural properties of the system. Event-driven simulation is used for analyzing behavioral properties. Although Petri nets are more complicated than the standard reliability techniques they enable a richer insight in system behavior and becomes an important element of education for reliability engineers and risk analysts.

Key words: Reliability, Risk, Petri net, Modeling

1. UVOD

Za uspešno modeliranje i analizu pouzdanosti i raspoloživosti sistema neophodna su razna inženjerska, matematička i sistemska znanja. Pored poznavanja konkretnog sistema i primenjenih tehnologija, inženjer pouzdanosti, da bi efikasno mogao da primeni sistemski pristup, treba da poznaje različite matematičke discipline (logika, verovatnoća, teorija grafova, stohastički procesi, optimizacione metode). Primena sistemskog pristupa se jasno prepoznaje u analizi pouzdanosti jer je u njoj neophodno neprekidno voditi računa o elementima sistema ali i o sistemu kao celini, uzimajući u obzir relacije između elemenata i njihov uticaj na ukupne performanse.

Praćenjem razvoja teorije pouzdanosti uočava se napredak i usavršavanje tehnika koje su omogućavale analize sve složenijih procesa i sistema. U ovom radu se ukratko ukazuje upravo na evoluciju klasičnih pristupa analizi pouzdanosti i opisuju Petrijeve mreže koje predstavljaju jednu od moćnih, naprednih metoda za savremene analize složenih procesa.

2. KLASIČNI PRISTUPI MODELIRANJU

U standardnim tehnikama pouzdanosti [1] polazi se od principa dekompozije i svakoj komponenti sistema j , $j = 1, \dots, n$, pridružuje indikator stanja ispravnosti komponente $y_j(t)$

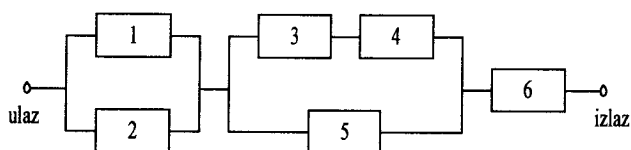
$$y_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{ako je komponenta ispravna} \\ 0, & \text{ako je komponenta neispravna} \end{cases}$$

Odgovarajući proces $\{y_j(t), t \geq 0\}$ se naziva proces ispravnosti komponente. Radi analize sistema uvodi se vektor indikatora stanja komponenti $y(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))$ i odgovarajući vektorski proces $\{y(t), t \geq 0\}$. Koristi se i indikator stanja sistema

$$h(t) = \begin{cases} 1, & \text{ako je sistem ispravan} \\ 0, & \text{ako je sistem неисправan} \end{cases}$$

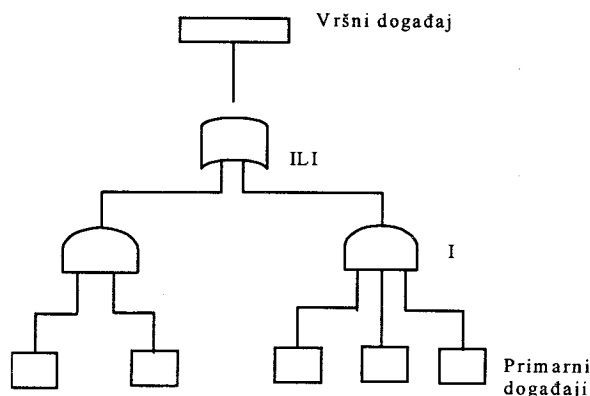
Svođenje opisa sistema na samo dva stanja, ispravno ili неисправno, veoma je ograničavajuće čak i u slučajevima kada se razmatra pouzdanost. Pored toga, standardne tehnike imaju i druge osobine koje ih ograničavaju u davanju bogatijeg opisa sistema.

Blok dijagrami pouzdanosti (RBD – Reliability Block Diagrams), slika 1, opisuju funkcionalnu strukturu sistema. Njihova primena je u praksi dodatno ograničena na sisteme sa rednom i paralelnom vezom komponentata.



Slika 1. Blok dijagram pouzdanosti

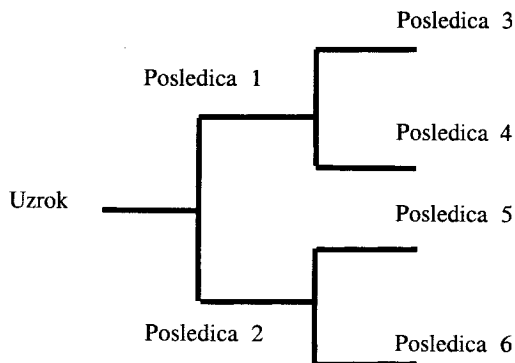
Stablo neispravnosti (FT - Fault Tree), slika 2, je pogodnija grafička predstava funkcionalne strukture sistema pri razmatranju specifikiranog vršnog događaja. Stabla neispravnosti omogućuju formalnu grafičku predstavu kombinacije događaja koji mogu dovesti do sistemskog otkaza[2]. Ona se mogu lako razumeti i kreirati pošto predstavljaju logičku strukturu sistema. Vršni događaj (stanje otkaza sistema) razlaže se na svoje konstitutivne uzroke koji su spojeni logičkim funkcijama tipa I, ILI ili m-od-n:doobar. Proces razlaganja se nastavlja dok se ne identifikuju bazični događaji. Bazični događaji se direktno odnose na komponente sistema.



Slika 2. Stablo neispravnosti

Metode analize stabla neispravnosti takođe su razvijene bez uključivanja u razmatranje dinamike sistema, odnosno procesa održavanja, osim u uopštenom slučaju kada se umesto pouzdanosti komponentata razmatraju njihove raspoloživosti. Za realne sisteme sa ugrađenim sigurnosnim uređajima, stabla neispravnosti uključuju specijalna logička kola i pogodna su samo za utvrđivanje kombinacija događaja koji izazivaju vršni događaj. Međutim, mogućnosti analize procesa pouzdanosti u vremenskom domenu veoma su ograničene.

Za analizu pouzdanosti i rizika u sistemima sa ugrađenim merama sigurnosti posebno su značajna stabla događaja (Event Tree) i stabla odluka (Decision Tree) slika 3. To su induktivne logičke metode za identifikaciju različitih mogućih ishoda nekog datog početnog (inicijalnog) događaja, a razlikuju se po tome da li ljudska kontrola može da utiče na ishode (slučaj stabla odluka) ili ishodi zavise samo od prirodnih zakona (kao u slučaju stabla događaja). U primenama analize rizika, početni događaj u stablu događaja je po pravilu otkaz vitalne komponente sistema a sledeći događaji se utvrđuju na osnovu pravila ponašanja sistema.

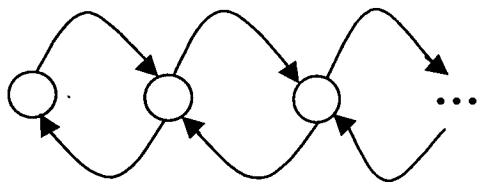


Slika 3. Stablo događaja

Stablo događaja počinje definisanim događajem koji inicira akcident. Ovaj događaj može nastati iz otkaza komponente sistema ili može biti iniciran eksternim uticajem na sistem. Mogu se konstruisati i procenjivati različita stabla događaja da bi se analizirao skup mogućih akcidenata.

U stablima neispravnosti i stablima događaja pravac prostiranje greške se modelira usmerenim grafovima i pretpostavlja se trenutno prostiranje greške. Ove tehnike su pogodne za otkrivanje mogućih stanja i sleda događaja ali su nepoгодne za analize ponašanja sistema u vremenu i uključivanje u razmatranje odluka kojima se proces može usmeravati.

Analiza pouzdanosti sistema koja uključuje akcije održavanja klasično se zasniva na modelima Markova, odnosno modelima lanaca Markova (Markov Chains), slika 4. Ovaj pristup je veoma popularan kod inženjera pouzdanosti. Osnovna pretpostavka je da posmatrani procesi imaju osobinu Markova, tj. da su bez pamćenja. Tu osobinu imaju samo procesi kod kojih je vreme između dva događaja raspodeljeno po eksponencijalnom zakonu verovatnoće što u praksi po pravilu nije slučaj, naročito kada se posmatraju trajanja operacija održavanja.



Slika 4. Lanci Markova

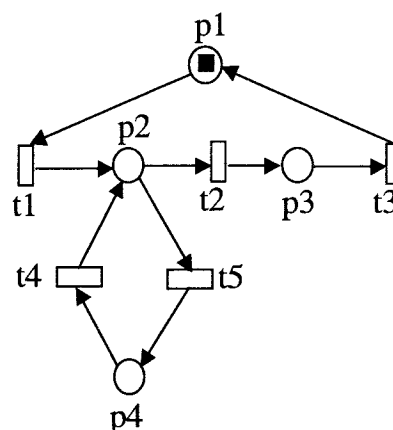
Napomenimo još da su problemi pouzdanosti u sistemima koji imaju faznu misiju kao i u sistemima čije komponente imaju više stanja (ne)ispravnosti, posebno značajni a odgovarajući matematički modeli koji počivaju na navedenim standardnim tehnikama veoma složeni.

3. PETRIJEVE MREŽE

Pre nego što formalno opišemo Petrijeve mreže i mogućnosti njihove primene u analizi pouzdanosti, razmotrimo jednostavan proces obrade proizvoda na mašini koja može da se pokvari. Ovaj proces je ilustrovan na slici 5. pomoću dijagrama prelaza koji je sličan dijagramu prelaza u modelima Markova. Opis procesa obuhvata pet prelaza i četiri stanja. Prelazi su: t1 - Dolazak proizvoda na mašinu, t2 - Obrada proizvoda, t3 - Kompletiranje obrade i

oslobađanje mašine, t4 - Opravka mašine, i t5 - Kvar mašine. Stanja mašine su: p1 - Mašina slobodna, p2 - Mašina zauzeta, p3 - Mašina obavlja završnu obradu, p4 - Mašina na opravci.

Ovakav dijagram stanja može se opisati usmerenim grafom sa dve vrste čvorova koji predstavljaju prelaze (na slici pravougaonici) ili mesta (krugovi). Orijentisane grane grafa povezuju mesta sa prelazima ili prelaze sa mestima, nikada dva prelaza ili dva mesta. Svakoj grani može se pridružiti težina (u primeru sa slike 5. sve težine grana su 1). Upravo takav graf je u osnovi definicije struktura Petrijeve mreže [3, 4].



Slika 5. Dijagram procesa obrade na mašini

Struktura Petrijeve mreže je bipartitni, usmereni težinski graf N definisan četvorkom $N = (P, T, A, W)$:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ konačan skup mesta,

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_q\}$ konačan skup prelaza,

$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ konačan skup grana pri čemu je $P \cap T = \emptyset$ i $P \cup T \neq \emptyset$

$W : A \rightarrow \{1, 2, \dots\}$ f-ja težina pridružena granama.

Na slici 5. u mestu p1 nacrtan je žeton koji predstavlja posao ili proizvod. Mreža sa žetonom je *markirana* a raspored žetona se zove *markiranje*. Stanje sistema opisano je ovim dijagramom: mašina je slobodna i postoji posao tako da ona može da počne sa obradom. Prisustvo žetona je uslov da se omogući prelaz t1 (u slučaju da je grani p1-t1 bila pripisana težina 2, bila bi potrebna dva žetona u mestu p1 da bi se ostvario prelaz t1). Kada se ostvari prelaz t1, žeton se oslobađa iz mesta p1 i prelazi u mesto p2. Time se dobija novo markiranje koje opisuje stanje sistema u kome je mašina zauzeta

i vrši obradu. Dalja kretanja žetona kroz mrežu opisuju nova stanja sistema. Markiranje, dakle, opisuje stanje sistema.

Elementarna (crno-bela) Petrijeva mreža (Petri nets PN) je petorka

$PN = (P, T, A, W, M_0) = (N, M_0)$ gde je

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ konačan skup mesta,

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_q\}$ konačan skup prelaza,

$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ konačan skup grana pri čemu je

$P \cap T = \emptyset$ i $P \cup T \neq \emptyset$

$W: A \rightarrow \{1, 2, \dots\}$ funkcija težina pridružena granama

$M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ početno markiranje.

Početni broj žetona u mestu p označava se $M_0(p)$.

Ovako definisana mreža omogućuje identifikovanje potencijalnih stanja sistema i određene korisne strukturne analize (dostiživost, kompletnost, životnost itd). Radi analize ponašanja sistema u vremenu, mestima se pridružuju vremena koja označavaju koliko se neki žeton zadržava u tom mestu. Tako se dobijaju vremenske Petrijeve mreže. Ako su razmatrana vremena slučajne prirode, u pitanju su stohastičke Petrijeve mreže. Pored toga, u jednoj mreži mogu se posmatrati različiti poslovi i više vrsta resursa. Različiti poslovi mogu zahtevati razne resurse za svoja obavljanja. Drugim rečima, može se kazati da u jednom sistemu mogu postojati različiti žetoni, odnosno žetoni različitih boja. Takve mreže se nazivaju *obojene Petrijeve mreže* [4] i one su za analizu pouzdanosti od posebnog interesa.

Obojena Petrijeva mreža (Coloured Petri Net CPN) je devetorka

$CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, M_0)$, gde je

- (i) Σ konačan skup tipova (boja),
- (ii) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ konačan skup mesta,
- (iii) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_q\}$ konačan skup prelaza,
- (iv) $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ konačan skup grana takav da $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$,
- (v) $N: A \rightarrow (P \times T) \cup (T \times P)$ funkcija čvorova,
- (vi) $C: P \rightarrow \Sigma$ funkcija tipova (boja),

(vii) G funkcija čuvanja, koja preslikava T u izraz takav da:

$\forall t \in T: [\text{Type}(G(t)) = B \wedge \text{Type}(\text{Var}(G(t))) \subseteq \Sigma] E$ opis

grane, koji preslikava A u izraz takav da:

$\forall a \in A: [\text{Type}(E(a)) = C(p)_{MS} \wedge \text{Type}(\text{Var}(E(a))) \subseteq \Sigma]$

gde je r mesto u $N(a)$

(viii) M_0 početna funkcija, koja preslikava P u

zatvoreni izraz takav da:

$\forall p \in P: [\text{Type}(M_0(p)) = C(p)_{MS}]$.

Skup tipova ili skup boja Σ je skup koji opisuje moguće tipove žetona. Delovi definicije (ii), (iii), (iv) i (v) ponavljaju definiciju strukture Petrijeve mreže. *Funkcija bojenja* C u (vi) dodeljuje svakom mestu žetone određene boje, odnosno, samo žetoni definisanih boja mogu da se nađu na određeno mesto u grafu. *Funkcija čuvanja* G (vii) definiše uslove pod kojima se može ostvariti prelaz žetona sa jednog mesta na drugi. Ova osobina obojenih Petrijevih mreža od izuzetnog je značaja u analizi rizika za sisteme sa ugrađenim preventivnim merama. Funkcija E (viii) opisuje tipove žetona koji mogu "prolaziti" kroz određene grane mreže. Na kraju, M_0 je početno markiranje koje uzima u obzir ograničenja da se na određenim mestima mogu pojaviti samo žetoni određenih boja.

Obojene Petrijeve mreže imaju niz prednosti u odnosu na elementarne a njihovo korišćenje je uslovljeno primenom računara i pogodnih specijalizovanih softverskih paketa. Oni pružaju grafičku predstavu, imaju malo primitiva koje su veoma moćne, jasan opis stanja i akcija, nude hijerarhijske opise i interaktivnu simulaciju, integrišu opsie upravljanja itd.

4. PRIMENE

Petrieve mreže zbog svojih dobrih osobina i mogućnosti koje pružaju analitičarima postaju potrebni deo znanja inženjera pouzdanosti. Institucije u tehnološki razvijenom svetu koje se bave konsultacijama i obrazovanjem profesionalaca u oblasti pouzdanosti, rizika i održavanja opisuju primene Petrijevih mreža i uključuju ih u svoje programe [5,6,7,8,9,10].

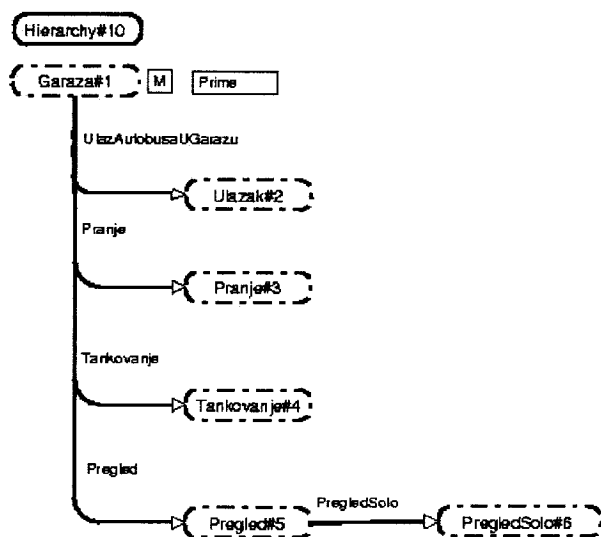
Ovde ćemo ukratko opisati jednu od primena [11,12] koju smo napravili korišćenjem obojenih Petrijevih mreža i programskog paketa *Design/CPN*,

koji je razvila grupa Univerziteta Orhus (Aarhus) iz Danske[4]. Razmatran je proces održavanja autobusa u jednoj garaži gradskog saobraćaja. Dnevni pregled obuhvata sledeće operacije koje se vrše na autobusu: autobusa, pranje, tankovanje i pregled na kanalu koji zavisi od toga da li je autobus obični ili zglobovi.

Petrijeva mreža kojom se modelira postupak dnevnog pregleda autobusa pripada klasi generalizovanih stohastičkih mreža jer obuhvata prelaze koji traju slučajno vreme ali i trenutne prelaze. Prelazi koji imaju trajanje su prelazi kojima se modelira pranje, tankovanje i pregled autobusa na kanalima.

Programski paket *Design/CPN* podržava rad sa hijerarhijskim mrežama, koje omogućavaju formiranje velikih modela povezivanjem više manjih. Svaki od manjih modela je posebna mreža. Dnevni pregled je modeliran hijerarhijskom mrežom koja na najvišem nivou obuhvata šest podmreža, a njihov odnos prikazan je na slici 6.

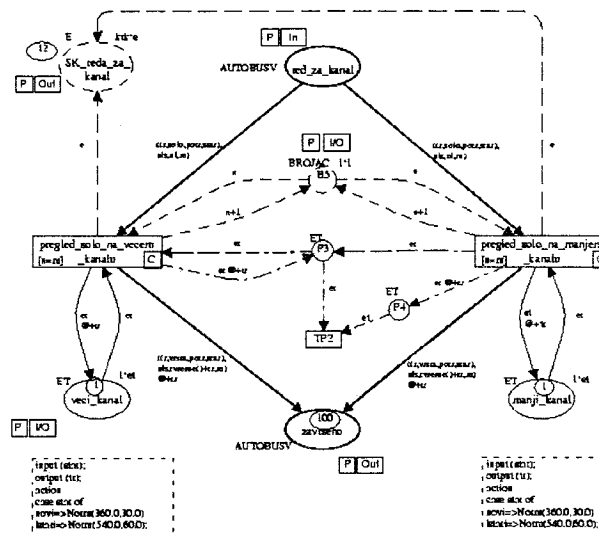
U modelu se koristi više skupova boja, odnosno tipova podataka. Pomoću *color* *AUTOBUS* se modeliraju autobusi, tako da je svaki autobus predstavljen po jednim žetonom koji nosi podatke o njegovoj registraciji, vrsti, potrošnji goriva, starosti i uslovima eksploatacije.



Slika 6. Petrijeva mreža procesa pregleda

Kako zbog ograničenosti prostora ovde nije moguće prikazati svih šest podmreža sa slike 6, radi ilustracije na slici 7 prikazana je

samo podmreža kojom se modelira pregled solo autobusa na kanalu.



Slika 7. Petrijeva mreža procesa pregleda na kanalu

Za različite scenarije upravljanja poslovima dnevnog pregleda napravljene su simulacije procesa i izračunate performanse sistema kao što su: zadržavanje autobusa radi pregleda, srednja dužina reda, ukupno vreme potrebno za pregled svih autobusa (očekivanje i standardna devijacija) itd.

5. ZAKLJUČAK

Petrijeve mreže su originalno razvijene za modeliranje procesa, odnosno dinamike sistema. One su u odnosu na stabla neispravnosti komplikovanija predstava razmatranog sistema ali u isto vreme i snažnija paradigma za njegovu analizu i razumevanje. Razlog ovoj tvrdnji je činjenica da Petrijeve mreže omogućavaju modeliranje fenomena koje ranije tehnike nisu mogle obuhvatiti. Radi se o mogućnosti analize sistema sa više stanja čija trajanja su slučajne prirode pri čemu su i prelazi iz jednog stanja u drugo takođe stohastički procesi. To je značajna razlika u odnosu na stabla neispravnosti u kojima se smatra da se događaji odvijaju trenutno. Petrijeve mreže imaju prednosti i u odnosu na modele Markova u kojima se pretpostavlja da su razmatrani sistemi bez memorije što primenu modela Markova ograničava na sisteme u kojima se trajanja modeliraju kao slučajne veličine raspodeljene isključivo po eksponencijalnom zakonu.

6. LITERATURA

- [1] M. Vujošević, *Operaciona istraživanja – Izabrana poglavlja*, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, 1999.
- [2] N. J. McCormick, *Reliability and Risk Analysis – Methods and Nuclear Power Applications*, Academic Press, New York 1981.
- [3] C. A. Petri, »Kommunikation mit Automaten«, Schriften IIM, Nr. 2, Institut fuer Instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962.
- [4] Jensen K., Coloured Petri Nets. Basic concepts, Analysis Methods and Practical Use. Volume 1,2,3, Springer-Verlag, 1997.
- [5] H.H. Ammar, T. Nikyadeh, J.B. Dugan, »A Methodology for Risk Assessment of Functional Specification of Software Systems Using Colored Petri Nets«, *Proceedings of the 4th International Software Metrics Symposium (METRICS 97)*
- [6] B. Cukic B., H.H. Ammar, K. Lateef, »Identifying high-risk scenarios of complex systems using input domain partitioning«, *Proceedings of the 9th International Symposium on Software Reliability Engineering*, November 1998, Paderborn, Germany, pp. 164-173, 1998.
- [7] Yang, S.K., Liu T.S., »A Petri net approach to early failure detection and isolation for preventive maintenance«, *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 14, No. 5, pages 319-330. 1998.
- [8] S. T. Skaguchi, »Development of the hierarchical Stochastic Reward Net Solver package«, *Master's Thesis, Dept. of Electrical Engineering*, University of Washington, Seattle, 1997
- [9] M.S. Ouali, D. Ait-Kadi, N. Rezg, »Fault diagnosis model based on Petri net with fuzzy colors«, *Computers & Industrial Engineering* 37, (1999) 173 -176
- [10] I.R. Chen, D.Ch. Wang and Ch.P. Chu, »User-Perceived Availability and Response-Time in Voting-Based Replicated Systems: A Case study«, *Proceedings of the 1999 IEEE Symposium on Application-Specific Systems and Software Engineering & Technology*,
- [11] D. Makajić-Nikolić, M. Vujošević, Branko Vasić, »Primena obojenih petrijevih mreža u modeliranju sistema održavanja autobusa«, SYM-OP-IS 2001,
- [12] M. Vujošević, D. Makajić-Nikolić, B. Vasić, »An Application Of Coulored Petri Nets To Modeling Of Bus Maintenance System«, *EURO 2001, The European Operational Research Conference* 9-11 July 2001, Rotterdam, The Netherlands

TERMOELEKTRO-MONT d.o.o.

INŽENJERING, IZGRADNJA, PROJEKTOVANJE, PROIZVODNJA OPREME, REKONSTRUKCIJA, REVITALIZACIJA REMONT I ODRŽAVANJE ENERGETSKIH I INDUSTRIJSKIH POSTROJENJA I OBJEKATA

Adresa: Dajbabe b.b., P.Fah 59, 81000 Podgorica, Srbija i Crna Gora, E-mail: termoelektromont@cg.yu
Telefon: +381 (0)81 644 217, Telefaks: +381 (0)81 644 325. Internet adresa: www.termoelektro-mont.com