SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

LABORATORIJ TELEKOMUNIKACIJA I INFORMATIKE 2

POUZDANOST TELEKOMUNIKACIJSKE MREŽE

Zagreb, lipanj, 2016.

Sadržaj

1. Uvod

Pouzdanost *R(t)* (engl. *reliability*) je vjerojatnost da mreža ispravno radi tijekom promatranog vremenskog intervala *t* pod određenim uvjetima okoline. Izražava zahtjev da mreža radi ispravno bez prekida. Računa se formulom (2.1).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{2.1}$$

λ je **intenzitet kvarova** (engl. *failure rate*), odnosno broj kvarova u određenom vremenskom intervalu i mjeri se jedinicom FIT (*failures in time*). FIT podrazumijeva vrijeme od 10^9 sati, pa 1 FIT znači da se u mreži dogodi prosječno 1 kvar u 10^9 sati.

Raspoloživost (engl. *availability*) ***A(t)*** je vjerojatnost da mreža ispravno radi u promatranom trenutku *t*. Izražava zahtjev da prekidi rada mreže budu što kraći. Može se mjeriti s tri glavne veličine (pri tome podrazumijevamo da do kvara mreže dolazi zbog kvara neke njene komponente):

- **srednje vrijeme do kvara** nakon što mrežna komponenta počinje normalno raditi (engl. *Mean Time To Failure*, MTTF),
- **srednje vrijeme popravka** (engl. *Mean Time To Repair*, MTTR) – komponenta se nakon kvara zamjenjuje drugom ili popravlja (obnavlja), te
- **srednje vrijeme između kvarova** (engl. *Mean Time Between Failures,* MTBF).

Raspoloživost mreže može se izraziti kao omjer vremena u kojem mreža ispravno radi (engl. *Mean Up Time*, MUT) i ukupnog vremena (zbroja vremena u kojem mreža radi ispravno, MUT, i vremena u kojem je mreža u ispadu (engl. *Mean Down Time*, MDT). To je zapisano sljedećom formulom:

$$A(t) = \frac{MUT}{MUT + MDT} \tag{2.2}$$

Mjereno u dugom vremenskom intervalu, MDT može biti aproksimiran s MTTR, a zbroj MUT i MDT s MTBF. Iz toga proizlazi sljedeća formula za raspoloživost mreže (pod pretpostavkom da je MTBF puno veće od MTTR):

$$A(t) = \frac{MTTF}{MTBF} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.3)$$

Ciljana raspoloživost u mrežama je „raspoloživost pet devetki“ (engl. *five nines*) odnosno 99,999% što je jednako ispadu od 5,26 minuta godišnje. To je vrijeme srednje vrijeme ispada MDT.

Raspoloživost se još može izraziti preko funkcija **intenziteta kvarova** λ i **intenziteta popravaka** (engl. *repair rate*) μ. Ako je intenzitet kvarova konstantan može se izraziti preko MTTF-a. Intenzitet μ predstavlja broj popravaka u određenom vremenskom intervalu i može se izraziti preko MTTR-a. Vrijedi:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}, \ \mu = \frac{1}{MTTR}, \ A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2.4)$$

U slučaju eksponencijalne razdiobe vremena kvarova i popravaka, ako vrijeme promatranja čvora ili linka teži u beskonačnost, tada raspoloživost asimptotski teži vrijednosti A_s koju nazivamo **stacionarna ili asimptotska raspoloživost** (2.5).

$$A_s = \lim_{t \to \infty} A(t) = A \quad (2.5)$$

Dvije vrste mehanizama koje omogućuju preživljavanje (engl. *survivability* – sposobnost mreže da podrži promet i u slučaju kvarova), odnosno oporavak (engl. *recovery*) mreže od kvara su **zaštita** (engl. *protection*) i **obnavljanje** (engl. *restoration*). Metode zaštite i obnavljanja povećavaju raspoloživost i pouzdanost mreže određujući raspodjelu rezervnih resursa (mrežnih uređaja, kabela) u slučaju kvara neke komponente mreže. Bitna razlika između metoda zaštite i obnavljanja je u tome da su u slučaju zaštite rezervni putevi, na koje će se preusmjeriti promet s dijela puta pogođenog kvarom, unaprijed određeni, a u slučaju obnavljanja rezervni putevi mogu biti unaprijed određeni ili dinamički alocirani.

Metode zaštite se mogu podijeliti ovisno o broju rezervnih komponenata koje štite određen broj entiteta u radu, a u laboratoriju koristimo **1+1 pridijeljenu** (engl. *dedicated*) **zaštitu**. Kod takve zaštite jedan rezervni put štiti točno jedan osnovni put tako da je promet udvostručen na izvorištu i teče po oba puta istovremeno. Na odredištu se bira signal bolje kvalitete ili se uvijek uzima signal s osnovnog puta osim u slučaju kad se na njemu otkrije nedostatak – u tom slučaju uzima se signal s rezervnog puta.

Za određivanje pouzdanosti i raspoloživosti redundantnih i neredundatnih sustava koriste se **serijske (neredundantne)** i **paralelne (redundantne)** strukture pouzdanosti i raspoloživosti. Serijska ili neredundantna struktura komponenata u mreži znači da za neku primarnu komponentu ne postoji rezervna pa kvar bilo koje od komponenata povlači kvar cijele mreže. U tom slučaju, dakle, mreža radi ispravno ako sve njene komponente rade ispravno. U takvoj strukturi pouzdanost i raspoloživost računamo kao umnožak pouzdanosti i raspoloživosti pojedinih komponenata (čvorova, poveznica) (2.6).

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n \,, \ A = A_1 \cdot A_2 \cdots A_n \tag{2.6}$$

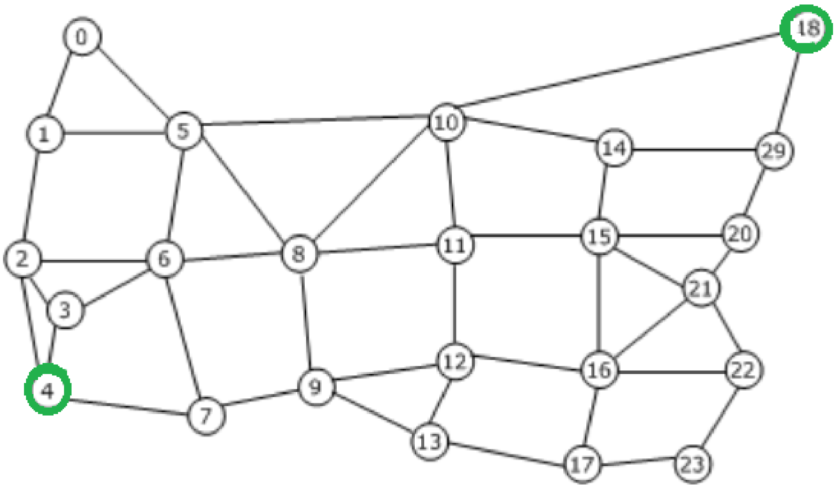
Postoje li rezervne (redundantne) komponente u mreži, onda mreža radi ispravno ako ispravno radi primarna ili barem jedna od rezervnih komponenata. Ovisno o odnosu primarnih i rezervnih komponenata, paralelne ili redundantne strukture mogu se podijeliti na vruću rezervu, hladnu rezervu, *r* od *n* strukturu te na strukturu s većinskim odlučivanjem. Općenite formule za računanje pouzdanosti i raspoloživosti u paralelnoj strukturi su:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - R_i], \ A = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - A_i] \tag{2.7}$$

2. Analitički proračun pouzdanosti i raspoloživosti

Slika 1 prikazuje topologiju s označenim početnim i krajnjim čvorom puta nad kojim ću provoditi laboratorijski zadatak.

7. US IP backbone



Slika 1 US IP backbone topologija

Zadani podaci:

- srednje vrijeme do kvara čvora $MTTF_n = 10^5$ h
- srednje vrijeme do popravka čvora $MTTR_n = 20$ h
- srednje vrijeme do kvara linka $MTTF_l = 10^4$ h
- srednje vrijeme do popravka linka $MTTR_l = 6$ h

1) Raspoloživost jednog čvora i jednog linka

Raspoloživost čvorova:

$$A_n = \frac{MTTF_n}{MTTF_n + MTTR_n} = \frac{10^5}{10^5 + 20} = 0.99980004$$

Raspoloživost linkova:

$$A_l = \frac{MTTF_l}{MTTF_l + MTTR_l} = \frac{10^4}{10^4 + 6} = 0.9994003598$$

2) Pouzadnost jednog čvora i jednog linka

Pouzdanost čvorova:

$$R_n(t) = e^{-\lambda_n \cdot t}, \ \lambda_n = \frac{1}{MTTF_n} = 10^{-5} h^{-1}$$

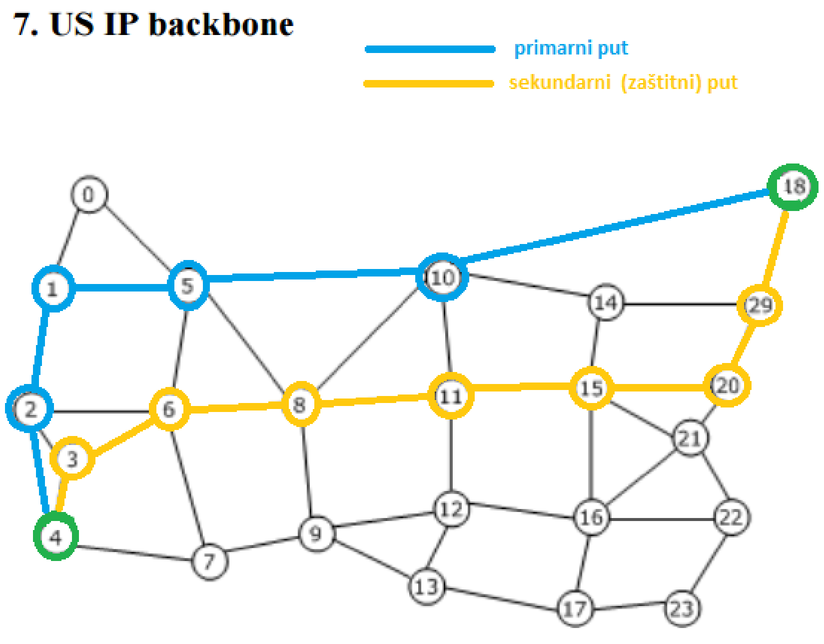
$$R_n(t) = e^{-10^{-5} \cdot t}$$

Pouzdanost linkova:

$$R_l(t) = e^{-\lambda_l \cdot t}, \ \lambda_l = \frac{1}{MTTF_l} = 10^{-4} h^{-1}$$

$$R_l(t) = e^{-10^{-4} \cdot t}$$

3) Kolika je raspoloživost, a kolika je pouzdanost primarnog puta za godinu dana rada ako pretpostavimo eksponencijalnu razdiobu vremena do kvarova i popravaka?



Slika 2 Primarni i sekundarni put

Slika 2 prikazuje primarni i sekundarni put između čvorova 4 i 18. Primarni put je najkraći put u smislu broja skokova od početnog do krajnjeg čvora (odabran jedan od više mogućih), a sekundarni je najkraći put koji nema zajedničkih poveznica i čvorova (osim početnog i krajnjeg) s primarnim putem (također jedan od više mogućih).

$$t = 365 \cdot 24h = 8760h$$

Primarni put je serija komponenata, čvorova i linkova koji ga čine. Stoga raspoloživost i pouzdanost primarnog puta računamo kao raspoloživost i pouzdanost serijske strukture komponenata. Za godinu dana raspoloživost je:

$$A_{primarni}(t) = A_4 \cdot A_{4->2} \cdot A_2 \cdot A_{2->1} \cdot A_1 \cdot A_{1->5} \cdot A_5 \cdot A_{5->10} \cdot A_{10} \cdot A_{10->18} \cdot A_{18} = A_n{}^6 \cdot A_l{}^5 = 0.995809823$$

Pouzdanost pojedinog čvora i linka u godini dana je:

$$R_n(t = 8760h) = e^{-10^{-5} \cdot 8760} = 0.9161272543$$

$$R_l(t = 8760h) = e^{-10^{-4} \cdot 8760} = 0.4164453666$$

$$R_{primarni}(t) = R_4 \cdot R_{4->2} \cdot R_2 \cdot R_{2->1} \cdot R_1 \cdot R_{1->5} \cdot R_5 \cdot R_{5->10} \cdot R_{10} \cdot R_{10->18} \cdot R_{18} = R_n{}^6 \cdot R_l{}^5 = 0.007404998748$$

4) Kolika je raspoloživost, a kolika pouzdanost puta ako se koristi 1+1 zaštita?

Potrebno je izračunati pouzdanost i raspoloživost sekundarnog puta kao i za primarni te zatim izračunati ukupnu raspoloživost i pouzdanost puta od čvora 4 do čvora 18 kao paralelnu strukturu komponenata primarnog i sekundarnog puta.

$$A_{sekundarni}(t) = A_n{}^9 \cdot A_l{}^8 = 0.9934233411$$

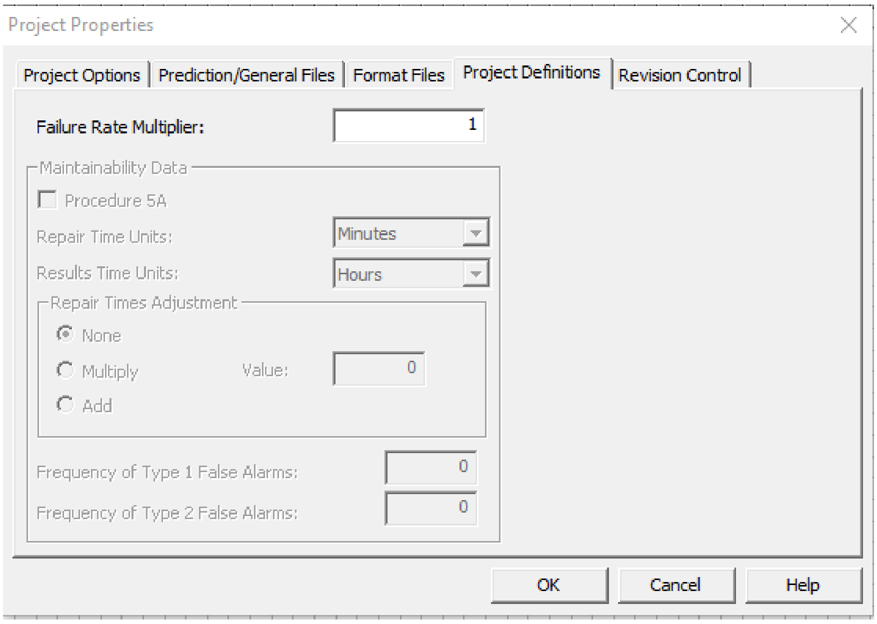
$$R_{primarni}(t) = R_n{}^9 \cdot R_l{}^8 = 4.112126828 \cdot 10^{-4}$$

$$A_{ukupno}(t) = 1 - (1 - A_{primarni}(t)) \cdot (1 - A_{sekundarni}(t)) = 0.9999724426$$

$$R_{ukupno}(t) = 1 - (1 - R_{primarni}(t)) \cdot (1 - R_{sekundarni}(t)) = 7.813166401 \cdot 10^{-3}$$

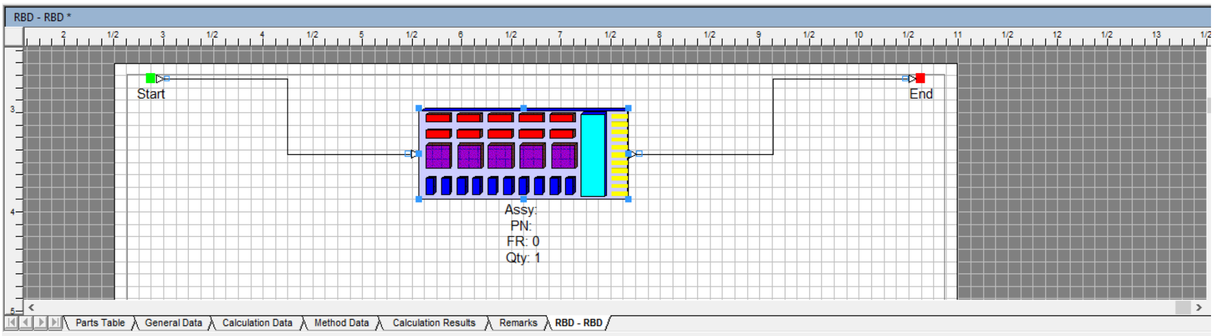
3. Simulacija u alatu Relex

U programskom alatu Relex nakon početnih postavki iz uputa i stvaranja novog projekta, potrebno je u *View* → *File Properties* → *Project Definitions* postaviti *Failure Rate Multiplier* na 1 kako bi intenzitet kvarova bio prikazan u obliku $1 \cdot 10^{-n}$ (Slika 3).



Slika 3 *Failure Rate Multiplier* postavke

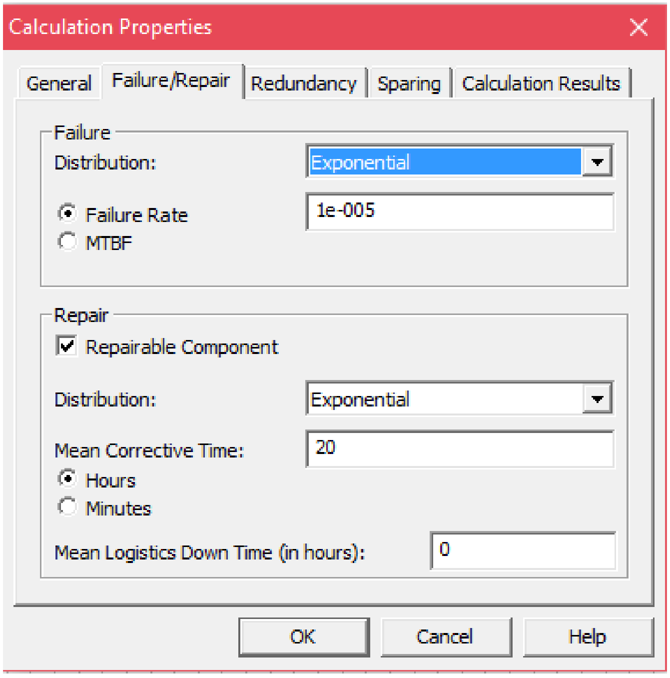
U donjoj polovici ekrana otvorimo karticu RBD – RBD na kojoj su označene početna (zeleno, *Start*) i krajnja točka (crveno, *End*) buduće strukture. Željeni objekt (čvor, link) smještamo između tih točaka odabirom *Insert* → *Figure* → *Circuit Board* i spajamo ga s točkama. Dodani objekt koji će predstavljati čvor prikazan je na Slika 4.



Slika 4 RBD prikaz za jedan čvor ili link

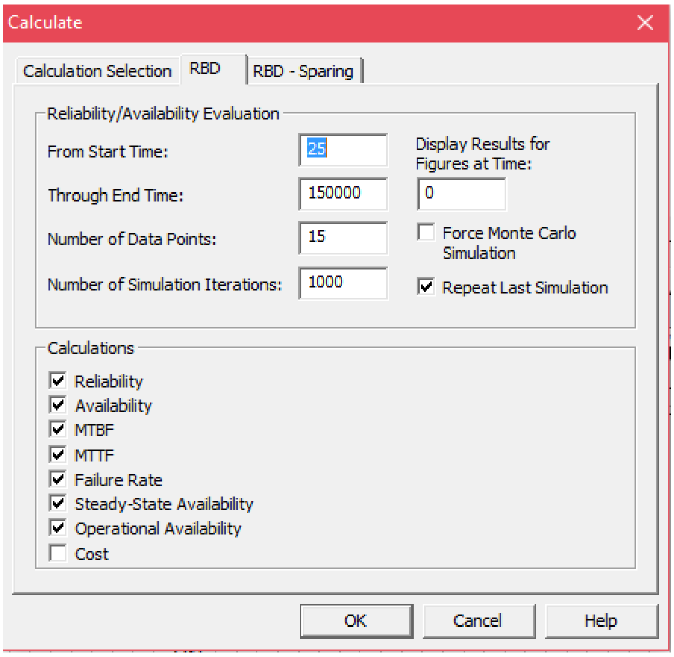
Zatim desnim klikom na objekt → *Calculation Properties* → kartica *Failure/Repair* postavimo intenzitet kvarova i popravaka čvora ili linka na vrijednosti zadane u zadatku u poglavlju 2.

3.1. Simulacija funkcija pouzdanosti i raspoloživosti čvora



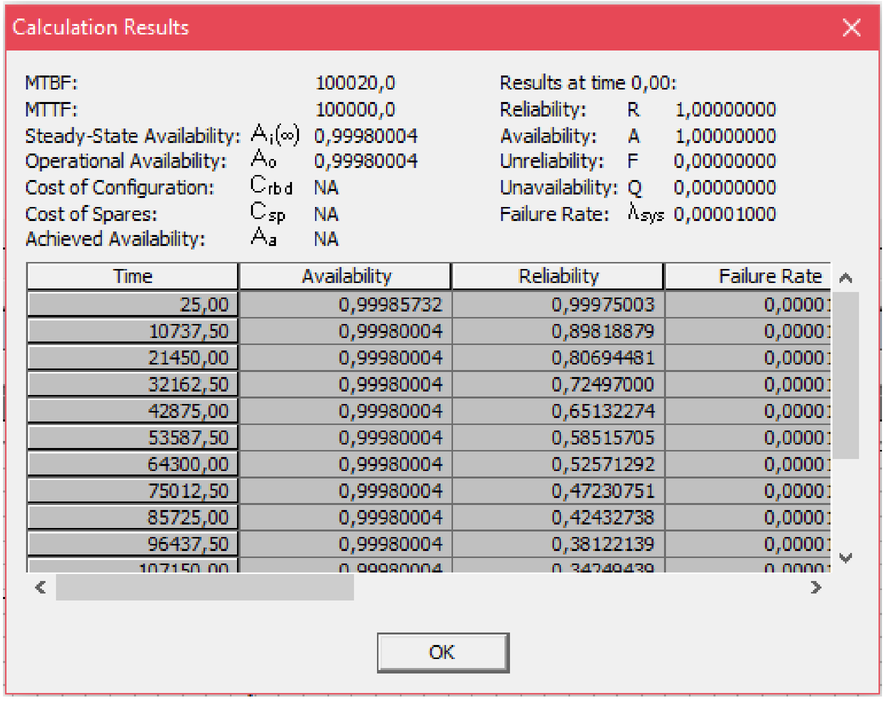
Slika 5 Postavljanje intenziteta kvarova i popravaka za čvor

Slika 5 prikazuje postavke za čvor. Prije početka simulacije potrebno je odabrati početno i završno vrijeme, veličine koje želimo izračunati te broj točaka za koje računamo te veličine. Navedeno postavljamo odabirom *Diagram* → *Calculate* ili pritiskom na tipku F8. Na Slika 6 su prikazani postavljeni parametri.



Slika 6 Parametri za simulaciju

Nakon toga simulacija se pokreće, a rezultati prikazuju u obliku tablice. Dio rezultata vidljiv je na Slika 7 (prozor se ne može proširiti kako bi se sve vidjelo).


Calculation Results

MTBF: 100020,0
MTTF: 100000,0
Steady-State Availability: $A_i(\infty)$ 0,99980004
Operational Availability: A_o 0,99980004
Cost of Configuration: C_{rbd} NA
Cost of Spares: C_{sp} NA
Achieved Availability: A_a NA

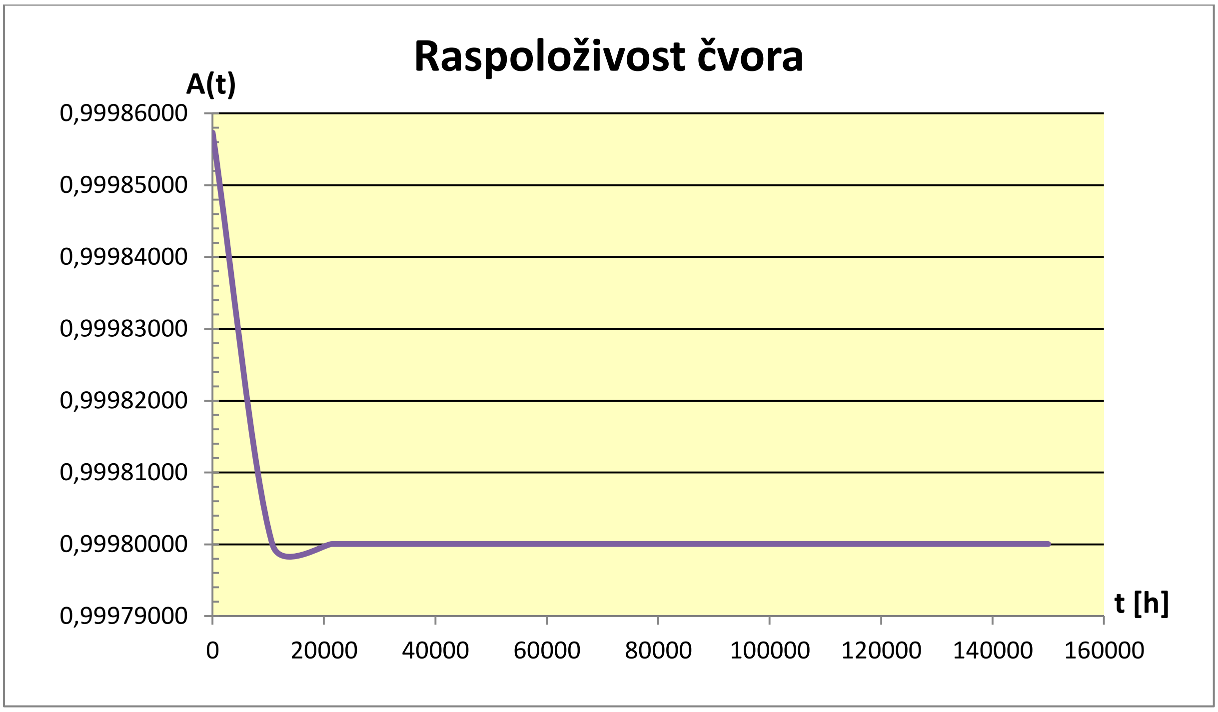
Results at time 0,00:
Reliability: R 1,00000000
Availability: A 1,00000000
Unreliability: F 0,00000000
Unavailability: Q 0,00000000
Failure Rate: λ_{sys} 0,00001000

Time	Availability	Reliability	Failure Rate
25,00	0,99985732	0,99975003	0,0000
10737,50	0,99980004	0,89818879	0,0000
21450,00	0,99980004	0,80694481	0,0000
32162,50	0,99980004	0,72497000	0,0000
42875,00	0,99980004	0,65132274	0,0000
53587,50	0,99980004	0,58515705	0,0000
64300,00	0,99980004	0,52571292	0,0000
75012,50	0,99980004	0,47230751	0,0000
85725,00	0,99980004	0,42432738	0,0000
96437,50	0,99980004	0,38122139	0,0000

OK

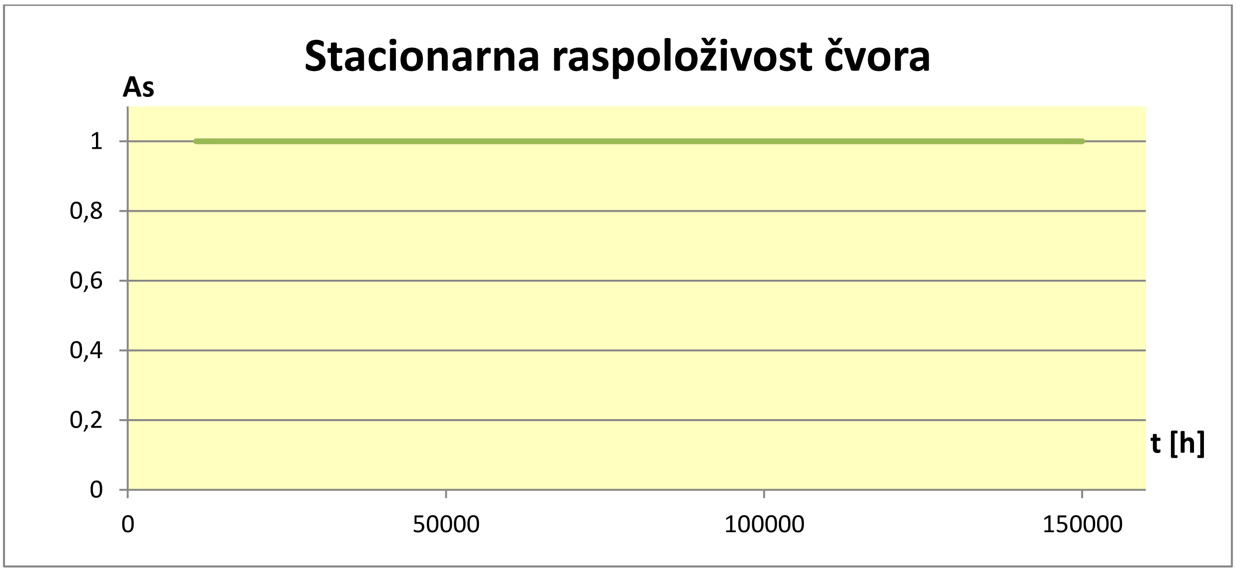
Slika 7 Rezultati simulacije za jedan čvor

Slijede prikazi rezultata u obliku grafova iscrtanih u Excelu.

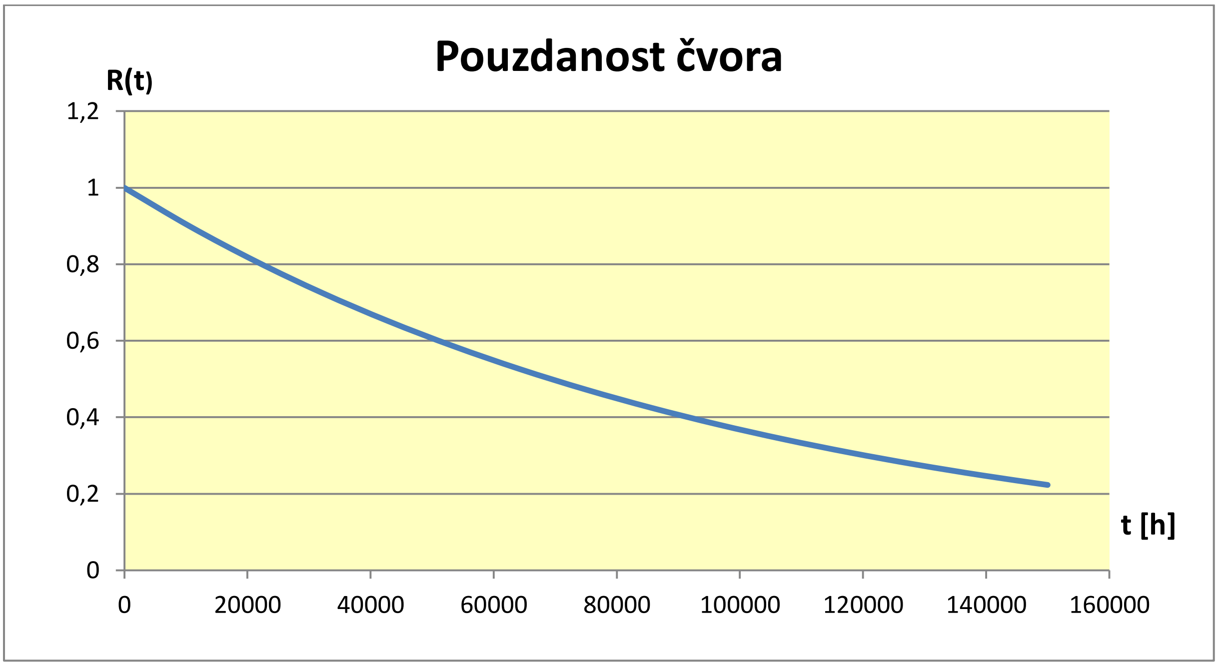


Graf 1 Funkcija raspoloživosti čvora

Vidljivo je da raspoloživost čvora dobivena analitički ($A_n = 0.99980004$) odgovara rezultatu simulacije. U početku je raspoloživost nešto veća ($A_n = 0.99985732$), no ona je realna nakon određenog vremena kada imamo dovoljan broj kvarova i popravaka, tj uočavamo stacionarnu raspoloživost (Graf 2) od vremena oko 20 000 h.

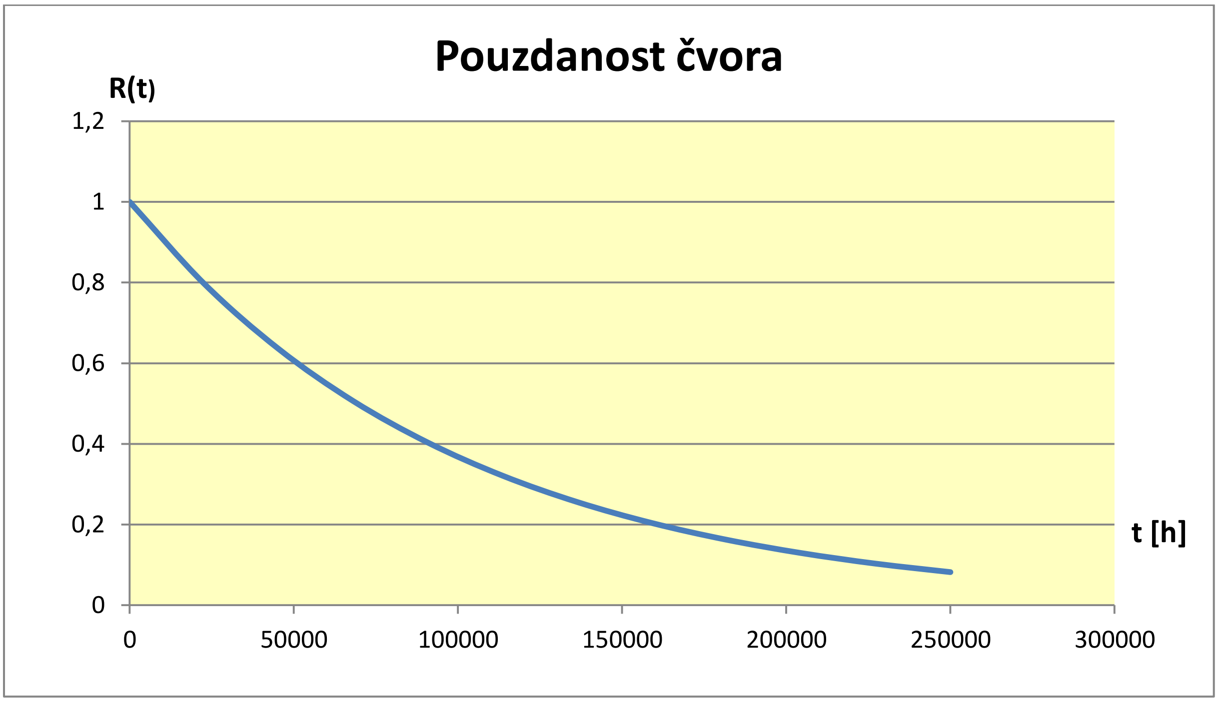


Graf 2 Stacionarna raspoloživost čvora



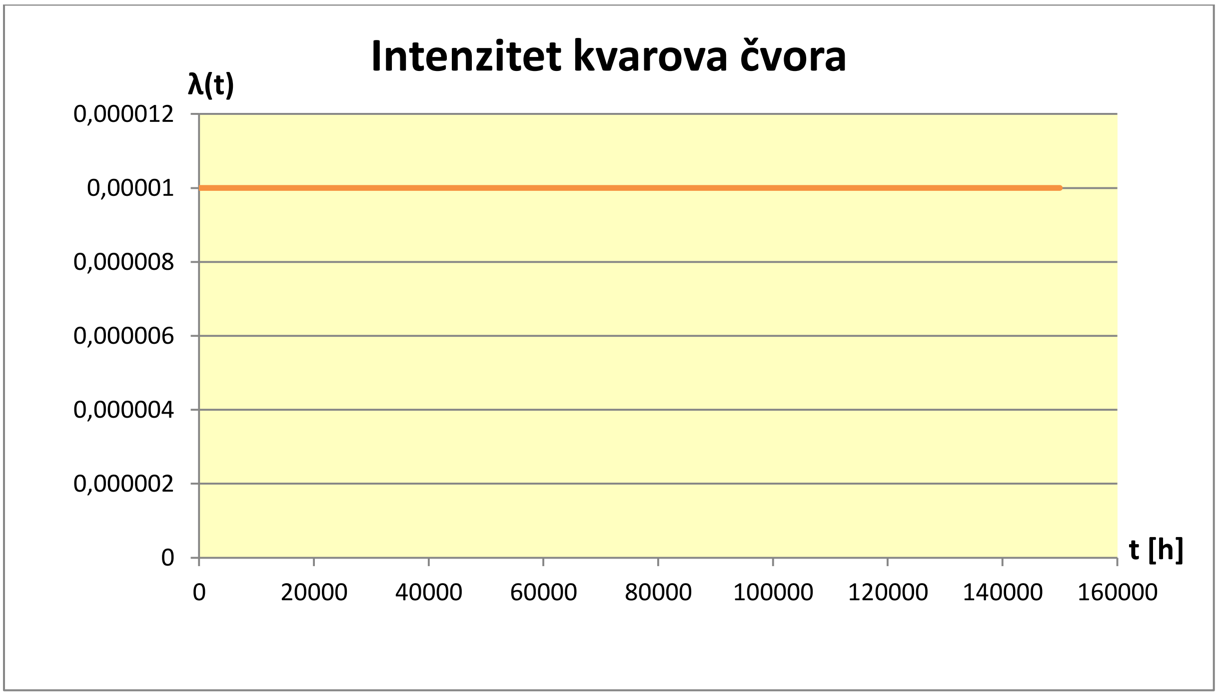
Graf 3 Funkcija pouzdanosti čvora

Pouzdanost dobivena simulacijom također odgovara rezultatu analitičkog proračuna, tj. dobivenoj eksponencijalnoj funkciji čija vrijednost porastom vremena opada. To objašnjava eksponencijalno padajući oblik krivulje pouzdanosti (starenjem čvora njegova pouzdanost opada). Na Graf 4 je eksponencijalno padajući oblik malo jasnije vidljiv jer je povećano vrijeme simulacije.



Graf 4 Funkcija pouzdanosti čvora

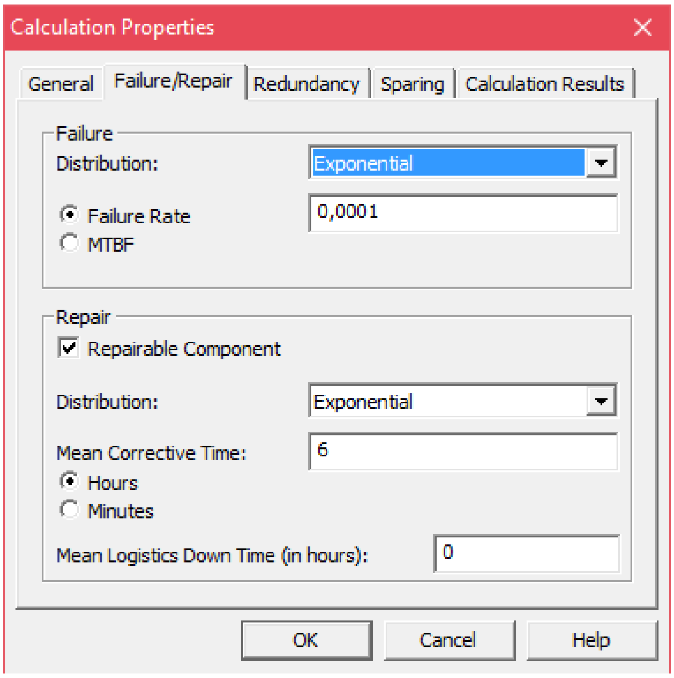
Intenzitet kvarova čvora je zadan (postavljen u *Calculation Properties*, $\lambda_n = 10^{-5} h^{-1}$) i konstantan u vremenu (Graf 5).



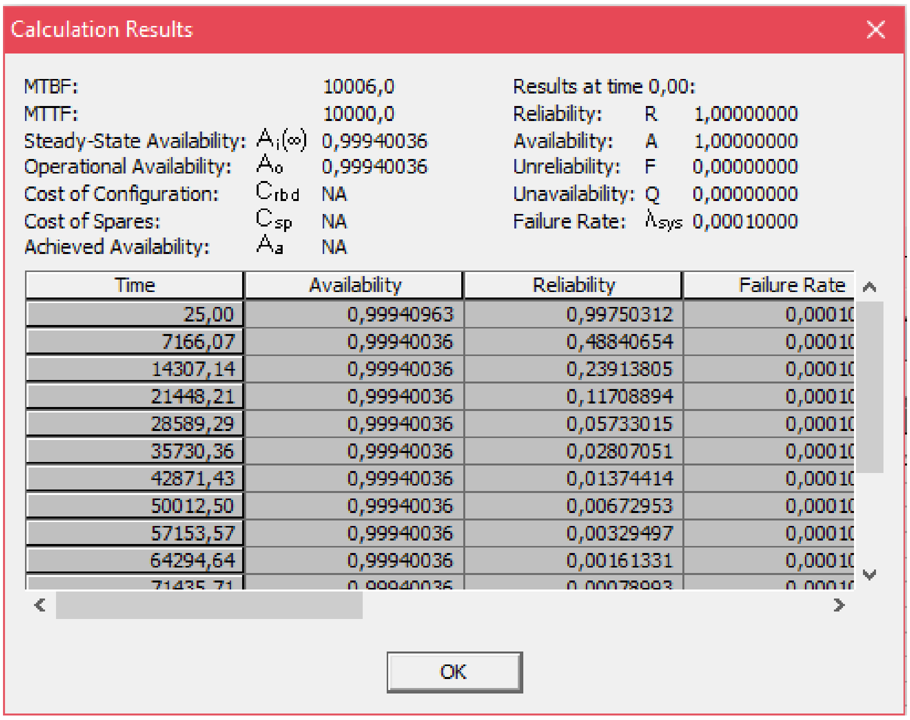
Graf 5 Funkcija intenziteta kvarova čvora

3.2. Simulacija funkcija pouzdanosti i raspoloživosti linka

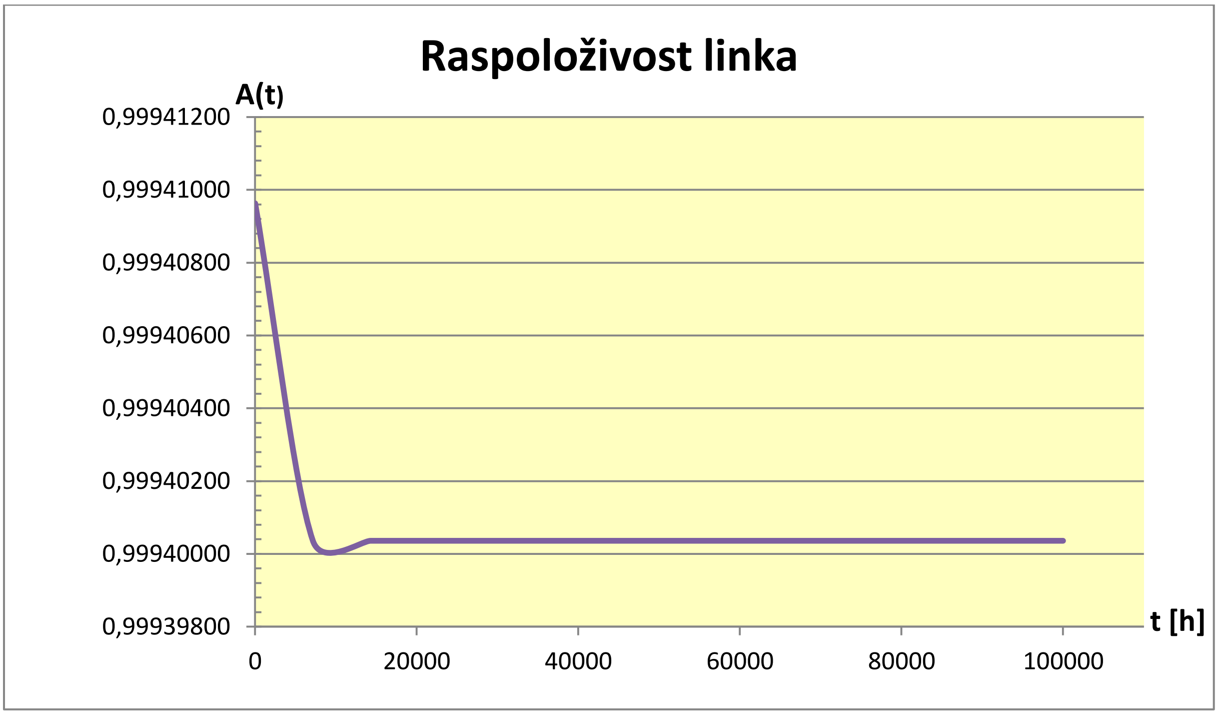
Proces je isti za izračun pouzdanosti i raspoloživosti linka, jedina razlika je u intenzitetu kvarova i popravaka (Slika 8) koji su zadani u zadatku u poglavlju 2. Osim toga sam smanjila vrijeme završetka simulacije na 100 000 sati. Pokretanjem simulacije prikazuju se rezultati u obliku tablice (Slika 9).



Slika 8 Postavljanje intenziteta kvarova i popravaka za link

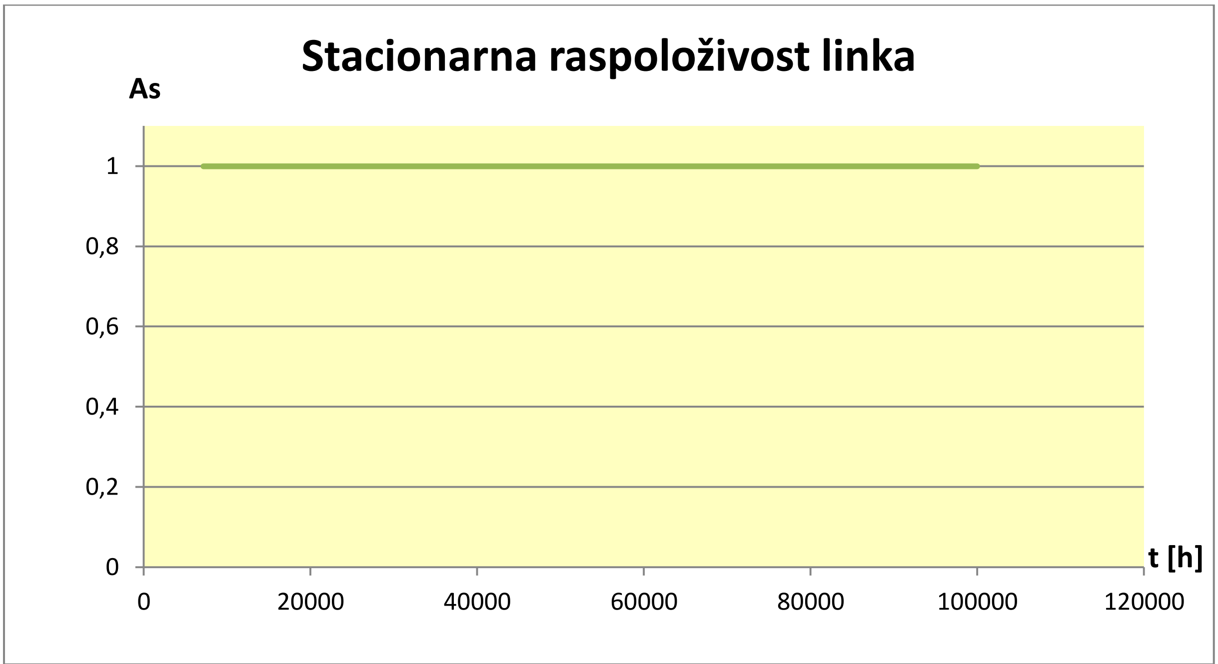


Slika 9 Rezultati simulacije za link

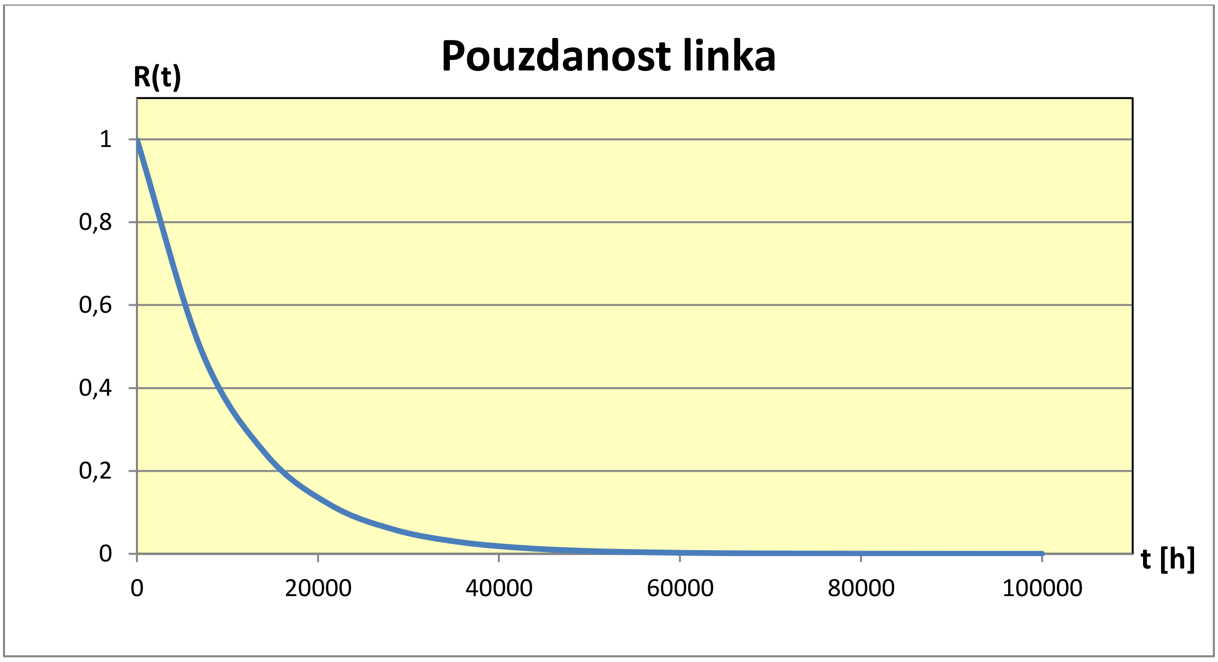


Graf 6 Funkcija raspoloživosti linka

Raspoloživost linka dobivena analitički ($A_l = 0.9994003598$) odgovara rezultatu simulacije. U početku je raspoloživost nešto veća ($A_l = 0.99940963$), no kada imamo dovoljan broj kvarova i popravaka, tj uočavamo stacionarnu raspoloživost, $A_{ls} = 0.99940036$ (Graf 7).



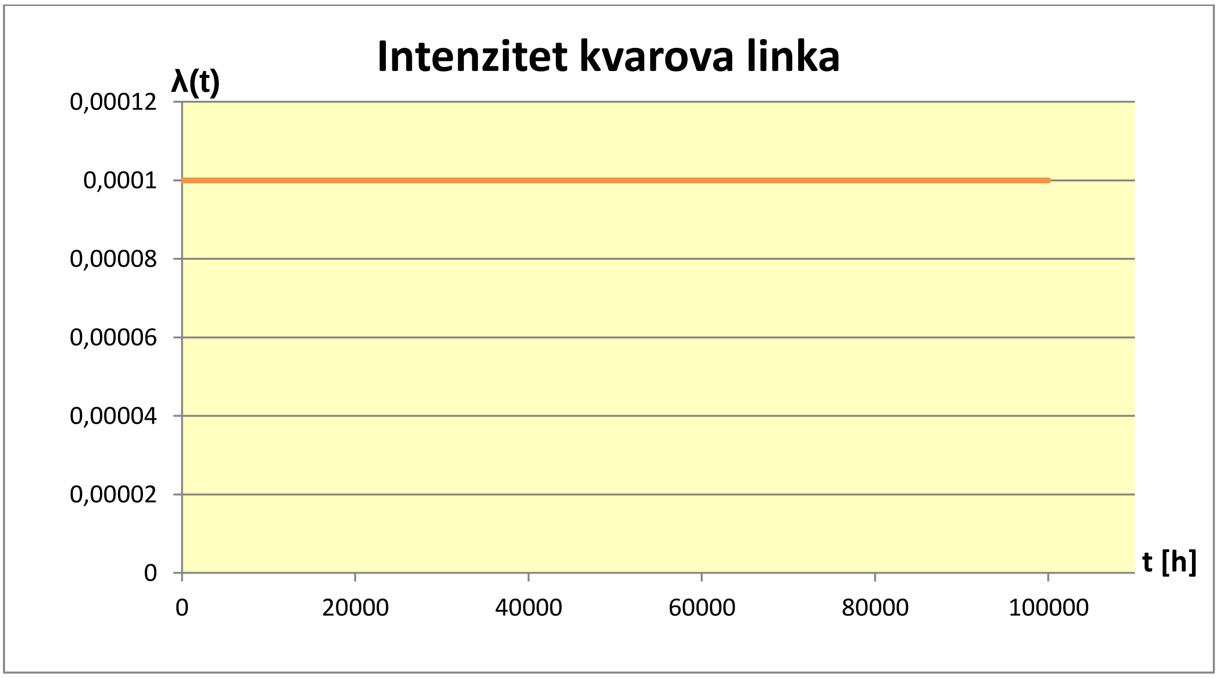
Graf 7 Stacionarna raspoloživost linka



Graf 8 Funkcija pouzdanosti linka

Pouzdanost dobivena simulacijom, eksponencijalno padajuća funkcija, odgovara rezultatu analitičkog proračuna. Za link ona brže pada i teži nuli u odnosu na funkciju pouzdanosti čvora s obzirom da je intenzitet kvarova za link veći.

Intenzitet kvarova linka također je zadan ($\lambda_l = 10^{-4} h^{-1}$) i ne mijenja se u vremenu (Graf 9).

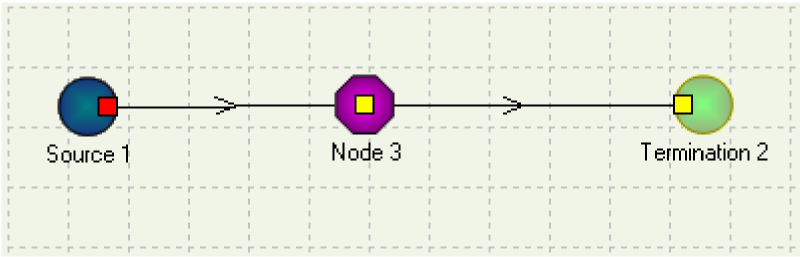


Graf 9 Funkcija intenziteta kvarova linka

4. Simulacija u alatu COSMOS

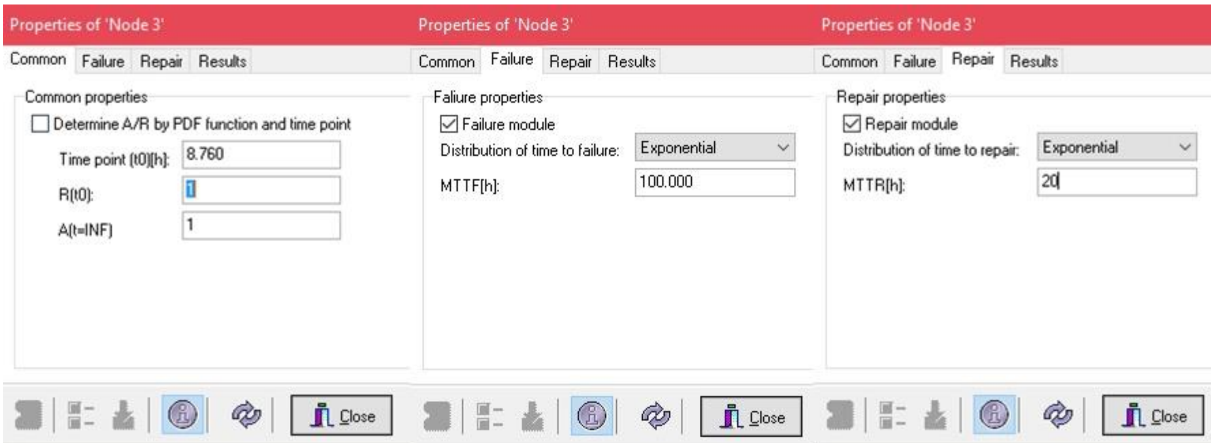
U programskom alatu Cosmos otvaramo novi projekt i odabiremo opciju TSAR (*Tool for System Availability and Reliability analysis*) te nacrtamo potrebnu komponentu, put ili mrežu na radnoj površini.

4.1. Pouzdanost čvora



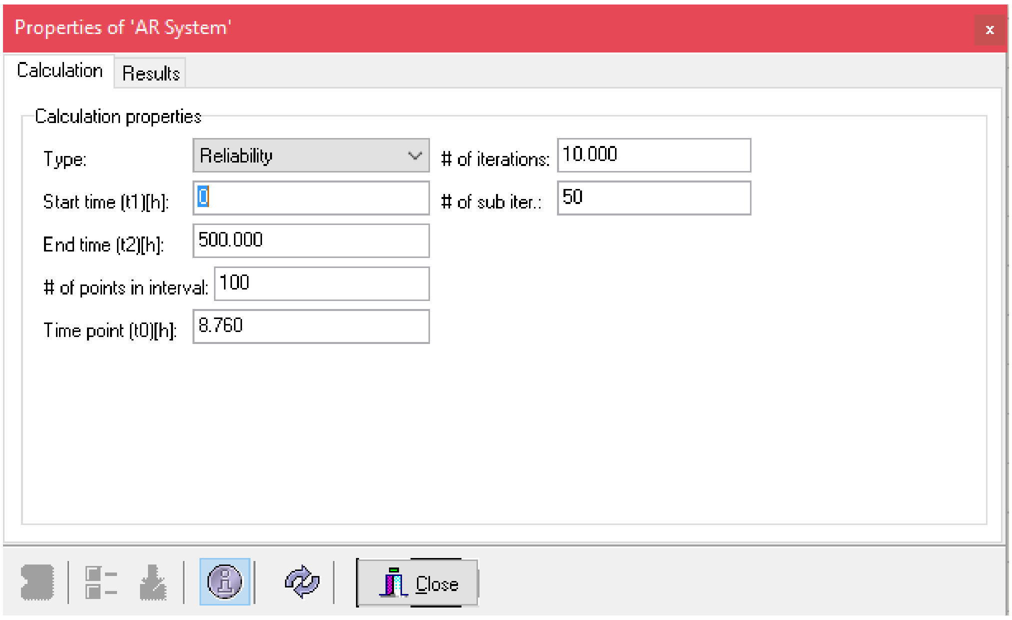
Slika 10 Čvor

Na radnu površinu dodajemo jedan čvor (*Node 3*) te ga s početnim (*Source 1*) i krajnjim (*Termination 2*) povežemo jednostavnom konekcijom s uključenim *Cursor* gumbom. Nakon toga potrebno je čvoru postaviti parametre zadane u poglavlju 2 desnim klikom na čvor → *Properties*. *Time point* postavljamo na jednu godinu, odnosno 8760 sati jer pouzdanost mjerimo za godinu dana rada čvora (Slika 11) i jednom postavljena, definirana je za cijeli sustav. Odabiremo eksponencijalnu razdiobu vremena do kvarova i popravaka, srednje vrijeme do kvara (MTTF) postavljamo na 10^5 sati, a srednje vrijeme do popravka na 20 sati.



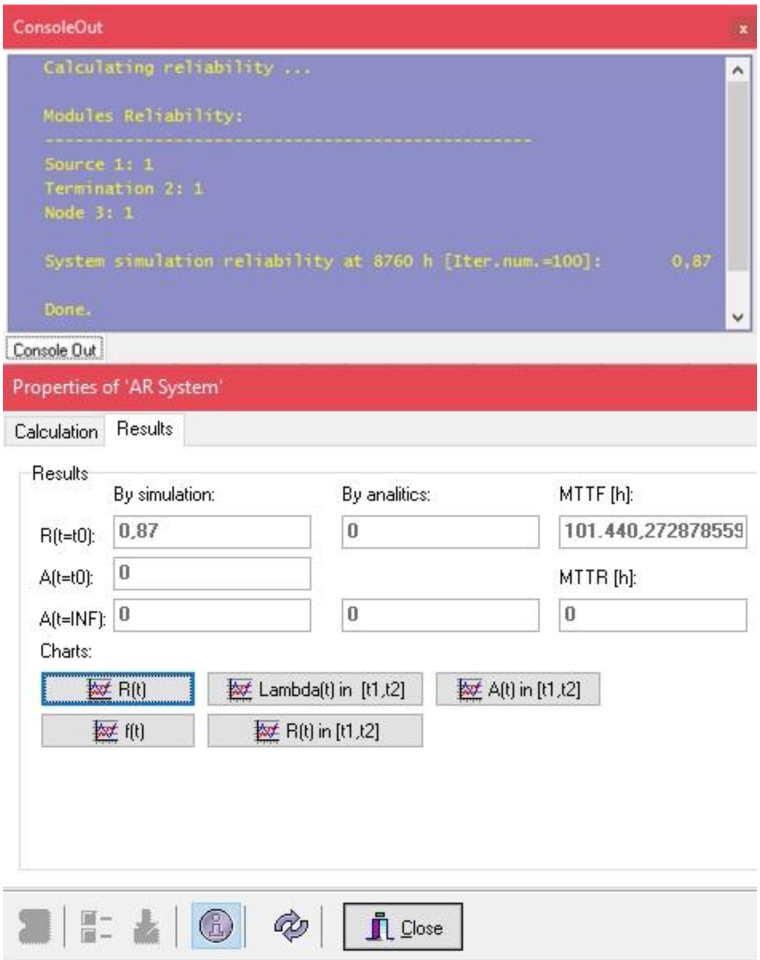
Slika 11 Postavke parametara čvora

Zatim je potrebno postaviti parametre kalkulacije, u našem slučaju simulacijske (*Monte Carlo*). Dvostrukim klikom miša na površinu otvara se prozor s postavkama (Slika 12). Simulaciju vršimo mijenjajući broj iteracija na 100, 1000, 10 000 i 100 000, a pokrećemo odabirom *Simulation* → *Parameters* → zeleni gumb *Play*.

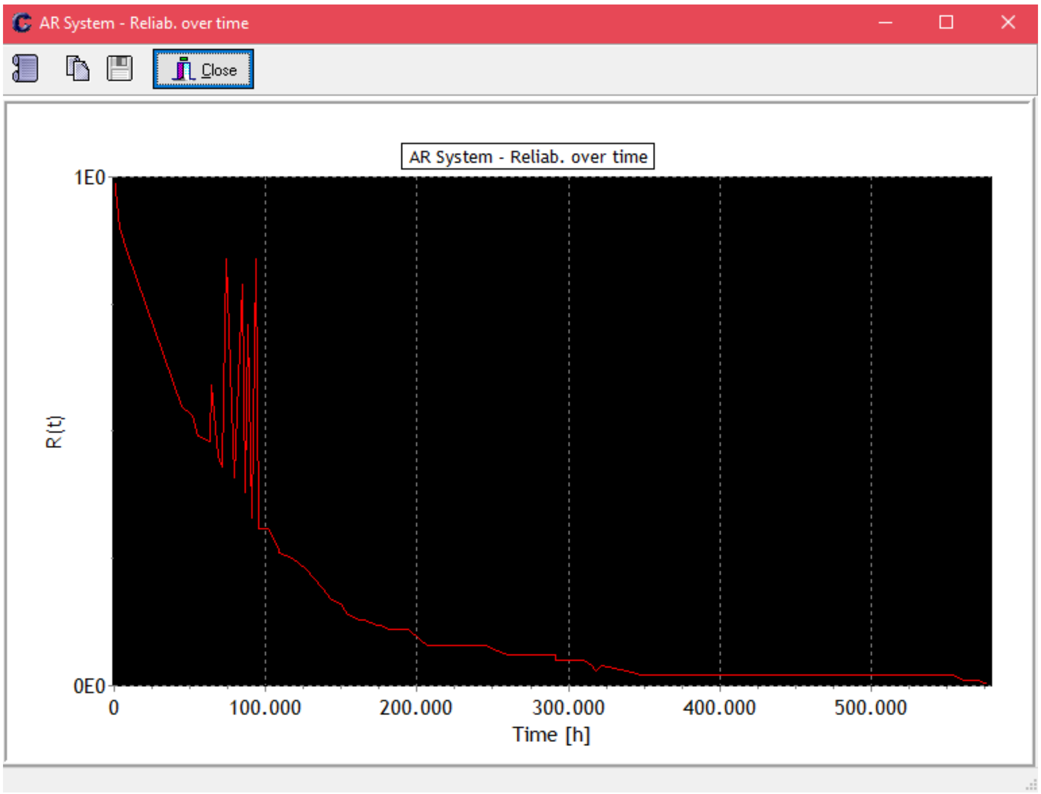


Slika 12 Postavke simulacije

Rezultati simulacije vidljivi su u konzoli (*View* → *Console*) ili u kartici *Results* u postavkama simulacije (Slika 13). Moguće ih je prikazati i u obliku grafa pritiskom na gumb *R(t)* u kartici *Results* → *Charts* (Slika 14).

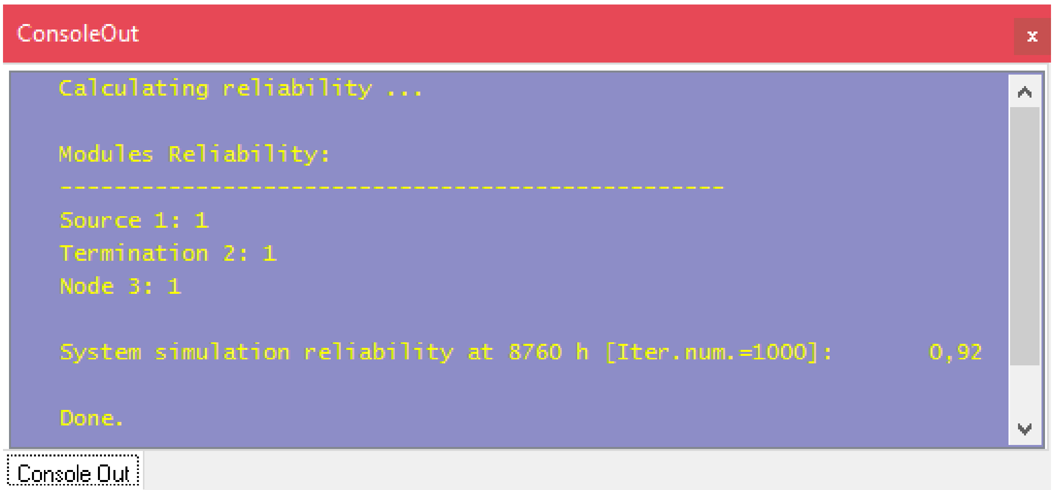


Slika 13 Rezultati simulacije za 100 iteracija



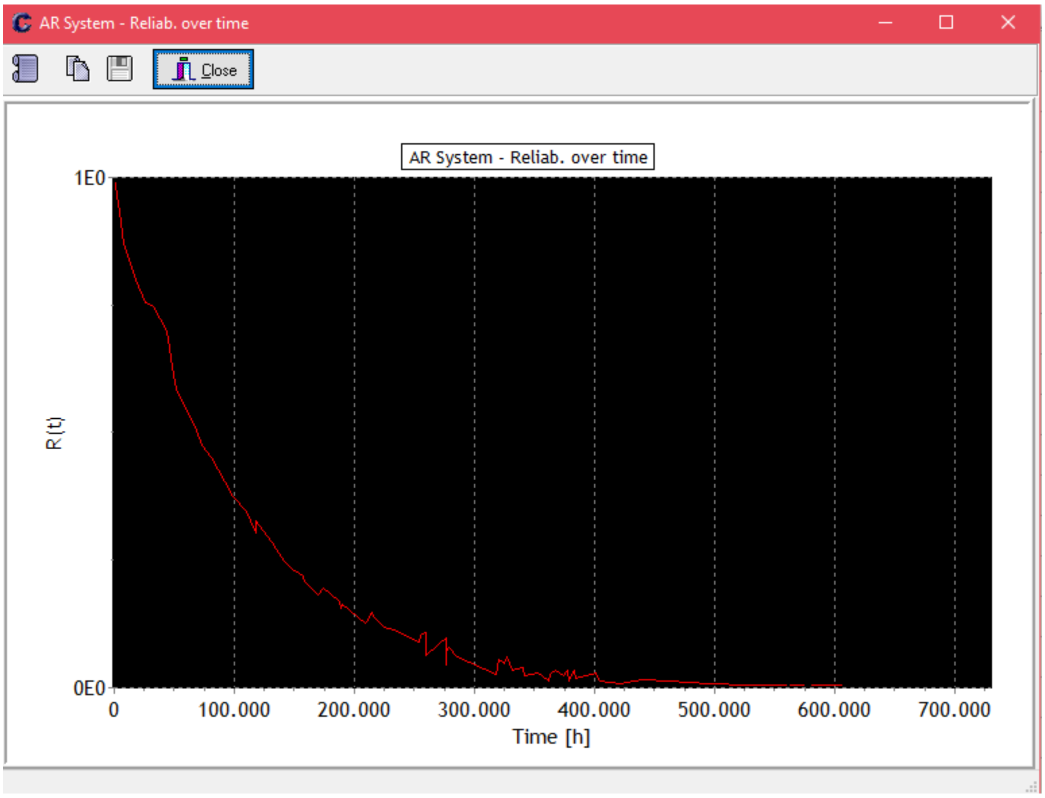
Slika 14 Funkcija pouzdanosti za 100 iteracija

Pouzdanost simulirana sa 100 iteracija je 0.87 (Slika 13) što se ne poklapa s pouzdanošću čvora dobivenom analitički ($R_n(t = 8760h) = 0.9161272543$) i funkcija (Slika 14) ima „smetnje“, odnosno nije čisto eksponencijalno padajuća. Možemo pretpostaviti da će za veći broj iteracija simulirani rezultati biti bliži onima dobivenima analitički i funkcija pouzdanosti bliža eksponencijalno padajućem obliku.

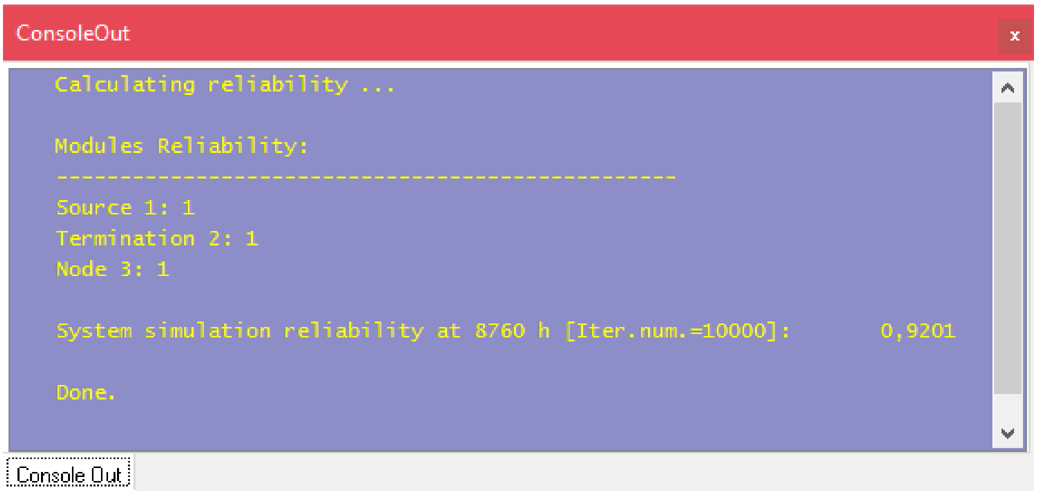


Slika 15 Rezultati simulacije za 1000 iteracija

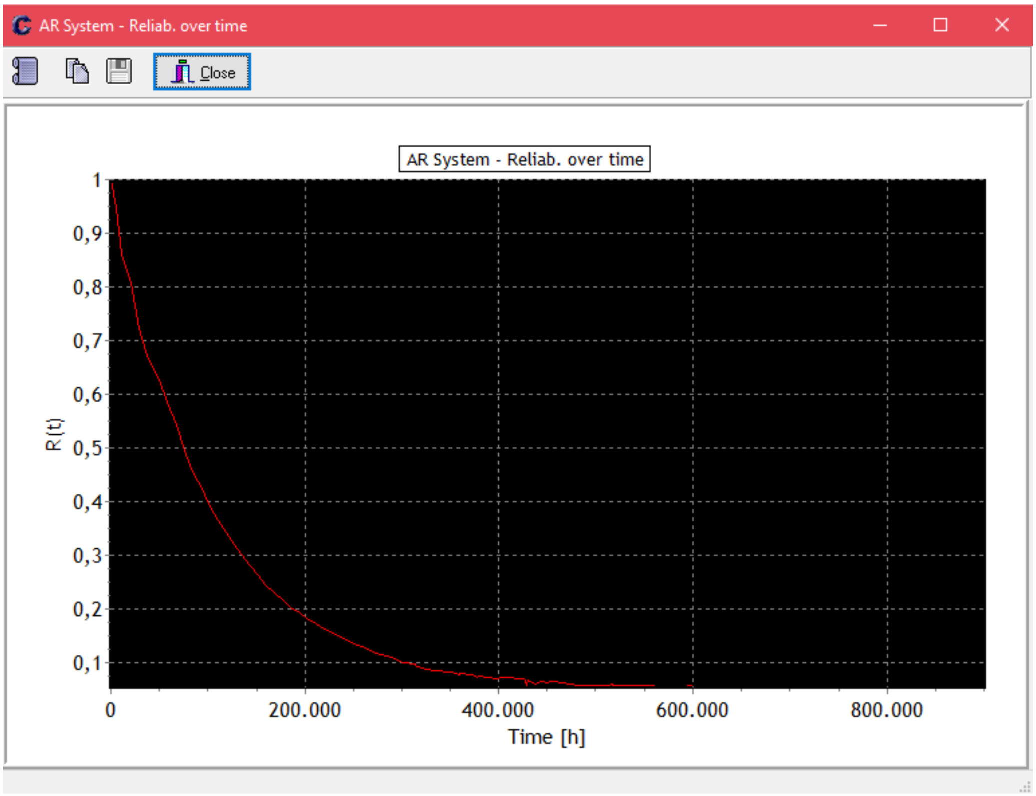
Već za 1000 iteracija primjećujemo veliku razliku i puno bolje preklapanje analitičkog i simulacijskog izračuna. Također, funkcija je vjernija eksponencijalno padajućoj (Slika 16).



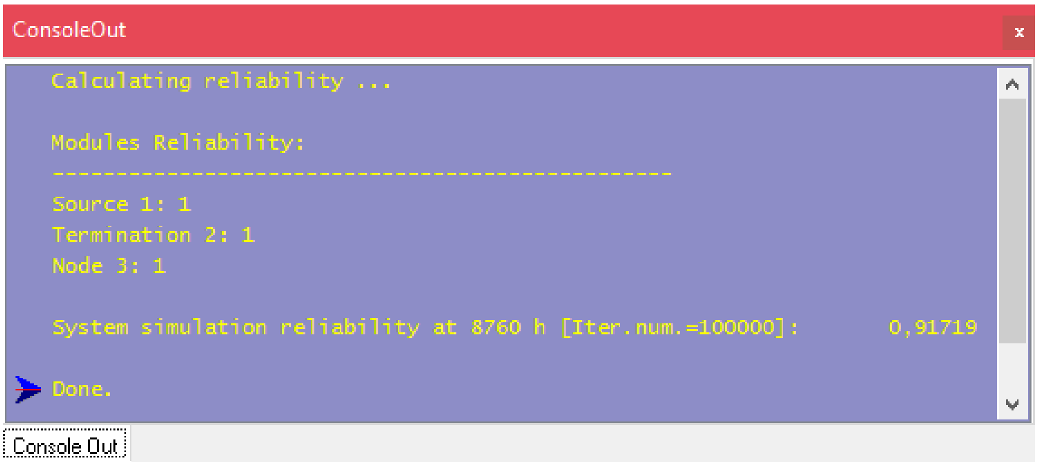
Slika 16 Funkcija pouzdanosti za 1000 iteracija



Slika 17 Rezultati simulacije za 10 000 iteracija

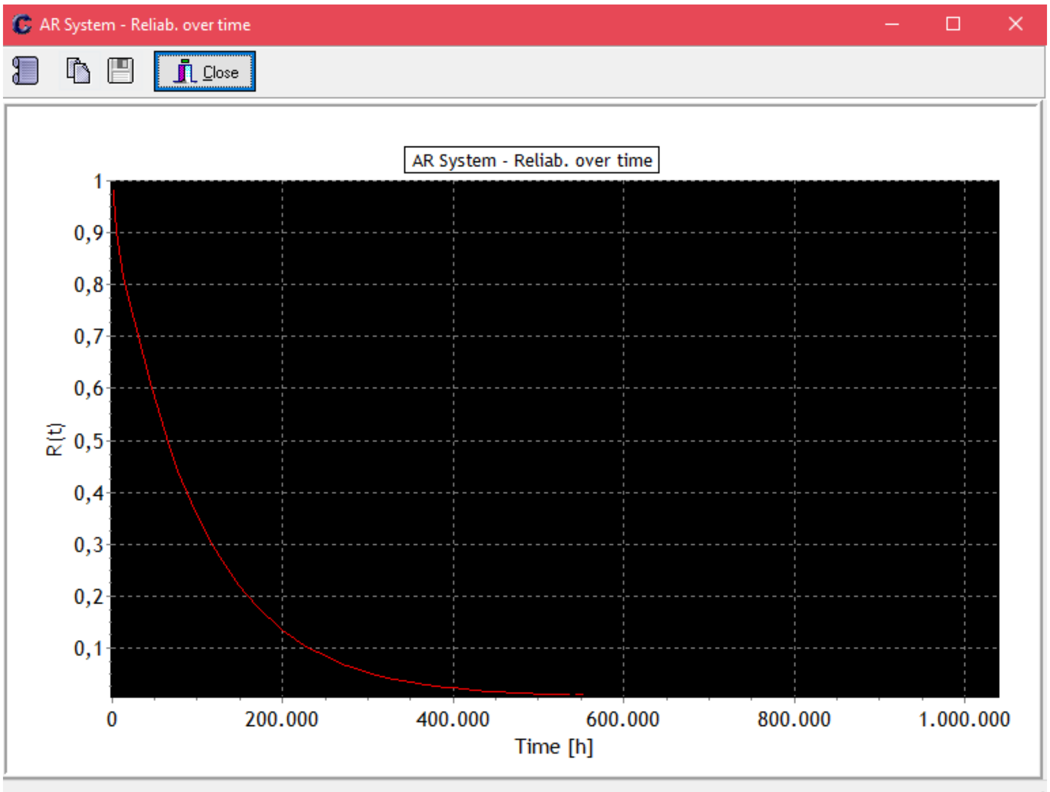


Slika 18 Funkcija pouzdanosti za 10 000 iteracija



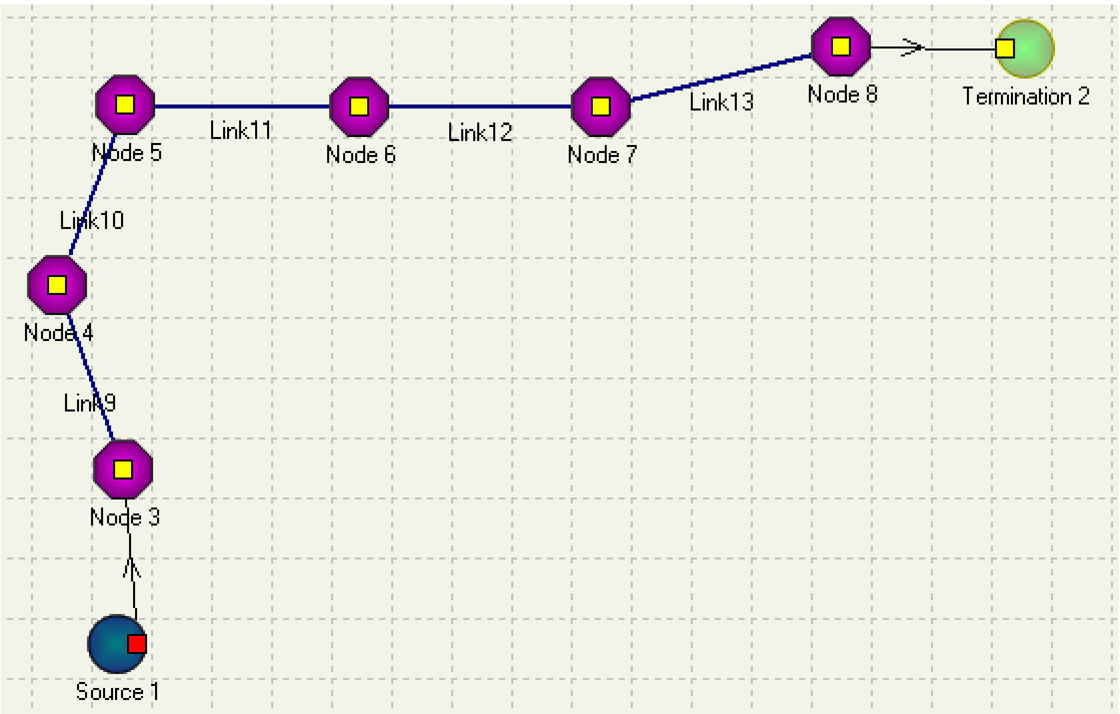
Slika 19 Rezultati simulacije za 100 000 iteracija

Nakon simulacije sa 100 000 iteracija uočavamo da su se pretpostavke ispunile – pouzdanost je najbliža analitički dobivenoj (0.91719, Slika 19), a oblik funkcije je u potpunosti eksponencijalno padajući (Slika 20).



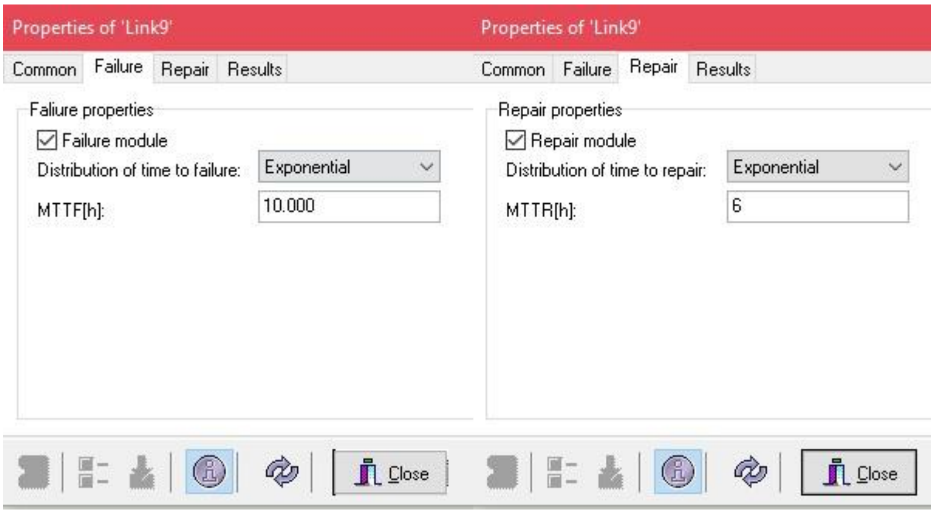
Slika 20 Funkcija pouzdanosti za 10 000 iteracija

4.2. Raspoloživost primarnog puta

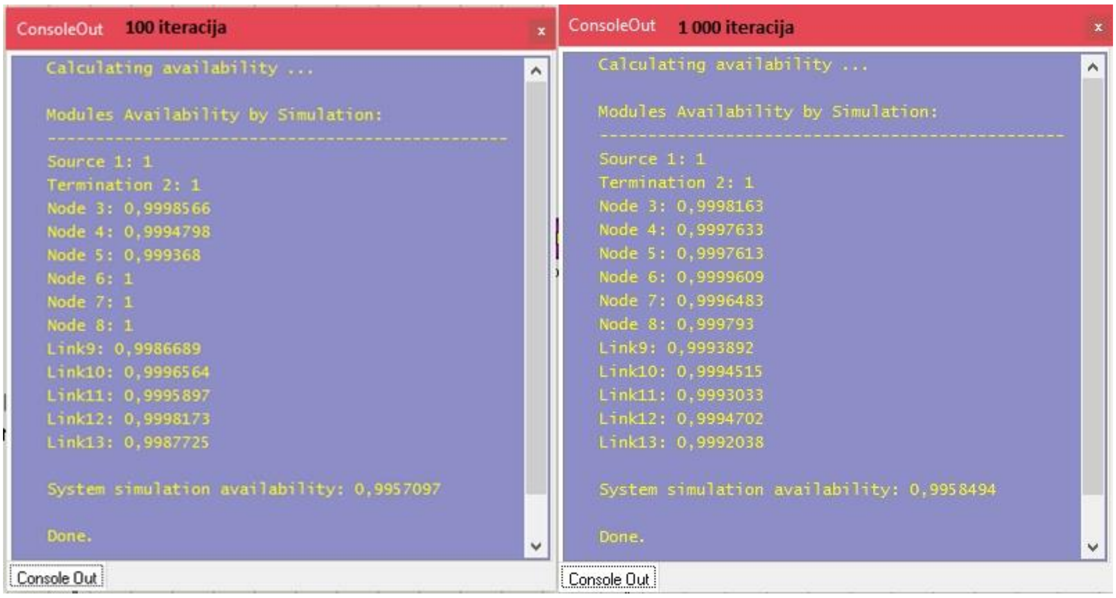


Slika 21 Primarni put

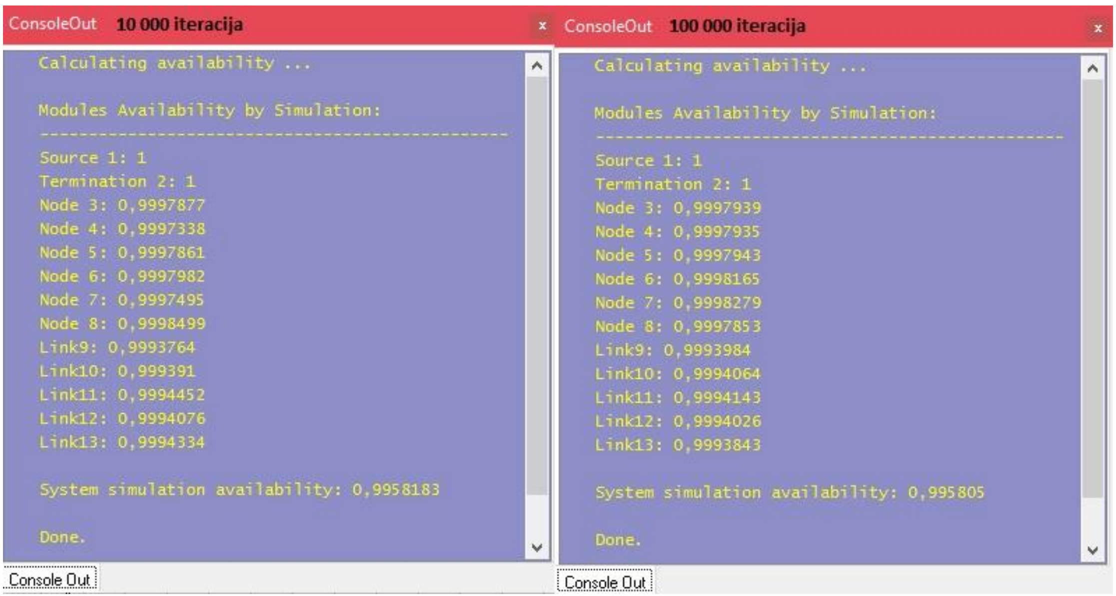
Za svaki čvor postavimo parametre kao na Slika 11, a za svaki link kao na Slika 22.



Slika 22 Postavke parametara linka



Slika 23 Rezultati simulacije za 100 (lijevo) i 1000 (desno) iteracija

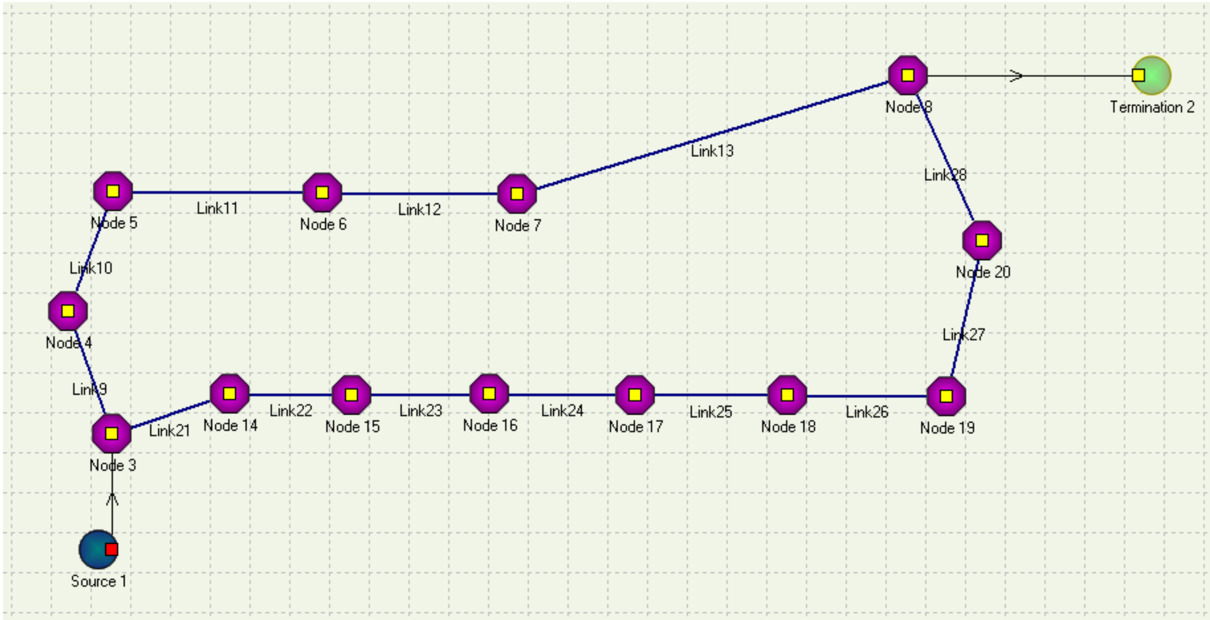


Slika 24 Rezultati simulacije za 10 000 (lijevo) i 100 000 (desno) iteracija

Analitički dobivena raspoloživost primarnog puta je $A_{primarni}(t) = 0.995809823$.

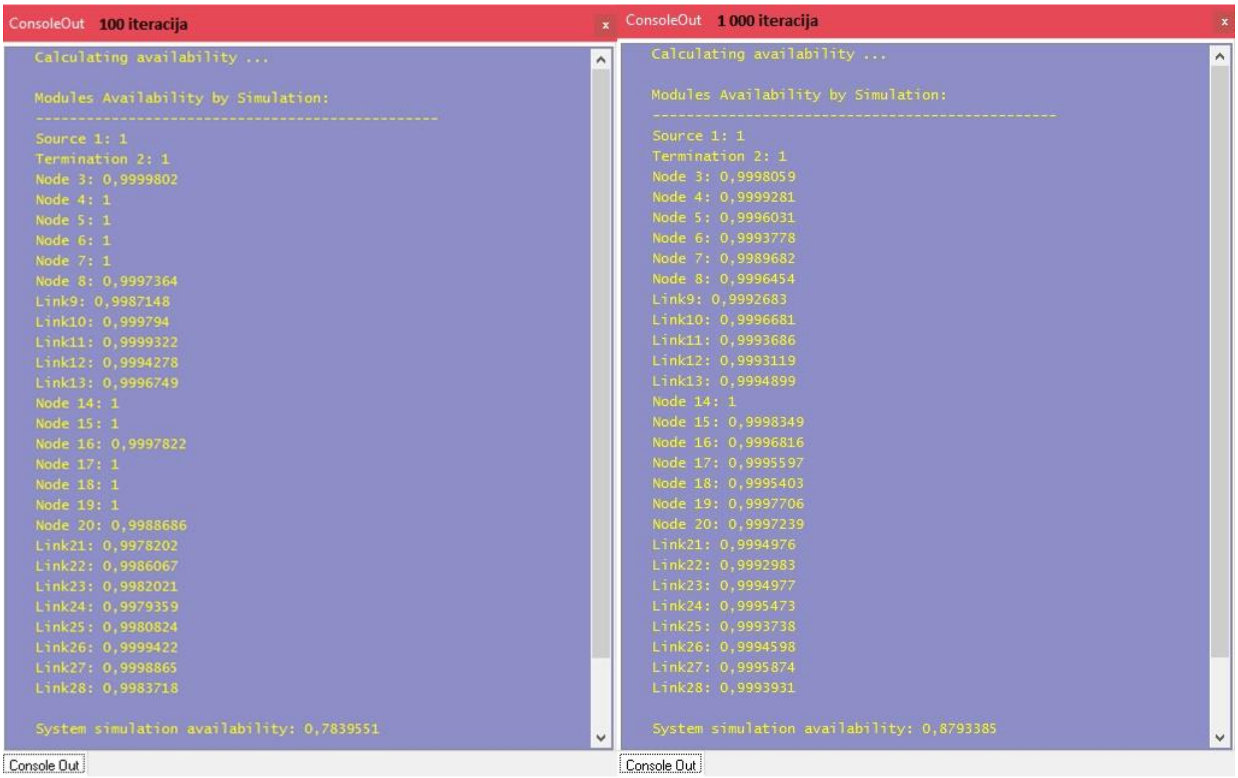
Čak i za 100 iteracija (Slika 23), raspoloživost puta dobivena simulacijom vrlo je blizu vrijednosti dobivenoj analitički. Za broj iteracija ona varira, a najtočnija analitički dobivenoj je u simulaciji sa 100 000 iteracija (Slika 24). Tada je raspoloživost $A_{primarni}(t) = 0.995805$, gotovo identična analitički dobivenoj, razlikuje se tek na 6. decimali.

4.3. Raspoloživost zaštite 1+1



Slika 25 Zaštita 1+1

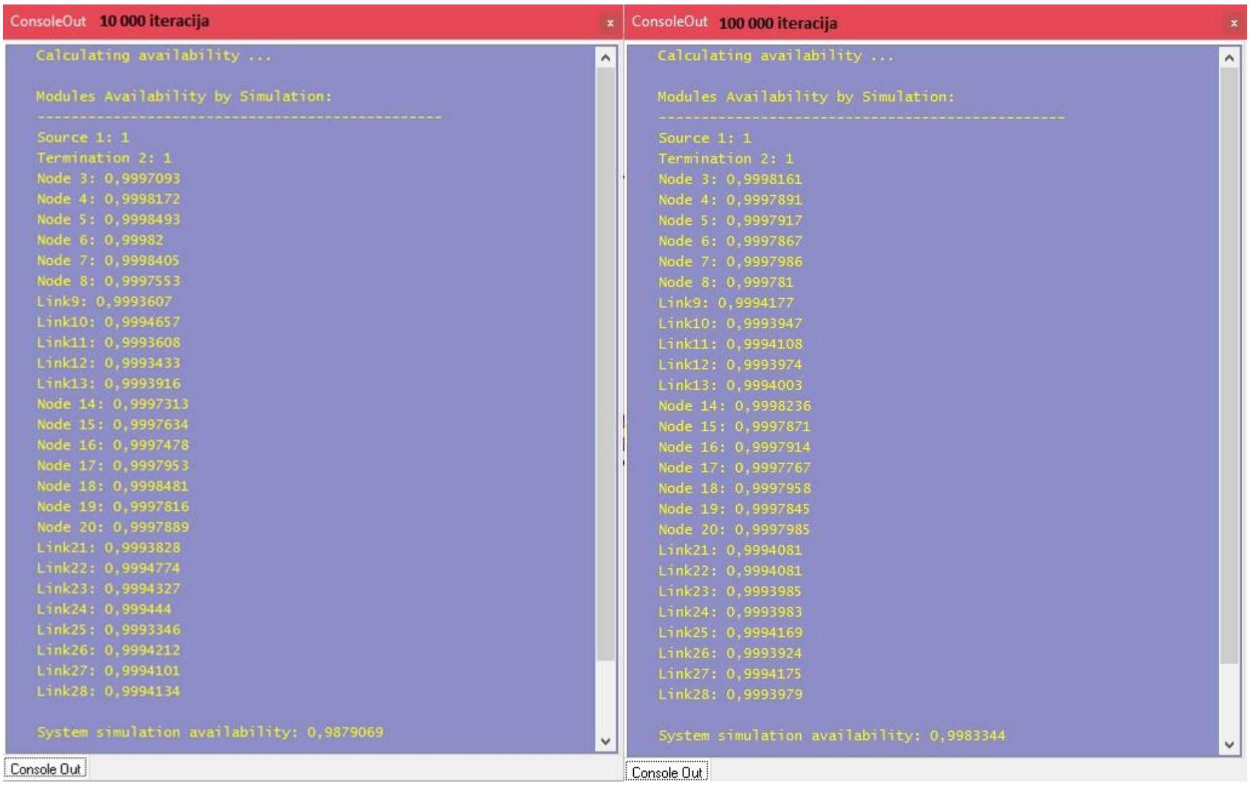
Analitički dobivena raspoloživost zaštite 1+1 je $A_{zaštita}(t) = 0.9999724426$. Simulacijom sa 100 iteracija dobivamo veliko odustupanje (Slika 26), no ono se smanjuje povećanjem iteracija i približavamo se analitičkom rezultatu. Raspoloživost dobivena simulacijom sa 100 000 iteracija (0.9983344, Slika 27) je najveća i najbliža analitički dobivenoj, ali u odnosu na ostale proračune ovdje je pogreška najveća – analitički i simulacijski rezultati se razlikuju već na trećoj decimali. Međutim rezultat je i dalje logičan obzirom da je raspoloživost zaštite 1+1 veća od raspoloživosti samo primarnog puta, što u ovom slučaju vrijedi ($A_{primarni}(t) = 0.995805$ < $A_{zaštita}(t) = 0.9983344$).



```
ConsoleOut 100 iteracija
Calculating availability ...

Modules Availability by Simulation:
-----------------------------------------------
Source 1: 1
Termination 2: 1
Node 3: 0,9999802
Node 4: 1
Node 5: 1
Node 6: 1
Node 7: 1
Node 8: 0,9997364
Link9: 0,9987148
Link10: 0,999794
Link11: 0,9999322
Link12: 0,9994278
Link13: 0,9996749
Node 14: 1
Node 15: 1
Node 16: 0,9997822
Node 17: 1
Node 18: 1
Node 19: 1
Node 20: 0,9988686
Link21: 0,9978202
Link22: 0,9986067
Link23: 0,9982021
Link24: 0,9979359
Link25: 0,9980824
Link26: 0,9999422
Link27: 0,9998865
Link28: 0,9983718

System simulation availability: 0,7839551
Console Out
```

```
ConsoleOut 1 000 iteracija
Calculating availability ...

Modules Availability by Simulation:
-----------------------------------------------
Source 1: 1
Termination 2: 1
Node 3: 0,9998059
Node 4: 0,9999281
Node 5: 0,9996031
Node 6: 0,9993778
Node 7: 0,9989682
Node 8: 0,9996454
Link9: 0,9992683
Link10: 0,9996681
Link11: 0,9993686
Link12: 0,9993119
Link13: 0,9994899
Node 14: 1
Node 15: 0,9998349
Node 16: 0,9996816
Node 17: 0,9995597
Node 18: 0,9995403
Node 19: 0,9997706
Node 20: 0,9997239
Link21: 0,9994976
Link22: 0,9992983
Link23: 0,9994977
Link24: 0,9995473
Link25: 0,9993738
Link26: 0,9994598
Link27: 0,9995874
Link28: 0,9993931

System simulation availability: 0,8793385
Console Out
```

Slika 26 Rezultati simulacije za 100 (lijevo) i 1000 (desno) iteracija

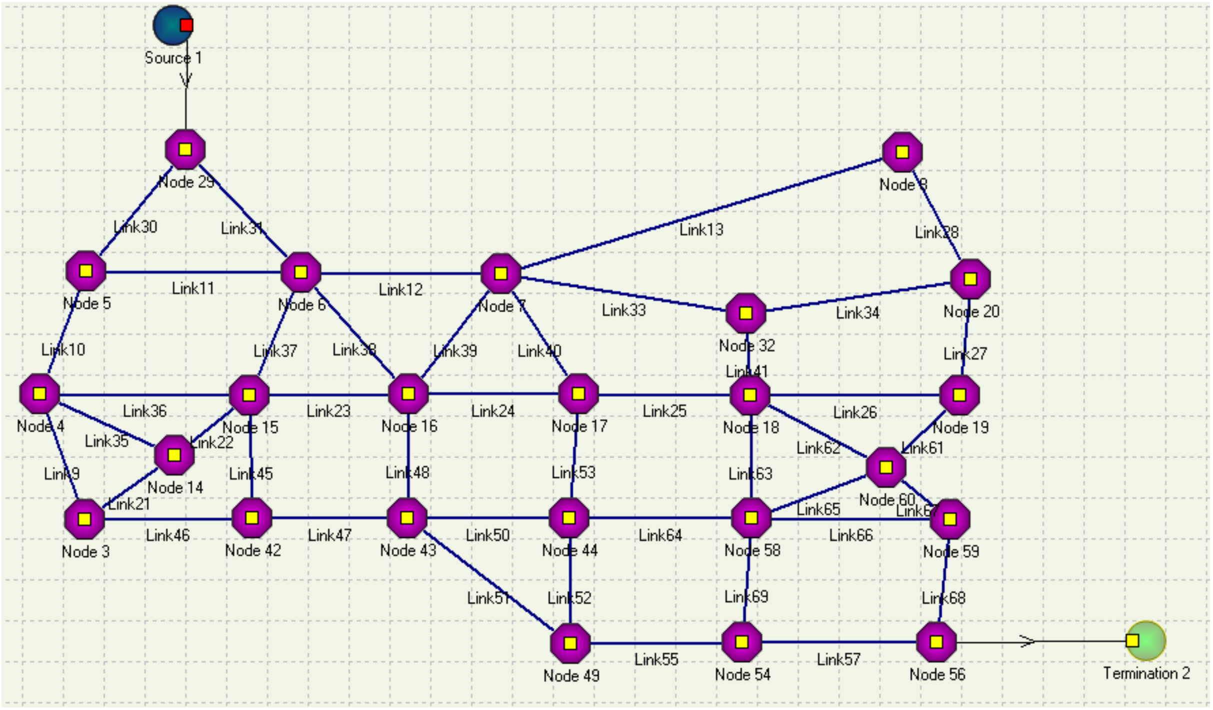


```
ConsoleOut 10 000 iteracija
Calculating availability ...

Modules Availability by Simulation:
-----------------------------------------------
Source 1: 1
Termination 2: 1
Node 3: 0,9997093
Node 4: 0,9998172
Node 5: 0,9998493
Node 6: 0,99982
Node 7: 0,9998405
Node 8: 0,9997553
Link9: 0,9993607
Link10: 0,9994657
Link11: 0,9993608
Link12: 0,9993433
Link13: 0,9993916
Node 14: 0,9997313
Node 15: 0,9997634
Node 16: 0,9997478
Node 17: 0,9997953
Node 18: 0,9998481
Node 19: 0,9997816
Node 20: 0,9997889
Link21: 0,9993828
Link22: 0,9994774
Link23: 0,9994327
Link24: 0,999444
Link25: 0,9993346
Link26: 0,9994212
Link27: 0,9994101
Link28: 0,9994134

System simulation availability: 0,9879069
Console Out
```

```
ConsoleOut 100 000 iteracija
Calculating availability ...

Modules Availability by Simulation:
-----------------------------------------------
Source 1: 1
Termination 2: 1
Node 3: 0,9998161
Node 4: 0,9997891
Node 5: 0,9997917
Node 6: 0,9997867
Node 7: 0,9997986
Node 8: 0,999781
Link9: 0,9994177
Link10: 0,9993947
Link11: 0,9994108
Link12: 0,9993974
Link13: 0,9994003
Node 14: 0,9998236
Node 15: 0,9997871
Node 16: 0,9997914
Node 17: 0,9997767
Node 18: 0,9997958
Node 19: 0,9997845
Node 20: 0,9997985
Link21: 0,9994081
Link22: 0,9994081
Link23: 0,9993985
Link24: 0,9993983
Link25: 0,9994169
Link26: 0,9993924
Link27: 0,9994175
Link28: 0,9993979

System simulation availability: 0,9983344
Console Out
```

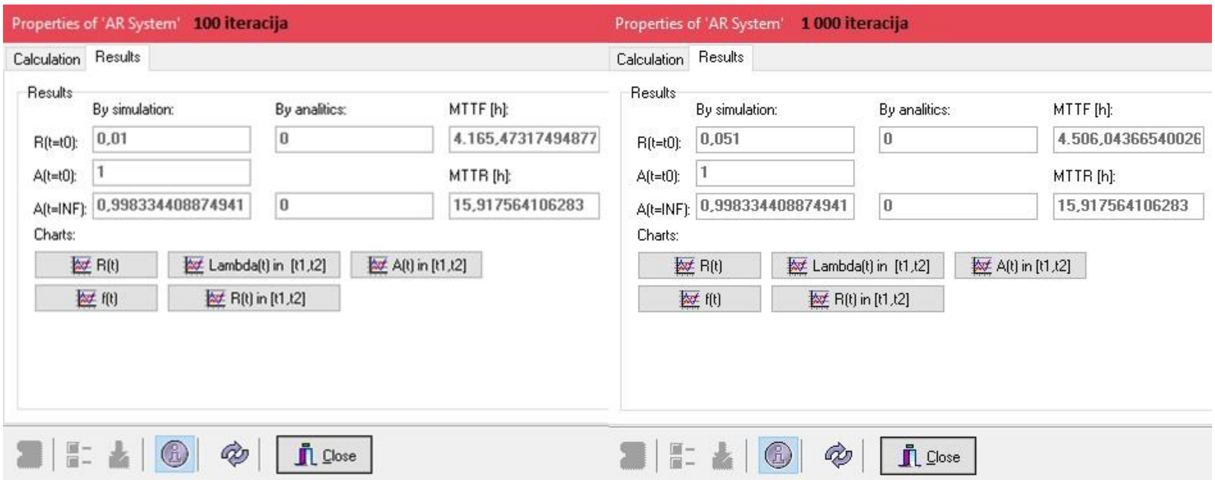
Slika 27 Rezultati simulacije za 10 000 (lijevo) i 100 000 (desno) iteracija

4.4. Pouzdanost mreže

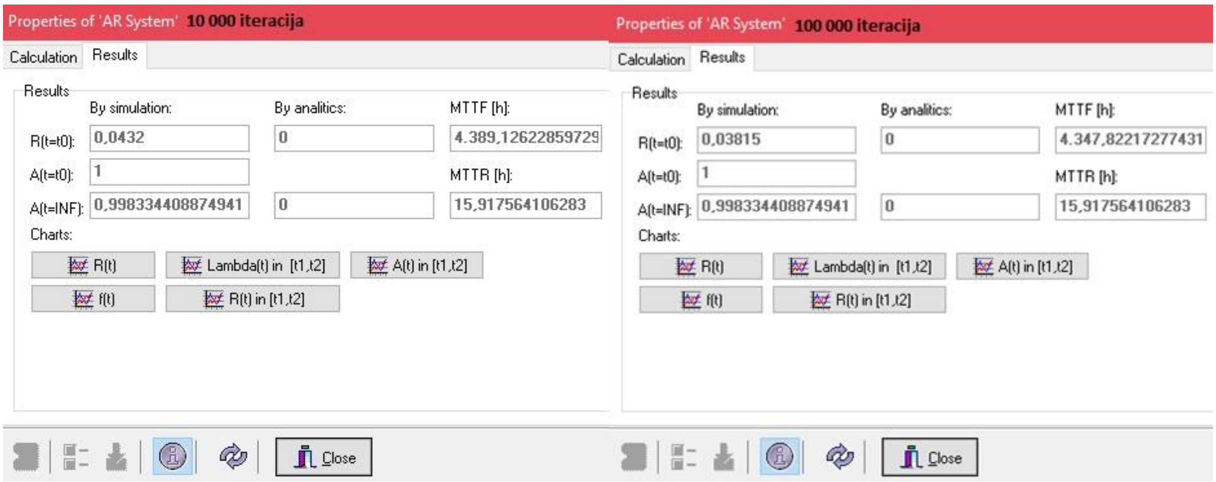


Slika 28 Zadana topologija, US IP backbone

Kako u topologiji ima 24 čvora, pretpostavila sam da umjesto broja čvora 29 (Slika 1) treba pisati 19. Tada je čvor s najvećim indeksom čvor 23 i on je postavljen kao izlazni čvor.



Slika 29 Rezultati simulacije za 100 (lijevo) i 1 000 (desno) iteracija



Slika 30 Rezultati simulacije za 10 000 (lijevo) i 100 000 (desno) iteracija

Pouzdanost komunikacije izvorišnog i odredišnog čvora u ovakvoj mreži je jako mala. Kako mijenjamo broj iteracija pouzdanost komunikacije varira, ne uočava se neka pravilnost.

- 100 iteracija: R = 0.01
- 1000 iteracija: R = 0.051
- 10 000 iteracija: R = 0.0432
- 100 000 iteracija: R = 0.03815

Promatrajući veći broj čvorova i linkova, pogreška simulacije je veća. Najtočnije rezultate, odnosno identične analitički dobivenim vrijednostima, dobili smo za samo jedan čvor i link. Za primarni put uočavamo malu grešku na šestoj decimali, a za put sa zaštitom se rezultati razlikuju već na trećoj decimali.

5. Zaključak

Cilj ove laboratorijske vježbe bio je usporediti rezultate analitičkog i simulacijskog proračuna pouzdanosti i raspoloživosti određenog puta u zadanoj topologiji. Simulacija se provodila u programskim alatima Relex i Cosmos.

U programskom alatu Relex dobivene vrijednosti za raspoloživost i pouzdanost jednog čvora i jednog linka odgovaraju vrijednostima dobivenima analitičkim računom. Grafovi napravljeni na temelju dobivenih vrijednosti odgovaraju obliku funkcija pouzdanosti (eksponencijalno padajuća) i raspoloživosti (konstanta nakon dovoljnog broja kvarova i popravaka).

U programskom alatu Cosmos dobiveni rezultati sličniji su rezultatima analitičkog računa ako promatramo manji broj čvorova i linkova. Također, u većini simulacija rezultati su precizniji za veći broj iteracija.