

Procjena pouzdanosti tehničkog sustava primjenom Markovljevih modela i sustavne dinamike

Boženko BILIĆ¹⁾, Mate JURJEVIĆ²⁾ i
Jane BARLE¹⁾

1) Fakultet elektrotehnike, strojarstva i
brodogradnje, Sveučilište u Splitu
(Faculty of Electrical Engineering,
Mechanical Engineering and Naval
Architecture, University of Split),
Ruđera Boškovića 32,
HR-21000 Split
Republic of Croatia

2) Sveučilište u Dubrovniku (University of
Dubrovnik), Ćira Carića 4,
HR-20000 Dubrovnik
Republic of Croatia

bbilic@fesb.hr

Ključne riječi

*AMOS (Administration of Maintenance,
Operations and Spares)
Brodski diesel-motor
Markovljevi modeli
Održavanje
Pouzdanost sustava
Simulacijsko modeliranje
Sustavna dinamika*

Keywords

*AMOS (Administration of Maintenance,
Operations and Spares)
Maintenance
Marine Diesel engine
Markov models
Simulation modelling
System dynamics
System reliability*

Received (primljeno): 2010-01-04

Accepted (prihvaćeno): 2010-04-30

1. Uvod

Složeni tehnički sustav sastoji se od više komponenti i podsustava koji su međusobno povezani u jednu cjelinu, a uzročno-posljedično međusobno su povezani krugovima povratnog djelovanja. Neispravnost tehničkog sustava može uzrokovati ekonomske gubitke te ugroziti sigurnost ljudi koji rabe i održavaju taj sustav ili se nalaze u blizini njega. Kako bi tehnički sustavi mogli normalno funkcionirati u planiranome vijeku eksploatacije, potrebno

Original scientific paper

U radu je prikazan postupak za procjenu pouzdanosti tehničkog sustava koji se temelji na primjeni Markovljevih modela i sustavne dinamike. Markovljevi modeli, s pomoću diferencijalnih jednadžbi, omogućuju matematičko modeliranje različitih stanja tehničkog sustava. Sustavna dinamika omogućuje kontinuiranu simulaciju sustava s povratnom vezom. Opisani postupak primijenjen je na konkretnom brodskom diesel-motoru. Podaci o motoru dobiveni su iz baze podataka programskog paketa AMOS. S pomoću parametara koji su izračunati primjenom Markovljevih modela, provedeno je simulacijsko modeliranje brodskog motora sustava u realnom vremenu. Simulacija je izvedena pomoću simulacijskog programa POWERSIM.

Reliability Estimation of Technical System Using Markov Models and System Dynamics

Izvornoznanstveni članak

This paper presents the procedure for reliability estimation of a technical system. The procedure is based on the application of Markov models and system dynamics. Markov models with the use of differential equations, enables mathematical modeling of different states in technical system. The continuous simulation of system with feedback is made possible by system dynamics. The procedure described in the paper was applied to reliability estimation of the specific marine Diesel engine. The engine operational data were taken from the database of AMOS software package. The modeling of marine Diesel engine in real time was made based on the parameters calculated by Markov models. The simulation was performed with the help of simulation software POWERISM.

je na njima provoditi sustavno održavanje. Održavanje obuhvaća niz različitih operacija i zahvata koji podupiru osnovnu funkciju tehničkog sustava. Pokazatelji tehničke i tehnološke kvalitete tehničkog sustava su: pouzdanost, raspoloživost, efektivnost, sposobnost za održavanje i funkcionalna podobnost [1].

U ovome radu prikazan je postupak za procjenu pouzdanosti tehničkih sustava. Postupak se temelji na povezivanju Markovljevih modela i sustavne dinamike.

Oznake/Symbols

n_{0j}	- broj prijelaza motora iz stanja 0 u stanje j - number of engine transitions from state 0 to state j	t_{31}	- ukupno vrijeme koje je motor proveo u stanju 3 do prijelaza u stanje 1, h - total time the engine was in state 3 before transition to state 1
n_{j0}	- broj prijelaza motora iz stanja j u stanje 0 - number of engine transitions from state j to state 0	T_{srur}	- srednje vrijeme motora u radu, h - mean operating engine time
n_{12}	- broj prijelaza motora iz stanja 1 u stanje 2 - number of engine transitions from state 1 to state 2	λ	- učestalost kvarova po satu - failure rate per hour
n_{31}	- broj prijelaza motora iz stanja 3 u stanje 1 - number of engine transitions from state 3 to state 1	λ_{0j}	- učestalost prijelaza motora po satu iz stanja 0 u stanje j - engine failure rate per hour from state 0 to state j
P_j	- vjerojatnost da je motor u stanju j - probability that the engine is in state j	μ_{j0}	- učestalost popravaka motora po satu iz stanja j u stanje 0 - engine repair rate per hour from state j to state 0
R	- pouzdanost - reliability	α_{12}	- učestalost prijelaza motora iz stanja 1 u stanje 2; prijelaz/h - frequency of transition from state 1 to state 2; transitions/h
t	- vrijeme, h - time	α_{31}	- učestalost prijelaza motora po satu iz stanja 3 u stanje 1 - frequency of transition per hour from state 3 to state 1
t_{0j}	- ukupno vrijeme koje je motor proveo u stanju 0 do prijelaza u stanje j , h - total time the engine was in state 0 before transition to state j		
t_{j0}	- ukupno vrijeme koje je motor proveo u stanju j do prijelaza u stanje 0, h - total time the engine was in state j before transition to state 0		
t_{12}	- ukupno vrijeme koje je motor proveo u stanju 1 do prijelaza u stanje 2, h - total time the engine was in state 1 before transition to state 2		

Primjena postupka prikazat će se na konkretnom brodskom dizelskom motoru.

2. Pouzdanost tehničkog sustava

Kvar je promjena stanja tehničkog sustava ili njegovih sastavnih dijelova, koja ometa ili onemogućuje funkciju tehničkog sustava. Oštećenje je promjena stanja tehničkog sustava ili njegovih sastavnih dijelova, koja još ne ometa funkciju tehničkog sustava, ali se može razviti u kvar [1].

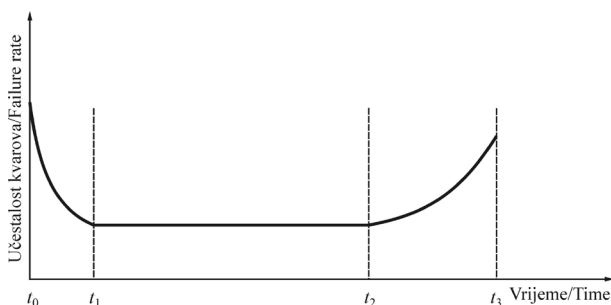
Pouzdanost tehničkog sustava jest vjerojatnost da će tehnički sustav obaviti svoju funkciju u propisanim uvjetima rada u određenom vremenu. Za proračun pouzdanosti treba analizirati unutarnje i vanjske čimbenike koji imaju utjecaj na tehnički sustav. Unutarnje čimbenike određuju projektanti i proizvođači tehničkog sustava, dok su vanjski čimbenici oni koji djeluju na tehnički sustav tijekom eksploatacije (režimi rada, načini održavanja itd.). Kupnjom tehničkog sustava, kupljena je i određena razina njegove pouzdanosti. Stručnjaci održavanja mogu snimanjem i obradom podataka o zastojima izračunati veličinu eksploatacijske

pouzdanosti, te svojim pravodobnim odlukama povećati ukupnu pouzdanost tehničkog sustava. Eksploatacijska pouzdanost računa se zato da bi se odredila razina pouzdanosti kupljenog tehničkog sustava, te da bi se mogla usporediti s pouzdanostima sličnih tehničkih sustava drugih proizvođača. Analizom pouzdanosti o zastojima i razlozima zastoja dolazi se do niza podataka bitnih za donošenje odluke o [1]:

- planiranim budućim zahvatima održavanja,
- zamjeni ili rekonstrukciji pojedinih sklopova (slabih mjesta),
- asortimanu i količinama doknadnih dijelova,
- obliku zahtjeva za ponudu pri nabavi nove opreme,
- rangiranju pojedinih dijelova i sklopova u odnosu na učestalost kvarova i srednjeg vremena između dvaju kvarova.

Promatranjem učestalosti kvarova i zastoja, mogu se razlučiti tri vremenske faze u vijeku trajanja tehničkih sustava, slika 1:

1. interval uhadavanja, (t_0, t_1) ,
2. interval normalne uporabe (t_1, t_2) i
3. interval dotrajlosti (t_2, t_3) .



Slika 1. Krivulja vijeka trajanja (krivulja kade) [1-3]

Figure 1. Mortality curve (The bathtub curve)

Tijekom intervala uhadavanja, osim slučajnih (neovisnih i prouzrokovanih) kvarova, pojavljuju se i početni kvarovi uzrokovani konstrukcijskim pogreškama, pogreškama u izradbi, pogreškama u materijalu, pogreškama u montaži itd.

Interval normale uporabe tehničkog sustava karakterizira niska i konstantna vrijednost učestalosti kvarova. U tom se vremenu pojavljuju slučajni kvarovi. Vjerojatnost pojave slučajnih kvarova pod određenim uvjetima u određenom vremenskom intervalu određuje pouzdanost komponente tehničkog sustava. Slučajni kvarovi analiziraju se praćenjem učestalosti kvarova kroz dug vremenski interval uporabe tehničkog sustava.

U intervalu dotrajlosti tehničkog sustava uočava se brzi porast učestalosti kvarova. Osim slučajnih kvarova, pojavljuju se i vremenski kvarovi uzrokovani otkazivanjem komponenti sustava zbog više razloga: starenja materijala, korozije, zamora, trošenja itd. Uzroke vremenskih kvarova treba tražiti u održavanju tehničkog sustava.

Na osnovi zakonitosti, odnosno razdiobe kvarova, koja je obično Weibullova, eksponencijalna ili lognormalna, može se izračunati pouzdanost. Za ove statističke razdiobe moguće je definirati:

1. funkciju pouzdanosti $R(t)$,
2. funkciju gustoće kvarova $f(t)$ i
3. funkciju učestalosti kvarova $\lambda(t)$.

3. Markovljevi modeli i sustavna dinamika

Realistički opis događaja u prirodi, tehničari ili ekonomiji može se, u mnogim slučajevima, postići samo pomoću slučajnih varijabli, koje su vremenski ovisne. Analiza slučajnih varijabli koje ovise o vremenu pomoću statističkih tehnika dovodi do stohastičkih procesa.

Markovljev model nekog sustava temelji se na određivanju svih međusobno isključivih stanja toga sustava, od trenutka $t = 0$ (početnog stanja) do nekog trenutka t (konačnog stanja) sustava [4-8]. Pomoću Markovljevog modela može se vrlo dobro opisati ponašanje kako komponenti, tako i cijelog sustava, pri

čemu se opisivanje izvodi stohastičkim procesom sa dvije slučajne varijable: stanjem sustava i vremenom promatranja.

Razlikuju se dva tipa Markovljevih modela:

1. Markovljev lanac s diskretnim vremenom, kod kojeg se prijelaz iz jednog stanja u drugo odvija u određenom vremenskom trenutku, a u intervalima između tih trenutaka prijelaza, sustav ostaje u istom stanju.
2. Markovljev proces s kontinuiranim vremenom (Markovljev neprekinuti lanac), kod kojeg je prijelaz iz jednog stanja u drugo moguć u proizvoljnom vremenskom trenutku.

Pomoću blok dijagrama izrađenih od Markovljevih lanaca, Markovljevi modeli, opisuju stanja u kojima se sustav može naći tijekom vremena. Ako su događaji koji uzrokuju promjene stanja kontinuirani, model postaje modelom diskretnog stanja i kontinuiranog vremena, a naziva se Markovljevim procesom.

U većini tehničkih sustava ne mogu se predvidjeti promjene stanja, jer su parametri koji ih opisuju slučajnog karaktera. Odabirom Markovljeva modela omogućeno je slobodno kreiranje svih mogućih stanja sustava. Stanje sustava u potpunosti je određeno brojem komponenti sustava i brojem stanja u kojima se pojedine komponente sustava mogu naći.

Kako bi se opisao Markovljev model nekog sustava, potrebno je:

1. poznavati sva stanja u kojima se sustav može naći,
2. odrediti početno stanje sustava,
3. dijagramom stanja opisati moguće prijelaze sustava iz jednog stanja u drugo,
4. definirati učestalosti prijelaza iz jednog stanja u drugo.

Sustavna dinamika je metodologija istraživanja, modeliranja, simuliranja i optimiranja složenih dinamičkih sustava s uzročno povratnim vezama i krugovima povratnog djelovanja [9]. Sustavna je dinamika danas priznata kao interdisciplinarna znanost, čija je metodologija primjenjiva za simuliranje najsloženijih sustava, tj. simulacijsko modeliranje dinamike ponašanja njihovih, u pravilu, nelinearnih modela [10-11].

4. Brodski Diesel motor

Za siguran i ekonomičan rad brodskog dizelskog motora (tehničkog sustava) posebnu važnost imaju sljedeći sustavi od kojih se motor sastoji:

1. sustav goriva,
2. sustav ulja,
3. sustav hlađenja i
4. sustav zraka.

Nakon izrade i montaže, a prije ugradnje na brod, motor se ispituje na probnom stolu. Ovo ispitivanje prvenstveno utječe na skraćivanje vremena uhodavanja, te pomaže proizvođačima motora da učestalost kvarova u samom početku rada smanje na najmanju mjeru. U radu [12] prikazan je ekspertni sustav za dijagnostiku stanja i optimiranje rada brodskog dizelskog motora. Održavanje motora u ispravnom stanju osnovna je zadaća časnika stroja u strojarnici broda. Složenost poslova u održavanju brodskog dizelskog motora stalno se povećava povećanjem njegove snage, dimenzija i stupnja automatiziranosti. Mnogi se kvarovi ne mogu unaprijed predvidjeti, ali se zato mogu pravilnim održavanjem svesti na najmanju moguću razinu.

Za osiguranje uspješnog održavanja tehničkih sustava, te za izračun pouzdanosti i raspoloživosti tehničkog sustava potrebno je analizirati velik broj podataka o konkretnom tehničkom sustavu. U tu svrhu rabe se računalni programi koji pretražuju datoteke, sortiraju podatke, izvode statističke testove, regresijsku i korelacijsku analizu. Jedan od najzastupljenijih programskih paketa za održavanje brodskih dizelskih motora je AMOS (Administration of Maintenance, Operations and Spares) [13-14]. Programski paket AMOS sastoji se od četiri, međusobno povezana, osnovna modula, i to:

1. upravljanje održavanjem,
2. upravljanje zalihama doknadnih dijelova,
3. kupnja i narudžba doknadnih dijelova,
4. kontrola proračunskih sredstava.

5. Izračunavanje pouzdanosti brodskog dizelskog motora

5.1. Markovljev model brodskog dizelskog motora

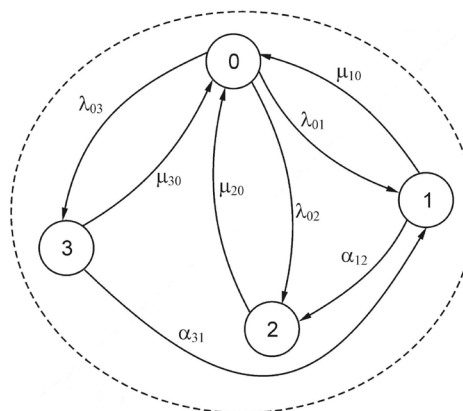
Markovljev model jednog stvarnog brodskog dizelskog motora, koji se analizira u ovome radu, obuhvaća četiri stanja motora, slika 2:

- Stanje 0: motor u ispravnom stanju (u radu),
- Stanje 1: motor neispravan (kvar koji se može popraviti bez pomoći s kopna),
- Stanje 2: motor neispravan (kvar koji se ne može popraviti bez pomoći s kopna),
- Stanje 3: motor u planskome pregledu.

Oznake na slici 2 imaju sljedeća značenja:

- λ_{01} – učestalost prijelaza motora iz stanja 0 u stanje 1,
- μ_{10} – učestalost povratka motora iz stanja 1 u stanje 0,
- λ_{02} – učestalost prijelaza motora iz stanja 0 u stanje 2,
- μ_{20} – učestalost povratka motora iz stanja 2 u stanje 0,
- λ_{03} – učestalost prijelaza motora iz stanja 0 u stanje 3,

- μ_{30} – učestalost povratka motora iz stanja 3 u stanje 0,
- α_{12} – učestalost prijelaza motora iz stanja 1 u stanje 2,
- α_{31} – učestalost prijelaza motora iz stanja 3 u stanje 1.



Slika 2. Markovljev model stanja brodskog dizelskog motora
Figure 2. Markov model of the marine Diesel engine

Vrijeme praćenja rada brodskog dizelskog motora iznosilo je 80.000 radnih sati, a obuhvaćalo je interval uhodavanja i interval normalne uporabe. Na temelju podataka o kvarovima 60 komponenti motora dobivenih iz baze programskog paketa AMOS tijekom 80.000 radnih sati, izrađene su empirijske i teorijske funkcije pouzdanosti. Pomoću Kolomogorov-Smirnovljeva testa, potvrđena je hipoteza da se kvarovi promatranog brodskog dizelskog motora u intervalu normalne uporabe podvrgavaju zakonu eksponencijalne razdiobe [15]. To znači da je u intervalu normalne uporabe učestalost kvarova približno konstantna [2, 4, 16-17].

Funkcije pouzdanosti $R(t)$, gustoće kvarova $f(t)$ te učestalosti kvarova $\lambda(t)$ kod modela eksponencijalne razdiobe računaju se pomoću izraza:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda. \quad (3)$$

gdje je:

- $\lambda \geq 0$ – učestalosti kvarova po satu,
- $t \geq 0$ – vrijeme trajanja kvara u satima.

5.1.1. Matematički opis modela motora

Pomoću slike 2, Markovljev model opisuje se sustavom linearnih diferencijalnih jednačini.

Stanje 0:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} = & -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03})P_0(t) + \mu_{10}P_1(t) + \\ & + \mu_{20}P_2(t) + \mu_{30}P_3(t), \end{aligned} \quad (4)$$

Stanje 1:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_{01}P_0(t) - (\mu_{10} + \alpha_{12})P_1(t) + \alpha_{31}P_3(t) \quad (5)$$

Stanje 2:

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{02}P_0(t) + \alpha_{12}P_1(t) - \mu_{20}P_2(t), \quad (6)$$

Stanje 3:

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{03}P_0(t) - (\mu_{30} + \alpha_{31})P_3(t). \quad (7)$$

Za opis Markovljeva modela može se koristiti i Kolmogorovljeva jednačba čija se matrica gustoće prijelaza Q može jednostavno odrediti pomoću modela stanja (slika 2) koja za ovaj slučaj glasi:

$$Q = \begin{bmatrix} -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03}) & \mu_{10} & \mu_{20} & \mu_{30} \\ \lambda_{01} & -(\mu_{10} + \alpha_{12}) & 0 & \alpha_{31} \\ \lambda_{02} & \alpha_{12} & -\mu_{20} & 0 \\ \lambda_{03} & 0 & 0 & -(\mu_{30} + \alpha_{31}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Kada je motor u stanju 0, početni uvjeti u trenutku $t = 0$, su sljedeći:

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = 0; P_2(0) = 0; P_3(0) = 0. \quad (9)$$

U svakome trenutku mora biti ispunjen uvjet definiran jednačbom identiteta:

$$P_{uk} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1. \quad (10)$$

Potrebno je odrediti stacionarno rješenje sustava linearnih diferencijalnih jednačbi Markovljeva modela pomoću Kolmogorovljeve jednačbe za stacionarno stanje procesa:

Temeljem prethodnih izraza definira se sljedeći sustav linearnih diferencijalnih jednačbi:

$$\begin{aligned} 0 &= -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03})P_0 + \mu_{10}P_1 + \mu_{20}P_2 + \mu_{30}P_3, \\ 0 &= \lambda_{01}P_0 - (\mu_{10} + \alpha_{12})P_1 + \alpha_{31}P_3, \\ 0 &= \lambda_{02}P_0 + \alpha_{12}P_1 - \mu_{20}P_2, \\ 0 &= \lambda_{03}P_0 - (\mu_{30} + \alpha_{31})P_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Rješenjem sustava jednačbi (10) i (11), odrede se vjerojatnosti stacionarnih stanja brodskog dizelskog motora:

- vjerojatnost da se motor nađe u stanju 0:

$$P_0 = \frac{\mu_{30} + \alpha_{31}}{\lambda_{03}} \frac{1}{C}, \quad (12)$$

- vjerojatnost da se motor nađe u stanju 1:

$$P_1 = \frac{A}{C} \frac{1}{\mu_{10} + \alpha_{12}}, \quad (13)$$

- vjerojatnost da se motor nađe u stanju 2:

$$P_2 = \frac{B}{C} \frac{1}{\mu_{20}}, \quad (14)$$

- vjerojatnost da se motor nađe u stanju 3:

$$P_3 = \frac{1}{C}. \quad (15)$$

Veličine A , B i C mogu se izračunati s pomoću sljedećih izraza:

$$A = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{03}} (\mu_{30} + \alpha_{31}) + \alpha_{31}, \quad (16)$$

$$B = \frac{\lambda_{02}}{\lambda_{03}} (\mu_{30} + \alpha_{31}) + \alpha_{12} \frac{A}{\mu_{10} + \alpha_{12}}, \quad (17)$$

$$C = \frac{\mu_{30} + \alpha_{31}}{\lambda_{03}} + \frac{A}{\mu_{10} + \alpha_{12}} + \frac{B}{\mu_{20}} + 1. \quad (18)$$

5.1.2. Izračunavanje parametara stanja motora

Vrijeme praćenja brodskog dizelskog motora podijeljeno je u intervale od po 4.000 sati rada [18]. Da bi se izračunali parametri Markovljeva modela uzeti su podaci iz baze programskog paketa AMOS-ova motora, tablica 1.

Oznake u tablici 1 imaju sljedeća značenja:

n_{ij} – broj prijelaza motora iz stanja i u stanje j ,

t_{ij} – ukupno vrijeme u satima koje je motor proveo u stanju i do prelaska u stanje j .

Pomoću podataka iz tablice 1, izračunaju se učestalosti prijelaza iz jednog stanja u drugo po satu rada motora:

$$\lambda_{01} = \frac{1}{\sum \frac{t_{01}}{n_{01}}} = 0,00003, \quad (19)$$

$$\mu_{10} = \frac{1}{\sum \frac{t_{10}}{n_{10}}} = 0,00253, \quad (20)$$

$$\lambda_{02} = \frac{1}{\sum \frac{t_{02}}{n_{02}}} = 0,00004, \quad (21)$$

$$\mu_{20} = \frac{1}{\sum \frac{t_{20}}{n_{20}}} = 0,00241, \quad (22)$$

$$\lambda_{03} = \frac{1}{\sum \frac{t_{03}}{n_{03}}} = 0,00005, \quad (23)$$

Tablica 1. Podaci o brodskom dizelskom motoru [15]**Table 1.** Marine Diesel engine operational data

Vrijeme/ Time t, h	n_{01}	n_{10}	n_{02}	n_{20}	n_{03}	n_{30}	n_{12}	n_{31}	t_{01} h	t_{02} h	t_{03} h	t_{10} h	t_{12} h	t_{20} h	t_{30} h	t_{31} h
4.000	11	11	0	0	19	19	0	0	3.895	0	3.895	60	0	0	45	0
8.000	10	12	0	0	10	8	0	2	3.780	0	3.780	200	0	0	20	10
12.000	10	9	1	1	9	9	1	0	3.954	3.835	3.954	30	29	29	16	0
16.000	4	6	0	0	8	6	0	2	3.840	0	3.840	100	0	0	60	60
20.000	3	5	1	1	9	7	0	2	3.940	3.892	3.940	48	0	1	12	12
24.000	2	2	0	0	7	7	0	0	3.880	0	3.880	100	0	0	20	0
28.000	2	4	0	0	6	4	0	2	3.950	0	3.950	40	0	0	10	10
32.000	2	2	1	1	5	5	0	0	3.890	3.870	3.890	20	0	60	30	0
36.000	2	6	0	0	5	1	0	4	3.773	0	3.773	200	0	0	27	27
40.000	2	3	0	0	2	1	0	1	3.974	0	3.974	17	0	0	9	9
44.000	2	2	0	0	2	2	0	0	3.982	0	3.982	11	0	0	7	0
48.000	2	2	1	1	3	3	0	0	3.931	3.917	3.931	14	0	48	7	0
52.000	2	2	0	0	3	3	0	0	3.815	0	3.815	180	0	0	5	0
56.000	2	2	1	1	4	3	0	1	3.757	3.754	3.757	3	0	230	10	10
60.000	2	3	1	1	2	1	0	1	3.937	3.929	3.937	8	0	1	5	5
64.000	2	2	0	0	1	1	0	0	3.897	0	3.897	100	0	0	3	0
68.000	1	3	0	0	2	1	0	1	3.983	0	3.983	10	0	0	7	7
72.000	1	2	1	1	9	8	0	1	3.980	3.969	3.980	11	0	1	9	9
76.000	1	3	0	0	10	8	0	2	3.805	0	3.805	180	0	0	15	15
80.000	2	4	0	1	15	12	1	3	3.886	0	3.886	29	29	60	25	25

$$\mu_{30} = \frac{1}{\sum \frac{t_{30}}{n_{30}}} = 0,01037, \quad (24)$$

$$\alpha_{12} = \frac{1}{\sum \frac{t_{12}}{n_{12}}} = 0,01695, \quad (25)$$

$$\alpha_{31} = \frac{1}{\sum \frac{t_{31}}{n_{31}}} = 0,00861. \quad (26)$$

Vjerojatnosti pojedinih stanja brodskog dizelskog motora izračunate su pomoću izraza (12), (13), (14) i (15), te iznose:

$P_0 = 0,9635$; $P_1 = 0,0024$; $P_2 = 0,0317$; $P_3 = 0,0024$,
pri čemu je zadovoljena jednačba identiteta (10):

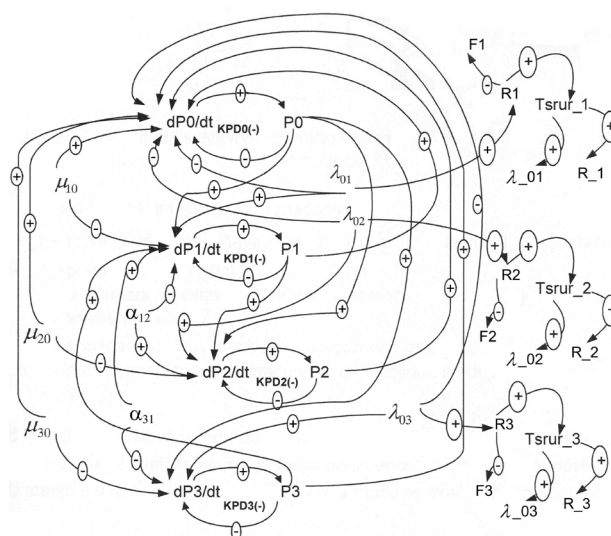
$$P_{uk} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1.$$

5.2. Primjena sustavne dinamike u izračunavanju pouzdanosti brodskog dizelskog motora

Da bi brodski motor obavljao svoju funkciju, potrebno je da bude u ispravnom stanju. Međutim, motor može u svakome trenutku prijeći u bilo koje opisano stanje. Ako prijeđe u neko drugo stanje, potrebno ga je intervencijom

službe održavanja ponovno vratiti u ravnotežno stanje, tj. stanje u radu. Narušavanjem statičke ravnoteže između stanja, mijenja se pouzdanost i raspoloživost brodskog motora.

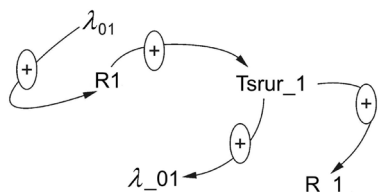
Na slici 3 prikazan je sustavno dinamički kvalitativni model Markovljeva modela brodskog dizelskog motora.



Slika 3. Sustavno dinamički kvalitativni model brodskog dizelskog motora

Figure 3. System dynamic qualitative model of marine Diesel engine

Na slici 4 prikazan je sustavno dinamički kvalitativni model za izračunavanje srednjeg vremena u radu do pojave kvara, tj. do dolaska motora u stanje 1, $Tsrur_1$.



Slika 4. Sustavno dinamički model za izračunavanje srednjeg vremena u radu do pojave kvara

Figure 4. System dynamic model for calculation of mean time to failure

Oznake na slici 4 imaju sljedeća značenja:

- λ_{01} – učestalost kvarova motora (učestalost prijelaza motora iz stanja 0 u stanje 1) izračunata temeljem empirijskih podataka pomoću izraza (19),
- R1 – pouzdanost motora izračunata pomoću izraza (1),
- $Tsrur_1$ – srednje vrijeme motora u radu do dolaska u stanje 1,
- λ_{01} – izračunata učestalost kvarova (recipročna vrijednost srednjeg vremena u radu $Tsrur_1$),
- R_1 – pouzdanost motora izračunata derivacijom srednjeg vremena u radu $Tsrur_1$.

Srednje vrijeme motora u radu do pojave kvara, tj. do dolaska u stanje 1, $Tsrur_1$, definirano je pomoću pouzdanosti sustava R1 i učestalosti kvarova motora λ_{01} , a može se izračunati s pomoću izraza:

$$Tsrur_1 = \int_0^{\infty} R1(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{01}t} dt. \quad (27)$$

Za provjeru modela koriste se izračunata učestalost kvarova λ_{01} i izračunata pouzdanost R_1 .

Na sličan način mogu se izračunati srednja vremena u radu do dolaska motora u stanja 2 i 3, tj. $Tsrur_2$ i $Tsrur_3$. Srednje vrijeme u radu do dolaska motora u stanje 2, $Tsrur_2$, definirano je pomoću pouzdanosti sustava R2 i učestalosti kvarova motora λ_{02} (učestalost prijelaza motora iz stanja 0 u stanje 2), a može se izračunati s pomoću izraza:

$$Tsrur_2 = \int_0^{\infty} R2(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{02}t} dt. \quad (28)$$

Učestalost kvarova λ_{02} izračunata je pomoću izraza (21) temeljem empirijskih podataka. Za provjeru modela koristi se učestalost kvarova λ_{02} (recipročna vrijednost srednjeg vremena u radu $Tsrur_2$) i izračunata pouzdanost R_2 dobivena derivacijom srednjeg vremena u radu $Tsrur_2$.

Srednje vrijeme u radu do dolaska motora u stanje 3, $Tsrur_3$, definirano je pomoću pouzdanosti sustava R3 i učestalosti prijelaza motora λ_{03} iz stanja 0 u stanje 3, a može se izračunati s pomoću izraza:

$$Tsrur_3 = \int_0^{\infty} R3(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{03}t} dt. \quad (29)$$

Učestalost prijelaza motora iz stanja 0 u stanje 3, λ_{03} , izračunata je pomoću izraza (23) temeljem empirijskih podataka. Za provjeru modela koristi se učestalost prijelaza λ_{03} (recipročna vrijednost srednjeg vremena u radu $Tsrur_3$) i izračunata pouzdanost R_3 dobivena derivacijom srednjeg vremena u radu $Tsrur_3$.

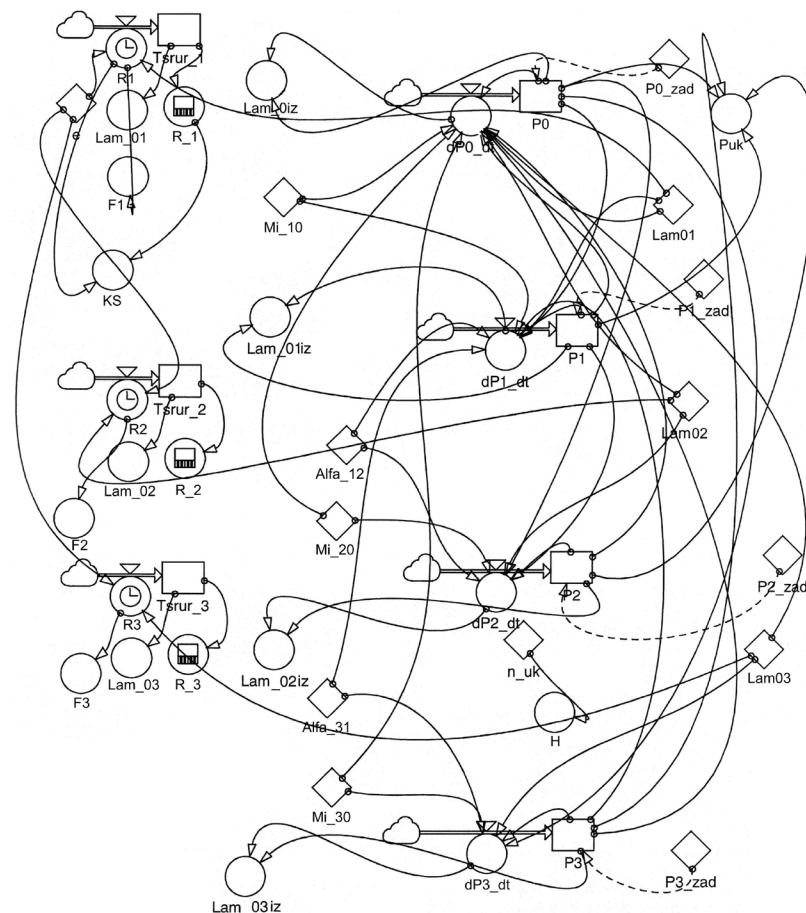
Na slici 5 prikazan je sustavno dinamički model brodskog dizelskog motora izrađen u POWERSIM simbolici [19]. U izradi modela korišteni su izrazi (4), (5), (6), (7), (27), (28) i (29) koji opisuju dinamičke prijelaze motora iz stanja u stanje, te sustavno dinamički kvalitativni model prikazan na slici 3.

U tablici 2 prikazani su izračunati parametri stanja brodskog dizelskog motora dobiveni Markovljevim modelom koji služe kao početne vrijednosti u simulacijskom modelu.

Tablica 2. Parametri stanja brodskog dizelskog motora

Table 2. State parameters of the marine Diesel engine

Učestalosti prijelaza motora iz stanja u radu/ The failure rates		Učestalosti povratka motora u stanje u radu/ The repair rates		Učestalosti prijelaza između stanja motora/ The frequency of transition between the engine states		Vjerojatnosti pojedinih stanja motora/ The probability of the engine states	
λ_{0i}		μ_{j0}		α_{ij}		P_i	
λ_{01}	0,00003	μ_{10}	0,00253	α_{12}	0,01695	P_0	0,9635
λ_{02}	0,00004	μ_{20}	0,00241	α_{31}	0,00861	P_1	0,0024
λ_{03}	0,00005	μ_{30}	0,01037			P_2	0,0317
						P_3	0,0024



Slika 5. Sustavno dinamički model brodskog dizelskog motora u POWERSIM simbolici

Figure 5. System dynamic model of marine Diesel engine in POWERSIM symbolic

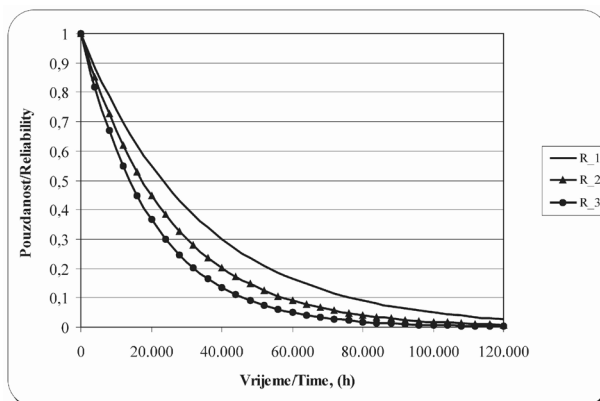
Simulacija je provedena za dva scenarija rada brodskog dizelskog motora. Prvi scenarij je obuhvaćao 80.000 sati rada motora. To je vrijeme rada za koje su postojali empirijski podaci u bazi podataka programskog paketa AMOS. S obzirom da su rezultati dobiveni simulacijom odgovarali empirijskim podacima, provedena je simulacija prema drugome scenariju koji je obuhvaćao ukupno 120.000 sati rada motora.

5.3. Rezultati simulacije

U tablici 3 prikazane su sljedeće veličine dobivene simulacijom: pouzdanosti pojedinih stanja brodskog dizelskog motora, srednja vremena u radu i učestalosti prijelaza motora iz stanja u radu u stanja 1, 2 i 3.

Pouzdanosti brodskog dizelskog motora dobivene simulacijom prikazane su na slici 6. Iz slike se može uočiti da se pouzdanost brodskog dizelskog motora tijekom vremena rada smanjuje. Intervencijom službe održavanja, sustav se iz stanja u kvaru vraća u ispravno stanje.

Na slici 7 prikazana su simulacijom dobivena srednja vremena u radu brodskog dizelskog motora do dolaska sustava u stanja 1, 2 ili 3.



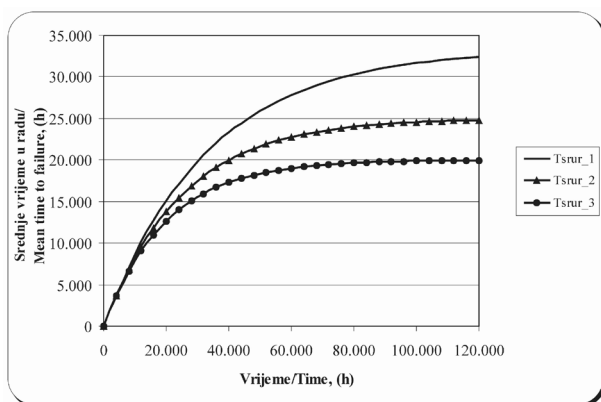
Slika 6. Pouzdanosti brodskog dizelskog motora dobivene simulacijom

Figure 6. The reliability of marine Diesel engine obtained by simulation

Učestalosti prijelaza iz stanja u radu u stanja 1, 2 i 3 brodskog dizelskog motora dobivene simulacijom, prikazane su na slici 8. Iz slike se može uočiti da se učestalosti prijelaza dobivene sustavno dinamičkim simulacijskim modelom ponašaju prema eksponencijalnoj razdiobi. Učestalost kvarova u početnom intervalu rada motora je povećana, a tijekom vremena pada i postaje konstantna.

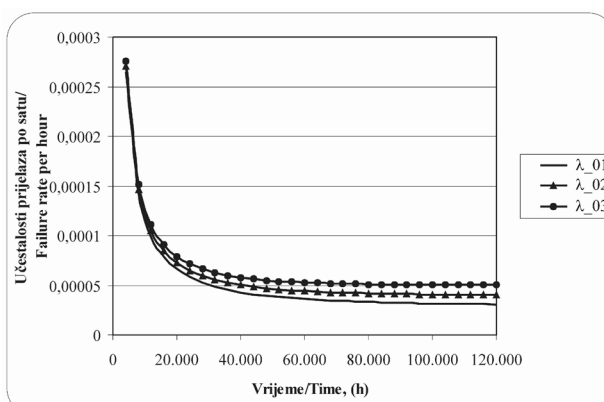
Tablica 3. Pouzdanosti, srednja vremena u radu i učestalosti prijelaza u stanja 1, 2 i 3 brodskog dizelskog motora
Table 3. Reliability, mean operating time and transition frequency to states 1, 2 and 3 of the marine Diesel engine

Vrijeme/Time <i>t</i> , h	<i>R</i> ₁	<i>Tsur</i> ₁ , h	λ ₀₁	<i>R</i> ₂	<i>Tsur</i> ₂ , h	λ ₀₂	<i>R</i> ₃	<i>Tsur</i> ₃ , h	λ ₀₃
0	1,000	0	-	1,000	0	-	1,000	0	-
4.000	0,887	3.769	0,0002650	0,852	3.696	0,000271	0,819	3.625	0,000276
8.000	0,787	7.112	0,0001410	0,726	6.846	0,000146	0,670	6.594	0,000152
12.000	0,698	10.078	0,0000992	0,619	9.531	0,000105	0,549	9.024	0,000111
16.000	0,619	12.707	0,0000787	0,527	11.818	0,0000846	0,449	11.014	0,0000908
20.000	0,549	15.040	0,0000665	0,449	13.767	0,0000726	0,368	12.643	0,0000791
24.000	0,487	17.108	0,0000585	0,383	15.428	0,0000648	0,301	13.976	0,0000715
28.000	0,432	18.943	0,0000528	0,326	16.843	0,0000594	0,247	15.068	0,0000664
32.000	0,383	20.570	0,0000486	0,278	18.049	0,0000554	0,202	15.962	0,0000626
36.000	0,340	22.014	0,0000454	0,237	19.077	0,0000524	0,165	16.694	0,0000599
40.000	0,301	23.294	0,0000429	0,202	19.953	0,0000501	0,135	17.294	0,0000578
44.000	0,267	24.429	0,0000409	0,172	20.699	0,0000483	0,111	17.784	0,0000562
48.000	0,237	25.436	0,0000393	0,147	21.335	0,0000469	0,091	18.186	0,0000550
52.000	0,210	26.329	0,0000380	0,125	21.877	0,0000457	0,074	18.515	0,0000540
56.000	0,186	27.121	0,0000369	0,106	22.339	0,0000448	0,061	18.784	0,0000532
60.000	0,165	27.824	0,0000359	0,091	22.733	0,0000440	0,050	19.005	0,0000526
64.000	0,147	28.447	0,0000352	0,077	23.068	0,0000434	0,041	19.185	0,0000521
68.000	0,130	29.000	0,0000345	0,066	23.354	0,0000428	0,033	19.333	0,0000517
72.000	0,115	29.490	0,0000339	0,056	23.597	0,0000424	0,027	19.454	0,0000514
76.000	0,102	29.925	0,0000334	0,048	23.805	0,0000420	0,022	19.553	0,0000511
80.000	0,091	30.310	0,0000330	0,041	23.982	0,0000417	0,018	19.634	0,0000509
84.000	0,081	30.652	0,0000326	0,035	24.132	0,0000417	0,015	19.701	0,0000508
88.000	0,071	30.955	0,0000323	0,030	24.261	0,0000412	0,012	19.755	0,0000506
92.000	0,063	31.224	0,0000320	0,025	24.370	0,0000410	0,010	19.800	0,0000505
96.000	0,056	31.463	0,0000318	0,021	24.463	0,0000409	0,008	19.836	0,0000504
100.000	0,050	31.675	0,0000316	0,018	24.543	0,0000407	0,007	19.866	0,0000503
104.000	0,044	31.862	0,0000314	0,016	24.611	0,0000406	0,006	19.890	0,0000503
108.000	0,039	32.029	0,0000312	0,013	24.688	0,0000405	0,005	19.910	0,0000502
112.000	0,035	32.176	0,0000311	0,011	24.717	0,0000405	0,004	19.927	0,0000502
116.000	0,031	32.307	0,0000310	0,010	24.759	0,0000404	0,003	19.940	0,0000502
120.000	0,027	32.423	0,0000308	0,008	24.795	0,0000403	0,003	19.951	0,0000501



Slika 7. Srednja vremena u radu brodskog dizelskog motora dobivena simulacijom

Figure 7. The mean operating time of marine Diesel engine obtained by simulation



Slika 8. Učestalosti prijelaza u stanja 1, 2 i 3 brodskog dizelskog motora dobivena simulacijom

Figure 8. The frequency of transition in state 1, 2, and 3 of marine Diesel engine obtained by simulation

U tablici 4 prikazane su vjerojatnosti pojedinih stanja brodskog dizelskog motora dobivene simulacijom.

Tablica 4. Vjerojatnosti pojedinih stanja brodskog dizelskog motora

Table 4. Probabilities for states 1, 2 and 3 of the marine Diesel engine

Vrijeme/ Time t, h	P_0	P_1	P_2	P_3	P_{uk}
0	0,9635	0,0024	0,0317	0,0024	1,000
4.000	0,9607	0,0024	0,0344	0,0025	1,000
8.000	0,9607	0,0023	0,0345	0,0025	1,000
12.000	0,9607	0,0027	0,0341	0,0025	1,000
16.000	0,9607	0,0028	0,0340	0,0025	1,000
20.000	0,9607	0,0025	0,0343	0,0025	1,000
24.000	0,9607	0,0024	0,0344	0,0025	1,000
28.000	0,9606	0,0024	0,0345	0,0025	1,000
32.000	0,9607	0,0027	0,0341	0,0025	1,000
36.000	0,9607	0,0028	0,0340	0,0025	1,000
40.000	0,9607	0,0029	0,0339	0,0025	1,000
44.000	0,9606	0,0025	0,0344	0,0025	1,000
48.000	0,9607	0,0024	0,0344	0,0025	1,000
52.000	0,9607	0,0027	0,0341	0,0025	1,000
56.000	0,9606	0,0028	0,0341	0,0025	1,000
60.000	0,9607	0,0028	0,0340	0,0025	1,000
64.000	0,9607	0,0025	0,0343	0,0025	1,000
68.000	0,9607	0,0024	0,0344	0,0025	1,000
72.000	0,9607	0,0023	0,0345	0,0025	1,000
76.000	0,9607	0,0027	0,0341	0,0025	1,000
80.000	0,9607	0,0028	0,0340	0,0025	1,000
84.000	0,9607	0,0025	0,0343	0,0025	1,000
88.000	0,9607	0,0024	0,0344	0,0025	1,000
92.000	0,9606	0,0024	0,0345	0,0025	1,000
96.000	0,9607	0,0027	0,0341	0,0025	1,000
100.000	0,9607	0,0028	0,0340	0,0025	1,000
104.000	0,9607	0,0029	0,0339	0,0025	1,000
108.000	0,9606	0,0025	0,0344	0,0025	1,000
112.000	0,9607	0,0024	0,0344	0,0025	1,000
116.000	0,9607	0,0027	0,0341	0,0025	1,000
120.000	0,9606	0,0028	0,0341	0,0025	1,000

Usporedbom vjerojatnosti dobivenih s pomoću empirijskih podataka (tablica 2) sa vjerojatnostima dobivenim simulacijom, može se zaključiti da se rezultati dobiveni simulacijom vrlo dobro podudaraju s empirijskim podacima. Simulacijski model u svakom trenutku ispunjava uvjet definiran jednačinom identiteta (10).

6. Zaključak

U radu je prikazan postupak kojim se može procijeniti pouzdanost tehničkih sustava. Postupak povezuje Markovljeve modele i sustavnu dinamiku. Primijenjen

je na izračunavanju pouzdanosti brodskog dizelskog motora koji je opisan Markovljevim modelima pomoću diferencijalnih jednačina koje opisuju prijelaze sustava iz jednog stanja u drugo.

Primjenom sustavne dinamike omogućeno je simuliranje rada tehničkog sustava prema željenim scenarijima s mogućnošću eksperimentiranja s režimima rada sustava koji bi pri ispitivanju stvarnog tehničkog sustava bili rizični ili ne bi bili mogući. Sustavnom dinamikom omogućeno je modeliranje i analiziranje pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sustava u realnom vremenu. Simulacijski model omogućuje:

1. dobivanje relevantnih kvantitativnih i kvalitativnih podataka,
2. potpunu ponovljivost simulacijskog eksperimenta,
3. istraživanje ponašanja tehničkog sustava u različitim eksploatacijskim uvjetima.

Mogućnosti praktične primjene u radu opisanog postupka su:

- istraživanje modela pouzdanosti složenih tehničkih sustava u fazi njihova projektiranja i konstruiranja s ciljem stvaranja kvalitetnijeg tehničkog sustava,
- sustavni i znanstveni pristup održavanju složenih tehničkih sustava,
- smanjivanje troškova eksploatacije tehničkih sustava,
- mogućnost prognoziranja i poboljšanja rada složenih tehničkih sustava tijekom uporabe,
- ekspertnu primjenu simulacije analognih nelinearnih složenih dinamičkih sustava.

LITERATURA

- [1]: *Inženjerski priručnik IP4*, svezak 3, Školska knjiga, Zagreb, 2002, 293-331.
- [2] LOVRIC, J.: *Optimizacija osnivanja i korištenja broda primjenom analize pouzdanosti brodskih sustava*, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1980.
- [3] JURJEVIĆ, M.; BILIĆ, B.; VEŽA, I.: *Method of technical system reliability analysis by application of exploitation experience*, Proceedings of 11th International Scientific Conference on Production Engineering – CIM'2007, (ISBN 978-953-97181-9-8), Biograd, 2007, 175-180.
- [4] KLEPO, M.: *Pouzdanost i raspoloživost elektroenergetskog sustava pri operativnim planiranjima rada*, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 1996.

- [5] ZHAO, R.; LIU, B.: *Stochastic programming models for general redundancy-optimization problems*, IEEE Transactions on Reliability, 3(2003), 18-21.
- [6] MILER, I.; FREUND, J. E.: *Probability and statistics for engineers*, Prentice-Hall, Inc., 2004.
- [7] KUO, W.; ZUO, M. J.: *Optimal reliability modeling: Principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [8] EBELING, C. E.: *An introduction to reliability and maintainability engineering*, McGraw-Hill, 2000.
- [9] MUNITIĆ, A.: *Kompjuterska simulacija uz pomoć sistemske dinamike*, Brodosplit, Split, 1989.
- [10] MUNITIĆ, A.; MILIĆ, L.; MILKOVIĆ, M.: *System dynamics simulating modelling of the diesel-drive generating set*, Proceeding of Simulation in Industry 9th European Simulation Symposium, Budapest, 1997, 679-683.
- [11] HETET, J. F.; INOZU, B.; ROY, P.; TAUZIA, X.; CHESSE, P.: *Performance simulation of marine diesel engines with Selindia*, Journal of Ship Research, 43(1999)12, 214-230.
- [12] RADICA, G.: *Expert System for Diagnosis and Optimisation of Marine Diesel Engines*, Strojarstvo (ISSN 0562-1887), 50(2008) 2, 105-116.
- [13] JURJEVIĆ, M.; BILIĆ, B.; MILIĆ-BERAN, I.; ZEKIĆ, H.: *Application of the software package "AMOS" in maintenance of the marine propulsion system*, 2nd International Maritime Scientific Conference, (ISBN 978-953-7599-02-7), Lumbarda, 2008, 151-159.
- [14] JURJEVIĆ, M.; BILIĆ, B.: *Izračun pouzdanosti brodskog porivnog sustava koristeći se podacima iz programskog paketa AMOS*, Naše more, (ISSN 0469-6255), 56(2009)3-4, 108-117.
- [15] JURJEVIĆ, M.: *Simulacijsko modeliranje pouzdanosti tehničkog sustava primjenom sustavne dinamike*, Doktorska disertacija, Fakultet, elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split, 2009.
- [16] LOVRIĆ, J.: *Osnove brodske terotehnologije*, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet u Dubrovniku, 1989.
- [17] BARLE, J.; MLADINEO, M.; LADAN, M.: *On the Bayesian updating of maintenance and reliability models*, Proceedings of 12th International Scientific Conference on Production Engineering - CIM'2009, (ISBN 978-953-7689-00-1), Biograd, 2009, 13-19.
- [18] LOUIT, D. M.; PASCUAL, R.; JARDINE, A. K. S.: *A practical procedure for the selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data*, Reliability Engineering & System Safety, 94(2009)10, 1618-1628.
- [19] POWERSIM, User's Guide and Reference.