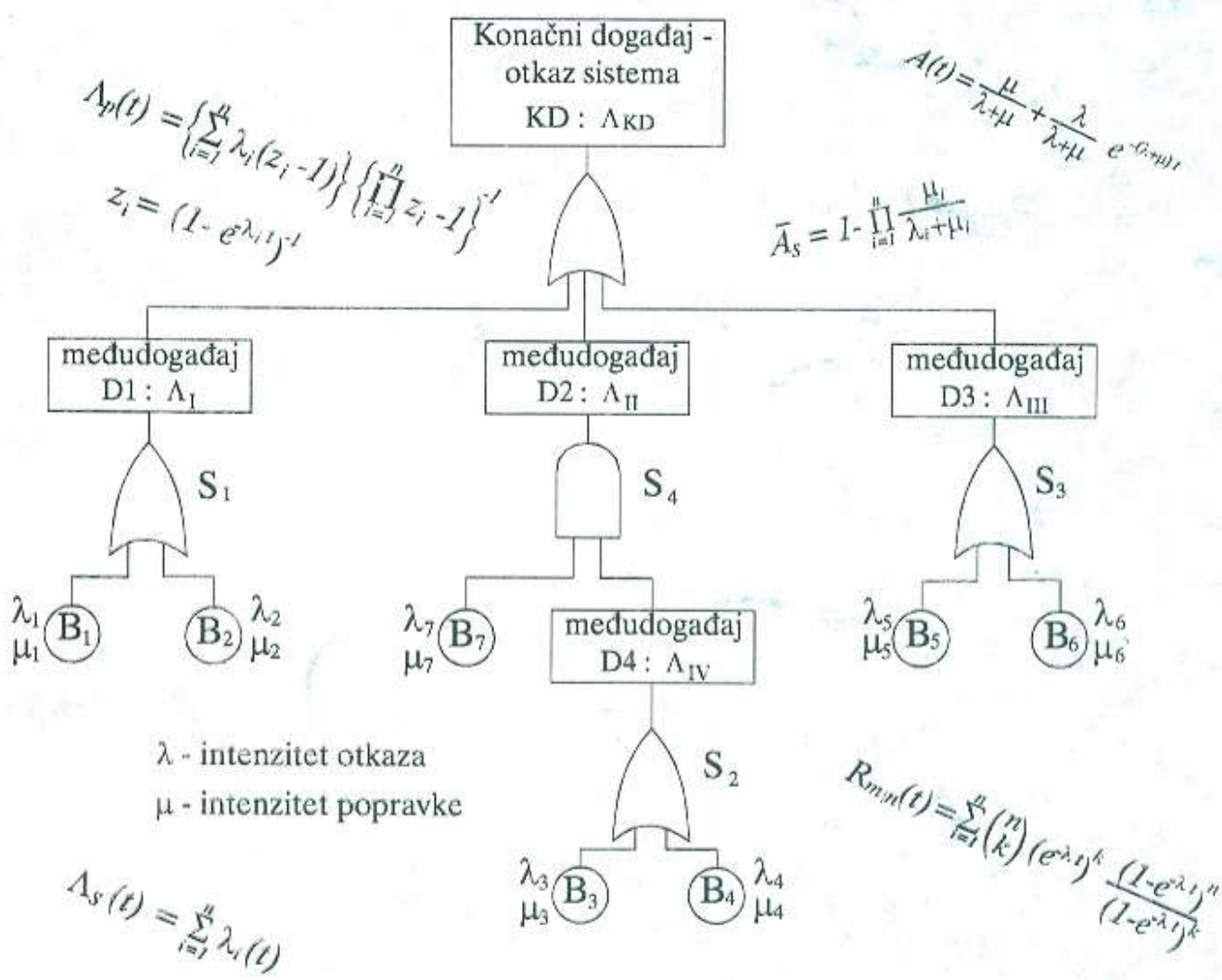


vodoprivreda



SADRŽAJ

ORIGINALNI NAUČNI RADOVI

Dr Dragutin MUŠKATIROVIĆ i saradnici: Uticaj promene geometrije otvorenih tokova na granične uslove u proračunima nejednolikog strujanja	1
Dr Branislav ĐORĐEVIĆ i Tina MILANOVIĆ: Stabla otkaza kao efikasna metoda za analizu pouzdanosti složenih hidrotehničkih sistema	15
Dr Stevan PROHASKA: Hidrološke karakteristike vodnih tokova od značaja za njihovo uređenje i zaštitu od poplava. II deo.	29
Mr Miloš STANIĆ i dr Dimitrije AVAKUMOVIĆ: Primena genetskog algoritma za optimizaciju distributivnih mreža u sistemima za navodnjavanje	37
Dr Nikola PLAMENAC i saradnici: Stanje i projekcija razvoja odvodnjavanja u Srbiji	45
Dr Đuro BOSNJAK: Potreba za vodom i realizacija racionalnog zalivnog režima soje	55
Mr Dragan RADIVOJEVIĆ i saradnici: Neizvesnost parametara izdani određenih opitom probnog crpljenja na kopanom bunaru	67
Mr Dragan MILIČEVIĆ: Makrobiološke metode u preradi otpadnih voda - novi pristup modeliranju sistema	75
Mr Slobodan FURUNDŽIĆ: Računanje geometrije lučne brane s kružnim lukovima promenljive debljine	81
Dr Dejan LJUBISAVLJEVIĆ i saradnici: Primena procesa flotacije rastvorenim vazduhom u sistemima za preradu površinske vode u vodu za piće	95
Aleksandar ĐUKIĆ i dr Dejan LJUBISAVLJEVIĆ: Karakteristike sistema za aeraciju hipolimniona akumulacije Gruža	99
PREGLEDNI RADOVI	
Dr Srbobran ĐORĐEVIĆ: Aluminijum u vodi i Alzheimerova bolest	109
Dr Violeta CIBULIĆ: O merama zaštite višenamenske akumulacije "Barje"	113
Jozef GILDEDOVIĆ: Regionalni sistem "Puglia" za snabdevanje vodom i odvođenje otpadnih voda u južnoj Italiji	121
Mr Bratislav STIŠOVIĆ: Primena hidrološkog konceptualnog modela za definisanje merodavnih velikih voda i dimenzionisanje evakuacionih organa	129
Olga LONČAREVIĆ i Mr Milena TOMANIĆ: Neki aspekti analize iskorišćenja rečnog resursa u navodnjavanju	133

CONTENTS

SCIENTIFIC THEMATIC REVIEWS

Dragutin MUŠKATIROVIĆ and al.: CHANGE OF OPEN CHANNEL GEOMETRY AND ITS INFLUENCE ON BOUNDARY FLOW	1
Branislav ĐORĐEVIĆ and Tina MILANOVIĆ: APPLICATION OF THE FAULT TREE TECHNIQUE TO RELIABILITY ANALYSIS OF WATER RESOURCES SYSTEMS	15
Stevan PROHASKA: HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF WATER COURSES IMPORTANT FOR REGULATION AND FLOOD CONTROL PART II - LOW FLOWS	29
Miloš STANIĆ and Dimitrije AVAKUMOVIĆ: APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS FOR OPTIMISATION OF IRRIGATION WATER DISTRIBUTION NETWORKS	37
Nikola PLAMENAC and al.: PRESENT STATE AND PLANS FOR LAND DRAINAGE DEVELOPMENT IN SERBIA	45
Đuro BOSNJAK: WATER REQUIREMENT AND THE REALIZATION OF RATIONAL IRRIGATION REGIME OF SOYBEAN.	55
Dragan RADIVOJEVIĆ: UNCERTAINTY OF AQUIFER PARAMETERS ESTIMATED ON LARGE DIAMETER WELL PUMPING TEST RESULTS	67
Dragan MILIČEVIĆ: MACROBIOLOGICAL METHODS IN WASTEWATER TREATMENT - NEW APPROACH IN SYSTEM MODELLING	75
Slobodan FURUNDŽIĆ: COMPUTING GEOMETRY OF AN ARCH DAM WITH CIRCULAR VARIABLE THICKNESS ARCHES.	81
Dejan LJUBISAVLJEVIĆ and al.: APPLICATION OF DISSOLVED AIR FLOTATION IN DRINKING WATER TREATMENT PLANTS FOR SURFACE WATER TREATMENT	95
Aleksandar ĐUKIĆ and Dejan LJUBISAVLJEVIĆ: CHARACTERISTICS OF HYPOLIMNETIC AERATION SYSTEM ON RESERVOIR GRUŽA	99

REVIEWS

Srbobran ĐORĐEVIĆ: ALUMINIUM IN WATER AND ALZHEIMER'S DISEASE	109
Violeta CIBULIĆ: WATER QUALITY PROTECTION MEASURES FOR MULTIPURPOSE RESERVOIR "BARJE"	113
Jozef GILDEDOVIĆ: PUGLIA REGIONAL WATER SUPPLY AND SEWERAGE SYSTEM IN ITALIA	121
Bratislav STIŠOVIĆ: APPLICATION OF HYDROLOGICAL CONCEPTUAL MODEL FOR FLOODS DESIGN AND DIMENSIONING OF DAM SPILLWAY	129
Olga LONČAREVIĆ and Milena TOMANIĆ: SOME ASPECTS OF THE ANALYSIS FOR RIVER WATER USE IN IRRIGATION.	133

VODOPRIVREDA

GOD. 28

Godina 1996.
BR. 159 - 160
(1996/1-2)

UDK 626

YU ISSN 0350 - 0519

IZDAVAČ:
JUGOSLOVENSKO DRUŠTVO ZA
ODVODNJAVANJE I NAVODNJAVANJE
Beograd, Kneza Miloša 9

Ovaj broj je finansijski podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju Srbije i Saveznog ministarstva za razvoj, nauku i životnu sredinu

REDAKCIJSKI KOLEGIJUM

(sa oblastima koje se pokrivaju):

Đorđević dr Branislav - Vodoprivredni sistemi i Hidroenergetika; predsednik Redakcionog kolegijuma
Avakumović dr Dimitrije - Hidromelioracioni sistemi
Batinić dr Božidar - Hidraulika
Bogdanović dr Slavko - Vodno pravo
Bruk dr Stevan - Opšta hidrotehnika
Ignjatović dr Lazar - Komunalna hidrotehnika
Jovanović dr Miodrag - Regulacija reka
Josipović dr Jovan - Hidrogeologija
Likić Budislav - Hidrotehnički objekti
Muškatirović dr Dragutin - Plovidbena infrastruktura
Petrović dr Petar - Brane i građevine
Petković dr Slobodan - Erozija
Plamenac dr Nikola - Odvodnjavanje
Popović dr Mirko - Kvalitet vode
Potkonjak dr Svetlana - Ekonomika vodoprivrede
Radić dr Zoran - Hidrologija
Radinović dr Đura - Meteorologija
Rudić dr Dragan - Održavanje melioracionih sistema
Stojić dr Milan - Navodnjavanje
Tutundžić dr Vera - Ribarstvo
Živaljević dr Ratomir - Hidrometeorološki informacioni sistemi

IZDAVAČKI SAVET

Bajić mr Vladimir
Božinović dr Miodrag
Bošnjak dr Đuro
Varga Arpad
Dragović Dušan
Dutina Nikola
Đukić Miljan
Ilić Živka
Kovačević dr Dejan
Milenković dr Slobodan
Milojević dr Miloje
Pantelić Petar
Stamenković mr Ljubiša

Slika na naslovnoj strani korica:
Stabla otkaza i kolaž relacija iz pouzdanosti
(uz članak B. Đorđevića i T. Milanović u ovom broju)

STABLA OTKAZA KAO EFIKASNA METODA ZA ANALIZU POUZDANOSTI SLOŽENIH HIDROTEHNIČKIH SISTEMA

Prof. dr Branislav ĐORĐEVIĆ, dipl. inž. i Tina MILANOVIĆ, dipl. inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

*Potrebno je kvantificirati pouzdanost, ali i
blagovremeno otkriti i ojačati sa gledišta otkaza
slaba mesta sistema.
(Jedan od postulata Teorije pouzdanosti)*

REZIME

U radu se razmatra mogućnost primene metode stabla otkaza za praćenje pouzdanosti složenih hidrotehničkih sistema. Daju se principi formiranja stabla otkaza, a zatim se analitički aparat Teorije pouzdanosti povezuje sa ovom metodom, korišćenjem elementarnih pravila Bulove algebre. Preporučuje se da se za sve složene hidrotehničke sisteme još u fazi projektovanja formiraju grafovi stabla otkaza, kako bi se unapred definisale slabe tačke sistema i našla odgovarajuća rešenja za njihovo ojačavanje u pogledu pouzdanosti funkcionisanja.

Ključne reči: stablo otkaza, vodoprivredni sistemi, pouzdanost, intenzitet otkaza, raspoloživost sistema, intenzitet popravke, Bulova algebra, serijska veza, paralelna veza, stablo uspešnog funkcionisanja.

1. UVOD

Izuzimajući informatičko - računarske tehnologije i nauke o životnoj sredini, retko koja oblast nauke je doživela tako eksplozivni teorijski razvoj i primenu u zadnje dve decenije kao što je to slučaj sa Teorijom pouzdanosti. Takav razvoj je nesumljivo potstaknut realizacijom sve složenijih i bezbednostno delikatnijih tehničkih sistema raznih namena, za čije je planiranje, realizaciju i eksploataciju bio neophodan odgovarajući analitički aparat Teorije pouzdanosti.

Valja nam priznati da buran razvoj vodoprivrednih sistema, koga karakteriše razvoj sve složenijih regionalnih sistema, na kojima se nalazi mnoštvo bezbednostno vrlo delikatnih postrojenja i uređaja, još nije praćen odgovarajućom primenom Teorije pouzdanosti za analizu aspekta pouzdanosti sistema još u fazi izbora konfiguracije i parametara sistema. Izuzetak je samo vrlo detaljna analiza obezbeđenosti funkcionisanja akumulacija. Međutim, analiza obezbeđenosti isporuke vode iz akumulacije je samo jedna komponenta analize funkcionalne sigurnosti sistema, i to pre svega hidrološko - stohastička, dok je čitav kompleks operativne gotovosti i pouzdanosti izvršenja zadataka elemenata sistema i sistema kao celine ostajao nepokriven. Prvi autor ovog rada, koji je svakodnevno u kontaktu sa novim projektima, još nije našao da se u usvojenom projektu nekog sistema, sa nizom raznih elemenata (pumpnih i buster stanica, dugih magistralnih cevovoda, raznih dozirajućih uređaja, itd.) nalazi odgovarajuća kvantitativna analiza pouzdanosti funkcionisanja planiranog sistema. A to znači da se taj aspekt ne ugrađuje u proces izbora konfiguracije i parametara planiranih sistema, što postaje apsolutno neprihvatljivo. Posledice će biti vrlo ozbiljne: nedovoljno pouzdani sistemi, čije će se konfiguracije morati kasnije da menjaju i dopunjavaju, ponekad uz vrlo velike adaptacije, kako bi se prilagodile nekim prihvatljivim pravcima pouzdanosti sistema. Takođe, nedostaje i projekat odgovarajuće opreme za monitoring sistema,

radi što brže i bliže lokalizacije nastalih kvarova. To će biti od izuzetne važnosti kod velikih regionalnih sistema vodosnabdevanja, koji mogu biti potpuno kompromitovani ukoliko se ne podignu na primeren nivo pouzdanosti i operativnosti pri otklanjanju kvarova.

Problemi pouzdanosti hidrotehničkih sistema sistematizovani su, kao posebna poglavlja, u monografijama Đorđevića iz 1991, 1993 [1, 6]. U radovima Božinovića, 1995 [7] razmatraju se aspekti pouzdanosti pri planiranju regulacionih objekata, što je veoma bitno za sigurnije planiranje takvih građevina. U radu [8] razmatraju se problemi alokacije pouzdanosti kod složenih sistema, pri čemu se posebno analitički analizira pouzdanost velikih regionalnih vodovodnih sistema. Zaključuje se da se u sam proces izbora dispozicije i parametara takvih sistema moraju ugraditi rezultati apriorne analize pouzdanosti, koji obuhvataju čitav sistem - od izvorišta i fabrike vode, preko magistralnih cevovoda i svih pratećih postrojenja na njima, sve do glavnih distribucionih rezervoara. Preliminarne analize pokazuju da se radi povećanja pouzdanosti moraju menjati neke dispozicije sistema: prekidne komore se moraju pretvarati u veće rezervoare; moraju se jasno razgraničiti deonice koje se mogu isključivati u periodu popravki; u blizini većih konzumnih područja moraju se predviđati veći rezervoarski prostori za periode isključenja dovoda usled kvarova; mora se ugrađivati merna / monitoring oprema za daljinsku detekciju kvarova na cevovodu; treba tako opremiti službu održavanja da se čitav period popravke - od detekcije kvara, dolaska na lokaciju, popravke, pa do ponovnog puštanja u pogon isključene deonice - svede na neki unapred utvrđeni prihvatljiv intenzitet popravke μ .

Nastavljajući razmatranje ove izuzetno važne teme, u ovom radu se razmatra mogućnost primene metode stabla otkaza za razmatranje pouzdanosti hidrotehničkih sistema još u fazi njihovog planiranja. Ta metodologija je vrlo pogodna za analizu pouzdanosti niza klasa hidrotehničkih sistema, a do sada praktično nije korišćena u vodoprivrednom planiranju.

2. FORMIRANJE GRAFA STABLA OTKAZA

Metoda analize pouzdanosti preko grafa stabla otkaza razvijena je još ranih 70-tih godina, tokom rada na letilicama za tadašnje veoma intenzivne kosmičke programe. Odmah zatim, oko 1966. uvodi je u korišćenje kompanija Boeing, za analizu pouzdanosti aviona, a ubrzo nakon toga postaje obavezna za praćenje bezbednosti nuklearnih elektrana. Krajem sedamdesetih godina se uvodi i u američke vojne standarde (MIL - STD) kao obavezna metoda za analizu vojne opreme i naoružanja. Treba zapaziti da je metoda korišćena za analizu pouzdanosti bezbednosti najdelikatnijih sistema: kosmičkih letilica, aviona, vojnih uređaja i opreme, kasnije nuklearnih elektrana. Kod nas je me-

toda korišćena sporadično, više na nivou istraživanja, i to najvećim delom u mašinstvu i elektromašinstvu. U hidrotehnici nije korišćena, mada je to jedna od oblasti tehnike gde bi imala puno opravdanje, pošto se radi o bezbednostno veoma delikatnim sistemima, sa mnoštvom elemenata čija se pouzdanost mora pratiti, sa teškim socijalnim i ekonomskim posledicama ukoliko dođe do otkaza sistema.

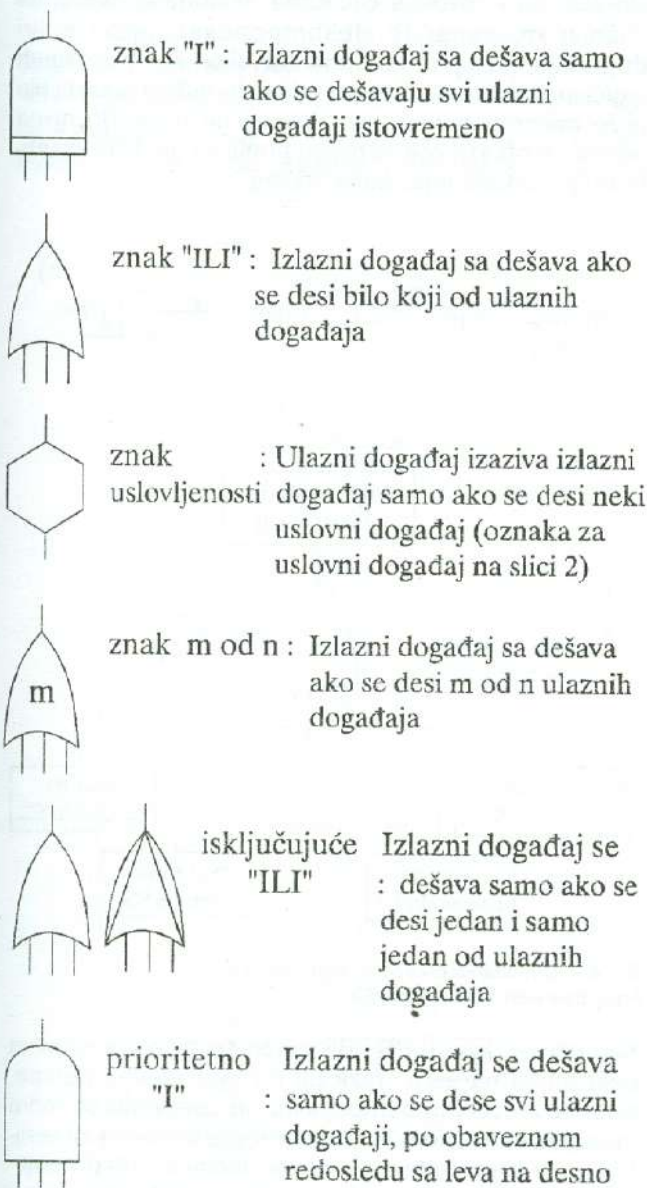
Stabla otkaza su svojevrsni grafovi kojima se u jedinstvenu logičnu strukturu dovode mogući otkazi nekog tehničkog sistema i njihovi uzročnici. Sa dekompozicijom mogućih uzročnika otkaza ide se sve do onih elemenata koji su od značaja za kvantitativnu analizu pouzdanosti razmatranog sistema i čija se pojedinačna pouzdanost (odnosno, opasnost od kvara) može utvrditi i pratiti. Vrednost ove analize posebno se iskazuje u sledećem:

- Analiza je vrlo efikasna za iznalaženje uzroka otkaza sistema.
- Obuhvataju se samo oni aspekti funkcionisanja sistema koji imaju važnost za praćenje pouzdanosti sistema.
- Omogućava kvalitativnu i kvantitativnu analizu pouzdanosti. Kvalitativnu - u procesu analize uzroka otkaza, kvantitativnu - pri numeričkom određivanju ključnih pokazatelja pouzdanosti sistema $R(t)$, intenziteta otkaza celog sistema $\Lambda(t)$ i njihovih pojedinih segmenata $\lambda_i(t)$, itd.
- Veoma je pregledna za analizu mogućih uzroka otkaza, što je od velikog značaja za delovanje posada u komandnim centrima u uslovima napregnutog rada u kriznim situacijama.
- Omogućava kompjutersku simulaciju procesa otkaza sistema.
- Obezbeđuje duboko bezbednostno pronicanje u čitav proces rada sistema.
- Može se širiti na sve dublje "slojeve" elemenata sistema, postupnom dekompozicijom na sklopove sve nižeg reda, kako se upoznaju njihove osobenosti sa gledišta otkaza.
- Ukoliko se stablo otkaza konstruiše u fazi izbora dispozicije sistema omogućava da se svaka varijanta jasno kvantifikuje i sa stanovišta pouzdanosti, čime se taj izuzetno važan kriterijum može da uključi u proces višekriterijumskog vrednovanja alternativnih dispozicija i parametara sistema.

Stablo otkaza se formira po veoma jasno definisanim principima. Neželjeni konačni događaj - otkaz sistema (još tačnije za hidrotehničke sisteme - prekid zahtevane funkcije sistema) smešta se na vrhu (zato se na engleskom i naziva *top event*). Taj konačni događaj se dekomponuje na potencijalne događaje / otkaze sve

elementarnijih delova sistema, a čitav graf se povezuje manjim brojem simbola, koji pokazuju uzročno - posledične odnose sa gledišta opasnosti od otkaza u sistemu. Znači, stablo otkaza mora da sadrži čitav niz postupnih događaja koji vode ka konačnom događaju. Dekompozicija se obavlja do onih detalja (sklopova) sistema koji se mogu kvantifikovati funkcijom intenziteta otkaza $\lambda_i(t)$, odnosno funkcijama pouzdanosti $R(t)$ i nepouzdanosti $Q(t)$, odnosno raspoloživosti $A(t)$.

Logički simboli



Sl. 1. - Logički simboli za formiranje stabla otkaza
Logical symbols of fault tree

Pri formiranju stabla otkaza odmah se ulazi u analizu uzročnih veza ispada pojedinih elemenata iz funkcije. Sa tog stanovišta može se načiniti sledeća podela.

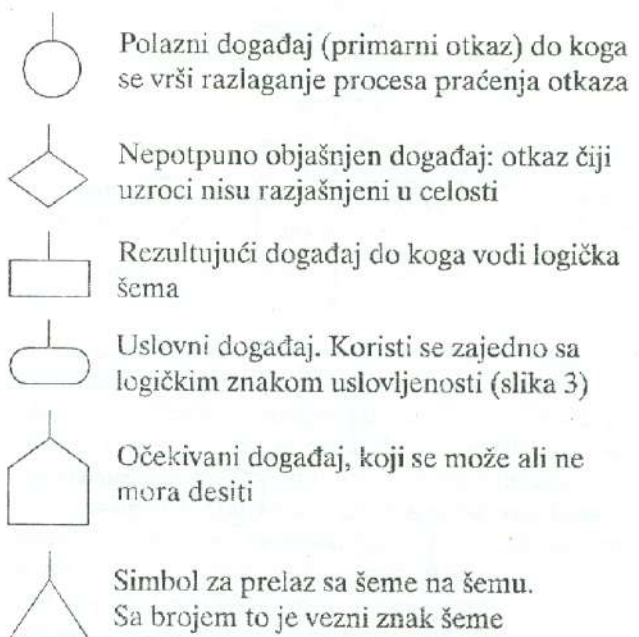
(1) **Primarni otkaz** elementa je onaj otkaz do koga dolazi u zadanim režimima rada, a uzročnik je starenje / istrošenost elementa, a ne neki vanredni događaj sa strane. Pucanje cevi usled zamora materijala u redovnom režimu eksploatacije je primer primarnog otkaza. Primarni otkaz elementa najčešće se u stablu otkaza sistema tretira kao polazni događaj.

(2) **Sekundarni otkaz** je onaj koji nastaje zbog nekih delovanja sa strane: neregularna naprezanja elemenata sistema, delovanje okruženja, preopterećenja, itd. Primeri sekundarnog otkaza: pucanje cevovoda zbog aktiviranja klizišta, ispad osigurača zbog nedopustivog preopterećenja, itd.

(3) **Pogrešno upravljanje** je onaj otkaz kada do ispada elementa iz funkcije dolazi zbog pogrešno izdate komande. Najčešće ne zahteva bilo kakav remont, ali u nekim slučajevima može da dovede do preopterećenja nekih elemenata sistema, koji usled toga mogu da dožive sekundarni otkaz.

Pri izradi stabla otkaza koriste se dve vrste povezanih simbola: (1) logički simboli (sl. 1), (2) simboli događaja (sl. 2).

Simboli događaja

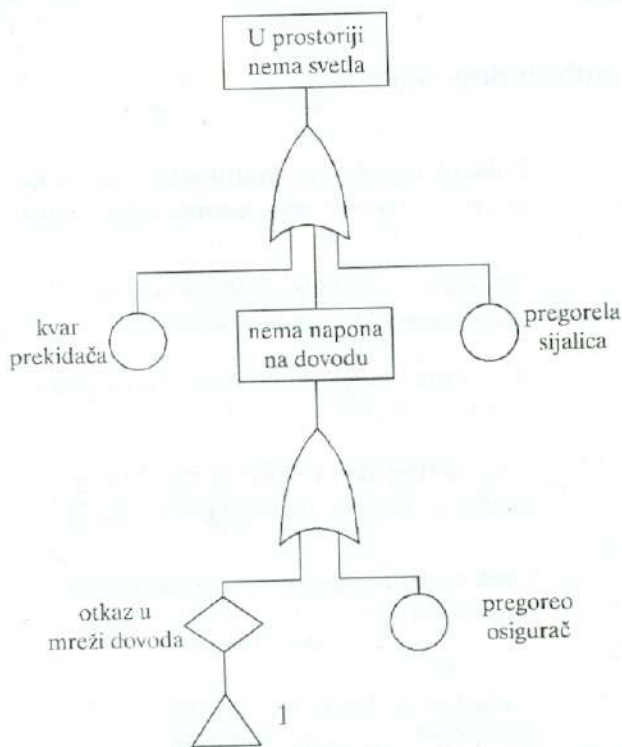


Sl. 2. - Simboli događaja u stablu otkaza
Symbols of events

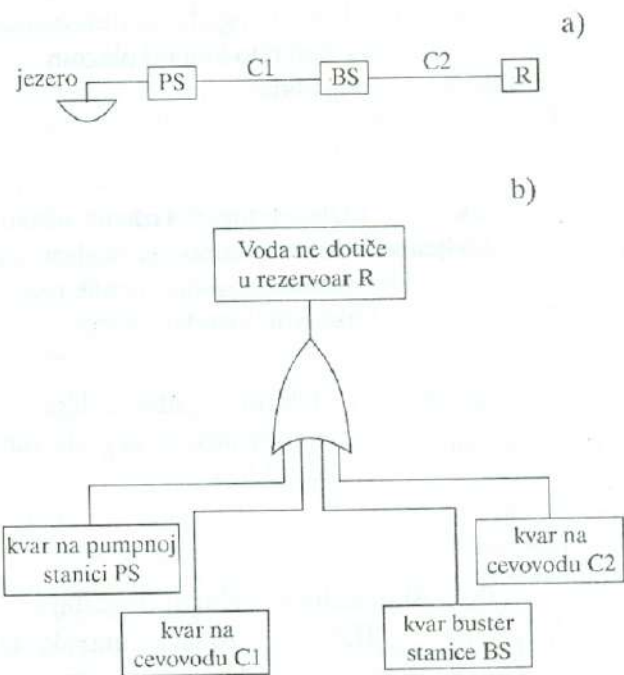
Ključni simboli za povezivanje stabla u jedinstvenu strukturu su logički simboli "I" i "ILI", kojima se jasno definiše međusobna uslovljenost pojedinih događaja. Npr. veza "I" označava da se moraju desiti svi događaji / otkazi nižeg reda da bi se desio događaj višeg reda, dok veza "ILI" označava da je dovoljno da se desi samo jedan događaj / otkaz nižeg reda, pa da dođe do otkaza višeg reda. Uvođenjem logike "I", "ILI" uvode se u proces analize pouzdanosti principi Bulove logičke algebre, što omogućava veoma pregledno kvantificiranje pouzdanosti pojedinih delova složenog sistema, kao i sistema kao jedinstvene celine. Tako npr. veza "I" sasvim jasno asocira na pouzdanost složenog sistema u paralelnoj vezi, kada do prekida funkcije sistema dolazi kada otkazu svi paralelno vezani elementi (npr. otkaze i glavna napojna pumpa i pumpa koja je bila u rezervi). Veza tipa "ILI" odgovara sistemu sa serijski vezanim elementima, kada do prekida funkcije sistema dolazi ukoliko otkaze samo jedan od serijski vezanih elemenata, zbog čega je takva šema sistema izuzetno osetljiva sa gledišta pouzdanosti. Na sl. 3 prikazan je jedan elementarni primer, kao početna ilustracija formiranja stabla otkaza, u uslovima elementarnih primarnih otkaza. Konačan događaj je "u prostoriji nema svetla pri pokušaju paljenja". Stablo otkaza se dekomponuje do tri primarna otkaza, koji se dalje ne razlažu kao i jedan nepotpun, nedovoljno razjašnjen događaj, (verovatno

sekundarni otkaz) koga bi trebalo dalje dekomponovati i razjašnjavati, zbog čega je ostavljen simbol veze (1) za prelaz na drugu šemu, kojom bi se taj događaj analizirao posebnom granom otkaza. U šemi je korišćena veza "ILI" u skladu sa logikom ovog stabla otkaza.

U hidrotehničkim sistemima najčešća je dispozicija sa serijskim povezivanjem elemenata (veza definisana logičkim znakom "ILI"), što je bezbedosno vrlo osetljiva šema, jer otkaz bilo kog elementa dovodi do ispada iz funkcije čitavog sistema. Radi ilustracije, na sl. 4b prikazuje se deo stabla otkaza sistema koga čine sledeći elementi sistema (sl. 4a): PS - pumpna stanica koja zahvata vodu iz jezera, C₁ - cevovod C₁, BS - buster stanica, C₂ - cevovod C₂. Konačni događaj "voda ne stiže u rezervoar R" dekomponovan je na četiri događaja nižeg reda datih na slici 4b, povezanih logičkim znakom "ILI". Svaki od tih događaja bi sada bio bliže dekomponovan, sve dok se ne dođe do nivoa primarnih otkaza koji se mogu pratiti sa gledišta kvantificiranja funkcija intenziteta otkaza.



Sl. 3 - Stablo otkaza sa logikom "ILI"
Fault tree with logical sign "OR"



Sl. 4 - Deo stabla otkaza sa logikom "ILI"
Fault tree with logical sign "OR"

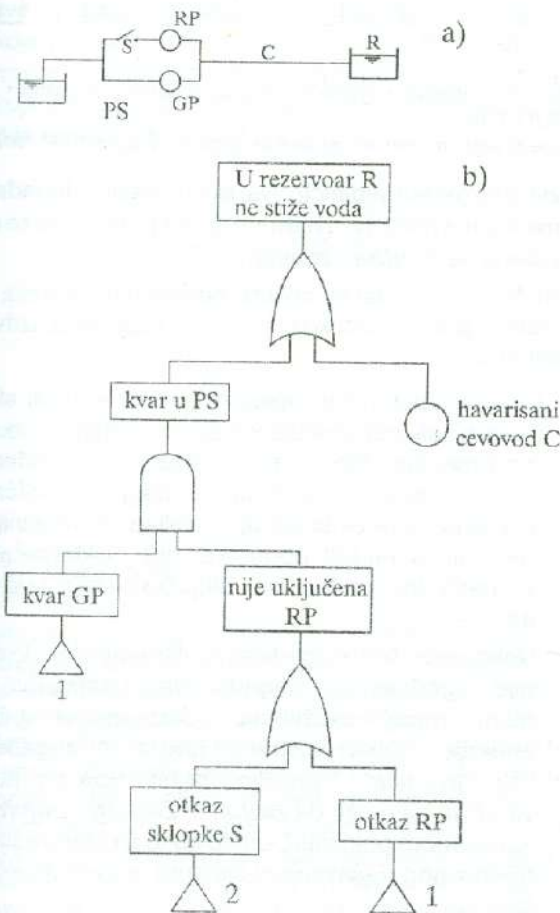
Kao primer, kvar u PS i BS može se slično principima pokazanim na sl. 5 razložiti na kvar glavne pumpe, sklopke i rezervne pumpe, kvar na cevovodu se mora razlagati, sa logikom "ILI" koja je karakteristična za serijsku vezu elemenata na kvarove deonica između pojedinih zatvarača koji služe za izolovanje tih deonica u vreme popravke kvara, itd. Kvarovi pumpnih agregata se dalje dekomponuju na kvarove elektromotornog i

pumpnog dela, pa sve do onih podsklopova čija se pouzdanost može kvantifikovati odgovarajućim funkcijama pouzdanosti $R(t)$, odnosno intenziteta otkaza $\lambda(t)$.

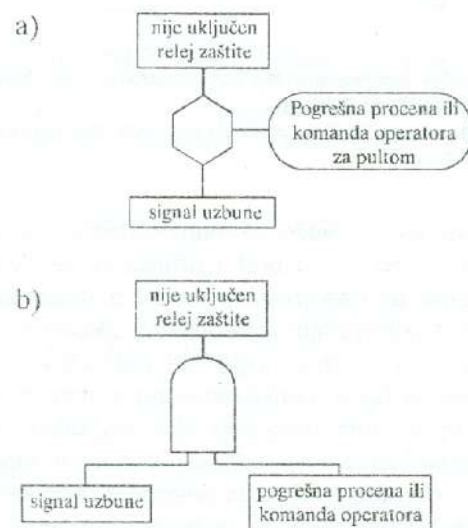
Na sl. 5 prikazan je deo stabla otkaza sa kombinovanom primenom logičkih simbola. Neka sistem za obezbeđivanje rashladne vode za HE čine pumpna stanica (PS) u odvodnoj vodi i cevovod (C) do rezervoara R (sl. 5a). U pumpnoj stanici se nalazi glavna pumpa (GP), koja je uvek u radu kada radi elektrana i rezervna istotipna pumpa (RP) koja je u hladnoj rezervi i koja se u rad uključuje automatskom sklopkom (S) čim stane glavna pumpa. Neka je konačni događaj (kvar) "u rezervoar R ne stiže rashladna voda". Taj se događaj može razložiti sa vezom "ILI" na elementarni primarni događaj "havarisan cevovod C" i događaj nižeg reda "kvar u pumpnoj stanici". U ovom drugom slučaju radi se o događajima koji su vezani logikom "I", i to baš po sledećem redosledu javljanja (uvek se ide s leva u

desno): najpre je nastao kvar na glavnoj pumpi, a onda se desio događaj još nižeg reda "nije uključena rezervna pumpa". U tom drugom slučaju moguća su dva događaja: ili je otkazala sklopka S, pa nije automatski uključila rezervnu pumpu nakon kvara glavne pumpe, ili je otkazala rezervna pumpa. Date su veze (1) i (2) za dalje dekomponovanje tih otkaza, pri čemu je veza (1) data za obe pumpe, jer je naglašeno da se radi o pumpama istog tipa.

Znak uslovljenosti događaja podrazumeva situaciju kada ulazni događaj (sa donje strane znaka) izaziva izlazni događaj samo pod uslovom da se desio i neki uslovni događaj. Na sl. 6a prikazan je takav slučaj. Taj znak se obično koristi radi boljeg objašnjenja geneze nastajanja nepoželjnih događaja, ali se pri formiranju stabla otkaza može zameniti i logičkim znakom "I" kao što je pokazano na sl. 6b, što je pogodnije, kada se kasnije uđe u kvantitativnu analizu korišćenjem Bulove algebre.

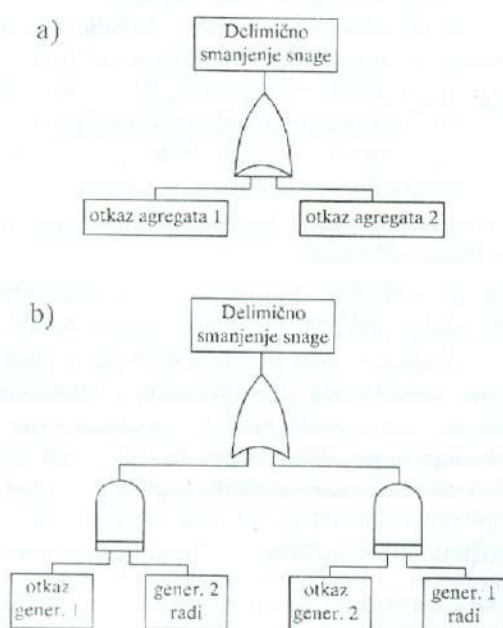


Sl. 5. - Deo stabla otkaza za sistem za obezbeđenje rashladne vode u HE
Part of fault tree graphic (cooling water system in HPP)



Sl. 6. - Načini prikaza uslovnih / povezanih događaja
Description of conditional events

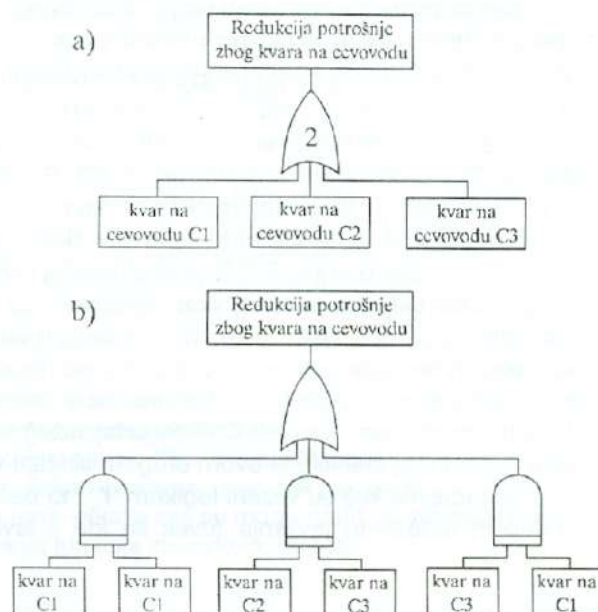
U hidrotehničkim sistemima, posebno u situacijama kada dva agregata u paralelnom radu ostvaruju neki efekat (npr. dva hidroagregata proizvode neku zahtevanu snagu) može se desiti da se neželjeni konačni događaj iskazuje ne potpunim prekidom rada sistema, već smanjenjem zahtevane izlazne efektivnosti (snage, pritiska u sistemu, protoka, itd.). U tom slučaju se u stablu otkaza koristi logički znak "isključujuće ILI" (sl. 7a), koji podrazumeva da se dešava samo jedan ulazni događaj. Kada se prelazi na kvantificiranje pouzdanosti primenom Bulove algebre taj znak se može zameniti odgovarajućom primenom znakova "I" i "ILI" (sl. 7b).



Sl. 7. - Upotreba znaka "isključujuće ILI" (a) i njegova zamena znacima "I" i "ILI" (b)
Using of sign "exclusively OR" (a) and its changing by signs "AND", "OR" (b)

Često se neki važni elementi sistema realizuju po principu "m od n", što podrazumeva da se izlazni događaj dešava ako se realizuje m od n događaja. Tada se koristi odgovarajući znak (sl. 8a) u kome se upisuje "m", kao broj ulaznih događaja koji uslovljavaju izlazni događaj. Na sl. 8 prikazan je deo stabla otkaza za slučaj da neko konzumno područje snabdeva tri cevovoda. Tek kad istovremeno otkazu dva od tri cevovoda nastupa događaj "redukcija potrošnje zbog kvara na cevovodu". Ta se situacija može dekomponovati kao na sl. 8b, primenom samo znakova za veze tipa "ILI" i "I", što omogućava lakše korišćenje Buloove algebre za kasniju analizu pouzdanosti.

Pri formiranju stabla otkaza nepotpuno sagledani (dekomponovani) događaji se označavaju rombom, kao na sl. 3. Kada se prelazi na njihovo dalje razlaganje na elementarnije događaje, taj se događaj predstavlja pravougaonikom, čime se eksplicitira namera da se taj događaj dalje razjasni i razloži na elementarnije otkaze. Takođe, kod šema uslovljenih događaja, ukoliko je uslovni događaj veoma visoke verovatnoće, nije nužno da se isti u šemi posebno izdvaja, a takođe, pri zameni te šeme logičkim simbolima "I" nije potrebno da se uvodi u stablo otkaza, pošto je njegova pojava gotovo sasvim



Sl. 8. - Upotreba znaka "m od n" (a) i zamena znacima "ILI" i "I" (b)
Use of sign "m from n" (a) and changing by signs "OR", "AND" (b)

izvesna (bliska jedinici). Na sličan način, događaj koji ima veoma malu verovatnoću nema potrebe da se uvodi u šemu sa logičkim znakom "ILI".

Pri formiranju stabla otkaza primenjuju se neka heuristička pravila, od kojih se kao najvažnija izdvajaju sledeća:

- Umesto apstraktnih opisa događaja koristiti ekvivalentne, ali konkretnije opise događaja / otkaza / poremećaja. Npr. umesto dosta neodređenog i širokog opisa događaja "Greška uklopničara u komandi" morala bi biti upotrebljena konkretnija formulacija o prirodi pogreške, npr. "Uklopničar nije primetio upozorenje i nije uključio sistem zaštite ...", itd.
- Dekomponovati događaje na elementarnije, konkretnije događaje. Npr. događaj "Nema napajanja energijom" treba razložiti na "Otkaz osnovnog izvora energije" i "Otkaz rezervnog izvora". Ili, događaj "Otkaz zatvarača ..." poželjno bi bilo razložiti na "Zatvarač se ne može da zatvori" i "Zatvarač zaglavljnjen u zatvorenom položaju", pošto su to sa stanovišta bezbednosnog dešavanja u sistemu sasvim drukčije situacije.
- Što tačnije sagledavati moguće uzroke događaja. Npr. događaj "Naglo zagrevanje trafoa" zameniti sa "Prekid hlađenja" i "Gubitak ulja".

- Povezivati inicirajuće događaje sa događajima kojima se definišu otkazi odgovarajućih sistema zaštite. Npr. događaj "Ispad svih agregata kanalske HE" mora se vezati i sa događajem "Otkaz sinhronog regulatora protoka" čija je namena da zaštiti kanalsku derivaciju upravo od posledica takvog događaja (pojava pozitivnog indirektnog talasa). Ili, događaj "Havarijski ispad agregata (hidroelektrane)" treba obavezno povezati sa događajem "Otkaz sinhronog regulatora pritiska", čija je uloga da smanji vodni udar u takvoj kritičnoj situaciji.
- Što tačnije locirati mesto otkaza. Nije dovoljno konkretno "Havarija cevovoda C", već "Havarija cevovoda na delu između zatvarača 7 i 8".
- Moraju se obuhvatiti događaji koji zajedno mogu izazvati drugi, mnogo ozbiljniji događaj. Npr. događaj "Pogrešno zatvaranje vodostanskog zatvarača" mora se razmatrati i sa događajem "Aeracioni ventil otkazao".
- Napokon, moraju se obuhvatiti svi relevantni otkazi u sve tri grupe, u skladu sa sistematizacijom otkaza, koja je prikazana pregledno i na sl. 9. Posebno se moraju pažljivo sagledati sve potencijalne greške koje se mogu javiti u komandi, koje izaziva čovek kao deo upravljačkog sistema.



Sl. 9. - Grupe otkaza
Groups of faults

Treba istaći da je graf stabla otkaza veoma pogodan za postepeno dograđivanje i postupnu detaljizaciju - onako kako se proširuje naše poznavanje pouzdanosti pojedinih elemenata sistema i pojedinih grana složenog sistema. Graf je najmanje potpun prilikom planiranja sistema i izbora dispozicije, ali je i tada izuzetno važan i koristan, jer prisiljava planera da intezivno traga za slabim mestima u svim dispozicijama sa gledišta pouzdanosti. Kasnije, u fazi eksploatacije, graf se znatno proširuje, posebno sa sve većim detaljizacijama grupa sekundarnih otkaza i otkaza zbog pogrešnih komandi. Tada u tu zadnju grupu otkaza treba unositi konkretne podatke o pouzdanosti ljudi koji sistemom upravljaju, o čemu će biti više reči u posebnom radu u narednom broju časopisa.

3. ODREĐIVANJE POUZDANOSTI SISTEMA DEFINISANIH STABLKOM OTKAZA

Radi kontinuiteta izlaganja, za one čitaoce koji nisu pratili ranije radove iz ove oblasti, definisaće se samo one bazne kategorije koje će se razmotriti u nastavku.

Funkcija pouzdanosti sistema $R(t)$ definiše se verovatnoćom da sistem neće otkazati u intervalu t , ako je T slučajna promenljiva koja označava vreme od početka rada do prvog otkaza

$$R(t) = P [T > t] \tag{1}$$

Funkcija nepouzdanosti $Q(t)$ definiše se u vidu verovatnoće

$$Q(t) = P [T < t] \tag{2}$$

Funkcija gustine otkaza $f(t)$ definiše se u obliku

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \tag{3}$$

sa vezom ovih funkcija

$$R(t) = 1 - Q(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \tag{4}$$

Funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$, koja se naziva i funkcijom opasnosti od kvara, definiše intenzitet otkaza u jedinici vremena, uz uslov da se otkaz do tada nije javio. Veza pouzdanosti i intenziteta otkaza definiše se relacijom

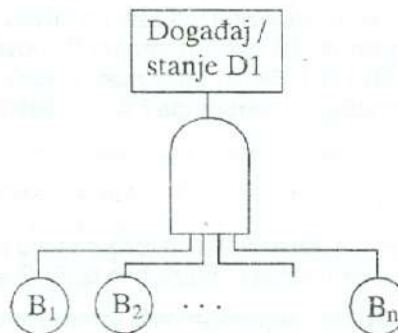
$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t)dt \right] \tag{5}$$

Kod eksponencijalne raspodele, kojom se najčešće može aproksimirati funkcija $\lambda(t)$, veza (5) svodi se na veoma često korišćenu relaciju

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \tag{6}$$

Srednje vreme rada između otkaza ($T_o \equiv MTBF$) je matematičko očekivanje slučajne promenljive t , što se konačno svodi na relaciju

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt \tag{7}$$



Sl. 10. - Segment stabla obrazovan logikom "I"
Fault tree formed by logical sign "AND"

Nakon ovog najsažetijeg podsećanja na bazne kategorije Teorije pouzdanosti, razmotrimo karakteristične strukture veza u stablu otkaza. Neka je neki događaj / stanje rezultat n početnih događaja B_1, \dots, B_n , koji su povezani logičkim znakom "I" (sl. 10). Ukoliko B_i označava događaj "i-ti element otkazao", onda možemo sa \bar{B}_i označiti suprotni događaj "i-ti element funkcioniše". Tada se, imajući u vidu logiku veza "I" (rezultujući događaj je rezultat delovanja svih događaja nižeg reda $\bar{B}_1, \dots, \bar{B}_n$) može pisati

$$R = P(\bar{B}_1 \cup \bar{B}_2 \cup \dots \cup \bar{B}_n) \quad (8)$$

Ta se relacija, imajući u vidu (4) može pisati u obliku

$$R = 1 - Q = 1 - P(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n) \quad (9)$$

Tada je u opštem slučaju

$$R = 1 - P(B_1) \cdot P(B_2 | B_1) \cdot P(B_3 | B_1, B_2) \dots P(B_n | B_1, \dots, B_{n-1}) \quad (10)$$

Ukoliko su otkazi elemenata / sklopova nezavisni, tada se uslovne verovatnoće pretvaraju u neuslovne, te važi

$$R = 1 - P(B_1) \cdot P(B_2) \dots P(B_n) = 1 - \prod_{i=1}^n P(B_i) \quad (11)$$

U skladu sa definicijom pouzdanosti / nepouzdanosti (jed. 1, 2) može se konačno pisati, za slučaj logičke veze "I" u strukturi stabla otkaza, da je pouzdanost takvog segmenta od n elemenata

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (12)$$

gde je $R_i(t)$ pouzdanost elemenata / podsklopa do koga je izvršeno dekomponovanje stabla otkaza složenog sistema.

Nakon određenih transformacija može se dobiti da je u slučaju logičke veze "I" funkcija intenziteta otkaza takve strukture

$$\Lambda_p(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i (z_i - 1) \right\} \left\{ \prod_{i=1}^n z_i - 1 \right\}^{-1} \quad (13)$$

gde je: $z_i = (1 - e^{-\lambda_i \cdot t})^{-1}$, $i = 1, \dots, n$

Primer. Koliki je intenzitet otkaza na nivou događaja prikazanog na sl. 10 ako su vezom "I" povezana dva događaja (B_1 i B_2), čiji su intenziteti $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,001 \text{ čas}^{-1}$, a razmatrano vreme rada $t = 100$ časova? Iz (13) se dobija

$$\Lambda_{D1}(t) = \frac{2\lambda}{z+1}; \quad z = (1 - e^{-\lambda \cdot t})^{-1} \therefore \Lambda_{D1} = 0,00018 \text{ čas}^{-1}$$

U tom slučaju bi pouzdanost sklopa sa tako povezanim podsklopovima u stablu otkaza bilo iz (6) $R = 0,98216$.

Razmotrimo ponašanje segmenta (grane) stabla otkaza koje je povezano logičkim znakom "ILI". Ukoliko je sa B_i označeno "i-ti element otkazao", a sa \bar{B}_i "i-ti element

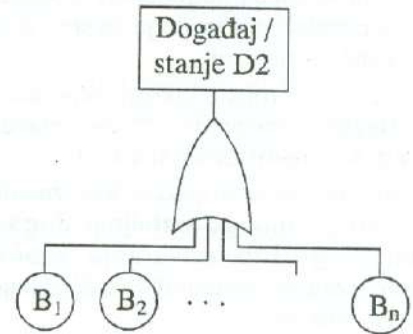
funkcioniše", tada se u najopštijem slučaju raspoloživost sistema $A(t)$ definiše verovatnoćom

$$A(t) = P(\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap \dots \cap \bar{B}_n) \quad (14)$$

a neraspoloživost $\bar{A}(t)$ verovatnoćom

$$\bar{A}(t) = P(B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_n) \quad (15)$$

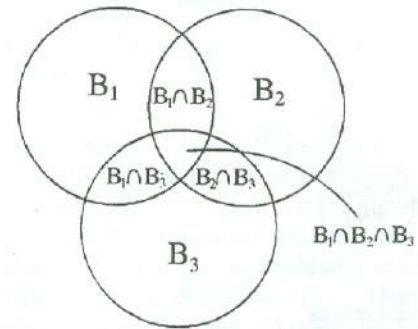
$$A(t) = P(\bar{B}_1) \cdot P(\bar{B}_2) \dots P(\bar{B}_n) = [1 - P(B_1)] [1 - P(B_2)] \dots [1 - P(B_n)] \quad (16)$$



Sl. 11. - Segment stabla obrazovan logičkim znakom "ILI"
Fault tree formed by logical sign "OR"

Za tri događaja to se može pregledno ilustrovati poznatim Veneovim dijagramom (sl. 12), te se može tada pisati da je neraspoloživost $\bar{A}(t)$

$$\bar{A}(t) = P(B_1 \cup B_2 \cup B_3) = P(B_1) + P(B_2) + P(B_3) - P(B_1) \cdot P(B_2) - P(B_2) \cdot P(B_3) - P(B_3) \cdot P(B_1) + P(B_1) \cdot P(B_2) \cdot P(B_3) \quad (17)$$



Sl. 12. - Veneov dijagram za tri događaja: $P(B_1 \cup B_2 \cup B_3)$
Ven's diagram for three events: $P(B_1 \cup B_2 \cup B_3)$

Pošto je proizvod dve ili više verovatnoća $P(B_i)$ najčešće vrlo mala veličina, sa vrlo dobrom aproksimacijom se može smatrati da je neraspoloživost razmatrane grane sistema

$$\bar{A}(t) \approx P(B_1) + P(\bar{B}_2) + P(B_3) \quad (18)$$

tako da je raspoloživost

$$A(t) = 1 - \bar{A}(t) \quad (19)$$

U ovom slučaju, pošto se još uvek ne razmatra pravka elementa, raspoloživost se može tretirati kao pouzdanost, te je iz (14)

$$R(t) = P(T_1 > t \cap T_2 > t \cap \dots \cap T_n > t) = P(T_1 > t) \cdot P(T_2 > t) \dots P(T_n > t) \quad (20)$$

odakle se dobija relacija za pouzdanost n elemenata povezanih logičkom vezom "ILI"

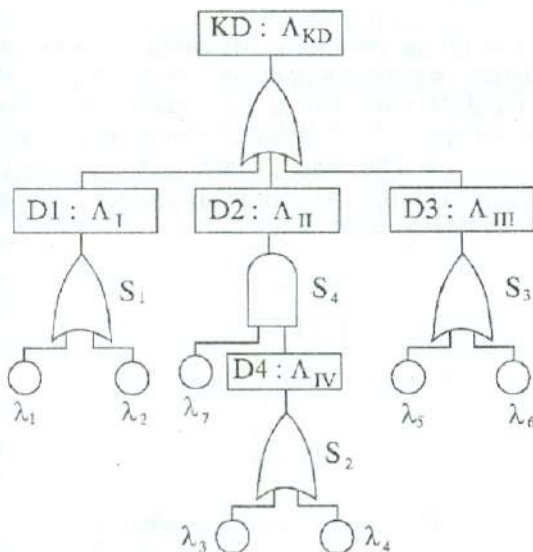
$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i \quad (21)$$

Tada je funkcija intenziteta otkaza tako povezane grane sistema

$$\Lambda_S(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (22)$$

dok se srednje vreme rada između otkaza (MTBF) može odrediti iz (7).

Za ilustraciju načina analize pouzdanosti sistema kao na sl. 13 prikazano je hipotetičko stablo otkaza, za čije su sve elemente - početne događaje do kojih je izvršena dekompozicija sistema, dati intenziteti otkaza λ_i . Naći intenzitet otkaza Λ_{KD} za konačni događaj i pouzdanost rada sistema tokom 100 sati, ako su $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,001 \text{ čas}^{-1}$, $\lambda_3 = \lambda_4 = 0,0015 \text{ čas}^{-1}$, $\lambda_5 = \lambda_6 = 0,00125 \text{ čas}^{-1}$, $\lambda_7 = 0,001 \text{ čas}^{-1}$.



SI. 13. - Hipotetičko stablo otkaza sa intenzitetima primarnih otkaza λ_i
Hypothetical fault tree with primary fault intensity λ_i

Podsklopovi S_1 , S_2 i S_3 povezani su sa gledišta otkaza po logici "ILI" (serijska veza) te su u sklopu sa jednačinom (22) intenziteti međudogađaja / otkaza

$$\begin{aligned} \Lambda_I &= \lambda_1 + \lambda_2 = 0,002 \text{ čas}^{-1} \\ \Lambda_{IV} &= \lambda_3 + \lambda_4 = 0,003 \text{ čas}^{-1} \\ \Lambda_{III} &= \lambda_5 + \lambda_6 = 0,0025 \text{ čas}^{-1} \end{aligned}$$

Sklop S_4 je vezan logikom "I", te se Λ_2 računa prema jednačini (13):

$$Z_7 = (1 - e^{-\lambda_7 \cdot 100})^{-1} = 10,508$$

$$Z_{IV} = (1 - e^{-\lambda_{IV} \cdot 100})^{-1} = 3,858$$

$$\Lambda_{II} = 0,00633 \text{ čas}^{-1}$$

Napokon, intenzitet otkaza konačnog događaja dobija se po vezi tipa "ILI", shodno jed. (22):

$$\Lambda_{KD} = \Lambda_I + \Lambda_{II} + \Lambda_{III} = 0,002 + 0,00633 + 0,003 = 0,00563 \text{ čas}^{-1}$$

Za eksponencijalnu raspodelu, shodno jednačini (6) to daje pouzdanost za 100 časova rada

$$R(100) = \exp[-\Lambda_{KD} \cdot 100] = \exp[-0,563] = 0,5695$$

U hidrotehničkim sistemima čest je slučaj paralelnih veza, sa logikom "m od n": sistem / sklop radi dok od n elemenata funkcioniše m (sl. 14). U tom slučaju, pošto se najčešće radi o istotipnim elementima, ako su verovatnoće (P) da su elementi ispravni:

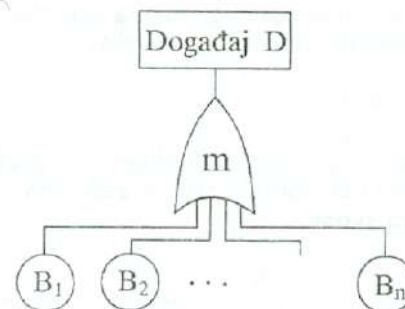
$$P(\bar{B}_1) = P(\bar{B}_2) = \dots = P(\bar{B}_n) = P \quad (23)$$

iz binomne raspodele se dobija pouzdanost takve šeme sistema

$$R = P(m \leq k \leq n) = \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} P^k (1 - P)^{n-k} \quad (24)$$

Za slučaj eksponencijalne raspodele funkcije λ , relacija za pouzdanost dobija oblik:

$$R_{m/n}(t) = \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} (e^{-\lambda t})^k \frac{(1 - e^{-\lambda t})^n}{(1 - e^{-\lambda t})^k} \quad (25)$$



SI. 14. - Veza tipa "m od n"
"m from n" connection type

Za dosta čest slučaj "2 od 3" jednačina (24) svodi se na

$$R_{2/3} = 3P^2 - 2P^3$$

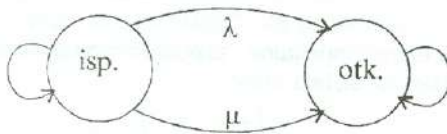
Primer. Tri istotipna uređaja, sa intenzitetom otkaza $\lambda = 0,001 \text{ čas}^{-1}$ vezana su paralelno, te su na stablu otkaza prikazani kao na sl. 14 ($n=3$, $m=2$). Kolika je pouzdanost takvog sklopa tokom 300 časova?

$$R_{2/3}(300) = 3e^{-2 \cdot 0,001 \cdot 300} - 2e^{-3 \cdot 0,001 \cdot 300} = 0,833 \quad (26)$$

Analiza stabla otkaza kada se razmatra i intenzitet popravke

Stabla otkaza se mogu veoma uspešno koristiti i za razmatranje profilaktičkih aktivnosti u složenom sistemu; tj. za razmatranje pouzdanosti sistema u uslovima popravke kvarova. To je jedna od ključnih aktivnosti održavanja sistema, koja se može uspešno pratiti preko stabla otkaza.

Uvedimo u razmatranje i veličinu koju ćemo nazvati intenzitet popravke μ , koja zajedno sa intenzitetom otkaza λ treba da bude ključna karakteristika "pasoša" nekog elementa (podsklopa, sklopa) u fazi eksploatacije sistema. Uvođenjem intenziteta popravke μ može se odrediti odgovarajuća funkcija raspoloživosti sistema u uslovima održavanja. **Funkcija raspoloživosti $A(t)$** definiše se kao verovatnoća da će sistem raditi u trenutku vremena t , za razliku od funkcije pouzdanosti $R(t)$ koja pokazuje da će sistem raditi bez otkaza u intervalu od 0 do t . Graf prelaza je prikazan na sl. 15: sa funkcijom otkaza λ sistem pređe iz ispravnog stanja (ISP) u stanje otkaza (OTK), a sa intenzitetom popravke μ vrati se u ispravno stanje.



Sl. 15. - Graf prelaza
Graf of transition

U slučaju eksponencijalnog zakona sigurnosti funkcija raspoloživosti $A(t)$ definiše se u obliku

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (27)$$

Za dovoljno duga vremena t funkcija raspoloživosti jednog elementa transformiše se u tzv. **stacionarni koeficijent raspoloživosti**:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (28)$$

Tada je stacionarni koeficijent nerasploživosti $\bar{A} = 1 - A$

$$\bar{A} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (29)$$

Kod elemenata povezanih logikom "ILI" mogućnost popravke se ne odražava na pouzdanost, već samo povećava raspoloživost sistema $A(t)$. Kod sistema povezanih logikom "I", mogućnost popravke povećava i pouzdanost $R(t)$ i raspoloživost $A(t)$.

Kod grane sistema od n elemenata čiji su događaji otkaza povezani logičkim znakom "ILI" nerasploživost sistema definiše se relacijom

$$\bar{A}_s = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (30)$$

Tada su srednji intenziteti otkaza Λ_{sm} i stacionarni intenziteti otkaza Λ_{ss}

$$\Lambda_{sm} = \sum_{i=1}^n \lambda_i ; \quad \Lambda_{ss} = (1 - \bar{A}_s) \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (31)$$

dok je srednji intenzitet popravke

$$\mu_{sm} = \Lambda_{ss} / \bar{A}_s \quad (32)$$

U strukturi stabla povezanog logičkim znakom "I", koja ima odlike paralelne veze odgovarajuće vrednosti su (indeks "p"):

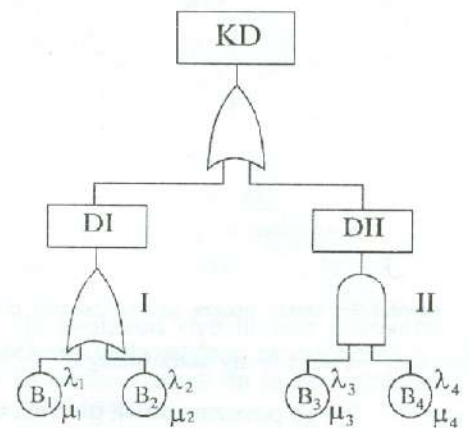
stacionarni koeficijent nerasploživosti

$$\bar{A}_p = \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \right) \quad (33)$$

srednji intenzitet otkaza Λ_{pm} , stacionarni intenzitet otkaza Λ_{ps} i srednji intenzitet popravke μ_{pm} :

$$\Lambda_{sm} = \frac{\Lambda_{ps}}{1 - \bar{A}_p} ; \quad \Lambda_{ps} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \bar{A}_p ; \quad \mu_{pm} = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (34)$$

Radi ilustracije analize odgovarajućih kategorija pouzdanosti sistema sa popravkama elemenata / sklopova, na sl. 16 prikazano je hipotetičko stablo otkaza, sa vezama tipa "ILI" i "I". Neka su intenziteti otkaza $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0,001 \text{ čas}^{-1}$, a intenzitet popravke $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0,05$, što odgovara vremenu popravke od 20 sati (MTBR = 20 sati).



Sl. 16. - Hipotetičko stablo otkaza popravljivog sistema
Hypothetical fault tree of repairable systems

Korišćenjem jednačina (29 ÷ 34) određuju se odgovarajući pokazatelji pouzdanosti ovog sistema.

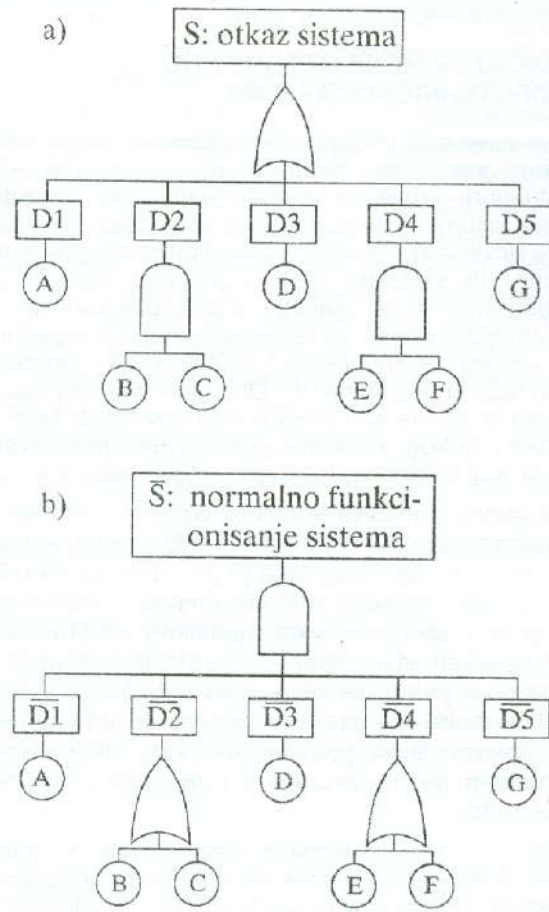
Iz (29) stacionarni koeficijent neraspoloživosti jednog elementa iznosi

$$\bar{A} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = 0,0196 \approx 0,02.$$

- Grana (I) stabla, povezana znakom "I": Iz (30) koeficijent neraspoloživosti $\bar{A}_{SI} \approx 0,04$. Iz (31, 32) srednji intenzitet otkaza Λ_{sm} , stacionarni intenzitet otkaza Λ_{ss} i srednji intenzitet popravke μ_{sm} ; $\Lambda_{smI} = 0,002 \text{ čas}^{-1}$; $\Lambda_{ssI} \approx 0,0019 \text{ čas}^{-1}$; $\mu_{smI} = 0,0475 \text{ čas}^{-1}$.
- Grana (II) stabla, povezana znakom "I": Iz (33) stacionarni koeficijent neraspoloživosti $\bar{A}_{pII} = 0,0004$. Iz (34) dobijaju se odgovarajući intenziteti otkaza i popravki: $\Lambda_{psII} = 0,00004 \text{ čas}^{-1}$; $\Lambda_{pmlI} = 0,000041 \text{ čas}^{-1}$; $\mu_{pmlI} = 0,01 \text{ čas}^{-1}$.
- Za konačni događaj (KD) analiza se zasniva na činjenici da su događaji DI i DII povezani vezom "I", te se koristi odgovarajuća relacija za kvantifikovanje pojedinih kategorija pouzdanosti konačnog događaja (jed. 30 ÷ 32), a ulazne veličine su sračunate veličine za DI i DII. Tako se dobijaju sledeće veličine za KD: Stacionarni koeficijent neraspoloživosti $\bar{A}_{SKD} = 0,0404$, te je odgovarajući koeficijent raspoloživosti čitavog sistema $A_{KD} = 1 - 0,0404 = 0,9596$; stacionarni intenzitet otkaza $\Lambda_{ssKD} = 0,00196 \text{ čas}^{-1}$; srednji intenzitet otkaza $\Lambda_{smKD} = 0,00204 \text{ čas}^{-1}$; srednji intenzitet popravke $\mu_{smKD} = 0,0485 \text{ čas}^{-1}$.

Dvojestvenost stabla: (1) stablo otkaza (*fault tree*) i (2) stablo ispravnih stanja (*success tree*). Analiza pouzdanosti sistema može se raditi na dva načina, na sasvim analogan način. Prvi način, koji je već prikazan, polazi od toga da je konačan događaj S - otkaz celog sistema, pa se u skladu sa tim svi događaji nižeg reda (D1, ...) dekomponuju kao kvarovi odgovarajućih elemenata / sklopova / podsklopova, sve do primarnih otkaza onih elemenata čije se opasnosti od kvara mogu kvantifikovati.

Drugi, analogni način analize je da se formira **stablo ispravnih stanja**. Tada se, jasno, svi otkazi i međuotkazi zamenjuju suprotnim događajima / stanjima (\bar{D} , ...) koji označavaju ispravno funkcionisanje. Npr. na sl. 3 događaj "u prostoriji nema svetla" zamenjuje se suprotnim događajem (\bar{D}) "osvetljenje normalno funkcionise", itd. Pri prelasku sa jednog na drugi način prikaza stabla svi znaci "I" zamenjuju se sa "II", i obratno, pa se u skladu sa tim menja i prikaz operacija dat Bulovom algebram. Na sl. 17 prikazana su stablo otkaza i stablo ispravnog funkcionisanja jednog sistema za obezbeđivanje rashladne vode (ovde se detaljnije ne prikazuje).



Sl. 17. - Stablo otkaza i analogno stablo normalnog rada istog sistema
Fault tree and analogous normal working tree of the same system

Za slučaj stabla otkaza (sl. 17a) određivanje verovatnoće konačnog događaja (S) vodi preko opšte relacije

$$S = A \cup (B \cap C) \cup D \cup (E \cap F) \cup G$$

Kada se znaju verovatnoće događaja A, ..., G, koji se definišu kao kvarovi određenih elemenata sistema, dobija se verovatnoća događaja S, koja predstavlja koeficijent neraspoloživosti sistema.

Moguća je, međutim, i analogna analiza preko **stabla ispravnih stanja**. Tada su događaji $\bar{A}, \bar{B}, \dots, \bar{G}$ definisani verovatnoćom ispravnog funkcionisanja. Treba zapaziti da su logički znaci "I" zamenjeni sa "II" i obratno pri prelasku sa jednog stabla na drugo. U ovom drugom slučaju opšta relacija za određivanje verovatnoće događaja \bar{S} ima oblik:

$$\bar{S} = \bar{A} \cap (\bar{B} \cup \bar{C}) \cap \bar{D} \cap (\bar{E} \cup \bar{F}) \cap \bar{G}$$

Verovatnoća događaja \bar{S} predstavlja *koeficijent raspoloživosti sistema*.

4. ZNAČAJ PRIMENE METODE KOD HIDROTEHNIČKIH SISTEMA

Upravo završena Vodoprivredna osnova Srbije, kao i Prostorni plan Srbije pokazuju da se vodoprivredna infrastruktura Srbije mora realizovati u vidu izuzetno složenih sistema, čije je građenje već započeto. Posebno će složene sa stanovišta pouzdanosti biti dve grupe regionalnih sistema: (1) regionalni sistemi za obezbeđivanje vode najvišeg kvaliteta (planirano je, već u početnoj dispoziciji, 18 takvih sistema); (2) regionalni rečni sistemi za korišćenje i zaštitu voda i uređenje vodnih režima, kojih ima 10. Obe vrste sistema tokom vremena će se sve više međusobno povezivati, tako da će nakon nekog vremena predstavljati jedinstvene sistema, koji će obuhvatati najveći deo Republike.

Takav razvoj postavlja izuzetno ozbiljne zadatke sa stanovišta pouzdanosti, koji se moraju rešiti još u fazi planiranja sistema. Zbog toga je potrebno da se još u fazi planiranja primene metode analize pouzdanosti, kako bi se u proces višekriterijumskog vrednovanja i rangiranja alternativa i izbora konfiguracija i parametara sistema kao jedan od obaveznih kriterijuma uvela i pouzdanost sistema, izražena odgovarajućim kvantificiranim pokazateljima: pouzdanošću $R(t)$, stacionarnim koeficijentom raspoloživosti $A(t)$, funkcijama intenziteta otkaza Λ , itd.

Za tu fazu planiranja veoma je pogodna prikazana metoda sa formiranjem stabla otkaza, uz odgovarajuću kvalitativnu i kvantitativnu analizu pouzdanosti čitavog sistema i pojedinih njegovih segmenata. Navedimo samo tri ključne prednosti tog pristupa.

- Metoda omogućava da se blagovremeno sagleda i shvati do najdubljih slojeva ponašanje sistema sa stanovišta pouzdanosti, te da se u skladu sa tim još u fazi koncipiranja dispozicija sistema uoče i tačno kvantificiraju slabe tačke sistema. Cilj te analize je da se izmenom i/ili dopunom konfiguracija sistema ojačaju slabe karike sistema i opšta pouzdanost funkcionisanja podigne do zahtevanog nivoa.
- Moguće je sagledati kako se kroz postepen fazni razvoj sistema, uz uvođenje novih elemenata nakon određenih faza, može postepeno povećavati pouzdanost u skladu sa povećanim zahtevima po tom kriterijumu vrednovanja sistema.
- Kroz proces planiranja sagledavaju se svi aspekti pouzdanosti koji će se javiti u fazi eksploatacije, što omogućava da se za njih nađu valjani odgovori još u fazi planiranja i realizacije sistema (ugradnja odgovarajuće oskultacione i monitoring opreme, ugradnja određenih bezbednostnih uređaja i sistema zaštite, softverska podrška, obuka kadrova za delovanje u kriznim situacijama, itd.).

Dosadašnje analize koje su radili autori ovog rada za neke dispozicije sistema pokazuju da će biti neophodne veoma ozbiljne mere kako bi se pouzdanost velikih regionalnih sistema sa veoma dugim magistralnim dovodima dovela na potreban visok nivo. To se mora raditi postupno, zbog čega je neophodno da se pouzdanost hidrotehničkih sistema tretira kao dinamička kategorija. To podrazumeva da se tokom razvoja jednog sistema omogućiti postepen rast pouzdanosti etapnom dogradnjom novih elemenata sistema i ugradnjom novih uređaja, što treba jasno sagledati i predvideti još tokom planiranja, kako bi se u dispozicijama objekata za to ostavile otvorene mogućnosti. Planer koji je analizom stabla otkaza uočio gde će se javiti problemi sa stanovišta pouzdanosti, predvideće mogućnost da se neki važniji čvorovi sistema mogu kasnije proširivati i adaptirati, u skladu sa povećanim zahtevima pouzdanosti (proširenje pumpnih stanica uvođenjem novog agregata u paralelnoj vezi, povećanje zapremine rezervoara, predviđanje mesta za realizaciju novih rezervoara u sistemu radi povećanja pouzdanosti sistema, itd.). Uočavaju se neke vrlo izgledne mogućnosti za povećanje pouzdanosti velikih regionalnih sistema i njeno fazno dovođenje na zahtevan izuzetno visok nivo.

- Predviđanje dispozicione mogućnosti da se zgrade pumpnih stanica, buster stanica, postrojenja za prečišćavanje vode - znači, vitalno važna postrojenja za ostvarivanje pouzdanosti funkcionisanja, kasnije prošire dodavanjem agregata u paralelnoj vezi (hladna rezerva sistema). U radu [8] je pokazano da se dodavanjem jednog rezervnog agregata u buster stanici pouzdanost tog čvora sistema podiže na vrlo visoku vrednost, veću od $R = 0,99$.
- Ugrađivanjem rezervoara duž magistralnog cevovoda, na ulazu u veća / šira konzumna područja značajno se povećava pouzdanost sistema. Dok traje detekcija i otklanjanje kvara potrošnja se obezbeđuje iz rezervoara. Na stablu otkaza ta dispozicija se prikazuje kao na sl. 18. Uvođenjem još jednog uslovnog otkaza prekid snabdevanja bi se desio samo ako bi istovremeno otkazao i cevovod i rezervoar, što je izuzetno mala uslovna verovatnoća, imajući u vidu povezanost ta dva događaja logičkim znakom "I".
- Predvideti mogućnost da se u kasnijim etapama pojedine prekidne komore na dovodu mogu dogradivati sa odgovarajućim rezervoarskim prostorom (rezervoar u fazama).
- Smanjenje intenziteta otkaza λ cevovoda kontrolom svakog pojedinačnog komada cevi na radnom stolu i posebna briga pri ugradnji, posebni pri postavljanju zaptivki.

- Ugradnja merne / monitoring opreme za daljinsko merenje pritiska i protoka u cevovodu i na ključnim objektima, kako bi se na bazi tih merenja "on line" i matematičkog modela tečenja u sistemu najbrže lokalizovala mesta havarija. Smisao ove mere je da se što je moguće više smanji vreme popravke kvara, čime se povećava raspoloživost sistema A , a u nizu dispozicija i njegova pouzdanost R .



S1. 18. - Delovanje rezervoara
Water storage influence

Napokon, treba istaći još jednu važnu činjenicu. U Teoriji sigurnosti je poznato da se pri optimizaciji pouzdanosti sistema javljaju dva različita kriterijuma: (1) optimalna pouzdanost za graditelja, koji je u obavezi da sistem popravlja samo u garantnom roku; (2) optimalna pouzdanost korisnika sistema, koji će se sa eventualnom nedovoljnom pouzdanošću sistema mučiti tokom čitave njegove eksploatacije. Analize jasno pokazuju da je optimalna sigurnost korisnika uvek veća, ponekad i znatno, od optimalne sigurnosti graditelja. Iz te činjenice treba da rezultira čitavo naše ponašanje tokom planiranja sistema: budući korisnik sistema mora odlučujuće da utiče na izbor dispozicionih elemenata sistema, koristeći pritom i metode analize pouzdanosti metodom stabla otkaza, koja je razmatrana u ovom radu.

ZAKLJUČCI

Vodoprivredni sistemi veoma ubrzano ulaze u sve više nivoje složenosti, dobijajući sve brojnije i značajnije funkcije od kojih zavisi elementarna bezbednost društva. U takvim okolnostima postaje apsolutno neophodno da se u planiranje i eksploataciju sistema uvedu adekvatne metode analize pouzdanosti svih hidrotehničkih sistema. Pouzdanost sistema mora biti detaljno ispitana još pri definisanju varijantnih rešenja, kako bi se u proces vrednovanja alternativa i izbora konfiguracija i parametara sistema kao jedan od obaveznih kriterijuma za optimalno rangiranje uveli i pokazatelji pouzdanosti. U radu je prikazana metoda formiranja stabla otkaza kao jedna od veoma efikasnih metoda za analizu pouzdanosti - kako u fazi planiranja, tako i tokom eksploatacije sistema. Metoda omogućava da se još pri planiranju sistema sagleda buduće ponašanje

sistema sa stanovišta pouzdanosti, da se uoče bezbednosno nedovoljno pouzdani delovi sistema, te da se na vreme, još pri projektovanju, nađu rešenja kojima se ojačavaju slabe karike složenog sistema i pouzdanost dovodi na zahtevan visok nivo. Primenom te metode može se iznaći i poželjan fazni razvoj sistema, kojim se sa povećanjem funkcionalnih zahteva koji se postavljaju sistemu postepeno povećava i pouzdanost sistema. U fazi eksploatacije sistema primena stabla otkaza omogućava najdublju bezbednosnu analizu ponašanja sistema sa ciljem da se blagovremeno obezbedi odgovarajuća dogradnja sistema, oskultaciona, monitoring i softverska podrška, kao i obuka kadrova za što bržu identifikaciju i otklanjanje otkaza i efikasno delovanje u kriznim situacijama.

Primena stabla otkaza, odnosno analognog stabla normalnog funkcionisanja sistema, omogućava da se podrobno kvantifikuju svi pokazatelji pouzdanosti (funkcije pouzdanosti, raspoloživosti, intenziteta otkaza, stacionarni koeficijenti raspoloživosti i neraspoločivosti) ne samo za sistem kao celinu, već i za sve njegove funkcionalne podsisteme, zaključno do elemenata, podsklopova i sklopova sistema do kojih se može izvršiti bezbednosno dekonponovanje sistema. Takođe, što je veoma značajno za eksploataciju sistema, može se jasno kvantifikovati koji se intenziteti popravki moraju postići da bi se raspoloživost i pouzdanost sistema održala na nekom zahtevanom nivou.

U radu se razmatraju i neke važnije grupe mera za povećanje pouzdanosti regionalnih sistema za obezbeđivanje vode najvišeg kvaliteta. Zaključuje se da se upravo sa bezbednosnog stanovišta takvi sistemi moraju planirati kao **adaptivni sistemi**, sa ostavljanjem otvorenih mogućnosti u dispozicijama da se dogradnjom određenih elemenata (npr. ugradnjom novog pumpnog agregata u paralelnoj vezi, dogradnjom novih rezervoara, itd) može povećati pouzdanost sistema. Korisnik budućeg sistema mora da bude uključen u proces analize pouzdanosti još u fazi planiranja, kako bi se proces optimizacije pouzdanosti, kao i izbor oskultacione / monitoring i druge opreme primerio stvarnim potrebama održavanja i eksploatacije sistema. Pri optimizaciji se mora odabrati pristup traženja **"optimalne pouzdanosti sa gledišta interesa korisnika sistema"**.

Analiza postojećih sistema pokazuju da oni nisu dovoljno osmotrivi sa gledišta zahteva funkcionalnosti i pouzdanosti. Savremene merne i informacione tehnologije omogućavaju da se čak i najsloženiji sistemi učine potpuno osmotrivim, sa daljinskim prenosom svih relevantnih informacija u upravljački centar. To omogućava, uz odgovarajuće matematičko modeliranje ponašanja sistema, da se svi fenomeni poremećaja funkcija sistema blagovremeno otkriju i lokalizuju. Time se vreme popravki smanjuje na minimum, što je od velike važnosti za poboljšanje performansi pouzdanosti hidrotehničkih sistema.

LITERATURA

- [1] Đorđević, B.: Cybernetics in Water Resources Management, WRP, Fort Collins, 1993.
- [2] Ušakov, I.A. (Ed.): Nadežnost' tehničkih sistem, R&S, Moskva, 1985.
- [3] Abramov N, N.: Nadežnost' sistem vodosadbženija, Strojizdat, Moskva, 1979.
- [4] Barlow R.E. i dr.: Reliability and Fault Tree Analysis, SIAM, Philadelphia, 1975
- [5] Henley E.J. and H. Kumamoto: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice Hall, N.J. 1983.
- [6] Đorđević, B.: Vodoprivredni sistemi, Naučna knjiga, Beograd, 1991.
- [7] Božinović, M.: O uvođenju metoda pouzdanosti u projektovanje rečnih regulacionih građevina; Vodoprivreda, 153-155 / 1995.
- [8] Đorđević, B. i T. Milanović: Sigurnost složenih vodoprivrednih sistema i mogućnost njene alokacije u fazi planiranja, Vodoprivreda, 153-155 / 1995.
- [9] Green A.E. et al. Reliability Technology, Wiley-Interscience, London, 1982.

APPLICATION OF THE FAULT TREE TECHNIQUE TO RELIABILITY ANALYSIS OF WATER RESOURCES SYSTEMS

by

Branislav DJORDJEVIĆ, Ph.D. and Tina MILANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

This article deals with application of the fault tree concepts and technique to reliability analysis of water resources systems. Many aspects of the probabilistic effectiveness of water resources system (Operational readiness, assignment reliability, functional suitability) were analysed in Introduction. This three categories of the probabilistic effectiveness can be defined shortly by posing the following three questions: (1) Is water resources system ready for operation, when it is expected to function? (2) Will the system function normally for a given time period, if the answer to the first question was positive? (3) Can the system fulfil the required goals if the answer to the first two questions were positive? Concepts and techniques of fault tree analysis, and basic principles and a formal methodology for fault tree graphics construction of WRS is shown in chapter two. Chapter three systematise certain principal categories of reliability theory, used in WRS planning: reliability

and unreliability functions, failure density function, failure - rate function λ , mean time between failures (MTBF), reliability and availability of restorable systems, repair rate μ , stationary coefficient of availability A, etc.

Methods of the utilisation of fault tree graphics (Boolean indicated cut sets) for quantification of the reliability functions, failure - rate functions, MTBF, availability functions are presented. Some interesting example of fault tree construction and calculation of reliability of complex WRS is considered.

Key words: fault tree, water resources systems, reliability, failure - rate function, availability of restorable systems, repair rate, Boolean algebra, serial connections, parallel connection, success tree.

Redigovano 27.02.1996.