

KATEGORIJE POUZDANOSTI KOJE SE MORAJU PROVERAVATI TOKOM PLANIRANJA I KORIŠĆENJA VODOPRIVREDNIH SISTEMA

Branislav ĐORĐEVIĆ i Tina DAŠIĆ
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

*Nimia fiducia calamitati solet esse.
(Preveliko poverenje obično dovede do nevolje)
Quod natura negat, nemo reddere potest.
(Ono što Priroda uskrati, niko ne može dati).
(Poznate latinske izreke)*

REZIME

Sa stanovišta pouzdanosti – ključnog pokazatelja probabilističke efektivnosti sistema - vodoprivredni sistemi (VS) spadaju u klasu najzahtevnijih sistema, sa brojnim kategorijama pouzdanosti koje treba analizirati i verifikovati tokom projektovanja, ali koje treba ažurno pratiti i tokom eksploatacije sistema. Pri planiranju, a naročito pri eksploataciji sistema neke od tih važnih provera pouzdanosti ne obavljaju se ažurno i celovito, zbog čega i nastupaju neki incidentni događaji (poplave, havarijski događaji na planu kvaliteta voda, itd.) koji se, najčešće, podvedu pod 'višu silu'. A to je loše, jer se ne izvuku zaključci za neophodna povećanja odgovarajuće kategorije pouzdanosti. Cilj članka je da sistematizuju kategorije pouzdanosti koje se moraju analizirati, verifikovati i ažurno pratiti tokom korišćenja VS. Ključne kategorije pouzdanosti koje se ovde razmatraju su: • obezbeđenost isporuke vode potrošačima, • pouzdanost objekata i sistema, • operativna gotovost sistema, • konstrukcijska i hidraulička sigurnost objekata / sistema, • hidrološka pouzdanost sistema, • pouzdanost ljudi koji upravljaju sistemima, • pogodnost sistema sa stanovišta tekućeg i investicionog održavanja, • pouzdanost sistema za osmatranje i praćenje objekata, • pouzdanost sa gledišta bezbednosti iz okruženja i prema okruženju VS.

U članku se razmatraju ključni aspekti navedenih kategorija pouzdanosti, mogućnosti njihovog ugrađivanja u projektna rešenja – od izbora konfiguracija sistema i dimenzionisanja objekata, izbora prateće opreme od koje zavisi pouzdanost VS, do kasnijih ažurnih provera pouzdanosti tokom eksploatacije sistema. Te provere su neophodne (a

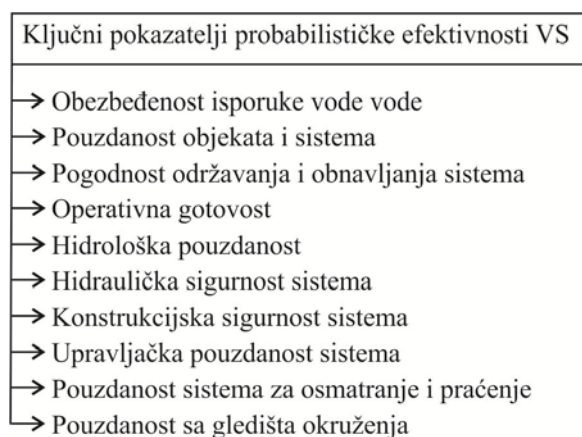
često se prenebregavaju), jer je pouzdanost vodoprivrednih sistema dinamička kategorija, koja se menja tokom vremena, pa se mora proveravati i dovoditi na neophodan nivo.

Ključne reči: vodoprivredni sistemi, pouzdanost i raspoloživost sistema, intenzitet otkaza, intenzitet popravke, popravljivi sistemi, pouzdanost čoveka

1. UVOD

Performanse vodoprivrednih sistema, kao važan vid njihove radne i zaštitne efektivnosti, mogu se sistematizovati u četiri osnovne kategorije [6]: (1) **kvantitativna efektivnost**, koja iskazuje sposobnost sistema da realizuje ciljeve koji se iskazuju količinskim pokazateljima: količine vode koja se isporučuje potrošačima, snaga i energija hidroelektrana, pokazatelji kvaliteta vode iskazani merljivim veličinama (sadržaj kiseonika i vodi, BPK, HPK, pH, itd.), merljivi pokazatelji kapaciteta plovnog puta (gabariti, tonaža), veličine ekoloških protoka koji se obezbeđuju u rekama, itd., (2) **probabilistička efektivnost**, koja radne i zaštitne performanse sistema iskazuje preko verovatnoća: verovatnoća potpune isporuke traženih količina vode (obezbeđenost isporuke vode), stvarni stepen ostvarene zaštite od velikih voda, pouzdanost sistema u izvršavanju postavljenih ciljeva, operativna raspoloživost sistema, itd., (3) **ekonomska efektivnost** - ekonomske performanse sistema koje se iskazuju ekonomskim pokazateljima: specifično koštanje isporučene vode (din/m^3), energetske pokazatelji (din/kW , din/kWh), profitna stopa, stopa efektivnosti, pokazatelji B/C, i (B-

C), specifična ulaganja u melioracione sisteme (din/ha), itd., **vremenska efektivnost** - radna svojstva VS koja se iskazuju vremenskim kategorijama: vreme (sati, dani) za neku interventnu operaciju poboljšanja režima malih ili velikih voda, vreme realizacije neke regulacione intervencije hidroelektrane, vreme mogućeg perioda plovidbe, itd. Na slici 1 prikazani su ključni pokazatelji probabilističke efektivnosti, oni koji moraju da budu proveravani tokom planiranja i korišćenja sistema.



Slika 1. Kategorije probabilističke efektivnosti VS

Analiza prakse planiranja i prezentiranja javnosti vodoprivrednih sistema u svim zemljama na ovom prostoru – ukazuje na dva ozbiljna propusta. (a) Pri prezentaciji javnosti projekata isti se najčešće sasvim pogrešno nazove samo po jednom od primarnih korisnika (npr. HE xyz), a ne definiše se kao integralni razvojni projekat sa čitavom složenom ciljnom strukturom sistema, koja treba da obuhvati sve proizvodne i zaštitne funkcije VS, ali i sve druge socijalne, ekonomsko-razvojne, urbane, ekološke, saobraćajne i druge ciljeve koji se ostvaruju izgradnjom planiranog sistema. (b) U projektima i Studijama opravdanosti ne specificiraju se i ne vrednuju se sve četiri navedene kategorije efektivnosti sistema, koji su veoma bitan 'pasoš' njihovih radnih i zaštitnih performansi, na osnovu kojih se donosi zaključak o opravdanosti njihovog građenja. Posebno se zapostavlja kategorija *probabilističke efektivnosti*. Analize obezbeđenost isporuke vode u projektima koji se rade u ozbiljnim projektnim kućama sada se obavljaju znatno detaljnije, često uz korišćenje dva pristupa, sa istorijskim i generisanim, sintetičkim serijama, tako da se ta važna performansa VS, posebno akumulacija kao izvorišta, određuje na prihvatljiv

način. Međutim, izostaje blagovremena, apriorna analiza ostalih bitnih pokazatelja probabilističke efektivnosti, koje treba razmatrati još tokom razrade dispozicija sistema: pouzdanost sistema – posebno bitna kod sistema sa prenosom vode na velika rastojanja sa dugim cevovodima i pumpnim stanicama, operativna gotovost sistema, pouzdanost mrežnih sistema složenih konfiguracija, upravljačka pouzdanost, itd. Praktično nema projekta u kome se apriorno, još prilikom izbora konfiguracije sistema i prateće opreme, određuju i analiziraju funkcije intenziteta otkaza (λ) pojedinih elemenata sistema i sistema kao celine (Λ), kao i odgovarajuće analize neophodnog intenziteta popravke (μ), sa sagledavanjem dispozicionih aspekata tog pitanja, jer dispozicija treba da omogući nesmetano održavanje i obnavljanje sistema. Ta manjkavost se prenosi i na druge dve kategorije efektivnosti: (a) ekonomske performanse sistema nisu potpune, jer se ne znaju štete zbog ispada iz funkcija sistema i troškovi održavanja, (b) vremenska efektivnost nije ni izdaleka potpuna ukoliko nisu utvrđeni pokazatelji operativne gotovosti sistema, ispadi iz funkcije, itd.

Izostanak tih analiza dovodi i do manjkavosti u planiranju odgovarajuće merne opreme koja je potrebna da se kasnije tokom eksploatacije obezbedi brza detekcija i lociranje kvara i njegova popravka u skladu sa veličinom intenziteta popravke (μ) koja je prihvatljiva sa gledišta normalnog funkcionisanja sistema.

Sa povezivanjem ranijih izolovanih sistema u sve veće celine – regionalne sisteme i integralne rečne sisteme - zahtevi za detaljnim analizama svih kategorija pouzdanosti dobijaju na značajnosti i postaju sve obavezni. Ti aspekti pouzdanosti se moraju ugraditi u sve faze projektovanja i eksploatacije VS – od studija sistema i generalnih projekata, kada utiču na odluku o konfiguraciji sistema i parametrima objekata (zapremine akumulacija, dispozicije prenosnih sistema i prateće opreme, npr. pumpnih stanica, rešenja mašinskih zgrada zbog pogodnosti održavanja), preko idejnih projekata, kada se moraju naći rešenja i za odgovarajuće merne sisteme kojima se 'on line' može da prati ponašanje sistema, pa do korišćenja sistema, tokom koga se povremeno moraju preispitivati razne kategorije pouzdanosti (hidrološke, hidrauličke, pouzdanosti objekata, operativne gotovosti, itd.).

Cilj ovog razmatranja je da sistematizuje u jedinstvenu metodološku celinu sve vidove pouzdanosti koji su

bitni za odluke tokom čitavog procesa planiranja i eksploatacije sistema i ocene probabilističke efektivnosti sistema, kao jedne od četiri ključne grupe performansi sistema. Vrlo važan praktičan korak tog razmatranja je da se zahtevi za tim analizama unose u projektne zadatke, jer je do sada taj aspekt bio nedopustivo zapostavljan i od investitora i od planera objekata i sistema.

2. POUZDANOSTI - POKAZATELJI PROBABILISTIČKE EFEKTIVNOSTI SISTEMA

Članak je metodološkog karaktera: razmatraju se samo ključna polazišta za analize pojedinih pokazatelja pouzdanosti. Na slici 1 i dalje razmatraju se samo oni pokazatelji koji se moraju analizirati pri izboru konfiguracija, dispozicija i projektnih rešenja, posebno pri razmatranju *Prethodne studije opravdanosti* i *Studije opravdanosti*, koje su obavezne u procesu donošenja investicionih odluka. Tu su i pokazatelji koji se moraju preispitivati i nakon pojedinih faza korišćenja vodoprivrednih sistema.

2.1. Obezbeđenost isporuke vode potrošačima

Obezbeđenost isporuke vode (P_{ob}) je ključna performansa sistema, koja se mora detaljno razmotriti pri planiranju sistema sa akumulacijama, kao i pri razmatranju izvorišta podzemnih voda. Ta analiza je neophodna zbog činjenice da savremeni regionalni sistemi za snabdevanje naselja i savremenih industrija zahtevaju veoma visoke obezbeđenosti (preko 97%) isporuke vode potrošačima bez redukcije. Zato je neophodno da se pri izboru izvorišta i dimenzionisanju akumulacija i izvorišta podzemnih voda odredi kakve se pouzdanosti isporuke vode njima mogu ostvariti. Ako se ta obezbeđenost ne odredi i ne unese u projekat, ne zna se ključna preformansa sistema - moguća isporuka vode. U projektima izvorišta podzemnih voda takve analize se ne rade, pa su realne obezbeđenosti takvih sistema veoma niske, a često se kreću samo oko 50% (jer se računa sa prosečnim kapacitetom izvorišta), pa do oko 70%. Kada se takva izvorišta kasnije upoređuju po ekonomskim performansama sa akumulacijama kao izvorištima površinskih voda, čija je obezbeđenost reda 95-98%, upoređuju se potpuno neuporedivi sistemi, na štetu akumulacija.

Obezbeđenost isporuke vode (P_{ob}) se definiše verovatnoćom isporuke zahtevane količine vode iz akumulacije, ili zahvatanje iz izvorišta podzemnih voda. Može se definisati na dva načina: kao *vremenska*

obezbeđenost (P_v), i kao *zapreminska obezbeđenost* (P_z):

$$P_v = (T_{pp}/T_u) \times 100\%, P_z = (W_{is}/W_{tr}) \times 100\% \quad (1)$$

Ovde su: T_{pp} - suma vremena kada se u potpunosti isporučuje tražena količina vode, T_u - ukupno razmatrano vreme, W_{is} - isporučena voda potrošačima, W_{tr} - tražena količina vode. Obimi redukcije se moraju ograničiti, jer nije dopustivo da veliki regionalni sistemi ostanu bez vode čak i kratko vreme. Jedan od mogućih kriterijuma je da i pri neizbežnoj redukciji potrošnje sistem mora da obezbedi oko 70% od tražene količine vode (koeficijent dopustive redukcije potrošnje $\omega = 0,7$). Pri vrednovanju isporuke vode (ISP) iz akumulacije ili iz izvorišta podzemnih voda treba simultano razmatrati nekoliko veličina: • količina vode koja se isporučuje (Q_{is}), • obezbeđenosti isporuke P_v i P_z , • koeficijent dopustive redukcije ω , tako da se ta performansa definiše četvorkom

$$ISP: \langle Q_{is}, P_v, P_z, \omega \rangle \quad (2)$$

Pošto je vremenska obezbeđenost strožiji kriterijum, često samo ona uzima u razmatranje, tako da se jed. (2) pretvara u trojku $\langle Q_{is}, P, \omega \rangle$, gde je $P = P_v = P_{ob}$ - vremenska obezbeđenost, koja se tada ne označava posebnim indeksom.

Najpouzdanija izvorišta sa stanovišta obezbeđenosti isporuke su akumulacije sa godišnjim regulisanjem. Za njih je obavezujuća analiza zavisnosti: *<korisna zapremina akumulacije - isporuka vode - obezbeđenost te isporuke>*.

Analiza obezbeđenosti ukoliko se radi samo sa postojećim hidrološkim nizom - nije dovoljno pouzdana, jer se mogu pojaviti još nepovoljnija nagomilavanja vodnih i sušnih godina u odnosu na ona koja su se javila u prošlosti. Analize treba raditi sa velikim brojem simuliranih sintetičkih serija (npr. 100 serija dužine 100 godina) koje zadovoljavaju sledeće uslove: (a) simulirane serije treba da zadrže iste stohastičke osobenosti kao realizovana serija, iskazane koeficijentima autokorelacije godišnjih protoka r , koeficijentima varijacije C_v i asimetrije C_s , (b) treba da zadrže stohastičke osobenosti mesečnih protoka, definisane istim pokazateljima. Modeli te vrste, na bazi složenih markovskih lanaca, razmatraju se u monografiji [7]. Posebno se uspešnom za modeliranje pokazala modifikovana metoda fragmenata koja zadovoljava ta oba uslova, a vrlo je operativna za generisanje mnoštva serija velikih dužina.

Obezbeđenost isporuke vode treba da bude analizirana još u generalnom projektu, sa sledećim zahtevima.

- Analizirati vremensku i zapreminsku obezbeđenost isporuke vode iz akumulacije (ukoliko je njena korisna zapremina unapred definisana) za sintetičke serije protoka, koje moraju da zadovolje sledeća dva uslova: (a) simulirane serije treba da imaju iste stohastičke osobenosti kao i osmotren niz godišnjih protoka, iskazane koeficijentima autokorelacije godišnjih protoka r , koeficijentima varijacije C_v i asimetrije C_s , (b) sintetičke serije treba da zadrže iste stohastičke osobenosti mesečnih protoka.
- Za slučaj dimenzionisnja akumulacije treba sa dugim sintetičkim serijama naći vezu: <korisna zapremina akumulacije - isporuka vode iz nje - obezbeđenosti po vremenu i zapremini>. Obezbeđenost varirati u opsegu od 80% do 97%.
- Dimenzionisati akumulaciju na vremensku i zapreminsku obezbeđenost ne manju od 97%, pod sledećim uslovima: da pri redukciji vode isporuka ne bude manja od 70% od tražene količine vode u tom mesecu. Raditi sa sintetičkim serijama protoka, koje moraju da zadovolje navedena dva uslova.
- U slučaju izvorišta podzemnih voda treba, takođe, odrediti obezbeđenost isporuke vode, računajući sa verovatnoćom izdašnosti izvorišta koja zavisi od vodnosti godine.

2.2. Pouzdanost objekata na otkaze

Pouzdanost sistema za izvršenje planiranih funkcija definiše se verovatnoćom da sistem neće otkazati tokom izvršenja zadatka, ukoliko je na početku radio normalno. Po uzroku nastanka otkazi mogu biti: (a) *Primarni otkazi* elemenata, do kojih dolazi u normalnim uslovima rada, a koji nastaju zbog starenja elemenata uređaja, a ne zbog nekih vanrednih događaja u okruženju. (b) *Sekundarni otkazi*, koji nastaju zbog nekih uticaja sa strane ili zbog rada u uslovima preopterećenja. (c) *Otkazi zbog pogrešnog upravljanja*, kada do otkaza dolazi zbog pogrešne komande kojom je uređaj stavljen u neki neplaniran režim rada. Ovde će se razmatrati pouzdanost sistema zbog primarnih otkaza, dok se otkazi zbog greške čoveka ili delovanja okruženja razmatraju u posebnim tačkama.

Pouzdanost elemenata se definiše pokazateljima iz Teorije pouzdanosti [6], a ključni pokazatelji su:

- funkcija pouzdanosti $R(t) = P[T > t]$,
- funkcija gustine otkaza $f(t) = dQ(t) / dt$,

- funkcija intenziteta otkaza (funkcija opasnosti od kvara) $\lambda(t) = f(t) / R(t)$,
- srednje vreme rada bez otkaza T_0 .

Pouzdanost sistema. Kod složenih sistema, sa nizom uređaja / elemenata, pouzdanost zavisi od načina povezivanja elemenata u funkcionalnu celinu: serijske, paralelne ili mrežne strukture (detaljnije u [3], [6]). Serijska veza je sa stanovišta pouzdanosti nepovoljna, ali se u vodoprivredi ne može izbeći. Primer je cevovod čije se deonice određene dužine (često na 1 km dužine) mogu smatrati elementima sistema koji su povezani serijski. Kvar na bilo kojoj deonici dovodi do ispada čitavog cevovoda. Pouzdanost takvih delova sistema može se povećavati drugim dispozicionim elementima: ugradnjom usputnih rezervoara, kako bi se i pored kvara na jednoj deonici mogla da nastavi funkcija na neoštećenim delovima, ugradnjom više zatvarača, kako bi se što brže izolovala oštećena deonica i ubrazala popravka kvara i sl. Paralelna veza je sa gledišta pouzdanosti znatno bolja, jer pri ispadu jednog elementa sistem nastavlja da funkcioniše, delimično ili u potpunosti, u zavisnosti od tipa paralelne veze kojom su elementi povezani.

U složenim sistemima niz elemenata je povezan u veći sklop (sistem) raznim kombinacijama veza. Potrebno je da se još pri izboru dispozicije sistema analizira pouzdanost takvih složenih sistema. Jedna od mogućnosti je da se koristi metoda grafa *stabla otkaza* (*fault tree*), ili, imajući u vidu dvojtvenost stabla, *stabla ispravnosti* (*success tree*). Ovde se ta metoda neće razmatrati, jer je prikazana u radu [9].

Pouzdanost mrežnih sistema pod pritiskom. Mrežni sistemi pod pritiskom (kao što su npr. vodovodni sistemi) imaju jednu specifičnost koja ih, sa gledišta pouzdanosti, čini složenijim od drugih tehničkih sistema. Da bi takvi sistemi uspešno obavljali svoju funkciju moraju simultano da budu zadovoljene dve pouzdanosti: mehanička pouzdanost cevovoda i hidraulička pouzdanost sistema (koja se zove pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara) [3]. To znači, da bi u nekom potrošačkom čvoru bile zadovoljene potrebe, u pogledu zahtevanih količina vode i zahtevanog pritiska, neophodno je da taj čvor bude fizički povezan sa nekim izvorišnim čvorom (rezervoar, izvorište), kao i da pritisak u čvoru bude veći od nekog minimalnog zahtevanog pritiska. Mehanička pouzdanost i pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara kombinuju se u ukupnu mehaničko - hidrauličku pouzdanost sistema, koja

predstavlja verovatnoću da će u određenom čvoru distributivnog sistema biti obezbeđena potrebna količina vode zahtevanog pritiska, pod uslovom da u izvorišnim čvorovima postoje dovoljne količine vode.

Ukupnu pouzdanost sistema potrebno je određivati i prilikom projektovanju novih sistema, kako bi se taj aspekt pouzdanosti apriorno ugradio u izbor konfiguracije sistema, ali i u slučaju sistema u eksploataciji, kako bi se proverila pouzdanost mrežnog sistema i po potrebi dovela na neophodan nivo dodatnim elementima (npr. zatvaranjem prstenastih mreža ili izradom dodatnih veza).

Za složene distributivne sisteme pod pritiskom u razmatranje se uvode dve mere pouzdanosti:

- pouzdanost mreže (sistema) - verovatnoća da će svaki potrošački čvor ispuniti zahtevanu funkciju u određenom vremenskom trenutku, i
- pouzdanost čvora - verovatnoća da će određeni potrošački čvor obavljati postavljeni zadatak u određenom vremenskom trenutku.

Za *bezbednosno osetljive sisteme* može se apriorno (još u ciljnoj strukturi) postaviti zahtev da pouzdanost treba da bude veća od neke zahtevana pouzdanosti R_z : $R \geq R_z$. U tom slučaju se postavlja problem *alokacije pouzdanosti*. Korišćenjem metode stabla otkaza razmatraju se pouzdanosti podsistema, podsklopova i sklopova, ojačavaju se paralelnim vezama najslabije 'karike' tog složenog sistema, dok se ne ostvari zahtevana pouzdanost. To je aktivnost koju je neophodno obaviti još tokom Generalnog projekta, jer takva analiza po pravilu utiče i na dispoziciju sistema, i zbog toga je treba razmotriti za sve varijante koje su ušle u uži izbor za vrednovanje pre konačnog izbora. Ta analiza omogućava poboljšavanja dispozicije sistema kojima se pouzdanost podiže na zahtevani nivo: uvođenje dodatnih pumpnih agregata za obezbeđenje pouzdanosti, pretvaranje prekidnih komora u rezervoare radi omogućavanja isključenja dela cevovoda radi popravke bez prekida u snabdevanju potrošača, predviđanje odgovarajućih zatvaračnica radi olakšavanja popravki, 'bajpasiranje' nekih bezbednosno delikatnih deonica dovodnih sistema radi povećanja pouzdanosti, predviđanje kompenzacionih basena radi obezbeđenja garantovanih ekoloških protoka i tokom popravki delova sistema, itd. Pošto je pouzdanost dinamička kategorija, koja se može menjati (najčešće se zahteva povećanje pouzdanosti) treba predvideti dispozicione mogućnosti za tu svrhu. Poželjno je odabrati takvu dispoziciju

mašinske zgrade pumpne ili buster stanice koja ne sprečava da se kasnije proširi, kako bi se omogućilo ugrađivanje dodatnog agregata, koji će kao hladna rezerva sistema u paralelnoj vezi povećati pouzdanost sistema, itd.

Tokom izrade Glavnog projekta, posebno pri izboru opreme, potrebne su detaljnije analize pouzdanosti, sa analizama intenziteta otkaza (λ_i) svih vitalnih elemenata (i) koji se mogu izdvojiti kao funkcionalne celine (pumpne stanice, buster stanice, cevovodi) i intenziteta otkaza celog sistema (Λ), a razmatraju se i ostali pokazatelji pouzdanosti, pre svega određivanje srednjeg vremena rada između otkaza (MTBF).

2.3. Pogodnost održavanja i obnavljanja

Održavanje sistema. Vodoprivredni sistemi su zahtevni u pogledu održavanja i obnavljanja. Zbog toga se taj vid probabilističke efektivnosti mora analizirati još pri projektovanju, kako bi se dispozicija i parametri sistema usaglasili sa tim zahtevima. Dispozicija treba da omogući da se sistem održava u operativnom stanju putem *preventivnog održavanja*, i da se ponovo vrati u radno stanje putem *korektivnog održavanja*. Upozoravajuće je da planeri i investitori često tu izuzetno važnu prerformansu sistema uopšte ne razmatraju pri izboru dispozicije sistema. Zbog toga neki sistemi imaju dispozicije koje ne omogućavaju da *intenzitet popravke* (μ) i srednje vreme popravke MTTR bude je u skladu sa zahtevima koji se postavljaju u vezi sa pouzdanošću i operativnom gotovošću.

Održavanje obuhvata sve aktivnosti kojima se obezbeđuje ispravan rad sistema u određenom periodu vremena. Te aktivnosti su: (1) *preventivno - tekuće održavanje*, koje omogućava da se sistem održava u operativnom stanju sprečavanjem otkaza, (2) *korektivno održavanje* - vraćanje u radno stanje sistema popravkom nakon otkaza. Obe vrste održavanja se moraju sagledati još u fazi projektovanja i izbora dispozicije sistema. Ključne mere u obe grupe održavanja daju se na slici 2.

Za vodoprivredne sisteme, kao bezbednosno osetljive sisteme preporučuje se održavanje prema pouzdanosti (OPP), koje počiva na Teoriji pouzdanosti i detaljnom izučavanju otkaza i identifikovanju zakonitosti njihovog nastajanja.



Slika 2. Aktivnosti na održavanju sistema

Pogodnost održavanja se definiše verovatnoćom da će sistem koji se održava ostati u radnom stanju ili će biti vraćen u njega u nekom zadatom vremenskom intervalu. Zato treba izabrati dispoziciju sistema koja omogućava da se preventivno i korektivno održavanje obavlja u skladu sa zahtevanim srednjim vremenom popravke MTTR i intenzitetom popravke μ . To podrazumeva:

- obezbeđivanje pristupačnosti elementima sistema koji se održavaju,
- ugrađivanje *havarijskih zatvarača* čiji je zadatak da se pri pojavi nepovoljnih događaja u sistemu automatski zaštite delovi sistema na kojima mogu da nastupe teže posledice,
- predviđanje *remontnih zatvarača* koji omogućavaju da se delovi koji su u kvaru izoluju radi popravke,
- predviđanje *rezervoara* duž trase cevovoda čije zapremine omogućavaju održavanje vitalnih funkcija sistema tokom opravke,
- izbor dispozicije *merne opreme* i informacionog sistema koja omogućava detekciju kvara u skladu sa zahtevanim MTTR,
- izbor dispozicija *prstenastih cevovoda* sa snabdevanjem važnih potrošača iz više pravaca,
- predviđanje *kompensacionih basena* za obezbeđenje ekoloških protoka i tokom remonta objekata,
- primena opreme istog tipa u okviru jednog sistema, što je racionalnije sa gledišta rezervnih delova,
- primena istih raspona i tipova remontnih zatvarača, kako bi se sa jednim kompletom zatvarača podmirilo više hidročvorova (slučaj sa HS DTD),
- premošćavanje nekih vitalnih uređaja obilaznim cevovodom ("bypass") kako bi se obezbedile neke minimalne funkcije sistema i tokom održavanja i popravki, itd.

Vremena pojedinih operacija održavanja se moraju razmatrati još tokom izbora dispozicije sistema. Ključni su sledeći pokazatelji pri analizi pogodnosti održavanja.

(a) Srednje aktivno vreme *preventivnog održavanja* sistema (\overline{M}_p) se određuje na osnovu frekvencije (f_i) preventivnog održavanja i -tog elementa i srednjeg aktivnog vremena preventivnog održavanja (\overline{M}_{p_i}) i -tog elementa sistema sastavljenog od (n) elemenata:

$$\overline{M}_p = \left(\sum_{i=1}^n f_i \cdot \overline{M}_{p_i} \right) / \left(\sum_{i=1}^n f_i \right) \quad (3)$$

(b) Srednje aktivno vreme *korektivnog održavanja* ($\overline{M}_c = MTTR$) definiše se preko relacije

$$\overline{M}_c = MTTR = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot M_{c_i} \right) / \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right) \quad (4)$$

Ovde su: λ_i - intenzitet otkaza i -tog elementa (dela) sistema, M_{c_i} - srednje aktivno vreme korektivnog održavanja sistema kada otkaze i -ti element (deo).

(c) Srednje aktivno vreme *korektivnog i preventivnog održavanja* (\overline{M}) definiše se iz relacije

$$\overline{M} = (\lambda \cdot \overline{M}_c + f \cdot \overline{M}_p) / (\lambda + f), \quad (5)$$

gde je: $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$; $f = \sum_{i=1}^n f_i$

(d) Za izbor dispozicije sistema bitno je i *maksimalno aktivno vreme korektivnog održavanja* ($M_{c_{max}}$). To je 'pesimistička' procena najdužeg vremena za koje se može završiti neko korektivno održavanje (detekcija lokacije kvara magistralnog cevovoda, dolazak ekipe i popravka kvara pri najnepovoljnijim vremenskim uslovima na terenu). U odnosu na to vreme se dimenzionišu elementi sistema koji treba da obezbede određene vitalne funkcije sistema i tokom popravke (zapremine rezervoara, kapaciteti nekih obilaznih vodova, rezervna izvorišta, spojevi sa susednim sistemima radi međusobne pomoći u havarijskim situacijama i tokom popravki kvarova, itd).

(e) Maksimalno aktivno vreme *preventivnog održavanja* ($M_{p_{max}}$) definiše se na indentičan način kao prethodna veličina, samo se odnosi na preventivno održavanje.

(f) Srednje vreme između održavanja (MTBM) definiše se kao srednje vreme između svih akcija održavanja - preventivnih i korektivnih

$$MTBM = 1 / (\lambda + f) \quad (6)$$

(g) Funkcija pogodnosti održavanja $M(t)$ pokazuje verovatnoću da će potrebna operacija održavanja biti izvršena u vremenu zastoja t . Za sličaj eksponencijalne raspodele, verovatnoća da će popravka biti uspešno završena za vreme t , definisana je relacijom

$$M(t) = 1 - \exp(-t/MTTR) \quad (7)$$

gde su: MTTR - srednje vreme popravke, t - slučajna promenljiva vremena popravke. Veličina intenziteta popravke μ za slučaj eksponencijalne raspodele, koja je najprihvatljivija u slučaju sistema koje ovde razmatramo definiše se relacijom $\mu = 1/\text{MTTR}$.

Obnavljanje sistema. Obnavljanje sistema se obavlja zamenom delova i odgovarajućih preventivnih i korektivnih radnji. Teorija obnavljanja – grana Teorije pouzdanosti, još nije ušla u praktičnu upotrebu u vodoprivredi. Ako se ima u vidu velika složenost i bezbednosna osetljivost hidrotehničkih sistema, neophodno je da se ta oblast što pre počne da koristi za planiranje njihove eksploatacije (određivanje perioda zamene bezbednosno vitalnih delova, itd).

Matematičko očekivanje (E) broja popravki $N(t)$ tokom (t) časova rada sistema, u slučaju eksponencijalne raspodele funkcija intenziteta otkaza λ i intenziteta popravki μ može se svesti na relaciju:

$$E[N(t)] = \frac{\lambda \cdot \mu}{\lambda + \mu} \cdot t - \frac{\lambda \cdot \mu}{(\lambda + \mu)^2} [1 - \exp[-(\lambda + \mu)t]] \quad (8)$$

Bezbednosno osetljiva postrojenja se obnavljaju preventivnom zamenom vitalnih delova. Koriste se sledeće preventivne zamene: 1) zamena posle određenog vremena rada: vodi se evidencija o kada su ugrađeni vitalni delovi, te se zamenjuju nakon T_r časova rada, a to je ono vreme kada dolazi do porasta funkcije opasnosti od kvara λ , 2) blok zamena, koja predviđa zamenu u određenim vremenskim intervalima, pri čemu se zamenjuju i oni delovi koji su bili zamenjeni pri popravkama, te još nisu odradili planiran fond sati. U sistemima u oblasti voda obično je povoljniji slučaj (1), uz odgovarajuću informacionu podršku.

O održavanju vodoprivrednih sistema mora se voditi računa tokom svih faza njihovog planiranja i korišćenja. Bitna su sledeća razmatranja. (a) U generalnom projektu i idejnom projektu: • Analiza dispozicije sistema sa gledišta pogodnosti održavanja. • Analiza funkcije havarijskih i remontnih zatvarača u svim fazama održavanja sistema, što je posebno važno kod regionalnih sistema sa dugim cevovodima, pumpnim i buster stanicama, rezervoarima. • Ocena varijantnih dispozicija sistema sa stanovišta pogodnosti za održavanje. (b) U glavnom projektu: • Projekat održavanja sistema, sa analizom srednjih i maksimalnih planiranih vremena korektivnog i preventivnog održavanja. • Projekat informacionog sistema i drugih sistema za podršku održavanju i

obnavljanju sistema (ekspertni sistem kao savetodavni sistem za potrebe održavanja, itd). • Analiza operativnosti obnavljanja sistema i potrebnih sadržaja (skladišta rezervnih delova, pristupne saobraćajnice, itd).

2.4. Raspoloživost sistema

Raspoloživost (A) definiše spremnost (sinonim: *gotovost*) sistema da može da prihvati izvršenje zadatka - kada se to od njega zatraži u nekom trenutku vremena t . Određuje se *funkcijom raspoloživosti* $A(t)$, koja pokazuje verovatnoću da sistem može da prihvati funkciju u trenutku vremena t . Na gotovost bitno utiče i veličina intenziteta popravke (μ), te se razmatra paralelno sa analizom pogodnosti održavanja.

Razmatra se sistem koji se nalazi u dva stanja: 'Ispravan', sa intenzitetom otkaza λ , ili 'U popravci' sa intenzitetom popravke μ . Uvođenjem funkcija λ i μ za određeni popravljiv element sistema njegova funkcija raspoloživosti $A(t)$ u opštem slučaju se definiše u obliku:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (9)$$

Za slučaj kada $t \rightarrow \infty$ funkcija raspoloživosti, za jedan element sistema, teži veličini

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (10)$$

Veličina A je *stacionarni koeficijent raspoloživosti* i predstavlja bitnu performansu sistema. Intenzitet popravke μ (za slučaj eksponencijalne raspodele $\mu = 1/\text{MTTR}$, gde je MTTR - srednje vreme popravke) utiče na pouzdanost i raspoloživost složenih sistema na sledeći način: (a) kod serijske veze elemenata intenzitet popravke μ nema uticaja na pouzdanost složenog sistema, ali značajno povećava raspoloživost sistema, što je za vodoprivredne sistem vrlo bitno, posebno za cevovode, (b) kod sistema se paralelnom vezom elemenata (npr. rezervne pumpe u paralelnoj vezi) mogućnost popravke značajno povećava i raspoloživost i pouzdanost sistema. To je jedna od dodatnih prednosti sistema u paralelnoj vezi elemenata. Da bi se jasno razgraničile performanse sistema, od kojih je raspoloživost jedna od veoma važnih, razmatraju se tri vrste raspoloživosti.

1. *Sopstvena raspoloživost (A_s)*: verovatnoća da će sistem uz brzu detekciju kvara raditi sa planiranim performansama u datom trenutku vremena. Ne uzimaju se u obzir zastoji zbog preventivnog održavanja,

logističko vreme detekcije kvara, dolaska na mesto kvara i administrativno vreme zastoja, te je:

$$A_s = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \overline{M} c) \quad (11)$$

2. *Dostignuta raspoloživost* (A_d): verovatnoća da će sistem raditi u datom trenutku vremena, uz idealnu organizaciju, vodeći računa i o zastojima zbog preventivnog održavanja. Pritom se isključuje logističko i administrativno vreme, te je:

$$A_d = \text{MTBM} / (\text{MTBM} + \overline{M}) \quad (12)$$

3. *Operativna raspoloživost* (A_{op}): verovatnoća da će sistem, kada se koristi u sasvim realnim uslovima, raditi sa planiranim performansama kada se to od njega zatraži. To je realna raspoloživost, kojom su obuhvaćena sva vremena, uključiv i logističko i administrativno vreme:

$$A_{op} = \text{MTBM} / (\text{MTBM} + \text{MDT}) \quad (13)$$

Nova oznaka: MDT - srednje vreme svih zastoja, koje obuhvata srednje vreme korektivnog i preventivnog održavanja, srednje logističko vreme (vreme zbog čekanja na dotur delova, dolazak ekipe za popravku), kao i srednje administrativno vreme.

Pokazatelj sopstvene raspoloživosti treba razmatrati još u fazi generalnog projekta, jer imaju uticaj na dispoziciju sistema. Glavni problemi analize raspoloživosti rešavaju se u idejnom i glavnom projektu kada se bira monitorinog opreme koja omogućava brzu detekciju lokacije kvarova, kao i skraćivanje MTTR - srednjeg vremena popravke kvara, čime se bitno utiče na raspoloživost sistema.

U projektnim zadacima u okviru idejnog projekta raspoloživost kao važan aspekt pouzdanosti treba da bude obuhvaćen zahtevima: • Analiza raspoloživosti delova sistema i sistema kao celine, za određene opsege MTTR i intenziteta popravke μ . • Analiza uticaja raspoloživosti sistema na dispoziciju sistema i merne opreme za praćenje ispravnosti sistema.

2.4. Hidrološka pouzdanost

Hidrološka pouzdanost se definiše verovatnoćom računskih voda na koje se dimenzionišu neki vitalni organi hidrotehničkih objekata (evakuacioni organi na branama, kote nasipa i zaštitne visine do krune nasipa (*'freeboard'*), ali i mere zaštite kvaliteta voda, koje se određuju u odnosu na računске male vode, često male mesečne vode verovatnoće 95%). Zapaža se jedna nemeila pojava: analize hidrološke pouzdanosti se rade

najčešće samo prilikom projektovanja objekata i sistema, i posle se, po pravilu, ne proveravaju. To je veliki propust, na koji se ovde ukazuje. Naime, pri planiranju sistema računске vode se određuju, po pravilu, na osnovu nedovoljno dugih hidroloških serija, što može da dovede do potcenjenih ili precenjenih računskih voda. Tokom eksploatacije sistema sakupljaju se dodatne hidrološke informacije, raspoložive hidrološke serije su sve duže i pouzdanije, što upućuje na logiku da je umereno da se proveravaju računске vode na osnovu kojih je realizovan sistem. Postoji i drugi vrlo bitan fenomen: tokom vremena dolazi do promene hidroloških režima na većim rekama – povećanja velikih i smanjenja malih voda. To se dešava zbog radova u slivu (regulacioni radovi sa isključivanjem inundacija u kojima je dolazilo do retenziranja povodanja, povišenje nasipa), ali i zbog delovanja klimatskih promena. Zbog toga je neophodno da se povremeno proverava hidrološka pouzdanost – ponovnom analizom računskih velikih voda, korišćenjem novih, produženih hidroloških serija.

Proveravanje računskih voda, sa kojima su projektovani sistemi neophodno je zbog bezbednosti sistema i okruženja. Navode se samo dva primera. Pri planiranju brane i HE Bočac na Vrbasu zbog tada kratkih i nedovoljno pouzdanih hidroloških serija, pri planiranju je potcenjena računska velika voda za dimenzionisanje preliva na desnom boku i odvodnog tunela. Dodatne analize su pokazale da su velike vode veće, da je proticajni kapacitet bočnog preliva i odvodnog tunela nedovoljan. Zbog toga je u levom boku brane planiran dopunski evakuacioni organ, kako bi se ostvarila potrebna hidrološko-hidraulička pouzdanost brane. Drugi primer su zaštitni nasipi duž naših najvećih reka, posebno u zonama veoma osetljivih i važnih branjenih sadržaja u priobalju (REK Kostolac, TE Nikola Tesla A i B u Obrenovcu, velika naselja u priobalju). Nasipi duž Dunava, Save, Tise, Velike Morave dimenzionisani su na osnovu hidroloških serija do oko 1965. godine, jer su građeni nakon velikih poplava iz 1965. godine i tokom građenja HE Đerdap. U međuvremenu su na uzvodnim delovima tih reka, posebno Dunava i Tise, izvedeni brojni regulacioni radovi koji su doveli do postupnih promena režima velikih voda, koje su se očitovale ubrzavanjem koncentracije i propagacije talasa velikih voda i povećanjem vrednosti Q_{max} . Zbog toga je sasvim izvesno da u sadašnjim uslovima nasipi ne pružaju zahtevan stepen zaštite od velikih voda verovatnoće 1%, sa zaštitnim visinama od oko 1,5 m, kao što su planirani i realizovani. Neophodno je da se

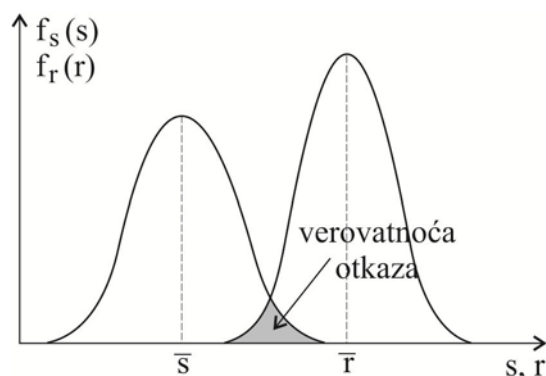
što pre izvrše provere hidrološke pouzdanosti tih zaštitnih sistema, po čitavoj dužini reka. Treba odrediti nove računске vode za sve ključne vodomerne stanice na tim rekama, odrediti linije nivoa za te vode, uporediti ih sa kotama nasipa, i na osnovu toga ustanoviti rezervne zaštitne visine ('freeboard') u sadašnjem stanju i determinisati kritične nedovoljno zaštićene deonice, po prioritetima. Prioritet imaju deonice koje štite velike gradove i velike tehnološke sisteme (npr. REK Kostolac, REIK Kolubara, TE Obrenovac). Parcijalne analize koje su rađene za neke gradove, npr. Novi Sad [19], pokazuju da su upravo zbog promena režima velikih voda sada smanjeni stepeni zaštite čak i tako velikih urbanih centara. Sasvim je izvesno da sada značajno zaostaje stepen zaštite i drugih naselja u priobalju tih reka, kao što su Šabac, Sremska Mitrovica, beogradske opštine u priobalju Dunava i Save, Obrenovac, Veliko Gradište, Golubac, kao i naselja u priobalju sve tri Morave i njihovih pritoka. Zbog toga realno sagledavanje, u sadašnjim uslovima, stepena zaštite od velikih voda ima prioritet i treba ga povezati sa obaveznošću izrade karata ugroženosti od poplava, u skladu sa odgovarajućom Direktivom EU (FRMD - Flood Risk Management Directive 2007/60/EC).

2.6. Konstrukcijska pouzdanost

Konstrukcijska pouzdanost se iskazuje verovatnoćom (R_k) da će radno opterećenje (s) konstrukcije objekta biti manje od kritičnog opterećenja (r). To polazište se vidi na slici 3, na kojoj su date raspodele radnog (s) i kritičnog opterećenja (r), kao i rizik - verovatnoća otkaza konstrukcije, koja je definisana površinom preklapanja tih dveju površina. Na radno opterećenje (s) deluje niz stohastičkih uticaja, pa se distribuira funkcijom raspodele $f_s(s)$. Granična nosivost konstrukcije je, takođe, stohastička kategorija i distribuira se po odgovarajućoj raspodeli $f_r(r)$.

Zavisno od vrste opterećenja koje je merodavno za neki od proračuna stabilnosti veličine (s) i (r) mogu biti različite fizičke veličine. U analizama stabilnosti na klizanje neke hidrotehničke konstrukcije (npr. gravitacione betonske brane) veličina (s) je zbir svih horizontalnih sila koje teže da pokrenu tu konstrukciju nizvodno, a (r) predstavlja sumu svih suprotno usmerenih sila koje se tome suprotstavljaju. Pri analizi stabilnosti na isplivavanje (npr. neka šahtna mašinska zgrada) veličinu (s) čine sve sile uzgona i druge sile koje teže da 'podignu' objekat, dok su (r) sve vertikalne gravitacione sile koje se tome opiru. U analizi stabilnosti na preturnanje uticaj (s) su momenti

koji deluju u smeru prevrtanja konstrukcije oko linije rotacije, dok je (r) suma suprotno usmerenih momenata koji se svojim težinama tome suprotstavljaju. U nekim proračunima veličina (s) su radna naponska stanja u konstrukciji, a (r) kritični naponi koji dovode do loma elementa, itd.



Slika 3. Raspodele radnog i kritičnog opterećenja konstrukcije

Pri analizi stabilnosti konstrukcija polazi se od neke pretpostavljene šeme opterećenja, i neke definisane merodavne otpornosti konstrukcije. To je uobičajen pristup: iz distribucija $f_s(s)$ i $f_r(r)$ izdvajaju se merodavno radno opterećenje $s=S$, kao i vrednost otpornosti konstrukcije $r=R$, te se sigurnost konstrukcije definiše preko koeficijenta sigurnosti

$$k = R/S \quad (14)$$

U tom determinističkom polazištu neizvesnosti proističu iz stohastičke činjenice da stvarno radno opterećenje (s) može da bude veće od odabrane vrednosti S : $s > S$, kao i da otpornost (r) može da bude manja od merodavno odabrane vrednosti R : $r < R$. Te neizvesnosti se 'pokrivaju' tako što se usvaja koeficijent sigurnosti (k) koji mora da bude veći od neke usvojene vrednosti veće od 1, npr. $k > 1,25$. Pošto su (s) i (r) slučajni procesi u kojima su superponirani brojni mehanički, geofizički i drugi uticaji koji su stohastičke kategorije, po logici stohastičkih procesa (od male veličine može biti još manja, a od velike – još veća), jasno je da će bez obzira na usvojen koeficijent sigurnosti - konstrukcijska pouzdanost svakako biti manja od 1. To je u skladu sa Teorijom pouzdanosti, jer se ne može realizovati sistem sa apsolutnom pouzdanošću jednakoj 1. Međutim, problem je što se u tom determinističkom pristupu ne zna kolika je stvarana pouzdanost konstrukcije, jer je to maskirano naizgled visokim koeficijentom sigurnosti.

Rizik, kao verovatnoća narušavanja stabilnosti konstrukcije, u realnosti je definisan površinom označenom šrafurom na slici 3, koja pokazuje verovatnoću otkaza, tj. verovatnoću da će radno opterećenje u nekom spletu oklnosti ipak premašiti kritičnu nosivost / otpornost konstrukcije. Znači, pouzdanost objekta koji je izložen dejstvu radnog opterećenja dobija se iz uslova da verovatnoća bezotkaznog rada postoji ako otpornost elementa (r) nije premašena radnim opterećenjem (s), te je uslov bezotkaznog rada $r > s$. Iz tog uslova se izvodi opšta jednačina za konstrukcijsku pouzdanost (R_k) elementa / objekta, za poznate raspodele $f_s(s)$ i $f_r(r)$ u obliku

$$R_k = \int dR = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \left[\int_s^{\infty} f(r) dr \right] ds \quad (15)$$

Pošto za jednačinu 15 ne postoje tačna matematička rešenja za sve vrste raspodela $f_s(s)$ i $f_r(r)$, razvijena su približne numeričke metode [2]. Da bi se omogućilo približno rešenje jednačine 15 izvrši se zamena

$$G = \int_s^{\infty} f(r) dr \quad ; \text{ kao i : } dH = f(s) ds \quad (16)$$

čime se problem svodi na znatno jednostavniji zadatak određivanja integrala

$$R = \int_0^1 G \cdot dH \quad (17)$$

U radu [2] razmatran je takav pristup pri analizi pouzdanosti rečnih regulacionih građevina, pre svega - obaloutvrda od lomljenog kamena, koji ukazuje na mogućnosti projektovanju hidrotehničkih građevina uz primenu metoda Teorije pouzdanosti.

Ukoliko je (n) elemenata sa različitim pouzdanostima R_i ($i=1,n$) spregnuto u konstrukciju čija ukupna pouzdanost zavisi od svakog pojedinačnog elementa, po analogiji sa principima pouzdanosti kod serijske veze elemenata, pod pretpostavkom da su otkazi pojedinih elemenata nezavisni i potpuni, ukupna pouzdanost R cele konstrukcije dobija se po principima računanja pouzdanosti složenih sistema vezanih redno:

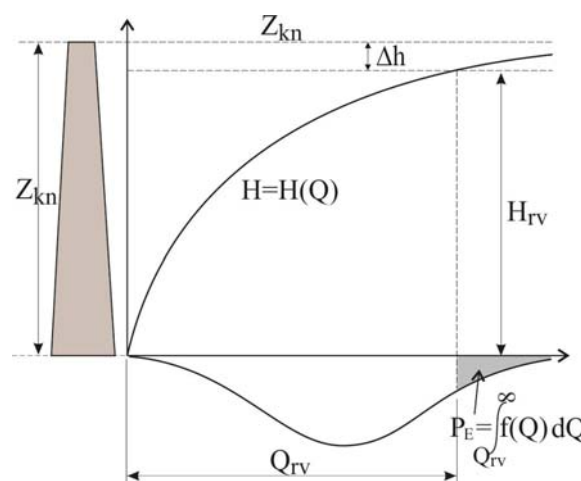
$$R = \prod_{i=1}^n R_i \quad (18)$$

2.7. Hidraulička pouzdanost

Hidraulička sigurnost (R_h) je vid konstrukcijske sigurnosti onih objekata čija je bezbednost ugrožena onda kada nivo ili protok na nekom delu sistema postane veći od neke kritične veličine, pa dolazi do

prelivanja objekta. Analiza te pouzdanosti je posebno važna za nasute brane i nasipe. Pri projektovanju se taj vid sigurnosti implicitno obuhvatao projektovanjem na neku merodavnu vodu - nivo i/ili protok), kao i usvajanjem dodatne zaštitne visine konstrukcije (Δh). Taj prilaz je prikazan na slici 4. za slučaj dimenzionisanja kote krune nasipa. Hidrološkim modelima se najpre definiše funkcija učestalosti ekstremnih protoka $f(Q)$. Onda se odredi projektna velika voda Q_{pv} , prema unapred usvojenoj verovatnoći prevazilaženja godišnjih maksimuma

$$P_E = \int_{Q_{rv}}^{\infty} f(Q) dQ \quad (19)$$



Slika 4. Konceptija projektovanja na osnovu verovatnoće prevazilaženja

Preko krive protoka $H=H(Q)$ projektni protok transformiše se u odgovarajući merodavni projektni nivo $H_{rv}=H(Q_{rv})$. Kada se tom nivou doda zaštitna visina ('freeboard') Δh , kojom se dodatno povećava sigurnost objekta zbog hidrološko - hidrauličkih neizvesnosti, dobija se projektna kota krune nasipa $Z_{kn}=H_{rv}+\Delta h$. Do otkaza sistema dolazi kada je $H(Q) > Z_{kn}$, te je P_f - verovatnoća otkaza sistema jednaka:

$$P_f = P[H(Q) > Z_{kn}] < P_E \quad (20)$$

Manja je od P_E zbog delovanja zaštitne visine Δh , što se vidi na slici 4.

Projektovanje na osnovu verovatnoće prevazilaženja biće prihvatljiva samo za nivo generalnih projekata. Posebno je osetljivo određivanje zaštitne visine Δh do kote krune nasipa, koja se kretala otprilike u opsegu 1,2÷1,7 m, zavisno od toga koliko se planer bojao zbog

neizvesnosti koje nije uspeo da sagleda: pouzdanost određivanja računске velike vode na koju dimenzioniše nasip (npr. $Q_{1\%}$), visina talasa od vetra koji se mogu očekivati na toj deonici, itd. Ako se ima u vidu da na Dunavu talasi od vetra na nekim deonicama mogu biti i oko 1,5 m, a po pravilu koincidiraju sa periodima velikih voda, zapaža se da su brojne deonice izuzetno važnih nasipa – nedovoljno pouzdane. O tome svedoči i činjenica da su na nekim mestima dodatni nasipi od džakova sa peskom tokom odbrana bili i do oko 1,5 m, što rečito govori o tome da su te deonice u zoni zabrinjavajuće (ne)pouzdanosti.

Na višim nivoima projektovanja zaštitno - bezbednosna performansa sistema moraće da se iskazuju veličinama pouzdanosti R . U tom slučaju hidraulička pouzdanost se principijelno može računati na isti način kao u slučaju konstrukcijske sigurnosti, samo se menja priroda radnog opterećenja i kritične nosivosti (otpora). U slučaju hidrauličke sigurnosti radno opterećenje (s) su nivoi velikih voda, zajedno sa dopunskim uticajem (visine talasa od vetra), koji su stohastičke kategorije. Otpor sistema (r) predstavlja efektivna visina objekata (kruna nasipa i brana, itd), zajedno sa rezervnim nadvišenjem Δh , što se, takođe, distribuira po nekoj raspodeli. Time se problem svodi na već prikazan slučaj definisan na slici 3, samo za druge fizičke veličine (s) i (r).

Tesno povezano sa pitanjem hidrauličke pouzdanosti nasipa je i koncepcija odbrane priobalja. Entiteti za koji se moraju vezivati analize hidrauličke pouzdanosti zaštitnih sistema moraju biti kasete branjenih područja. Ne postoji neka apstraktna pouzdanost čitavog branjenog sistema, već postoje pouzdanosti branjenih kaseti. Pod kasetom se podrazumava deo branjenih površina koji ima zajedničku hidrauličku sudbinu - ukoliko dođe do prodora nasipa na bilo kom delu. Znači, u slučaju sistema za odbranu od poplava pouzdanost treba odrediti za svaku od branjenih kaseti. Ujedno, to je način da se jasno uoče slabe tačke u zaštitnom sistemu i da se korekcijom kota kruna nasipa Z_d pouzdanost dovede do neke zahtevane veličine. Kod kaseti su prema Prostornom planu i Vodoprivrednoj osnovi Srbije pouzdanosti različite, zavisno od vrste i značaja sadržaja koji se brane. Propuštena je prilika da se neka važna ugrožena područja namenski kasetiraju izgradnjom saobraćajnica, tako da se uvećava opasnost od incidentnih događaja proboja nasipa.

Pošto simulacioni matematički modeli omogućavaju veoma brojne simulacije ponašanja sistema u raznim

hidrološko - hidrauličkim uslovima, posebno u uslovima nestacionarnog tečenja, hidraulička pouzdanost sistema u tom slučaju može se odrediti i iz opšte relacije

$$R_h = 1 - n_f / n \quad (21)$$

gde je n broj simulacija, a n_f je broj simulacija u kojima dolazi do otkaza sistema, jer je na određenim delovima branjenog sistema nivo $H > Z_{kn}$. Da bi pouzdanost mogla da bude realno određena simulacijama treba obuhvatiti čitav opseg mogućih promena režima voda. Taj pristup je i jedino moguć u slučaju kada se na vodne režime utiče i veštačkim uticajima (branjena područja nizvodno od hidroelektrana, ili, u zoni uspora kao u slučaju HE Đerdap, itd).

U projektnim zadacima za sisteme odbrane od poplava - na nivou idejnog i glavnog projekta, treba definisati zahtev: • Odrediti pouzdanost branjenog sistema za svaku zaštićenu kasetu, i dovesti čitav sistem do pouzdanosti koja se traži za takvu vrstu branjenog područja. U slučaju projekata nasutih brana zahtev u projektnom zadatku bio bi sasvim određen: odrediti hidrauličku pouzdanost brane, varirajući zaštitne visine do kote krune i odabrati dispoziciju koja je bezbednosno prihvatljiva, zavisno od sadržaja koji bi bili ugroženi na nizvodnom potezu).

2.8. Upravljačka pouzdanost sistema.

Uzroci nastanka otkaza sistema već su sistematizovani: • *primarni otkazi*, do kojih dolazi u normalnim uslovima rada, bez delovanja uticaja iz okruženja, • *sekundarni otkazi*, koji nastaju zbog nekih nepovoljnih uticaja sa strane ili zbog rada u uslovima preopterećenja, • *otkazi zbog pogrešnog upravljanja*, kada otkaze i kvarove izazovu greške ljudi koji upravljaju, greške kojima je postrojenje stavljeno u neki neregularan režim rada. Ti otkazi su dugo prenebregavani, sve dok se neke najveće katastrofe u svetu nisu desile upravo zbog ljudskih grešaka – grešaka koje su za nevericu (NE Černobil, NE 'Ostrvo tri milje'). Nakon havarije u NE 'Ostrvo tri milje' 1979. u Pensilvaniji, nastalog zbog čitavog niza krupnih ljudskih grešaka, obavljena su podrobna empirijska istraživanja pouzdanosti ljudi u procesu upravljanja. Ona su pokazala da je čovek najslabija karika u lancu upravljanja [22], a na neke pokazatelje neočekivano visoke nepouzdanosti ljudi je ukazano i u [10, 11]. Suština je u tome što je sposobnost čoveka da u normalnim radnim uslovima uspeva da analizira i koristi informacije u opsegu oko 5÷10 bit/s, u kratkim

intervalima napregnutog rada to se može povećati do oko 15 bit/s. Međutim u uslovima stresa, zbog 'panične upravljačke blokade', ta sposobnost percepcije i korišćenja informacija se smanjuje na samo oko 0,5 bit/s! Utvrđeno je istraživanjima da je prosečna učestalost greške čoveka $0,2 \div 0,3$ ukoliko neku proceduru treba obaviti po tačno određenom redosledu, ili, sa verovatnoćim 0,5 operator (ukoliko nije opomenut upornim zvučnim signalima) neće primetiti na komandnoj tabli svetlosno upozorenje da se neki vitalno važni prekidači nalaze u nedozvoljenom položaju. (U NE 'Ostrvo tri milje' čitavih 14 dana po tri smene operatora nisu uočili vizuelno upozorenje na komandnoj tabli da su isključene sve rezervne pumpe za hlađenje, što je bio glavni uzročnik havarije nakon otkaza glavne pumpe). Ili, greška stavljanja u pogrešan položaj serije preklopnika na komandnom pultu je čak 0,9 (!) ukoliko je prvi preklopnik stavljen u pogrešan položaj.

Upravljačka pouzdanost sistema se definiše verovatnoćom uspešnog izvršenja postavljenih upravljačkih zadataka tokom određenog vremena upravljanja. To podrazumeva verovatnoću da čovek kao element sistema neće načiniti greške u upravljanju u intervalu vremena t . Istraživanja su pokazala da se čovek kao upravljački organ ponaša, sa gledišta pouzdanosti, potpuno analogno kao i svi drugi sistemi, tako da je upravljačka pouzdanost čoveka R_c :

$$R_c(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_c(t) dt\right] \quad (22)$$

Ovde je: λ_c - intenzitet pogrešaka ljudi u procesu upravljanja (analogna veličina sa intenzitetom otkaza sistema λ), koji se u slučaju ljudskih grešaka najbolje aproksimira sa Vejbulovom raspodelom. Razlika u odnosu na tehničke sisteme je u tome što čovek ima sposobnost samokorigovanja, koja se, takođe, može analitički definisati. Kao što je gore naglašeno analize pokazuju da su veličine λ_c intenziteta pogrešaka čoveka tokom upravljanja iznenađujuće visoke, što se mora uzeti u obzir prilikom projektovanja upravljačkih uređaja i definisanja procedura obavljanja bezbednosno osetljivih operacija. Upravo je iz tih razloga u članku [11] zaključeno da je zbog takve (ne)pouzdanosti čoveka u procesu upravljanja neophodno da se ekspertnim sistemima, kao sistemima za podršku upravljanju, čovek što više isključi iz procesa neposrednog samostalnog operativnog upravljanja u svim kriznim situacijama (odbrane od poplava, havarijske situacije). Čovek je i dalje nezamenljiv upravljački organ, ali je neophodno da mu se obezbedi

'on line' podrška u vidu ekspertnog sistema (ES). To je upravljački softver, pripremljen studiozno u normalnim okolnostima sa svim neophodnim informacijama i simulacijama, u kome su analizirani svi nepovoljni scenariji koji se mogu desiti, i za koje su nađeni najbolji upravljački odgovori za delovanje u kriznim situacijama.

Nakon navedenih istraživanja (ne)pouzdanosti čoveka kao donosioca i izvršioca upravljačkih odluka, potpuno su izmenjene procedure svih rizičnih operacija. To je rađeno u više pravaca. Najpre, automatizovanim sistemima upravljanja operator je onemogućen da izvrši neku nedozvoljenu operaciju. Ako bi takvu komandu dao upravljački program bi ga opomenuo i svetlosno i vizuelno da je takva operacija nedozvoljena, a ako bi neki rasejani ili pospani operator insistirao na tome - ES bi to odbio. Ergonomska istraživanja su pokazala da je za smanjenje upravljačkih grešaka čoveka vrlo važno adekvatno uređenje upravljačkog pulta, sa dobro promišljenim položajem i rastojanjem upravljačkih dugmadi i preklopnika na komandnoj tabli. Verovatnoća grešaka raste ukoliko su komandna dugmad i preklopnici postavljeni previše blizu ili dosta daleko, tako da je eksperimentima nađeno optimalno rastojanje. Komandni uređaji se grupišu po redosledu upravljačkih procedura, a vitalno važni komandni uređaji, oni čije bi slučajno aktiviranje izazvalo neku veliku štetu stavljaaju se pod poklopac upozoravajuće narandaste ili crvene boje, koji je zaključan sa dve brava, tako da je moguće aktiviranje samo ako dva operatera istovremeno otključaju bravice. Tako se sada opremaju uređaji za podizanje segmentnih zatvarača na branama kojima se formira uspor, kako bi se sprečila greška otvaranja koja bi izazvala veoma opasan poplavni talas.

Imajući sve to u vidu, projekat upravljačkog sistema (i hadvera i softvera) vodi računa o tome da se mogućnost upravljačkih grešaka operatora svede na minimum. Za to su vrlo bitni odgovarajući informacioni i ekspertni sistemi kao podrška u donošenju upravljačkih odluka. Pokazalo se da najopasnije upravljačke greške nastaju ukoliko se delovanje automatike i čoveka spoje u 'izmešanu' proceduru, tako da automatika obavlja samo jedan deo procedure, a čovek mora da vrlo brzo reaguje, nastavljaajući sa izvršavanjem nekih bezbednosno najdelikatnijih operacija. Upravljenje automatikom mora da budu celovito, koherentno, informaciono potpuno podržano, a da čoveku kao upravljačkom organu stoji na raspoloženju kontrolni sistem, koji

omogućava da prati valjanost izvršenja upravljačkih operacija, sa jasnim upozorenjima na više načina (svetlost, zvuk, kompjutersko upozorenje) da je neka operacija u proceduri izostavljena ili delimično obavljena.

Aspekti upravljačke pouzdanosti se rešavaju tokom izrade glavnog projekta, kada se projektuje sistem za upravljanje - njegov hadverski i softverski deo. U projektnim zadacima to treba definisati zahtevima tipa:

- Analizirati upravljačku pouzdanost komandnih uređaja i iste planirati (prema položaju, grupisanju, procedurama pokretanja, itd) tako da se ostvaruje zahtevana pouzdanost upravljanja.
- Definirati upravljačku podršku (kontrolni softveri, ekspertni sistemi, itd) za povećanje pouzdanosti pri upravljanju sistemom.

2.9. Pouzdanost sistema za osmatranje

Sa porastom složenosti hidrotehničkih sistema i porastom brojnosti i bezbednosne osetljivosti njihovih interakcija sa okruženjem, sve važniji postaju sistemi za osmatranje (monitoring) objekata. Zbog toga postaje izuzetno važan zadatak dovođenje pouzdanosti oskultacionih sistema na zahtevan visok nivo. U slučaju visokih brana od oskultacionih sistema odlučujuće zavisi bezbednost nizvodnih područja, te se tu postavljaju vrlo visoki zahtevi u pogledu pouzdanosti tih sistema. Kod nekih klasa sistema (npr. dugački magistralni cevovodi) od dobro planiranog i održavanog oskultacionog sistema zavisi brza detekcija i lokalizovanje kvarova, što omogućava da se opravke obave sa planiranim intenzitetom popravke μ . Imajući u vidu te činjenice iznenađuje da se u našim projektima uopšte ne razmatra taj vrlo važan vid pouzdanosti. Postavlja se pitanje: kako se uopšte mogu birati za ugrađivanje tako važni i delikatni uređaji ukoliko za njih od proizvođača opreme nije čak ni zatraženo da navede funkcije opasnosti od kvara λ , i ukoliko nije apriori definisana neophodna pouzdanost R . Posledica te žalosne prakse: niz oskultacionih uređaja čak i na bezbednosno izuzetno važnim objektima veoma brzo nakon puštanja u pogon se kvare, pri čemu se mnogi oskultacioni instrumenti kvare odmah nakon stavljanja u funkciju, što znači da je bila veoma visoka vrednost funkcije $\lambda(t)$ čak i za $t=0$. Koliko je to ozbiljan problem govori činjenica da se neki od tih uređaja kasnije ne mogu da zamene, jer su ugrađeni duboko u telu brane. Njihovim ispadom iz funkcije potpuno je onemogućeno praćenje nekog važnog planiranog parametara ponašanja objekata, što govori o

značajnosti ugrađivanja pouzdanosti u proces planiranju oskultacionih sistema.

Ovaj aspekt pouzdanosti treba razmatrati u fazi izrade glavnog projekta, pri projektovanju oskultacionog / monitoring sistema i izboru opreme za njih. Zahtevi koji se moraju uneti u projektni zadatak:

- Izbor opreme oskultacionog sistema prema kriterijumu pouzdanosti.
- Analiza funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ svih odabranih instrumenata i uređaja, sistema za prenos informacija kao i čitavog sistema (Λ).
- Određivanje srednjeg vremena rada između otkaza MTBF.
- Razmatranje funkcija pouzdanosti $R(t)$ instrumenata i uređaja, kao i sklopova koji se mogu izdvojiti kao celine sa gledišta pouzdanosti i sistema kao celine. Za uređaje koji se kasnije ne mogu zameniti izbor izvršiti po kriterijumu najvećih vrednosti pouzdanosti R .
- Analiza stabla otkaza, optimizacija alokacije pouzdanosti oskultacionog sistema.
- Analiza funkcija raspoloživosti delova oskultacionog sistema i sistema kao celine, za određene opsege MTTR i intenziteta popravke μ (za one uređaje i delove koji se mogu popravljati tokom eksploatacije).
- Analiza oskultacionog sistema sa gledišta pogodnosti održavanja.
- Analiza uticaja raspoloživosti sistema na dispoziciju oskultacionog sistema i njegovih pojedinih delova.

2.10. Pouzdanost sa gledišta okruženja

Vodoprivredni sistemi imaju dvosmerne interakcije sa okruženjem. Neki uticaji okruženja na sisteme su nezavisne slučajne geofizičke pojave (zemljotresi, ekstremne velike vode, itd.) i oni se na odgovarajuće načine, preko računskih zemljotresa i računskih velikih voda uključuju u analize konstrukcijske i hidrauličke pouzdanosti. Međutim, neki uticaji na okruženje dolaze iz smera sistema. U te uticaje koje treba analizirati spadaju pojava tzv. indukovane seizmičnosti u zoni velikih akumulacija, kao i provera stabilnosti geotehničkih formacija u zoni uspora. To su posebni vidovi pouzdanosti koji treba odrediti i za to postoje metode, ali to nije predmet ovog razmatranja, ali se navode radi potpunosti ove sistematizacije pouzdanosti.

3. ZAKLJUČAK

Vodoprivredni sistemi su ušli u takvu fazu funkcionalne i upravljačke složenosti kada postaje neophodno da se u sve faze njihovog planiranja i korišćenja moraju ugraditi analize svih vidova

pouzdanosti kojima se ocenjuje probabilistička afektivnost sistema. U radu se razmatra 10 kategorija pouzdanosti: • obezbeđenost isporuke vode, • pouzdanost rada sistema, • pogodnost održavanja i obnavljanja, • operativna gotovost; pouzdanosti: • hidrološka, • hidraulička, • konstrukcijska, • upravljačka, • pouzdanost sistema mrežnih konfiguracija, • pouzdanost sistema za osmatranje, • pouzdanost sa gledišta okruženja.

Prve četiri vrste pouzdanosti: obezbeđenost isporuke vode, pouzdanost rada sistema, pogodnost održavanja i obnavljanja, i raspoloživost sistema – od izuzetne su važnosti za ispravno ispunjavanje funkcija vodoprivrednih sistema. Te pouzdanosti se mogu nazvati *pouzdanosću ispunjavanja funkcija sistema* (R_{if}). To je posebno bitno za velike regionalne sisteme koji se naslanjaju na velika izvorišta površinskih voda (akumulacije) i akvifere podzemnih voda iz velikih aluvijalnih izvorišta. Ti sistemi moraju istovremeno da ispunjavaju zahtevanu obezbeđenost izvorišta (R_{ob}), potrebnu pouzdanost sa stanovišta kvarova (R), kao i pogodnost održavanja i obnavljanja, od kojih zavisi raspoloživost sistema (A). U tom slučaju *pouzdanost ispunjavanja funkcija sistema* nekog sistema za snabdevanje vodom, u kome postoji akumulacija, magistralni cevovodi i prateći pumpni i drugi uređaji kojima se voda priprema i doprema na mesto potrošnje, jednak je proizvodu obezbeđenosti sistema (isporuke vode iz akumulacije) P_{ob} , pouzdanosti čitavog sistema R (pri čemu se cevovod i svi uređaji tretiraju kao serijska veza elemenata) i operativne gotovosti A

$$R_{if} = R_{ob} \times R \times A \quad (23)$$

Imajući u vidu značaj tih pokazatelja probabilističke efektivnosti sistema ti aspekti pouzdanosti moraju se analizirati već od studije sistema i izrade generalnih projekata, jer bitno utiču na strateške odluke o dispoziciji sistema. Analiza obezbeđenosti bitno utiče na izbor izvorišta (veličinu akumulacije, kapacitet izvorišta podzemnih voda, što je problem Studije sistema), dok ostali pokazatelji utiču na izbor dispozicije sistema, kako bi se ostvarile zahtevane pouzdanosti rada i raspoloživosti sistema.

Hidrološka i hidraulička pouzdanost su dinamičke kategorije koje se moraju analizirati ne samo u fazi projektovanja, već se moraju proveravati i u fazi korišćenja objekta. Tokom korišćenja se sakupljaju nove hidrološke informacije, hidrološki nizovi postaju duži i pouzdaniji, stiču se iskustva o hidrauličkom ponašanju objekata, te ta dva vida pouzdanosti treba

proveravati, da se vidi da li zadovoljavaju kriterijume bezbednosti, ili su neophodne neke dodatne mere. Konstrukcijska pouzdanost se u sadašnjim projektima obuhvata koeficijentima sigurnosti ($k > 1$), ali se ukazuje i na mogućnosti da se analiza obuhvati i probabilističkim metodama. Upravljačka pouzdanost i uloga čoveka u njoj se moraju razmatrati i ugraditi u planiranje upravljačkog hardvera i softvera, a posebno tokom korišćenja, izradom ekspertnih sistema za podršku upravljanju, kako bi se minimizirale moguće greške čoveka u operativnom upravljanju. Pouzdanost mrežnih sistema se mora proveravati i tokom projektovanja, a svakako i tokom korišćenja, kako bi se dodatnim elementima u mreži (dodatne veze, zatvaranje prstena cevovoda, itd.) njihova pouzdanost dovela na zahtevani nivo. Sadržaj sistema za osmatranje i njegova pouzdanost su od velikog značaja, te pored analiza tokom projektovanja (kako bi se ugradili pouzdani uređaj, posebno oni koji ne mogu da se zamenjuju), treba da budu razmatrani periodično tokom korišćenja, kako bi taj sistem bio uvek u stanju pune operativnosti da prati ponašanje sistema.

LITERATURA

- [1] Bonaci, O. (2008): Upravljanje rizicima u vodoprivredi, Vodoprivreda, N^o 234-236, s.167-175
- [2] Božinović, M. (1995): O uvođenju metoda pouzdanosti u projektovanje rečnih regulacionih građevina, Vodoprivreda, 153-155.
- [3] Dašić, T. i B. Đorđević (2003) Metod za određivanje pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema (NETREL), Vodoprivreda, N^o 203-204
- [4] Dhillon B. S., Singh C., (1981): Engineering reliability, new techniques and applications, A Wiley-Interscience
- [5] Dhillon B.S. and Ch. Sing (1991): Engineering Reliability, John Wiley & Sons, New York
- [6] Đorđević, B. (1990): Vodoprivredni sistemi, Naučna knjiga, Beograd
- [7] Djordjević, B. (1993): Cybernetics in Water Resources Management, WRP, Fort Collins
- [8] Đorđević, B. i T. Milanović (1995): Sigurnost složenih vodoprivrednih sistema i mogućnost njene alokacije u fazi planiranja, Vodoprivreda, N^o 153-155

- [9] Đorđević, B. i T. Milanović (1996): Stabla otkaza kao efikasna metoda za analizu pouzdanosti složenih sistema, *Vodoprivreda*, N^o 159-160
- [10] Đorđević, B. (1996): Pouzdanost čoveka kao dela složenog sistema upravljanja, *Vodoprivreda*, N^o 161-162
- [11] Đorđević, B. i T. Dašić (2015): Ekspertni sistemi za planiranje i operativno sprovođenje odbrane od poplava, *Vodoprivreda*, N^o 276-278, Beograd
- [12] Gargano R., Pianese D., (2000) Reliability as tool for hydraulic network planning, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 5
- [13] Green A.E. et al. (1982): *Reliability Technology*, Wiley Interscience, London
- [14] Henley E. & H. Kamamoto: *Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.
- [15] Johnson E.M. et al. (1983): *Models and Human Performance*, IEEE Trans. Reliab
- [16] Jovičić S. (1988): Pouzdanost, pogodnost za održavanje, raspoloživost, održavanje, logistička podrška - Savremeni pogledi i standardi. Naučna knjiga, Beograd
- [17] Nahman J. M., (2002): *Dependability of engineering systems - modeling and evaluation*, Springer
- [18] Plate E.J. i L. Duckstein (1988): Konceptija pouzdanosti u projektovanju hidrotehničkih objekata. *Vodoprivreda*, 113-114
- [19] Plavšić, J. i R. Milutinović (2010): O računskim nivoima za zaštitu od poplava na Dunavu kod Novog Sada, *Vodoprivreda*, N^o 243-245, s.69-79
- [20] Regulinski T.L. (1973): *Human Performance Reliability Modeling in Time Continuous Domain*, Symp. on Reliability, Liverpool
- [21] Todorović J. (1994): Održavanje tehničkih sistema - nauka ili veština? SYM-OP-IS, Kotor
- [22] US Atomic Energy Commission (1984): *Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants*, Appendix II and III: Failure Data, WASH 1400, Washington DC
- [23] Ušakov I.A. (1985): *Nadežnost tehničkih sistem*, R&S, Moskva
- [24] Von Thun, L. (1987): Use of risk based analysis in making decisions on dam safety. In: *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*. (Editors: Duckstein, L. & E.J. Plate), Dordrecht, Netherland
- [25] Vujanović, N. (1981): *Quality Control and Reliability*, TSC, Zagreb
- [26] Wagner, J., Shamir U., Marks D. (1988): Water distribution reliability: analytical methods, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 114
- [27] Yan, B. (1987): Reliability of hydraulic structures possessing Random loading and resistance. In: *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*. (Editors: Duckstein, L. & E.J. Plate), Dordrecht, Netherland
- [28] Yevdjević, V. (1977): Risk and Uncertainty in Design of Hydraulic Structures, Int. Symp. on Stochastic Hydraulics, Lund

CATEGORIES OF RELIABILITY THAT SHOULD BE ANALYSED DURING THE PLANNING AND OPERATION OF WATER RESOURCES SYSTEMS

by

Branislav ĐORĐEVIĆ and Tina DAŠIĆ
University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering

Summary

From the standpoint of reliability - a key indicator of the probabilistic effectiveness of systems - water resources systems (WRS) belong to the class of the most sensitive system with multiple categories of reliability. This reliability must be analyzed and verified during the planning and the operation of the system. However, some of these important reliability analyzes are not carried out promptly and comprehensively. As a consequence some incidental events occur (floods, surveyor events in the field of water quality, etc.) and they are usually treated as 'force majeure'. That approach does not draw conclusions for the necessary increase in the corresponding category of reliability. The aim of this article is to systematize the categories of reliability which must be analyzed, verified and kept up to date while using WRS. Key categories of reliability discussed here are: • reliability of water supply, • reliability in terms of failures, • operational readiness of the system, • reliability of construction and hydraulic structures, • hydrological system reliability, • reliability

of the people who manage the systems, • suitability of the system for maintenance, • reliability of the system for monitoring facilities, • reliability from the standpoint of security in the WRS environment.

The article discusses key aspects of those categories of reliability, the possibility of their incorporation in the design solutions - from the choice of system configuration and dimensioning of facilities, selection of related equipment, later updated to the reliability of the system during operation. These checks are necessary (but often ignored), because the reliability is a dynamic category, which changes over time, and must be checked and increased to the necessary level.

Key words: water resources systems, reliability and availability of the system, failure rate function, the intensity of corrections, maintainability, human reliability

Redigovano 12.11.2016.