

YU ISSN 0350-0519

UDK 626

BROJ 153 - 155
GODINA 27
JANUAR - JUNI
1995 / 1 - 3

vodoprivreda



SADRŽAJ

RAD UVODNOG KARAKTERA	
Snežana DAKOVIĆ: Voda - autobiografska crtica -	3
ORIGINALNI NAUČNI RADOVI	
Prof. dr Petar PETROVIĆ: Prilog proračunu filtracionog dela uzgona	5
Prof. dr Miodrag BOŽINOVIĆ: O uvođenju metoda pouzdanosti u projektovanje rečnih regulacionih građevina	23
Prof. dr Branislav ĐORĐEVIĆ i Tina MILANOVIĆ: Sigurnost složenih vodoprivrednih sistema i mogućnost njene alokacije u fazi planiranja	37
Dr Petar MILANOVIĆ: Prirodni uslovi i tehničke mogućnosti formiranja podzemnih akumulacija u karstu	47
Prof. dr Dimitrije AVAKUMOVIĆ i mr Miloš STANIĆ: Hidraulička analiza sistema za navodnjavanje kapanjem	61
Mr Dejan KOMATINA: Linijski otpori tečenju mešavina kroz kružnu cev	67
PREGLEDNI RADOVI	
Prof. dr Dimitrije AVAKUMOVIĆ: Prošlost, sadašnjost i perspektive navodnjavanja u Srbiji	75
Snežana DAKOVIĆ: Zakoni o vodama u Srbiji, krajem prošlog i početkom ovog veka	87
Prof. dr Branislav ĐORĐEVIĆ: Vodoprivredni razvoj se može uskladiti sa očuvanjem i obnovom spomenika kulture	91
IN MEMORIAM	97

CONTENTS

INTRODOCTORY PAPER	
Snežana DAKOVIĆ: Water - autobiography -	3
SCIENTIFIC THEMATIC PAPER	
Prof. Petar PETROVIC, Ph.D.: A CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF THE SEEPAGE UPLIFT	5
Prof. Miodrag BOŽINOVIĆ, D.Sc: INTROCUCTION OF RELIABILITY METHOD IN DESIGN HYDRAULIC STRUCTURES OF RIVER TRAINING	23
Prof. Branislav ĐORĐEVIĆ, Ph.D. and Tina MILANOVIĆ: RELIABILITY ALLOCATION IN COMPLEX WATER RESOURCE SYSTEM	37
Petar MILANOVIĆ, Ph.D.: NATURAL CONDITIONS AND TECHNICAL POSSIBILITIES OF UNDERGROUND RESERVOIRS FORMATION IN KARST AREAS	47
Prof. Dimitrije AVAKUMOVIC, Ph.D and Miloš STANIĆ: HYDRAULIC ANALYSIS OF TRICKLE IRRIGATION SYSTEMS	61
Dejan KOMATINA: FRICTIONAL RESISTANCE TO SOLID-LIQUID MIXTURES PIPE FLOW	67
REVIEWES	
Prof. Dimitrije AVAKUMOVIĆ, Ph.D.: HISTORY, PRESENT STATE AND PROSPECTS OF IRRIGATION IN SERBIA	75
Snežana DAKOVIĆ: THE LEGAL REGULATIONS ABOUT WATERS IN SERBIA, BY THE END OF PREVIOUS AND BEGINNING OF THIS CENTURY	87
Prof. dr Branislav ĐORĐEVIĆ, Ph.D.: WATER RESOURCE DEVELOPMENT CAN BE ADJUSTED WITH PRESERVATION AND RESTORATION OF CULTURAL MONUMENTS	91
IN MEMORIAM	97

VODOPRIVREDA

GOD. 27 Godina 1995.
BR. 153 -155
 (1995/1 - 3)
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
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
- Stojšić 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:
 Centar Pariza (Rue de Lion), za vreme poplave 1910. - pre izgradnje akumulacija u slivu Sene (uz članak B. Đorđevića na str. 91)

SIGURNOST SLOŽENIH VODOPRIVREDNIH SISTEMA I MOGUĆNOSTI NJENE ALOKACIJE U FAZI PLANIRANJA

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

If a series of events can go wrong, it will do so in the worst possible sequence.
(Ako niz događaja može da krene naopako, poći će naopako po najgorem mogućem redosledu).
(The extended Murphy's law, Murphy's Law, II, 1980.)

REZIME

Razmatraju se tri ključne kategorije sigurnosti vodoprivrednih sistema: obezbeđenost sistema, pouzdanost zadatka i operativna gotovost. Definiše se sigurnost složenih vodoprivrednih sistema raznih konfiguracija. Posebno se razmatraju metode alokacije pouzdanosti na pojedine podsisteme/čvorove složenog sistema u fazi njihovog projektovanja. Analiziraju se tendencije rasta pouzdanosti i načini njihovog ostvarivanja. Daje se primer poboljšanja sigurnosti regionalnog vodovodnog sistema, određenim izmenama konfiguracija. Napokon, definiše se zadatak optimizacije sigurnosti složenih vodoprivrednih sistema.

Ključne reči: Sigurnost sistema, pouzdanost zadatka, operativna gotovost, alokacija sigurnosti, regionalni vodovodi, optimizacija.

1. UVOD: RAZVOJ VODOPRIVREDNIH SISTEMA I ASPEKTI POUZDANOSTI

Vodoprivreda zemlje postepeno prelazi u III fazu razvoja vodoprivrednih sistema (Đorđević, 1991), koju karakterišu sve složeniji, duži i razgranatiji regionalni sistemi, koji će se međusobno povezivati u sve veće celine, sa sve tešnjim interakcijama pojedinih podsistema. Takav razvoj sistema otvara jedan izuzetno važan problem – **planiranje sistema na zahtevanu**

pouzdanost. Pouzdanost, kao ključna performansa probabilističke efektivnosti sistema, koja se definiše verovatnoćom realizacije postavljenih ciljeva, postaje jedan od najvažnijih pokazatelja valjanosti složenih sistema, posebno u fazi vrednovanja alternativa i pri izboru konfiguracija i parametara sistema u fazi planiranja. Taj aspekt planiranja je do sada iznenađujuće često zapostavljan pri izboru rešenja. To je posebno bilo opasno pri upoređivanju alternativa koje se naslanjaju na različita izvorišta. Često se upoređuju sistemi sa nedovoljnom ili neproverenom pouzdanošću (npr. neki sistemi sa zahvatanjem vode iz podzemlja) sa sistemima sa vrlo visokom pouzdanošću (akumulacije čiji su izlazi računati na obezbeđenost od 95-97%). Izostavljanjem vrednovanja pouzdanosti kao ključne performanse efektivnosti sistema nedopustivo je narušavana elementarna objektivnost planiranja, što je dovelo do realizacije više nedovoljno pouzdanih sistema. To iziđe na videlo svake godine u malovodnim periodima, ali se ne tumači kao projektni promašaj – što objektivno jeste, već se ispad takvih sistema iz osnovne funkcije i oštre redukcije isporuke vode pravdaju nepovoljnim hidrološkim prilikama. Kao da u obavezu planera nije spadalo i to da iznađe rešenje za delovanje sistema u nepovoljnim okolnostima koje ga mogu zadesiti, ili da projektni garantovani kapacitet usaglasi sa takvim situacijama. Sa realizacijom dugih i razuđenih

Zapreminska obezbeđenost (P_v) se definiše kao odnos ukupne zapremine vode isporučene potrošačima (W_{is}) prema sumi koju je trebalo isporučiti (W_{tr}):

$$P_v = (W_{is}/W_{tr}) \cdot 100 \quad (\%) \quad (4)$$

Analize pokazuju da je vremenska obezbeđenost obično strožija od zapreminske, te se često ona uzima kao reprezentivna obezbeđenost – funkcionalne podobnosti realizacije vodoprivrednih ciljeva. Međutim, kod sistema vodosnabdevanja mora se uvesti jedno važno ograničenje: ne sme se dopustiti da redukovana isporuka vode (Q_{red}) bude ispod nekog minimalnog prihvatljivog praga, kada bi bila dovedena u pitanje egzistencija potrošača. Zato je neophodno vremensku obezbeđenost definisati na sledeći način:

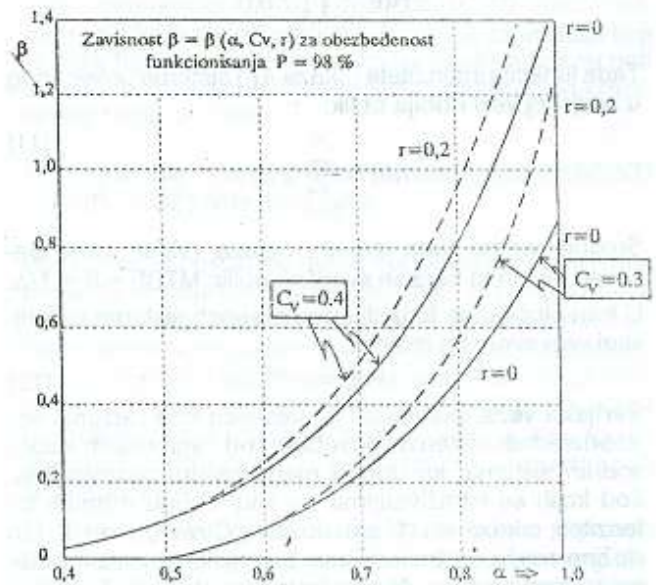
$$P_t = (T_{pp}/T_u) \cdot 100 \quad (\%); \quad Q_r > Q_{min} = \omega \cdot Q_z \quad (3')$$

gde je: Q_g – zahtevana količina vode u normalnim uslovima, ω – koeficijent dopustive redukcije potrošnje. Taj koeficijent zavisi od vrste potrošača: ne bi trebalo da bude manji od 0,5 u slučaju manjih naselja, dok bi u velikim urbanim sistemima bilo poželjno da ne bude manji od 0,7, pošto za veće nivoe redukcije nastupaju vrlo ozbiljni socijalni poremećaji. Imajući to u vidu jedino je korektno ako se obezbeđenost nekog vodovodnog sistema definiše trojkom

$$P_{ob} = \langle P_t, P_v, \omega \rangle \quad (5)$$

Ove kategorije obezbeđenosti određuju se prilikom rešavanja zadatka optimalne sinteze, pri dimenzionisanju akumulacija. U uslovima iskorišćenja totalnog vodnog potencijala visoke obezbeđenosti se mogu realizovati samo akumulacijama velikih relativnih zapremina β (detaljnije Đorđević, 1991). Ovde, samo radi ilustracije tog fenomena, na sl. 2 se pokazuje da pri graničnim vrednostima iskorišćenja voda, sa relativnom vrednosti potrošnje oko $\alpha = 0,7$ – povećanje obezbeđenosti sa $P = 80\%$ na $P = 90\%$ zahteva povećanje zapremine akumulacije β za čitava 2,5 puta! Kod još većih obezbeđenosti situacija je još drastičnija. Povećanje obezbeđenosti sa $P = 90\%$ na $P = 97\%$ (na tu obezbeđenost se u novije vreme planiraju veliki regionalni sistemi) zahteva da se relativna zapremina poveća sa $\beta = 0,5$ (za $\alpha = 0,7$) na $\beta = 1,1$, što podrazumeva višegodišnje regulisanje. Oznake: r – koeficijent autokorelacije godišnjih protoka; C_v i C_s – koeficijenti varijacije i asimetrije godišnjih protoka.

Može se zaključiti da se visoke obezbeđenosti moraju platiti skupo, po cenu velikog povećanja neophodnih korisnih zapremina akumulacije. To dokumentuje predhodnu tvrdnju da je neprihvatljivo kada se pri upoređivanju varijanti korišćenja podzemnih i nadzemnih voda ne uzima u obzir kategorija probablističke efektivnosti – sigurnost sistema.



Sl. 2. – Zavisnost $\beta = \beta(\alpha, P, C_v, C_s/C_v, r)$
Interdependence $\beta = \beta(\alpha, P, C_v, C_s/C_v, r)$

POUZDANOST ZADATKA (P_z) određuje se preko odgovarajućih funkcija pouzdanosti $R(t)$. Ako je T vreme od početka rada do prvog otkaza, funkcija pouzdanosti $R(t)$ definiše se verovatnoćom da sistem neće otkazati u intervalu t :

$$R(t) = P(T > t) \quad (6)$$

Tada je funkcija nepouzdanosti $Q(t)$ jednaka:

$$Q(t) = P(T < t) = 1 - R(t) \quad (7)$$

Ovde se navode još samo one kategorije koje su bitne za analizu sigurnosti složenih vodoprivrednih sistema. To su: **funkcija gustine otkaza** $f(t) = dQ(t)/dt$, kao i **funkcija intenziteta otkaza** $\lambda(t) = f(t)/R(t)$. Za dalje analize bitna je veza između $R(t)$ i $\lambda(t)$ koja se definiše u opštem obliku:

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) \cdot dt \right] \quad (8)$$

Kod **eksponencijalne raspodele**, koja se može usvojiti za aproksimaciju funkcija gustine otkaza kod većina uređaja koji se koriste u složenim vodoprivrednim sistemima, veza pouzdanosti i intenziteta otkaza (za $\lambda = \text{const.}$) dobija oblik:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (9)$$

Očekivano vreme bezotkaznog rada tada se transformiše u obliku: $T_0 = \theta = 1/\lambda$.

Pouzdanosti složenih sistema bitno zavisi od načina povezivanja elemenata u složenom sistemu. U slučaju **serijske veze**, koja se veoma često sreće kod složenih vodoprivrednih sistema, pouzdanosti složenog sistema sastavljenog od n elemenata definisana je relacijom

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (10)$$

Tada funkcija intenziteta otkaza $\Lambda(t)$ sistema povezanog u serijskoj vezi dobija oblik:

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (11)$$

Srednje vreme rada između otkaza (Mean Time Between Failures) tada se svodi na oblik: $MTBF = \theta = 1/\Lambda$.

U tom slučaju se funkcija pouzdanosti sistema u serijskoj vezi svodi na relaciju:

$$R(t) = e^{-\Lambda t} \quad (12)$$

Serijska veza elemenata je najčešća kod složenih vodoprivrednih sistema, posebno kod regionalnih vodovodnih sistema, sa dugim magistralnim cevovodima, kod kojih se istraživanjima „in situ” mogu odrediti intenziteti otkaza na 1 km dužine. Cevovod od L km dužine može se tretirati kao L serijski povezanih elemenata od po 1 km. Ako se u okviru sistema nalazi i više drugih vitalnih elemenata, od čijeg rada zavisi izvršenje funkcija čitavog složenog sistema (pumpne i buster stanice, zatvarači, itd.), pouzdanost čitave grane sistema određuje se preko relacija za pouzdanost serijske veze.

U slučaju **paralelne veze** elemenata, sa gledišta pouzdanosti razlikuju se tri osnovna tipa. *Prvi tip paralelne veze* podrazumeva da složeni sistem (sklop) funkcioniše uspešno ukoliko je ispravan samo jedan od n paralelno vezanih elemenata. Tada se pouzdanost složenog sistema definiše relacijom:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (13)$$

Za slučaj eksponencijalne raspodele pouzdanost sistema sa paralelnom vezom transformiše se u relaciju

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}] \quad (14)$$

Drugi tip paralelne veze je u onom slučaju ako je od „n” paralelno vezanih elemenata potrebno da radi njih „r” kako bi sklop funkcionisao. Pouzdanost tog tipa paralelne „on line” veze, dosta česte u vodoprivrednim sistemima, definiše se relacijom:

$$R = P(x \geq r) = \sum_{x=r}^n \binom{n}{x} P^x (1-P)^{n-x} \quad (15)$$

gde je P – verovatnoća da je element ispravan, x – broj još uvek ispravnih elemenata.

Pri konstantnom intenzitetu otkaza 1 izraz za pouzdanost paralelno vezanog složenog sklopa elemenata dobija oblik

$$R_{rh}(t) = \sum_{x=1}^n \binom{n}{x} (e^{-\lambda t})^x \frac{(1 - e^{-\lambda t})^n}{(1 - e^{-\lambda t})^x} \quad (16)$$

Treći tip paralelne veze: elementi u stanju pripravnosti. To je čest slučaj konfiguracije vodoprivrednih sistema, posebno u uslovima kada se neki delikatan element dublira (npr. potisne ili buster pumpe, pumpe drenažnih sistema za napajanje rashladnom vodom agregata ili za dreniranje mašinskih zgrada, itd.), kako bi uvek imao i tzv. hladnu rezervu, priključenu „off line”, preko odgovarajuće uključne sklopke. Sistem sastavljen od dva elementa otkazuje ako otkazu oba elementa, pri čemu se problem razlikuje od već navedenog prvog tipa paralelne veze po tome što nisu ista vremena rada elemenata.

Ako je u paralelnoj vezi n elemenata, od kojih je jedan u radu, dok su (n - 1) u stanju hladne rezerve, pouzdanost takvog sistema, uz pretpostavku da je sklopka idealna (ne otkazuje i ona) za slučaj eksponencijalne raspodele ($1 = \text{const.}$) definiše se u obliku:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \quad (17)$$

Za vodoprivredne sisteme je posebno interesantan slučaj postrojenja koje se sastoji od dva ista elementa, od kojih je jedan u radu, dok se drugi nalazi u ulozi hladne rezerve (npr. dve identične buster pumpe u okviru CS u regionalnom vodovodu). Tada je $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$, te se iz (17) dobija pouzdanost takvog sistema:

$$R(t) = e^{-\lambda t} [1 + \lambda t] \quad (18)$$

Kada se u razmatanje uvede i opasnost od kvara sklopke (λ_s) koja treba da uključi u rad element koji je u hladnoj rezervi (odmah nakon kvara elementa koji je bio u radu), dobija se pouzdanost sistema takvog „dubliranog sistema”:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \frac{\lambda}{\lambda_s} (1 - e^{-\lambda_s t}) \right] \quad (19)$$

RASPOLOŽIVOST SISTEMA A(t) određuje se preko verovatnoće da će sistem biti u stanju da radi u nekom trenutku t ukoliko se to od njega zahteva. Da bi se mogla da definiše raspoloživost popravljivog sistema, pored funkcije **intenziteta otkaza** λ mora se uvesti i **intenzitet popravke** μ ($\mu = 1/MTTR$ za slučaj eksponencijalne raspodele, gde je MTTR – srednje vreme popravke – the Mean Time to Repair). Funkcija raspoloživosti, kada su poznate veličine λ i μ definisana je u obliku:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (20)$$

Posebno je interesantan slučaj duge eksploatacije ($t \Rightarrow \infty$) kada ta funkcija asimptotski teži koeficijentu raspoloživosti

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (21)$$

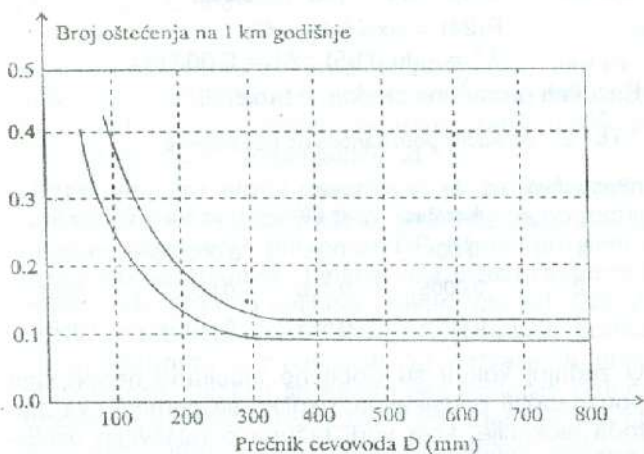
Sa gledišta analize sigurnosti vodoprivrednih sistema treba istaći dve bitne činjenice:

- (a) kod serijske veze elemenata intenzitet popravke μ se ne odražava na pouzdanost zadatka složenog sistema, ali povećava raspoloživost sistema;
 (b) kod paralelne veze mogućnost popravke povećava i pouzdanost i raspoloživost sistema.

SIGURNOST SISTEMA – kao ključna kategorija probabilističke efektivnosti, može se odrediti na bazi ovako definisane tri komponente: **obezbeđenosti** (Π), koja se postiže izborom odgovarajućih korisnih zapremina akumulacija; **pouzdanosti zadatka**, koja se definiše preko funkcija pouzdanosti $R(t)$ složenih sistema i **operativne gotovosti**, definisana preko koeficijenta raspoloživosti $A(t)$. Sa njima se može, shodno jed. (2) odrediti **sigurnost sistema** (P), kao ključna performansa probabilističke efektivnosti svake od razmatranih alternativa vodoprivrednih sistema. Sigurnost sistema se može definisati u obliku:

$$\Pi = P \times R \times A \quad (22)$$

Na osnovu analiza funkcionisanja postojećih cevovoda i uređaja u VS postoje podaci na osnovu kojih se mogu odrediti karakteristične veličine funkcija opasnosti od kvara. Tako je na slici 3 data karakteristična funkcija kvarova na cevovodima (interpretirano na osnovu podataka koje je sakupio Abramov, 1979), koja pokazuje da se opasnost od kvara λ (broj oštećenja na 1 km/godina) smanjuje sa povećavanjem prečnika cevovoda, dostižući za prečnike veće od oko 500 mm konstantnu vrednost. Za analizu pouzdanosti vodoprivrednih sistema su interesantni podaci za λ koji se mogu naći u literaturi (npr. Henley & Kumamoto, 1984) za neke od uređaja svetskog nivoa kvaliteta koji se frekventnije koriste u VS: pumpe u radu $3 \cdot 10^{-4}$ do $3 \cdot 10^{-6}$ čas⁻¹, start pumpi $1 \cdot 10^{-3}$ startovanje⁻¹ (zapaziti: veća nesigurnost pri uključivanju!); elektromotori: $1 \cdot 10^{-3}$ do $1 \cdot 10^{-4}$ čas⁻¹; dizel agregati: $3 \cdot 10^{-3}$ čas⁻¹;



Sl. 3. – Analiza opasnosti od kvara kod izvedenih cevovoda
 Damage risk analyze for made pipelane

automatski rele uređaji za uključivanje i isključivanje: $1 \cdot 10^{-3}$ intervencija⁻¹; transformatori: $1 \cdot 10^{-6}$ čas⁻¹; itd. Nema podataka o opasnosti od kvara λ za uređaje koji se ugrađuju u naše VS, ali se može očekivati da se radi o nešto većim vrednostima funkcije opasnosti od kvara, što tek treba izučavati.

3. PROBLEM RASPOREĐIVANJA POUZDANOSTI KOD SLOŽENIH SISTEMA

Pri planiranju nekog složenog vodoprivrednog sistema postavlja se ozbiljan teorijski problem – raspoređivanje (alokacija) pouzdanosti na pojedine elemente sistema. Taj problem se može postaviti u dva oblika: (1) alokacija pouzdanosti u slučaju unapred zahtevane sigurnosti složenog sistema; (2) alokacija u uslovima kada pouzdanost nije unapred zadata, već se kao važan element projekta traži optimizacija pouzdanosti složenog sistema.

Ukoliko se predpostavi slučaj da su otkazi pojedinih elemenata sistema nezavisni, a da otkaz bilo kog elementa dovodi do otkaza složenog sistema, tada se kao polazište za alokaciju pouzdanosti dobija relacija

$$R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) \geq R(t) \quad (23)$$

gde su: $R_i(t)$ – pouzdanosti i -tih elemenata/podsistema, $R(t)$ – pouzdanost složenog sistema.

Nejednačina (23) ima beskonačno mnogo rešenja, ukoliko se ne postavne neki uslovi vezani za raspoređivanje pouzdanosti po pojedinim elementima sistema. Ti zahtevi se mogu postaviti u vidu određenih kriterijuma. U skladu sa usvojenim kriterijumima nastalo je nekoliko metoda za raspoređivanje pouzdanosti, od kojih se ovde prikazuju samo one koje se mogu koristiti pri planiranju složenih vodoprivrednih sistema.

(A) METODA IZJEDNAČAVANJA POUZDANOSTI. Ova metoda se nameće spontano, kada se pouzdanost neke serijske veze elemenata želi da dovede da bude iznad nekog zahtevanog praga. Tada, se polazeći od jed. (10), kada se zna zahtevana pouzdanost složenog sistema R , može naći pouzdanost pojedinih podsistema/čvorova R_i , shodno jednačini:

$$R_i = R^{1/n}, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (24)$$

Primer. Neki merni uređaj na reci ima tri sklopa: merni deo, koder i predajnik, koji se razvijaju nezavisno. Ako su troškovi razvoja svakog od njih približno isti, koju pouzdanost alocirati svakom od njih, pa da pouzdanost čitavog sistema bude $R = 0,95$? Primenom jed. (24) dobja se da je $R_i = 0,983$, što znači da bi svakom od ta tri sklopa trebalo pouzdanost dići do te vrednosti.

Ovakav način alokacije pouzdanosti ne vodi računa o koštanju i uslovima rada pojedinih elemenata/čvorova, tako da često ne predstavlja najekonomičnije rešenje ostvarivanja zahtevane pouzdanosti, naročito u uslovima kada se podizanje pouzdanosti pojedinih sklopova do neke vrednosti ne ostvaruje uz isti priraštaj troškova, a njihova vremena rada nisu ista.

(B) ALOKACIJA PREMA ZNAČAJNOSTI POJEDINIH ELEMENATA SISTEMA. Ova metoda je razvijena za složene sklopove i poznata je i kao AGREE metoda. Bazna polazišta ove metode: (a) svi elementi u složenom sistemu slede eksponencijalnu raspodelu pouzdanosti; (b) uvodi se faktor značajnosti w_i i-tog dela složenog sistema, koje se definiše preko verovatnoće otkaza čitavog sistema u slučaju otkaza i-tog elementa/podsklopa. Ako je faktor značajnosti nekog dela sistema jednak 1, znači da taj deo mora da pouzdano radi da bi radio čitav sistem, dok bi niže vrednosti w_i značile da u nekim periodima eksploatacije rad i-tog dela ne uslovljava rad celog sistema. Kao polazište za alokaciju pouzdanosti određuje se minimalno prihvatljivo srednje vreme između otkaza (θ_i) i-tog elementa sistema, shodno relaciji:

$$\theta_i = \frac{N \cdot w_i \cdot t_i}{N_i (-\ln R(t))} \quad (25)$$

Ovde su: N – ukupan broj elemenata složenog sistema, w_i – faktor značajnosti i-tog elementa, t_i – vreme rada i-tog podsistema, N_i – broj elemenata u i-tom delu sistema, $R(t)$ – zahtevana pouzdanost sistema u vremenu t .

Tada je veličina neophodne pouzdanosti koju treba alocirati u i-tom delu sistema definisana relacijom.

$$R_i(t_i) = \exp\left(-\frac{t_i}{\theta_i}\right) \quad (26)$$

Primer. Sistem sastavljen od 4 sklopa/podsistema treba da ima pouzdanost 0,95 za vreme od 60 sati neprekidnog rada. Podsystemi 1 i 2 rade 60 sati i bez njih ne može da funkcioniše sistem (njihovi faktori značajnosti su 1), dok su podsystemi 3 i 4 sa manjim faktorima značajnosti i rade kraće (videti tab. 1). U istoj tabeli dat je i broj elemenata pojedinih podsistema/sklopova, kao i sračunata prihvatljiva srednja vremena rada bez otkaza θ_i pojedinih sklopova i alocirane pouzdanosti R_i na pojedine podsysteme.

Tab. 1. – Proračun alokacije pouzdanosti sklopova raznih nivoa značajnosti

Podsystem	Broj elemenata N_i	Faktor značajnosti w_i	Vreme rada t_i	θ_i (iz 25)	R_i (iz 26)
1	3	1	60	9747.86	0.9939
2	5	1	60	5848.72	0.9898
3	12	0.9	50	1827.72	0.9730
4	5	0.85	40	3314.27	0.9880

(C) METODA ALOKACIJE ARINC – PREKO RELATIVNIH OSETLJIVOSTI NA OTKAZ. Polazne pretpostavke metode: sistem od n redno vezanih delova, pri čemu otkaz bilo kog elementa dovodi do otkaza sistema; intenziteti otkaza su konstantni (eksponencijalna raspodela); vreme rada delova jednako vremenu rada celog sistema. Metoda polazi od postavke da se sve pouzdanosti izraze preko intenziteta otkaza. Cilj je

da se intenziteti otkaza λ_i^* i-tih delova tako alociraju da važi nejednačina (27), u kojoj je λ^* – zahtevani intenzitet otkaza čitavog sistema.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^* \leq \lambda^*, i = 1, \dots, n \quad (27)$$

Najpre se na osnovu ispitivanja pojedinih delova utvrdi intenzitet otkaza λ_i delova sistema. Na osnovu tih podataka određuje se **težinski faktor** u_i za svaki deo sistema, preko relacije

$$u_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i, i = 1, \dots, n \quad (28)$$

Može se zaključiti da u_i predstavlja pokazatelj relativne osetljivosti na otkaze i-tog dela sistema, te je

$$\sum_{i=1}^n u_i = 1 \quad (29)$$

Nakon toga sračunavaju se zahtevani intenziteti otkaza i-tog dela sistema preko relacije

$$\lambda_i^* = u_i \lambda^* \quad (30)$$

pri čemu se uzima da u jed. 27 važi znak jednakosti. Tako određene vrednosti intenziteta otkaza treba alocirati pojednim delovima sistema, da bi se ostvario zahtevani intenzitet čitavog sistema, vodeći računa o relativnoj osetljivosti na otkaze pojedinih podsistema.

Napokon, korišćenjem jed. (9) može se odrediti zahtevana pouzdanost delova sistema, uzimajući u obzir i zahtevano vreme rada.

Primer. Jedan sistem sastoji se od tri podsistema: (1) za merenje neke veličine, (2) za kodiranje i (3) za prenos. Na osnovu ispitivanja ocenjuje se da su intenziteti otkaza: $\lambda_1 = 0,001$ otkaz/čas; $\lambda_2 = 0,0005$ otkaz/čas, $\lambda_3 = 0,0025$ otkaz/čas. Alocirati pouzdanosti ako se traži da sistem tokom 24 časa rada ima pouzdanost $R = 0,95$. Rad: Iz jed. (9) sledi:

$$R(24) = \exp(-24 \cdot \lambda^*)$$

$$\lambda^* = -(\ln 0,95) : 24 = 0,00214$$

Rezultati proračuna se daju u tabeli 2.

Tab. 2. – Alokacija pouzdanosti na podsysteme

Podsystem	λ_i otkaz/čas	u_i (iz 28)	λ_i^* (iz 30)	R_i^* (iz 9)
1	0.001	0.25	0.000535	0.9872
2	0.0005	0.125	0.00027	0.9935
3	0.0025	0.625	0.00134	0.9684

U zadnjoj koloni su dobijene alocirane neophodne pouzdanosti podsistema, ukoliko se primeni ova metoda alokacije, koja vodi računa o relativnim osetljivostima na otkaz pojedinih podsistema.

(D) ALOKACIJA OJAČAVANJEM NAJSLABIJE KARIKE SERIJE. Ova metoda se nekako spontano na-

gledišta povećanja sigurnosti sistema. 'Odaberi dispoziciju tako da sebi ne vežeš ruke, ako kasnije treba da rekonstruišeš sistem radi poboljšanja performansi njegove sigurnosti', nameće se kao mudra poruka koju treba često ponavljati.

5. PRIMER ODREĐIVANJA SIGURNOSTI REGIONALNOG VODOVODNOG SISTEMA

Da bi se ilustrovali principi određivanja pouzdanosti jednog složenog sistema, posebno da bi se pokazali načini poboljšanja pouzdanosti po metodi ojačanja najslabije karike u rednoj vezi, razmotriće se jedan hipotetički regionalni vodovodni sistem koji se naslanja na akumulaciju sa sezonskim regulisanjem, čija je obezbeđenost, za dopuštenu veličinu redukcije $\omega = 0,5$ jednaka $P = 0,97$. Neka je magistralni cevovod $L = 120$ km, sa $\lambda \approx 0,1 \text{ god.}^{-1}$ ($\lambda = 0,00001 \text{ čas}^{-1}$), $\mu = 0,05 \text{ čas}^{-1}$, što odgovara $MTTR = 20$ časova (vrlo strog zahtev u pogledu operativnosti popravki kvarova. Na pouzdanost regionalnog sistema utiče i buster stanica, sa pumpama čije su $\lambda = 0,00001 \text{ čas}^{-1}$, i $m = 0,04$ ($MTTR \approx 24$ časa). Pouzdanost sklopke je $\lambda = 0,00005 \text{ čas}^{-1}$. Sagledati osnovne aspekte pouzdanosti takvog uprošćenog sistema.

Pouzdanost buster stanice kada bi bila ugrađena samo jedna pumpa bila bi za godinu dana (8760 sati):

$$R_{bs1}(8760) = \exp(-\lambda t) = \exp(-0,00001 \cdot 8760) = 0,914$$

Ukoliko bi ta buster stanica bila rešena sa dve istotipne pumpe (jedna u hladnoj rezervi) tada bi se pouzdanost takvog uređaja značajno povećala, što odgovara jednom od većih skokova prikazanim na početnom delu dijagrama na slici 4.

$$R_{bs2}(8760) = e^{-0,00001 \cdot 8760} (1 + 0,00001 \cdot 8760) = 0,993$$

Uvođenjem u razmatanje i opasnosti od kvara sklopke (jed. 19) dobija se pouzdanost podsistema sa buster pumpama:

$$R_{bps} = 0,985$$

Zahvaljujući činjenici da je $MTBF \gg MTTR$ ($\lambda \ll \mu$) raspoloživost sistema buster stanice je vrlo visoka i iznosi $A_{bps}(8760) = 0,999$.

Sa cevovodom, međutim, situacija nije tako povoljna, ukoliko se računa sa $\lambda \approx 0,1 \text{ god.}^{-1}$ ($\lambda = 0,00001 \text{ čas}^{-1}$), što je realno shodno dijagramu na slici 3. Zato će se razmotriti neka varijantna rešenja, da bi se videlo koliko mnogo konfiguracija sistema utiče na pouzdanost.

Dispozicija I: Ako bi se sistem realizovao u vidu jednog magistralnog cevovoda dužine 120 km, tada bi po zakonitostima pouzdanosti serijske veze (120 elemenata od po 1 km) iz jed. (10) do (12) sledilo:

$$\Lambda = 0,0012 \text{ čas}^{-1}; MTBF = 833 \text{ časa}; R(8760) = 0,000033$$

Pošto je $MTBF = 833$ časa, to znači da se mogu očekivati kvarovi na magistralnom cevovodu prosečno svakih 35 dana. Da bi se ostvarilo jako operativno i mobilno popravljanje kvarova ($MTTR \approx 20$ časova) potrebno je imati odgovarajuću opremu i dobro obu-

čene ekipe. Zbog brze popravke raspoloživost cevovoda je visoka i iznosi $A = 0,999$. Međutim, sasvim je izvesno da planer ne bi mogao da prihvati vrlo nisku pouzdanost R , zbog koje bi nastupali ozbiljni problemi u sistemu tokom njegove eksploatacije.

Povećanje pouzdanosti ovog sistema može se ostvariti primenom više mera:

(a) **Ugrađivanjem rezervoara** duž trase cevovoda, tako da se podmirivanje delova konzumnih područja može ostvariti iz njih, dok traje proces detekcije i otklanjanja kvara. To podrazumeva podelu cevovoda na veći broj deonica koje se mogu isključiti u slučaju kvara, uz snabdevanje potrošača iz odgovarajuće dimenzionisanih rezervoara.

(b) Pojedine prekidne komore, kojih ima više na dugačkim i granatim sistemima, mogu se rešiti u vidu rezervoara, u cilju povećavanja sigurnosti regionalnih sistema.

(c) Umesto jednog cevovoda mogu se postavljati dva, manjih kapaciteta, sa međusobnim povezivanjem na određenim rastojanjima, tako da se prilikom kvara može da isključi i izoluje havarisana deonica, a da druga polovina kapaciteta cevovoda još uvek normalno funkcioniše. Tako se, uz pretpostavku da je koeficijent dopustive redukcije $\omega = 0,5$ mogu podmirivati potrebe za vodom uz prihvatljiv donji prag ograničenja.

(d) Smanjenje opasnosti od kvara λ kontrolom svakog elementa cevi koji se ugrađuje i posebnom brigom o obradi spojnicama. (Proverom svake pojedinačne cevi na probnom stolu opasnost od kvara se može smanjiti za nekoliko puta, što je veoma važno kod realizacije regionalnih sistema).

(e) U konačnim fazama razvoja sistema može se konfiguracija rešavati sa tri cevi, tako da se kasnije pouzdanost može računati po principu „2 do 3”, uz koeficijent redukcije $\omega = 0,66$. To takođe podrazumeva povezivanje cevovoda i realizaciju sistema zatvarača, kako bi se mogla da izoluje deonica sa kvarom, bez prekidanja funkcije celog sistema.

(f) Spajanje grana susednih regionalnih sistema, kako bi se obezbedila alternativna napajanja u havarijskim situacijama.

Dispozicija II: Ukoliko se na trasi razmatranog cevovoda predvide tri rezervoara, čiji kapaciteti omogućavaju podmirivanje konzuma tokom obavljanja popravke, tada se može značajno povećati pouzdanost cevovoda. Ukoliko je zadnji rezervoar na 5 km od zadnjeg konzumnog područja, tada je:

$$\Lambda = 0,00005 \text{ čas}^{-1}; MTBF = 20000 \text{ časova}; R = 0,649$$

Približavanjem rezervoara konzumnim centrima povećava se pouzdanost, uz pretpostavku da je zapremina usaglašena sa potrošnjom tokom popravke kvara. Tako se sa približavanjem zadnjeg rezervoara na samo 2 km od zadnjeg konzumnog izlaza, pouzdanost cevovoda povećava na $R = 0,840$.

ZAKLJUČAK

Cilj ovog razmatranja bio je da ukaže na veliki značaj blagovremenog i detaljnog izučavanja svih kategorija sigurnosti prilikom planiranja složenih vodoprivrednih sistema. Te kategorije su: obezbeđenost sistema, koja se ostvaruje dimenzionisanjem akumulacija i/ili drugih izvorišta i kapaciteta; pouzdanost zadatka i operativna gotovost. Te kategorije su posebno važne za planiranje regionalnih vodovodnih sistema. Alokacija pouzdanosti po pojedinim čvorovima se može obaviti primenom više izloženih metoda, ali je najbolje ako se obezbede sve neophodne podloge, kako bi se ista izvršila primenom dinamičkog programiranja. Takođe je važno da se konfiguracija, parametri i dispozicija sistema tako odaberu da se pouzdanost sistema može kasnije povećavati, merama koje su pokazane u radu.

Na kraju valja podsetiti na mudru misao ruskog avio-konstruktora Jakovljeva: „Što se dalje otkrije od stola planera, nepouzdanost se skuplje plaća”. U slučaju regionalnih vodovodnih sistema, kao najvitalnije infrastrukture, cena nepouzdanosti bila bi izuzetno visoka. Zato se u proces planiranja moraju da ugrade analize svih navedenih komponenti sigurnosti, kako bi se tek na bazi njih definitivno odlučivalo o konfiguraciji i parametrima sistema. Dobar planer će se tokom tog odlučivanja priseliti i ovih Murphyjevih zakona: 'Mother

Nature is a bitch. Nature always sides with the hidden flaw'. ('Majka Priroda je kučka. Ona je uvek na strani skrivenih grešaka'). Zato planirajući složene sisteme ne smemo neodgovorno računati da majka Priroda neće kad-tad iznaći sve njihove skrivene mane i nepouzdanosti.

LITERATURA

- [1] Abramov, N.N.: Nadežnost sistem vodosnabženija, Strojizdat, (1979).
- [2] Dhillon, B.S. and Channan Singh: Engineering Reliability, Publ. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [3] Đorđević, B.: Vodoprivreni sistemi, Građevinski fakultet, Beograd, 1991.
- [4] Đorđević, B.: Cybernetics in Water Resources Management, Water Resources Publication, USA, Co., 1993.
- [5] Henley, E. & Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- [6] Ušakov, I.A. (Red.): Spravočnik po nadežnosti tehničkih sistem, Moskva, Radio i svjaz', 1985.
- [7] Vukadinović, S. i Todorović, D.: Elementi teorije sigurnosti i teorije obnavljanja tehničkih sistema, Privredni pregled, Beograd, 1979.
- [8] Vujanović, N.: Quality Control and Reliability, TSC, Zagreb, 1981.

RELIABILITY ALLOCATION IN COMPLEX WATER RESOURCE SYSTEM

by

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

Summary

Reliability of complex water resource system is considered, emphasizing the reliability allocation problem. The reliability optimi-

zation problem is defined. An example of improving reliability of regional water-supply system is presented.

Key words: Reliability, Readiness, Water Resources, Optimization

Redigovano 12.03.1995.