CS06RA835

IBK-1319

IBK-1319

Stojan Milivojević

ANALIZA POUZDANOSTI REAKTORSKIH SISTEMA PRIMENOM METODA VEROVATNOĆE

INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE „BORIS KIDRIČ"
BEOGRAD-VINČA

INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE "BORIS KIDRIČ" - VINČA
LABORATORIJA ZA TOPLOTNU FIZIKU I TEHNIKU

IBK - 1319

IBK-1319

Stojan Milivojević

ANALIZA POUZDANOSTI REAKTORSKIH SISTEMA PRIMENOM METODA VEROVATNOĆE

VINČA - BEOGRAD
Decembar 1974.

S a d r ž a j

	Str.
U V O D	1
1. PROBLEMI ANALIZE	2
1.1. Rešavanje problema	3
1.2. Statistički prilaz rešavanju problema	4
2. PROIZVODNA FUNKCIJA	8
2.1. Opšta definicija	9
2.2. Odredjivanje srednje vrednosti i varijance raspodele verovatnoće date proizvodnom funkcijom	12
2.3. Konvolucija	18
2.4. Matrično izvodjenje konvolucije	20
2.5. Konvolucija slučajnih promenljivih koje imaju istu raspodelu verovatnoće	24
3. PARAMETRI SISTEMA	28
3.1. Podela parametara	29
3.2. Konstantni parametri	30
3.3. Slučajni parametri	31
3.4. Elementi sistema	32
4. DOGADJAJI	34
4.1. Normalni (povoljni) i nepovoljni dogadjaji	35
4.2. Verovatnoća pojavljivanja dogadjaja	37
4.3. Raspodela verovatnoće doznih nivoa kao posledica ponašanja jednog parametra u datim uslovima	41
4.4. Verovatnoća nivoa doze kao posledica ponašanja više slučajnih parametara u datim uslovima	45
5. SIGURNOSNI UREDJAJI	50
5.2. Definicija	50
5.2. Osnovne osobine	51

Str.

5.3. Delovanje sigurnosnih uredjaja na nepovoljne dogadjaje 52

5.3.1. Slučaj uspešnog delovanja uredjaja 52

5.3.2. Slučaj otkaza svih uredjaja 54

6. METOD VEROVATNOĆE 56

6.1. Način uključivanja dogadjaja u metod 56

6.1.1. Uzroci 58

6.1.2. Promene parametarskih stanja 60

6.1.3. Posledice 62

6.2. Verovatnoća doze (ili nivoa) zračenja 65

6.3. Verovatnoća pojavljivanja uzroka u vremenskom periodu t 67

6.4. Proizvodna funkcija - osnovni zakon raspodele u metodu 69

6.4.1. Odredjivanje verovatnoće ukupne (kumulativne) doze 71

7. PROCENA POUZDANOSTI 75

7.1. Pouzdanost parametara 75

7.2. Pouzdanost sistema 77

ZAKLJUČAK 80

LITERATURA 83

U V O D

Suštinski fizički proces - nuklearna fisija, na kojoj je zasnovan rad reaktorskih sistema, uzrok je pojavljivanju odredjene opasnosti po zdravlje ljudi. Ta opasnost nastaje zbog mogućeg oslobadjanja radioaktivnosti teških elemenata i fisionih proizvoda stvorenih u gorivu. Zato zaštita ljudi od radioaktivnosti predstavlja osnovni cilj pri razmatranju pouzdanosti reaktorskih sistema.

Pomenuti specifični fizički proces zahteva veoma složenu strukturu reaktorskih sistema da bi se ostvario osnovni cilj - zaštita ljudi. Da bi zaštita bila što bolja i potpunija neophodno je postaviti dovoljan broj prepreka izmedju izvora radioaktivnog zračenja i ljudi. Postavljene prepreke odnose se u principu na dve situacije koje mogu nastati u toku rada: normalna situacija i nepovoljna situacija, tj. situacije nastanka nepovoljnih slučajeva koji izbacuju sistem iz normalnog radnog stanja. Analiziranjem uslova rada sistema, pojavljivanja mogućih nepovoljnih dogadjaja i efikasnosti delovanja postavljenih prepreka u normalnim i nepovoljnim uslovima rada dolazi se do procene sigurnosti rada sistema, utvrdjuje se pouzdanost razmatranog reaktorskog sistema.

Zato se pouzdanost reaktorskog sistema može definisati kao stepen efikasnosti delovanja predvidjenih i postavljenih prepreka u svim uslovima rada, normalnim i nepovoljnim, tako da je obezbedjena zadovoljavajuća zaštita ljudi i okoline od radioaktivnog zračenja.

1. PROBLEMI ANALIZE

Nema sumnje da se može postići visoki stepen pouzdanosti sistema u radu postavljanjem dovoljnog broja zaštitnih prepreka, visokog kvaliteta i efikasnog delovanja. Ali, nikada se ne može dostići potpuna, savršena pouzdanost, jer se ne mogu predvideti sve nepovoljne promene, a i ne mogu se obraditi u analizi. Uvek će postojati mogućnost pojavljivanja malo verovatnih nepovoljnih dogadjaja, što znači i oštećenja goriva, i zbog toga oslobodjenje radioaktivnosti u okolinu. To nije moguće izbeći i odredjena zaostala opasnost po ljude i okolinu, makar i najmanja, uvek će postojati.

Problemi uvek prisutne, uvek moguće opasnosti upućuju na realan, praktičan cilj - smanjenje opasnosti na što manju meru. Istovremeno se postavlja i pitanje šta je prihvatljivi mali nivo opasnosti, kao i kakav je način njegovog odabiranja. Jedan od načina je izbor radnih parametara sa većim konzervativizmom, unošenje više sigurnosnih karakteristika u sistem, izbog mesta sistema udaljenijih od naseljenih mesta, itd. Time se stvara utisak o većoj bezbednosti, a dodavanjem novih i poboljšavanjem postojećih sigurnosnih karakteristika stiče se sve povoljniji utisak - da se razmatrana stanja približavaju idealnom stanju, stanju potpune sigurnosti. Ovaj proces, ovako usmeren, praktično nema kraja; ali on istovremeno vodi i komplikaciji postojećih stanja, što u najnepovoljnijem slučaju može dovesti i do smanjenja sigurnosti. To znači da i ovakav način, naizgled potpun, savršen sa gledišta otklanjanja opasnosti, sadrži nepotpunosti i neodredjenosti koje mogu i umanjiti sigurnost.

Ranije se uz iskustvo i procenu, sa dovoljnom dozom konzervativizma uz to, lako dolazilo do odluke o prihvatljivoj opasnosti. Medjutim, nepodobnost takvog pristupa problemima opasnosti, i sa sigurnosnog i sa ekonomskog stanovišta, upućuje

na iznalaženje pogodnijih pristupa, koji su zasnovani na realnijim osnovama. Tu realniju osnovu predstavlja iskustvo (ranije je bilo nedovoljno i nepotpuno) koje se odnosi na eksploataciju reaktorskih sistema, na dogadjaje, od zanemarljivih do veoma nepovoljnih, koji mogu izazvati opasnost. Potpunije iskustvo omogućava realniju procenu mogućih opasnosti, koja uz razvoj novih, statističkih metoda vodi najpogodnijim putem ka rešavanju problema analize.

1.1. Rešavanje problema

Brojni su problemi pri analizi pouzdanosti, različiti su putevi njihovog rešavanja, pa zato i različitog krajnjeg efekta. U principu, koristi se neki kriterijum i vrši odgovarajući proračun da bi se rešio neki problem, a iskustvo, eksploatacija će pokazati koliko je uspešno bilo to rešavanje. Većinu problema je moguće uspešno rešiti, ali neki od problema, u većoj ili manjoj meri, imaju nepotpuna rešenja. Zatim, često se ne može doći ni do kakvog rešenja za pojedine probleme, zbog neizbežnog zakašnjenja izmedju uočavanja problema i vremena rada potrebnog da bi problem bio rešen. Za neke vrste problema nije moguće unapred predvideti potpuno rešenje. U takve probleme se obično uključuju slučajevi ili kombinacije slučajeva veoma male verovatnoće. Na primer, pretpostavljeni dogadjaji male verovatnoće, koji se koriste za odredjivanje reaktorske pouzdanosti, spadaju u ovu vrstu. Obzirom na njihovu malu verovatnoću pojavljivanja biće mala verovatnoća i za potvrdjivanje njihovih rešenja kroz eksploataciju, radno iskustvo. Takve retke slučajeve treba pažljivo razmotriti, jer su uzrok mnogim teškoćama prilikom odredjivanja reaktorske pouzdanosti.

Prihvatanje i korišćenje reaktorskih sistema uslovljeno je činjenicom da su nepovoljni dogadjaji zaista retki. Znanja o njima su nepotpuna - što je i poželjno, a i trebalo bi i moralo da ostane tako. Problemi koji zbog njih nastaju moraju se stoga rešavati na specifičan način, a to je način kojim se

rešavaju svi slučajevi čije je pojavljivanje okarakterisano verovatnoćom. Metod koji uzima u obzir njihovu verovatnoću daje posledice kroz odgovarajuće verovatnoće. Na ovaj način verovatnije posledice više doprinose opasnosti, a malo verovatne eliminišu same sebe zbog male verovatnoće pojavljivanja. Koristi od ovakvog prilaza su očigledne, jer ističu slučajeve koji znatno doprinose opasnosti.

1.2. Statistički prilaz rešavanju problema

Analiza reaktorske pouzdanosti, kao što se vidi, veoma je složena, jer je takva i struktura reaktorskih sistema, koja je samim tim veoma pogodno tlo za nastanak širokog spektra mogućih poremećaja. Uticaj nastalih poremećaja može biti veoma raznolik, a od načina prilaza analizi problema koji nastaju zbog poremećaja zavise dobijena rešenja, tj. veće ili manje približavanje realnom stanju, više ili manje oštra ograničenja nametnuta osnovnim elementima sigurnosnog sistema reaktorskog postrojenja. Rešenja koja nameću oštra ograničenja treba da obezbede potpuniju pouzdanost sistema, da što više približe sistem idealnom stanju sigurnosti u radu. Metodi koji teže takvim rešenjima su konzervativni i korišćeni su u početnom periodu primene nuklearne energije. To je razumljivo obzirom na nedovoljno iskustvo o opasnostima koje su mogle nastati i koje je teško bilo predvideti. Korišćenjem konzervativnih rešenja otklanjan je svaki rizik od novog, nepoznatog, nepotpuno ispitanog.

Medjutim, eksploatacioni razvoj nuklearnih postrojenja otklonio je mnoge dileme, nedovoljno poznato učinio poznatim, jasnim, a kroz usavršavanje primene nuklearnih procesa i kroz odgovarajuće eksperimentalne radove došlo se do brojnih podataka i dovoljnog iskustva da se drugačije pridje rešavanju problema pouzdanosti. Takav prilaz zasnovan je na činjeničnom, realnom stanju, na realnim odnosima parametara reaktorskih sistema, na ponašanju delova i celine u stvarnosti i na proučavanju posledica nastalih usled takvog ponašanja. Pri tome, i one posledice

koje se retko pojavljuju moguće je uključiti u analizu kroz njihove postojeće (što je malo verovatno) ili pretpostavljene verovatnoće pojavljivanja.

Takav, što je moguće realniji prilaz rešavanju problema pouzdanosti zahteva primenu odgovarajućih matematičkih metoda. Zapravo, ako se koristi iskustvo stečeno eksploatacijom razmatranog reaktorskog sistema, ako se koriste podaci o parametrima sistema iz eksploatacije, ako se koriste eksperimentalni podaci za pojedine parametre, onda to vodi u domen obimnog i raznovrsnog analiziranja sistema, pri čemu za svaki parametar postoje brojni podaci o njegovom ponašanju u različitim uslovima rada, kao i o odnosu izmedju parametara u njihovom sveukupnom dejstvu na sistem. Takvi uslovi za analizu upućuju na statistički način razmatranja pouzdanosti, na korišćenje osnovnih zakona teorije verovatnoće i statistike pri obradi podataka o parametrima sistema.

Složenost i brojnost analiziranih problema, statistički prilaz analizi i ozbiljnost i tačnost rezultata koji iz toga treba da proizidju uslovili su razradu metoda verovatnoće, kojim se široko i sveobuhvatno analiziraju problemi pouzdanosti nekog reaktorskog sistema. Usvajanjem statističkog prilaza rešavanju problema, moguće je oceniti opasnost po ljude u odredjenim normalnim ili nepovoljnim situacijama, i to kroz verovatnoću pojavljivanja nivoa ili doze zračenja u tim situacijama. Za takvu statističku analizu neophodno je korišćenje postojećih i razvoj novih, složenijih metoda verovatnoće [1-3], kojima se mogu obradjivati mnogobrojni problemi iz svakodnevne prakse - eksploatacije širokog spektra sve složenijih i sve većih nuklearnih postrojenja i ne samo nuklearnih, već industrijskih postrojenja uopšte.

Osnovna ideja razradjenog i primenjenog metoda verovatnoće je da se elementi razmatranog sistema, koji poseduju statistički karakter, iskazuju svojim raspodelama verovatnoća: pojavljivanje uzroka bilo kakve promene dato je verovatnoćom, promena parametara usled nastalih uzroka izražavaju se verovatnoćom i,

najzad, posledice zbog tih promena imaju svoju verovatnoću. Osnovni cilj metoda je da se iskoristi statistički karakter uzroka, promena i njihovih posledica, da se ispita njihov uticaj na bezbednost ljudi i izrazi verovatnoćom nivoa ili doze zračenja na nekom mestu pri datim uslovima rada. Povoljnost ovakvog metoda ogleda se i u tome što uvek prisutne neodredjenosti u elementima sistema preuzimaju na sebe raspodele verovatnoća i odstranjuju ih kroz primenu.

Ranije je pomenuta činjenica da je nemoguće postići idealno rešenje za probleme potpunog otklanjanja opasnosti po zdravlje ljudi od rada reaktorskih postrojenja, čak i primenom najkonzervativnijih načina. Medjutim, ako se usvoji neki nivo doze, koji bitno ne ugrožava zdravlje ljudi i koji predstavlja neki rizik makar i mali /4/, i ako se primeni u statističkim metodima analize dobiće se realnija rešenja i povoljnija sa ekonomskog stanovišta. Usvojeni nivo doze zračenja je prihvaćeni rizik, u okviru čijih granica je moguće slobodnije, objektivnije i raznovrsnije razmatranje pouzdanosti, radi potpunijeg iskorišćenja kapaciteta sistema i ostvarenja što boljih radnih efekata. Na ovaj način, oštra ograničenja nametnuta konzervativnom analizom mogu se u priličnoj meri ublažiti, a da se istovremeno prihvaćenim rizikom ne naruši potrebna pouzdanost sistema i ne izloži suvišnoj opasnosti zdravlje ljudi.

Razmatranje problema pouzdanosti ukazuje na brojne teškoće od načina predvidjanja normalnih i nepovoljnih situacija, koje mogu nastati u eksploataciji, do organizovanja odbrane, zaštite od mogućih nepovoljnih posledica. Principijelno najbolji put za organizovanje zaštite je sprečavanje nastanka nepovoljnih dogadjaja. Obezbedjenje kvalitetnog programa osiguranja i njegovo efikasno delovanje dozvoljava pojavljivanje nepovoljnih dogadjaja vrlo malih verovatnoća. Ali i ta mala verovatnoća dovoljan je razlog za predvidjanje i organizovanje dodatnog osiguranja za situacije kada su već nastali nepovoljni dogadjaji, u cilju postizanja zadovoljavajuće zaštite u svim uslovima. Tako se analizom pouzdanosti želi obuhvatiti sva složenost eksploatacije

reaktorskih postrojenja i sprovesti uspešna odbrana od nepovoljnih dogadjaja.

2. PROIZVODNA FUNKCIJA

Polazeći od postavke da je u metodu sve zasnovano na verovatnoći, od ulaznih parametara sa svojim promenama koji slede neku raspodelu verovatnoće, preko poremećaja u sistemu i odgovarajućih posledica u vidu verovatnoće, do krajnjeg delovanja svih tih komponenti u vidu raspodele verovatnoće nivoa doze zračenja, postavlja se pitanje da li je moguće da toliki i tako raznovrstan broj pojavljivanja raspodele verovatnoće u analizi budu predstavljeni poznatim zakonima, funkcijama iz teorije verovatnoće. Nažalost, u najvećem broju slučajeva raspodele verovatnoće razmatranih komponenti neće slediti nijedan od poznatih zakona verovatnoće, pa bi se njihovo pojedinačno i ukupno delovanje na pouzdanost sistema teško moglo uklopiti u analizu. Zbog toga je potrebno imati i koristiti neki opštiji zakon, funkciju kojom se mogu predstaviti sve raspodele verovatnoće koje se javljaju u analizi.

Prvi put je u statističkoj analizi, u radu /5/, korišćena jedna takva funkcija - proizvodna (generating) funkcija, čije su osnovne osobine date u /6/. Značaj primene ovakve opšte funkcije pri rešavanju statističkih problema je veoma veliki, pa su i koristi od njene primene velike. U ovom metodu verovatnoće učešće, primena proizvodne funkcije predstavlja značajan doprinos u obradi i analizi problema pouzdanosti. Zato je pre opisivanja samog metoda za analizu pouzdanosti data u detaljima teorija proizvodnih funkcija - od definicije, preko opisivanja osnovnih osobina do operacija sa njima - da bi kasnije, u metodu verovatnoće, bio dat način primene u konkretnim uslovima razmatranja pouzdanosti sistema. Biće pokazano da praktična primena proizvodne funkcije na probleme statističkog karaktera je i moguća i široka i raznovrsna. Odgovarajuća priprema i pogodna obrada razmatranog problema, radi korišćenja proizvodne funkcije,

daju uvek veoma korisne, tačne i upotrebljive rezultate; zato se i skup velikog broja problema statističkog karaktera i u najsloženijim sistemima, kakvi su reaktorski, može rešavati jednostavno i brzo primenom proizvodne funkcije i dobiti rešenja u sažetom, jednostavnom obliku koji karakteriše opšte stanje razmatranog problema.

2.1. Opšta definicija

Iako postoji priličan broj detaljno obradjenih i u eksplicitnom obliku datih zakona raspodele verovatnoće, ipak se pri proučavanju problema koji imaju statistički karakter najčešće ne može dati njihova raspodela verovatnoće u eksplicitnom obliku. To se može uspešno otkloniti primenom proizvodnih funkcija.

Proizvodna funkcija se definiše na sledeći način. Ako je dat niz realnih brojeva

$$a_o,\ a_1,\ a_2,\ \ldots,\ \text{tj. niz } \{a_k\},$$

i ako izraz

$$G(s) = a_o + a_1 s + a_2 s^2 + \ldots = \sum_k a_k s^k \qquad (2.1)$$

konvergira u nekom intervalu

$$-s_o < s < s_o ,$$

tada se $G(s)$ naziva proizvodnom funkcijom[1] niza realnih brojeva $\{a_k\}$. Sama promenljiva s nema značaja, mada se može smatrati pomoćnom veličinom, jer služi da se proizvodna funkcija predstavi u pogodnom obliku, što omogućava primenu odredjenih računskih operacija i, kao posledicu toga, dobijanje karakterističnih veličina razmatrane raspodele verovatnoće.

Jednačina (2.1) je opšti oblik proizvodne funkcije koja, ako skup realnih brojeva $\{a_k\}$ po odredjenom zakonu uzima vrednosti u nekom konačnom ili beskonačnom intervalu, teži nekoj

veličini zavisnoj od s. To se jasno uočava na karakterističnim primerima koji slede.

P r i m e r i:

1) Da bi funkcija (2.1) konvergirala, $\{a_k\}$ i s moraju zadovoljavati neke uslove. Neka je $a_k = 1$ za svako k. Tada je proizvodna funkcija

$$G(s) = 1 + s + s^2 + \ldots + s^{n-1}$$

što nije ništa drugo do geometrijski red, koji ima vrednost

$$G(s) = \frac{1 - s^n}{1 - s}$$

U slučaju $|s| < 1$, sa rastućim n $s^n \to 0$, pa je

$$G(s) = \frac{1}{1-s} ,$$

tj. $G(s)$ sigurno konvergira.

2) Ako je skup realnih brojeva a_k

$0, 0, 1, 1, 1, \ldots,$

onda je

$$G(s) = s^2+s^3+s^4+\ldots = s^2(1+s+s^2+\ldots) = \frac{s^2}{1-s} .$$

3) Skup $a_k = \frac{1}{k!}$ ima proizvodnu funkciju

$$G(s) = 1 + \frac{s}{1!} + \frac{s^2}{2!} + \frac{s^3}{3!} + \ldots = e^s .$$

4) Skup $a_k = \binom{n}{k}$, za fiksirano n, ima proizvodnu funkciju

$$G(s) = 1 + \binom{n}{1}s + \binom{n}{2}s^2 + \ldots + \binom{n}{n}s^n ,$$

odnosno

$$G(s) = \sum_{k=o}^{n} \binom{n}{k} s^k = (1 + s)^n .$$

5) Binomna raspodela je data izrazom

$$a(k;n,p) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}, \quad p+q=1 ,$$

pa je

$$G(s) = \sum_{k=o}^{n} \binom{n}{k} (ps)^k q^{n-k} = (q+ps)^n .$$

6) Poasonova raspodela ima oblik

$$a(k;\lambda) = \frac{e^{-\lambda k}}{k!} ,$$

a njena proizvodna funkcija je

$$G(s) = \sum_{k=o}^{\infty} \frac{e^{-\lambda}(\lambda s)^k}{k!} = e^{-\lambda+\lambda s} .$$

7) Ako slučajna promenljiva x ima geometrijsku raspodelu tako da je

$$P(x=k) = pq^k, \quad k = 0,1,2,\ldots,$$

gde su p i q pozitivne konstante i $p+q=1$, onda je odgovarajuća proizvodna funkcija

$$G(s) = \sum_{k=o}^{\infty} p(qs)^k = p \sum_{k=o}^{\infty} (qs)^k = \frac{p}{1-qs} .$$

(1) *PROIZVODNA FUNKCIJA (GENERATING FUNCTION). Naći odgovarajući izraz za ovu funkciju nije lako, pogotovo što ovakav tip funkcije nije obradjivan u prilično siromašnoj domaćoj literaturi o statistici i verovatnoći. S obzirom na značenje reči generate - proizvoditi, stvarati, roditi - verovatno bi naziv* <u>*proizvodna funkcija*</u> *bio najbliži originalu, eventualno izvodna funkcija. Ipak, čini se, trebalo bi usvojiti naziv "proizvodna", jer izraz (2.1) predstavlja zbir proizvoda dve*

veličine a_k *i* k, *koje su medjusobno zavisne, a koji proizvodi (daje, izvodi) odredjene karakteristike, zaključke o posmatranim veličinama.*

Interesantan je jedan tip funkcija koji ima sličan naziv - MOMENT GENERATING FUNCTION, ali je definisan na drugoj osnovi,

$$M(t) = \int_a^b e^{tx}\phi(x)dx ,$$

gde je $\phi(x)$ *kriva frekvencije (raspodela verovatnoće) slučajne promenljive* x, *a interval* (a,b) *je interval unutar koga je kriva frekvencije zadana. Ako se funkcija* M(t) *razvije*

$$M(t) = \int_a^b (1 + \frac{tx}{1!} + \frac{t^2x^2}{2!} + \ldots)\phi(x)dx =$$

$$= \int_a^b \phi(x)dx + t\int_a^b x\phi(x)dx + \frac{t^2}{2!}\int_a^b x^2\phi(x)dx + \ldots$$

dobiće se

$$M(t) = 1 + t\,\mu_1' + \frac{t^2}{2!}\mu_2' + \frac{t^3}{3!}\mu_3' + \ldots$$

Vidi se da su koeficijenti u tom razvoju jednaki pomoćnim momentima za zadanu krivu frekvencije. Ako je moguće naći funkciju M(t) *i razviti je u red, tu funkciju (moment generating function) Vranić /7/ naziva FUNKCIJOM IZVODNICOM, budući da ona u odredjenom smislu izvodi momente. To se vidi iz gornjeg razvoja, jer je*

$$\mu_1' = M'(o), \quad \mu_2' = M''(o), \quad \mu_3' = M'''(o), \ \ldots$$

2.2. Odredjivanje srednje vrednosti i varijance raspodele verovatnoće date proizvodnom funkcijom

Pored toga što se proizvodnom funkcijom na matematički

jednostavan način predstavlja verovatnoća pojavljivanja nekog dogadjaja, čak i kada ne sledi neki od poznatih zakona verovatnoće, njome se lako dobijaju osnovne karakteristike raspodele. Sažeta forma proizvodne funkcije veoma pogoduje primeni diferencijalnog računa za odredjivanje karakteristika raspodele, pri čemu treba napomenuti da su najvažnije karakteristike srednja vrednost i varijanca (Var), odnosno kvadrat standardnog odstupanja σ^2.

U postupku za odredjivanje ovih veličina polazi se od proizvodne funkcije nešto drugačijeg oblika od onog koji je dat jednačinom (2.1). Naime, koristi se proizvodna funkcija oblika

$$G(s) = \sum_{k=o}^{n} p_k s^{x_k} , \tag{2.2}$$

odnosno u razvijenom obliku

$$G(s) = p_o s^{x_o} + p_1 s^{x_1} + p_2 s^{x_2} + \ldots + p_n s^{x_n} , \tag{2.3}$$

gde je

$$\sum_{k=o}^{n} p_k = 1 , \tag{2.4}$$

a p_k je definisano kao verovatnoća da slučajna promenljiva[2] x ima vrednost x_k,

$$P(x=x_k) = p_k . \tag{2.5}$$

Oblik (2.2) je opštiji od oblika (2.1), jer se slučajna promenljiva x može odnositi na široki krug veličina iz raznih oblasti, a koje imaju statistički karakter, što će se i videti kasnije, u primeni proizvodnih funkcija na izučavanju konkretnih problema.

Iz računa verovatnoće je poznato da je srednja vrednost slučajne promenljive x, koja ima vrednosti x_o, x_1, $x_2, \ldots, x_n$ sa odgovarajućim verovatnoćama $p_o, p_1, p_2, \ldots, p_n$, u stvari

matematička nada (očekivanje) te promenljive i jednaka je zbiru proizvoda svih x_k sa odgovarajućim p_k, tj.

$$E(x) = \bar{x} = \sum_{k=o}^{n} x_k p_k \ . \tag{2.6}$$

Ako se (2.2) diferencira po s

$$\frac{d}{ds} G(s) = \sum_{k=o}^{n} x_k p_k s^{x_k - 1} \ ,$$

i stavi s = 1, dobija se

$$G'(1) = \sum_{k=o}^{n} x_k p_k \ ,$$

što je identično sa (2.6), pa je

$$E(x) = \bar{x} = G'(1) = \sum_{k=o}^{n} x_k p_k \ . \tag{2.7}$$

Prema tome, prvi izvod proizvodne funkcije, kada je s=1, daje srednju vrednost slučajne promenljive, čija je raspodela verovatnoće (funkcija frekvencije) data tom proizvodnom funkcijom.

Pri odredjivanju druge karakteristične veličine - varijance date raspodele verovatnoće (2.2), odnosno kvadrata standardnog odstupanja, polazi se od definicije da je varijanca moment drugog reda ili matematičko očekivanje od $(x-\bar{x})^2$, tj.

$$Var(x) = \mu_2 = E/(x-\bar{x})^2/ = \sum_{k=o}^{n} p_k (x_k - \bar{x})^2 \ . \tag{2.8}$$

Ovaj izraz se dalje razvija na sledeći način:

$$\sum_{k=o}^{n} p_k (x_k - \bar{x})^2 = \sum_{k=o}^{n} p_k x_k^2 - 2 \sum_{k=o}^{n} p_k x_k \bar{x} + \sum_{k=o}^{n} p_k \bar{x}^2 =$$

$$= \sum_{k=o}^{n} p_k x_k^2 - 2\bar{x} \sum_{k=o}^{n} p_k x_k + \bar{x}^2 \sum_{k=o}^{n} p_k =$$

$$= \sum_{k=o}^{n} p_k x_k^2 - 2\bar{x}^2 + \bar{x}^2 \ ,$$

tj.

$$\mathrm{Var}(x) = \sum_{k=o}^{n} p_k x_k^2 - \bar{x}^2 . \tag{2.9}$$

Prvi izvod funkcije (2.2) po s je

$$\frac{d}{ds} G(s) = \sum_{k=o}^{n} x_k p_k s^{x_k - 1} ,$$

drugi izvod je

$$\frac{d^2}{ds^2} G(s) = \sum_{k=o}^{n} x_k x_{k-1} p_k s^{x_k - 2} ,$$

što za $s=1$ daje

$$G''(1) = \sum_{k=o}^{n} x_k x_{k-1} p_k .$$

Ako se pretpostavi da se susedne vrednosti slučajne promenljive x razlikuju za 1 (jedan),

$$x_k - x_{k-1} = 1, \quad x_{k-1} = x_k - 1 ,$$

tada je

$$G''(1) = \sum_{k=o}^{n} x_k x_{k-1} p_k = \sum_{k=o}^{n} x_k (x_k - 1) p_k =$$

$$= \sum_{k=o}^{n} p_k x_k^2 - \sum_{k=o}^{n} p_j x_k ,$$

tj. s obzirom na jednačinu (2.6)

$$G''(1) = \sum_{k=o}^{n} p_k x_k^2 - G'(1) . \tag{2.10}$$

Odavde je

$$\sum_{k=o}^{n} p_k x_k^2 = G''(1) + G'(1) ,$$

što zamenom u (2.9) daje varijancu slučajne promenljive x,

odnosno kvadrat standardnog odstupanja

$$\mathrm{Var}(x) = \sigma^2 = G''(1) + G'(1) - /G'(1)/^2 \qquad (2.11)$$

Prema tome, slučajna promenljiva x sa datom raspodelom verovatnoće (2.2) ima srednju vrednost, $\bar{x}$, i varijancu, σ^2, odredjene jednačinama (2.7) i (2.11).

Od posebnog je interesa primena ovih formula na raspodele verovatnoće slučajnih promenljivih, koje inače ne slede poznate zakone raspodele verovatnoće, jer je jednostavna i brzo se dolazi do potrebnih karakterističnih veličina. To se potvrdjuje primerima primene na poznatim statističkim raspodelama.

P r i m e r i:

1) Proizvodna funkcija binomne raspodele

$$G(s) = (q+ps)^n$$

ima izvode

$$G'(s) = np(q+ps)^{n-1}, \quad G''(s) = n(n-1)p^2(q+ps)^{n-2} .$$

Prema jednačini (2.7)

$$\bar{a}_k = G'(1) = np ,$$

a prema jednačini (2.11)

$$\sigma^2 = n(n-1)p^2 + np - n^2p^2 = npq .$$

2) Proizvodna funkcija Poasonove raspodele

$$G(s) = e^{-\lambda + \lambda s}$$

ima izvode

$$G'(s) = \lambda e^{-\lambda + \lambda s} , \qquad G''(s) = \lambda^2 e^{-\lambda + \lambda s} ,$$

pa je

$$\bar{a}_k = \lambda, \quad \sigma^2 = \lambda .$$

3) *Geometrijska raspodela* $P(x=k) = pq^k$ *ima proizvodnu funkciju*

$$G(s) = \frac{1}{1-qs},$$

a ova izvode

$$G'(s) = \frac{pq}{(1-qs)^2}, \quad G''(s) = \frac{2pq^2}{(1-qs)^3},$$

pa je

$$\bar{x} = \frac{q}{p}, \quad \sigma^2 = 2\frac{q^2}{p^2} + \frac{q}{p} - \frac{q^2}{p^2} = \frac{q}{p^2}.$$

(2) *SLUČAJNA PROMENLJIVA je promenljiva koja može imati različite vrednosti, a svakoj pojedinoj vrednosti odgovara odredjena verovatnoća. Drugim rečima, sa odredjenom verovatnoćom slučajna promenljiva poprima, uzima neku vrednost iz skupa mogućih vrednosti. U tome je razlika izmedju OBIČNE PROMENLJIVE i PROMENLJIVE U STATISTIČKOM SMISLU. Jer, i obična promenljiva može poprimati sve moguće vrednosti, ali te vrednosti nisu uslovljene nikakvom verovatnoćom, dok slučajna promenljiva poprima pojedine vrednosti uz odredjenu verovatnoću.*

Uz pojam slučajne promenljive vezan je pojam STOHASTIČKE ZAVISNOSTI, koja kod slučajnih promenljivih zamenjuje pojam funkcionalne veze. Reč stohastičan je grčkog porekla i znači naslućivati, pa se ta reč upotrebljava kao sinonim za verovatnoću. To znači, ako postoji stohastička zavisnost ne postoji funkcionalna veza i obrnuto. Zato se slučajna promenljiva takodje naziva i STOHASTIČKOM PROMENLJIVOM.

Treba pomenuti još nekoliko pojmova koji idu uz slučajnu promenljivu. Skup svih mogućih vrednosti slučajne promenljive s pripadnim verovatnoćama naziva se ZAKONOM RASPODELE SLUČAJNE PROMENLJIVE. FUNKCIJA FREKVENCIJE ili RASPODELA VEROVATNOĆE $\phi(x)$ *definiše raspodelu slučajne promenljive, dok je*

FUNKCIJA RASPODELE definisana izrazom

$$\Phi(t) = \int_{-\infty}^{t} \phi(x)dx = P(-\infty<x\leq t) = P(-\infty,t) .$$

2.3. Konvolucija

Mogućnost množenja dve ili više proizvodnih funkcija, koje se naziva konvolucija, je veoma važna osobina i ima značajnu ulogu pri primeni proizvodne funkcije na izučavanje konkretnih problema.

Neka su date dve slučajne promenljive x i y, koje su medjusobno nezavisne, a koje su definisane na sledeći način:

$$P(x=j) = a_j , \quad P(y=k) = b_k ; \tag{2.12}$$

verovatnoća da istovremeno bude $x=j$ i $y=k$ jednaka je

$$P(x=j;y=k) = a_j b_k . \tag{2.13}$$

Medjutim, od ove dve medjusobno nezavisne slučajne promenljive može se načiniti nova slučajna promenljiva, koja je jednaka njihovom zbiru

$$S = x + y . \tag{2.14}$$

Tako je, na primer, slučaj $S = r$ u stvari unija slučajeva

$$(x=o;\ y=r), \quad (x=1;\ y=r-1)..., \ (x=r;y=o) \tag{2.15}$$

odnosno

$$(a_o,b_r), \ (a_1;b_{r-1}),..., \ (a_r;b_o) \tag{2.16}$$

Ovi slučajevi se uzajamno isključuju i zato je verovatnoća $P(S=r)=c_r$ data sledećim izrazom

$$c_r = a_o b_r + a_1 b_{r-1} + ... + a_r b_o = \sum_{k=o}^{n} a_k b_{r-k} . \tag{2.17}$$

Na osnovu ovog se definiše konvolucija. Neka su data dva brojna niza $\{a_k\}$ i $\{b_k\}$, onda novi niz $\{c_k\}$ definisan jednačinom (2.17) naziva se konvolucija (odvojnica, kompozicija) nizova $\{a_k\}$ i $\{b_k\}$, a to se označava sa zvezdicom (*)

$$\{c_k\} = \{a_k\}*\{b_k\}. \tag{2.18}$$

Ako nizovi $\{a_k\}$ i $\{b_k\}$ imaju proizvodne funkcije

$$G_a(s) = \sum_k a_k s^k, \quad G_b(s) = \sum_k b_k s^k , \tag{2.19}$$

a niz $\{c_k\}$ je njihova konvolucija i ima proizvodnu funkciju

$$G_c(s) = \sum_k c_k s^k , \tag{2.20}$$

pa je na osnovu jedn.(2.18)

$$G_c(s) = G_a(s)\cdot G_b(s) . \tag{2.21}$$

Drugim rečima, ako su x i y ne-negativne, celobrojne, uzajamno nezavisne slučajne promenljive sa proizvodnim funkcijama $G_a(s)$ i $G_b(s)$, tada njihov zbir ima proizvodnu funkciju $G_a(s)G_b(s)$. Vidi se, dakle, da se sabiranje slučajnih promenljivih vrši množenjem njihovih proizvodnih funkcija.

S obzirom na definiciju konvolucije, važi

$$\{a_k\}*\{b_k\}*\{c_k\} = \{c_k\}*\{b_k\}*\{a_k\} \quad \text{itd.} , \tag{2.22}$$

tj. konvolucija je komutativna i asocijativna operacija (isto kao i sabiranje slučajnih promenljivih).

P r i m e r i :

1) $a_k = b_k = 1, \quad k \geq 1; \quad c_k = k + 1.$

2) $a_k = k$, $b_k = 1$; $c_k = 1 + 2 + \ldots + k = \frac{k(k+1)}{2}$.

3) $a_o = a_1 = 1/2$, $a_k = 0$ za $k \geq 2$; $c_k = \frac{1}{2}(b_k + b_{k-1})$

4) *Ako je u pitanju Poasonova raspodela*

$$a(k;\lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}$$

čija je proizvodna funkcija $G(s) = e^{-\lambda+\lambda s}$, *može se direktno dokazati da je*

$$\{a(k;\lambda)\}*\{a(k;\mu)\} = \{a(k;\lambda+\mu)\}.$$

2.4. Matrično izvodjenje konvolucije

Opšti član proizvodne funkcije, koji je rezultat konvolucije dve slučajne promenljive, dat je jedn.(2.17). Uzimanje u obzir svih mogućih vrednosti r i primena postupka (2.17) daje sve članove rezultujuće proizvodne funkcije. Dati postupak konvolucije prilično je jednostavan. Medjutim, izvodjenje konvolucije se može sprovesti i jednostavno i vrlo pregledno, a da istovremeno obuhvati sve članove koji učestvuju u konvoluciji. Za takvo izvodjenje konvolucije pogodan je matrični račun. Jer, proizvodna funkcija slučajnih promenljivih, koje učestvuju u konvoluciji, mogu se dati u obliku matrica odredjenih tipova a zatim, primenom matričnog množenja koje odgovara postupku (2.17), dobijaju se pojedinačni članovi (2.18), odnosno rezultujuća funkcija (2.20).

Samo množenje matrica mora da ispunjava odredjene uslove. Prema definiciji, množenje matrica se može izvesti jedino ako je broj kolona prve matrice jednak broju vrsta druge matrice. Na primer, ako je prva matrica tipa $/m,n/$, onda druga matrica mora biti tipa $/n,\ell/$ da bi se moglo izvršiti množenje

$$/m,n/\cdot/n\cdot\ell/ = /m,\ell/ \,, \qquad (2.23)$$

koje daje matricu tipa /m,ℓ/. Prema definiciji matričnog množenja (2.23) i na osnovu karakteristika matrica uopšte zakon komutacije ovde ne važi. Imajući ovo u vidu i uslov (2.17), koji mora takodje biti ispunjen, jer takav se rezultat mora dobiti posle množenja matrica, svaka proizvodna funkcija se mora dati u obliku matrice odredjenog tipa.

Pošto matrično izvodjenje konvolucije treba da dā kao rezultat niz članova oblika (2.17), to znači da rešenje mora biti u obliku matrice kolone ili matrice vrste. Kako zakon komutacije ne važi, mesto slučajne promenljive u proizvodu odredjuje tip primenjene matrice. Ako se želi rešenje u obliku matrice kolone, a način konvolucije je

$$G_a \cdot G_b \,, \tag{2.24}$$

i ako obe proizvodne funkcije imaju isti broj članova K+1, tada funkcija G_a mora biti predstavljena u obliku kvadratne matrice /K+1,K+1/, a G_b u obliku matrice kolone /K+1,1/, da bi se posle množenja

$$/K+1,K+1/\cdot/K+1,1/ = /K+1,1/ \tag{2.25}$$

dobila matrica kolona. Raspored K+1 članova u matricama diktiran je uslovom (2.17), zbog čega matrica za G_a ima ovakav raspored članova

$$\begin{vmatrix} a_o & a_1 & \cdots & a_{K-1} & a_K \\ 0 & a_o & \cdots & a_{K-2} & a_{K-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & a_o & a_1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a_o \end{vmatrix} \tag{2.26}$$

dok matrica kolona za G_b ima jednostavniji oblik

$$\begin{vmatrix} b_K \\ b_{K-1} \\ \vdots \\ b_1 \\ b_o \end{vmatrix} \tag{2.27}$$

Množenje matrica (2.26) i (2.27) daje matricu kolonu

$$\begin{vmatrix} a_o & a_1 & \dots & a_{K-1} & a_K \\ 0 & a_o & \dots & a_{K-2} & a_{K-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_o & a_1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & a_o \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_K \\ b_{K-1} \\ \vdots \\ b_1 \\ b_o \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_o b_K + a_1 b_{K-1} + \dots + a_{K-1} b_1 + a_K b_o \\ a_o b_{K-1} + a_1 b_{K-2} + \dots + a_{K-1} b_o \\ \dots \\ a_o b_1 + a_1 b_o \\ a_o b_o \end{vmatrix} \tag{2.28}$$

čiji se članovi mogu napisati u sažetom obliku

$$\begin{aligned} \sum_{k=o}^{K} a_k b_{K-k} &= c_K \\ \sum_{k=o}^{K-1} a_k b_{K-1-k} &= c_{K-1} \\ &\vdots \\ \sum_{k=o}^{2} a_k b_{2-k} &= c_2 \\ \sum_{k=o}^{1} a_k b_{1-k} &= c_1 \\ a_o b_o &= c_o \end{aligned} \tag{2.29}$$

gde su c_i, za $i=o,1,\dots,K-1,K$, pojedinačni članovi matrice kolone (2.28), a istovremeno predstavljaju i članove proizvodne funkcije nastale konvolucijom funkcija G_a i G_b.

Pošto zakon komutacije važi za konvoluciju proizvodnih

funkcija G_a G_b, tj. $G_aG_b = G_bG_a$, ali ne važi za matričnu konvoluciju, to znači da bi matrično množenje G_bG_a dalo isti rezultat (2.29) kao matrično množenje G_aG_b, potrebno je G_b predstaviti u obliku kvadratne matrice /K+1,K+1/, a G_a u obliku matrice kolone /K+1,1/, pa se dobija

$$\begin{vmatrix} b_o & b_1 & \dots & b_{K-1} & b_K \\ 0 & b_o & \dots & b_{K-2} & b_{K-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & b_o & b_1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & b_o \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_K \\ a_{K-1} \\ \vdots \\ a_1 \\ a_o \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{k=0}^{K} b_k a_{K-k} \\ \sum_{k=0}^{K-1} b_k a_{K-1-k} \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^{1} b_k a_{1-k} \\ b_o a_o \end{vmatrix} \tag{2.30}$$

što je identično sa (2.29).

Ako se želi da rezultat matričnog izvodjenja konvolucije bude matrica vrsta, tada za proizvodne funkcije G_a i G_b treba formirati matrice tipova /1,K+1/ i /K+1,K+1/, čiji proizvod

$$/1,K+1//K+1,K+1/ = /1,K+1/ \tag{2.31}$$

daje matricu vrstu. Zbog toga proizvodnim funkcijama G_a i G_b odgovaraju dve vrste matrica u zavisnosti od načina množenja

$$\begin{vmatrix} a_o & a_1 & \dots & a_{K-1} & a_K \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_K & b_{K-1} & \dots & b_1 & b_o \\ b_{K-1} & b_{K-2} & \dots & b_o & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_1 & b_o & \dots & 0 & 0 \\ b_o & 0 & \dots & 0 & 0 \end{vmatrix} \tag{2.32}$$

$$\begin{vmatrix} b_o & b_a & \dots & b_{K-1} & b_K \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_K & a_{K-1} & \dots & a_1 & a_o \\ a_{K-1} & a_{K-2} & \dots & a_o & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & a_o & \dots & 0 & 0 \\ a_o & 0 & \dots & 0 & 0 \end{vmatrix} \tag{2.33}$$

U oba slučaja dobija se isti rezultat, kao (2.29) odnosno(2.30), ali u obliku matrice vrste

$$\begin{vmatrix} a_o b_K + \dots + a_K b_o & a_o b_{K-1} + \dots + a_{K-1} b_o & \dots & a_o b_o \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} \sum_{k=o}^{K} a_k b_{K-k} & \sum_{k=o}^{K-1} a_k b_{K-1-k} & \dots & a_o b_o \end{vmatrix} = \tag{2.34}$$

$$= \begin{vmatrix} c_K & c_{K-1} & \dots & c_o \end{vmatrix}$$

2.5. Konvolucija slučajnih promenljivih koje imaju istu raspodelu verovatnoće

Prilikom proučavanja zbirova nezavisnih slučajnih promenljivih x_k, od posebnog je interesa specijalni slučaj - kada svi x_k imaju istu, zajedničku raspodelu. Na primer, ako je $\{a_k\}$ raspodela verovatnoće svakog x_k, odnosno ako je to zajednička raspodela, tada se raspodela verovatnoće za zbir

$$S_n = x_1 + x_2 + \dots + x_n = \sum_{k=1}^{n} x_k \tag{2.35}$$

označava sa

$$\{a_k\}^{n*} , \tag{2.36}$$

jer je

$$\{a_k\}*\{a_k\} = \{a_k\}^{2*} , \quad \{a_k\}^{2**}\{a_k\} = \{a_k\}^{3*} , \dots$$

i uopšte

$$\{a_k\}^{n-1*}*\{a_k\} = \{a_k\}^{n*} \tag{2.37}$$

Prema tome, $\{a_k\}^{n*}$ je niz brojeva čija je proizvodna funkcija $G_a^n(s)$, ili $/G_a(s)/^n$. Na osnovu izloženog $\{a_k\}^{1*}$ je isto što i $\{a_k\}$, $\{a_k\}^{o*}$ je niz čija je proizvodna funkcija $G^o(s) = 1$, tj. niz $(1, 0, 0, \ldots)$.

Primer zajedničke raspodele je binomna raspodela

$$a(k;n,p) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k} ,$$

čija je proizvodna funkcija

$$G(s) = \sum_{k=o}^{n} \binom{n}{k} (ps)^k q^{n-k} = (q+ps)^n .$$

Očigledno je da je ova proizvodna funkcija n-ti stepen od $q+ps$, što ukazuje na činjenicu da je $\{a(k;n,p)\}$ raspodela zbira n nezavisnih slučajnih promenljivih, $S_n = x_1 + x_2 + \ldots + x_n$, koje imaju zajedničku proizvodnu funkciju $q+ps$; pri tome svaka promenljiva x_k ima vrednost 0 sa verovatnoćom q i vrednost 1 sa verovatnoćom p. Zato je

$$\{a(k;n.p)\} = \{a(k;1,p)\}^{n*} .$$

Naravno i za binomnu raspodelu važi

$$\{a(k;m,p)\}*\{a(k;n.p)\} = \{a(k;m+n,p)\} ,$$

jer je

$$(q+ps)^m \cdot (q+ps)^n = (q+ps)^{m+n} .$$

Osim ovog slučaja sa jednom zajedničkom raspodelom, moguća je i kombinacija dve ili više različitih raspodela. Na primer, ako je niz x_k niz medjusobno nezavisnih slučajnih promenljivih sa zajedničkom raspodelom

$$P(x_k=j) = f_j, \quad j = 0,1,2,\ldots , \tag{2.38}$$

često se ispituju zbirovi

$$S_n = \sum_{k=1}^{n} x_k = x_1+x_2+x_3+ \ldots +x_n , \tag{2.39}$$

gde je n broj slučajnih promenljivih u razmatranom zbiru, koji je nezavisan od samih slučajnih promenljivih x_k, a ima datu raspodelu

$$P(k=n) = g_n . \tag{2.40}$$

Raspodela zbirova S_n sledi iz osnovne formule za uslovnu verovatnoću

$$P(S_n=j) = \sum_{k=o}^{\infty} P(k=n)P(x_1+x_2+\ldots+x_n=j) , \tag{2.41}$$

Ovde je raspodela zbira $x_1+x_2+\ldots+x_n$ data n-tostrukom konvolucijom od f_j, tj.

$$P(S_n=j) = \sum_{n=o}^{\infty} g_n(f_j)^{n*} . \tag{2.42}$$

Tako jedn.(2.42) predstavlja zajedničku raspodelu dve različite raspodele g_n i f_j. Najinteresantniji slučaj ove vrste je kada n ima Poasonovu raspodelu, dok slučajne promenljive x_k mogu imati samo vrednosti jedan ili nula sa verovatnoćama p i q. U ovom slučaju S_n ima binomnu raspodelu

$$a(j;n,p) = \binom{n}{j}p^j q^{n-j} , \quad a$$

$$g_n = e^{-\lambda} \frac{\lambda^n}{n!} .$$

Tada je

$$P(S_n=j) = \sum_{n=o}^{\infty} e^{-\lambda}\frac{\lambda^n}{n!} \binom{n}{j}p^j q^{n-j} = \sum_{n=o}^{\infty} e^{-\lambda}\frac{\lambda^n}{n!} \frac{n!}{j!(n-j)!} p^j q^{n-j} =$$

$$= \frac{e^{-\lambda} p^j \lambda^j}{j!} \sum_{n=o}^{\infty} \frac{(\lambda q)^{n-j}}{(n-j)!} = e^{-\lambda(1-q)} \frac{(\lambda p)^j}{j!} .$$

Prema tome, kompozicija Poasonove raspodele za n i binomne raspodele za $x_1+x_2+\ldots+x_n$ dovodi do zajedničke raspodele

$$P(S_n=j) = e^{-\lambda p} \frac{(\lambda p)^j}{j!} ,$$

što predstavlja Poasonovu raspodelu sa parametrom λp.

Opisane osnovne osobine proizvodne funkcije ukazuju na opštost primene ovog zakona u domenu rešavanja problema statističkog karaktera. Dovoljan broj podataka za opis ponašanja razmatranih slučajnih veličina bilo kog sistema (reaktorskog, industrijskog i dr.) omogućava primenu proizvodne funkcije i realnu statističku analizu, koja daje rešenja za odgovarajuće probleme u obliku verovatnoće. Ovakvim načinom rešavanje pojedinačnih problema je lako uklopiti u analizu celokupnog skupa mogućih problema nekog sistema i dobiti krajnje rešenje koje je odraz ponašanja sistema u stvarnosti, odraz realnog, činjeničnog stanja.

3. PARAMETRI SISTEMA

Opredeljenje za statističku analizu pouzdanosti omogućava dobijanje realnijih rešenja, u obliku tačnije, potpunije procene opasnosti kojoj su ljudi izloženi usled radioaktivnog zračenja. Sprovodjenje takve analize predstavlja složen postupak, kojim je obuhvaćen niz problema, kao što su:

- podela reaktorskog sistema na oblasti, zone specifične po svom udelu u opštem razmatranju pouzdanosti;
- izbor veličina u okviru tih oblasti, zona, koje karakterišu njihov rad, njihovo ponašanje;
- podelu veličina prema načinu reagovanja u odredjenim uslovima rada;
- prostiranje radioaktivnog zračenja kroz sistem, tj. kroz oblasti, zone i prepreke;
- subjektivni i objektivni uticaji, itd.

Razmatranje navedenih problema u opredeljenom, statističkom smislu ima za cilj utvrdjivanje načina nastajanja zračenja, načine prostiranja zračenja od izvora kroz oblasti, zone i prepreke, koje mu stoje na putu, do posmatranog mesta i stanja nivoa zračenja na tom mestu u datim uslovima rada. Postavljeni cilj i navedeni problemi nameću uvodjenje brojnih veličina, kojima se definišu i karakterišu ti problemi. Usmeravanje ka postavljenom cilju, odnosno ka oceni stanja nivoa zračenja ne predstavlja ništa drugo do detaljnu analizu uticaja svake veličine pojedinačno. One veličine, koje makar i najmanje učestvuju i doprinose analizi u tom, usmerenom smislu nazivaju se *parametri sistema*. Svakako da jedan složeni sistem, kao što je reaktorski, sadrži veliki broj parametara. Prema nabrojanim problemima, koje je neophodno razmotriti, proističu brojni parametri

od kojih svaki, na odredjeni način, u odredjenoj meri sudeluje u radu sistema, doprinosi analizi pouzdanosti.

3.1. Podela parametara

Iako svaki reaktorski sistem odlikuju specifična svojstva ipak su neke osobine opšte, zajedničke za sve tipove reaktora. Zato je, u ovom opštem razmatranju, dovoljno pomenuti te zajedničke, ujedno i osnovne osobine čiji su nosioci i predstavnici parametri ili grupe parametara. Sa stanovišta opisa osnovnih karakteristika, mogu se parametri reaktorskog sistema podeliti na sledeći način:

- parametri reaktorskog jezgra,kao osnovne veličine koje definišu procese u jezgru i opisuju izvore zračenja;

- grupa parametara koja pripada rashladnom sistemu, važnom delu reaktorskog sistema od čijeg ispravnog rada veoma zavisi pouzdanost celog postrojenja;

- grupa parametara karakterističnih za sve tipove reaktora - fizičke prepreke, od omotača goriva do spoljnih obloga, radi slabljenja i sprečavanja prodiranja radioaktivnog zračenja od izvora do posmatranog mesta, oblasti,zone, unutar ili van sistema;

- parametri koji se odnose na procese rada i održavanja reaktora, gde su od posebnog interesa subjektivni parametri - rad osoblja (operatora) u procesu rada i održavanja, s posebnim naglaskom na njihovim greškama;

- spoljni parametri - prirodne i veštačke pojave.

Svi parametri jednog reaktorskog sistema svrstavaju se u odgovarajuće grupe, približno navedenim, osnovnim grupama, prema mestu, ulozi i načinu delovanja u radu sistema. Prirodno je da se delovanje parametara različitih grupa medjusobno razlikuje po mestu uključivanja u rad i meri uticaja na rad sistema. Medjutim, postoji zajednički vid delovanja koji je od interesa

u ovoj analizi. Naime, proučavanje delovanja parametara je usmereno i saobraženo strogo ograničenom, zajedničkom cilju - razmatranju prostiranja radioaktivnog zračenja kroz sistem. To označava da se proučavanje svakog, pojedinačnog parametra ili grupe parametara svodi na ispitivanje njihovog uticaja na stanje ozračenosti posmatranog mesta, koje se utvrdjuje nivoom zračenja ili dozom zračenja u nekom vremenskom periodu. Drugim rečima, svaki parametar daje neku dozu zračenja (uključujući i dozu koja je jednaka nuli), pa je zato moguće na toj osnovi uporedjivati parametre radi odredjivanja uloge i važnosti u tekućoj analizi.

Postojanje brojnih promena uslova rada označava istovremeno i moguće promene delovanja parametara u smislu promena nivoa radioaktivnog zračenja. Prema tome, kakav će biti nivo zračenja od nekog parametra, pri nekoj nastaloj promeni, zavisiće od načina reagovanja parametara na tu promenu. Podela parametara zasnovana na načinu njihovog reagovanja na nastale promene je vrlo bitna sa stanovišta statističke analize. Takvo poredjenje daje dva moguća reagovanja parametra, što ga svrstava u grupu konstantnih ili u grupu slučajnih parametara.

3.2. Konstantni parametri

Parametri koji reaguju jednostrano, koji daju samo jedan nivo doze zračenja d_k sa verovatnoćom $p_k = 1$, dok ostali nivoi doze različiti od d_k imaju verovatnoću nula, tj.

$$P(D=d_i) = p_i = \begin{cases} 1 , & i=k \\ 0 , & i\neq k \end{cases} , \qquad (3.1)$$

nazivaju se *konstantni parametri*.

Ako se pretpostavi da se svi parametri sistema ponašaju jednostrano, konstantno - tada svaki parametar kao odgovor na nastalu promenu daje samo jednu, tačno odredjenu vrednost doze sa verovatnoćom jedan. U ovom slučaju postoji samo jedna kombinacija reagovanja svih parametara sistema, koja u zavisnosti

od uloge i mesta delovanja parametra u sistemu daje jedan, odredjeni nivo doze na posmatranom mestu, naravno sa verovatnoćom jednakom jedinici, jer svaki parametar ulazi u kombinaciju sa verovatnoćom jedan. Prema tome, za slučaj konstantnih parametara dobija se doza D(L) na mestu L, koja je jednaka odredjenoj vrednosti za nastalu promenu (PRN), tj.

$$P/D(L) = d_i/(PRN)/ = 1, \quad i=k \tag{3.2}$$

i za svaku kombinaciju L i (PRN) verovatnoća (3.2) biće jednaka jedinici za samo jednu vrednost i(i=k), a nula za ostale vrednosti i(i≠k).

3.3. Slučajni parametri

Iako se većina parametara sistema može smatrati konstantnim parametrima, uvek postoji i odredjen, manji broj takvih parametara čije reagovanje na nastale promene nije jednostrano,ne daje samo jedan nivo doze. Kod ovih parametara ne zna se kako će reagovati na promene u datim uslovima, u smislu da se ne može unapred, sa sigurnošću znati koji će se nivo doze dobiti. Zapravo, moguće je dobijanje bilo kog nivoa iz nekog opsega, intervala doze zračenja, a stvar je slučaja koji će se nivo pojaviti od mogućih nivoa u datom opsegu. Ta slučajnost pojavljivanja nekog nivoa doze zračenja predstavlja se verovatnoćom koja je manja od jedinice, jer je zbir verovatnoća pojavljivanja mogućih nivoa zračenja za jedan parametar jednak jedinici. Slučajnost označava i najavljuje mogućnost pojavljivanja više nivoa zračenja, pri čemu je neophodno pojavljivanje bar dva nivoa da bi se nekom parametru pripisao karakter slučajnosti. Prema tome, parametri čije se ponašanje izražava raspodelom verovatnoće mogućih nivoa doze zračenja nazivaju se *slučajni parametri*.

Obzirom da konstantni parametri daju samo jedan nivo doze, da je njihovo učešće u analizi prostiranja zračenja jedno-

strano i jednostruko, obuhvaćeno je jednom jedinom kombinacijom, preostaje, dakle, detaljnija i složenija analiza reagovanja slučajnih parametara na nastale promene. Pri tome treba poći od činjenice da postoji nekoliko parametara koji imaju slučajni karakter ponašanja u datim uslovima i da su zbog toga uključeni u analizu svojom raspodelom verovatnoće. Takav način uključivanja većeg broja slučajnih parametara može pričiniti prilično velike teškoće. Zato broj analiziranih slučajnih parametara treba svesti na odgovarajuću meru da bi se računanje sa njima nalazilo unutar praktičnih, razumnih granica, pod uslovom da to ne utiče na korektnost i tačnost rezultata.

Treba još jednom naglasiti da promena većine parametara može biti zanemarena, dok promena nekih parametara treba da bude razmatrana tako da se kao posledica dobije raspodela verovatnoće doznih nivoa. Ovakav način uključivanja slučajnih parametara je veoma pogodan i pre svega poželjan ako se teži tačnijoj, potpunijoj analizi. Utoliko pre što za takvo korišćenje obično nisu potrebne tačne vrednosti slučajnih parametara. Jer, neodredjenosti u vrednostima slučajnih parametara prima na sebe njihova raspodela verovatnoće.

3.4. Elementi sistema

Podela parametara po načinu reagovanja na nastale promene daje konstantne i slučajne parametre. Medjutim, kako je ranije navedeno, parametri mogu biti grupisani, podeljeni i prema načinu delovanja, tj. prema uticaju na rad sistema i prema položaju, mestu u okviru delova, oblasti, zona sistema u kojima deluju. Na takvu podelu upućuje još i činjenica da primenjeni metod uključuje i obradjuje u analizi samo veličine (parametre) koje su medjusobno nezavisne. Veliki broj parametara reaktorskog sistema neminovno nameće mnogo uzajamnih veza pojedinih parametara ili čak i manjih grupa parametara. Da bi se ta medjusobna zavisnost parametara otklonila i time mogli svi parametri uključiti u postupak analize pouzdanosti, neophodno je

grupisanje parametara i sa tog stanovišta. To obrazovanje grupa parametara, sličnih po načinu i mestu delovanja a uz to eventualno medju sobom zavisnih, omogućava uprošćavanje postupka analize. Takvom podelom u analizu se uvodi manji broj veličina, promenljivih ili konstantnih, koje su još i nezavisne medju sobom, što je neophodan uslov za primenu metoda verovatnoće.

Nakon podele po grupama, sledi klasifikovanje, obrada i analiza parametara u okviru stvorenih grupa. Rezultati analize po grupama biće konstantne ili slučajne veličine. Ove, rezultantne veličine, kao predstavnici pojedinih delova, oblasti, zona sistema ili grupa parametara, nazivaju se *elementi sistema*, kojima se opisuju osnovne karakteristike i svojstva sistema u radu, u eksploataciji, u mogućim raznovrsnim situacijama. Njihovo razmatranje u okviru datog postupka analize je isto kao i za svaki parametar pojedinačno, jer i oni mogu biti konstantni i slučajni, odnosno njihovo delovanje u odredjenim uslovima rada izražava se odredjenom dozom ili raspodelom doznih nivoa. Pošto se delovanje i parametara i elemenata sistema izražava na isti način, u daljem toku opisa analize pouzdanosti uglavnom će biti korišćen izraz parametar; jedino u slučajevima kada je neophodno naglasiće se da se radi o elementu ili elementima sistema.

4. DOGADJAJI

Parametri sistema su osnovne veličine koje definišu i karakterišu probleme u vezi sa eksploatacijom sistema i sa stanjem nivoa zračenja na posmatranim mestima sistema i van njega. Njihov, makar i najmanji, doprinos analizi tog stanja uvrštava ih u veličine koje je neophodno razmotriti. Prethodna razmatranja o parametrima ukazala su na moguće načine njihovog ponašanja u eksploataciji, koji ih svrstavaju u konstantne i slučajne parametre. Ali bez obzira na to kojoj vrsti parametara pripadaju, kakve funkcije u sklopu sistema imaju, za analizu je od interesa kako se njihovo delovanje u odredjenim eksploatacionim uslovima odražava na nivo radioaktivnog zračenja ili dozu zračenja na posmatranom mestu.

Imajući ovo u vidu, kao i mogućnosti brojnih promena uslova rada pri eksploataciji reaktorskih sistema, proizilazi i mogućnost znatnijih promena delovanja parametara, što može dovesti i do većih promena nivoa radioaktivnog zračenja. Neminovnost uključivanja parametara kroz jedan ili više doznih nivoa,u analizu stanja radioaktivnosti naglašava potrebu uvodjenja veličine koja će biti obeležje radnog stanja parametra u nekom trenutku eksploatacije. Naime, nekakav uzrok - unutar ili van sistema, objektivan ili subjektivan, slučajnog ili konstantnog karaktera - izaziva promenu stanja parametra, a posledica toga je uticaj na radioaktivno stanje u vidu promene postojećeg radioaktivnog stanja ili ne. Sva tri činioca karakteristike su radnog stanja parametra bilo u stalnim, nepromenjenim ili dinamičnim uslovima rada. Ovako definisana pojedinačna radna stanja parametra označavaju *dogadjaje*, obeležavaju karakteristične slučajeve ponašanja parametra u eksploataciji sistema. Ove veličine - dogadjaji omogućavaju procenu doprinosa parametara analizi radioaktivnog stanja i njihovu podelu prema načinu delovanja,

odnosno reagovanja u datim uslovima, što vodi potpunijoj analizi parametara pojedinačno, elemenata sistema i, napokon, svih parametara sistema.

4.1. Normalni (povoljni) i nepovoljni dogadjaji

Promena radioaktivnog stanja, kao jedna od karakteristika nekog nastalog dogadjaja, predstavlja neposrednu posledicu tog dogadjaja. Ogleda se u menjanju nivoa ili doze zračenja na posmatranom mestu na taj način, što se odgovarajući nivo ili doza dodaje postojećem u nepovoljnim slučajevima ili se ništa ne menja u povoljnim slučajevima eksploatacije. Veličine nivoa ili doze koje daju dogadjaji nalaziće se u nekom realnom intervalu radioaktivnog zračenja, kojim je uključen i nulti nivo ili doza zračenja. Mogućnost pojavljivanja bilo kog nivoa ili doze iz širokog intervala radioaktivnog zračenja predstavlja istovremeno i mogućnost nastajanja nepoželjnih posledica po ljude i okolinu, razmatrajući problem sa stanovišta njihove bezbednosti. Samim tim, radi jasnijeg uočavanja njihove uloge u analizi, nameće se podela dogadjaja na osnovu intenziteta promena postojećeg stanja. Podelom na četiri grupe /8/, uglavnom su obuhvaćeni svi dogadjaji koji mogu nastati u eksploataciji reaktorskih sistema:

1) dogadjaji velike verovatnoće pojavljivanja koji ne daju nikakvo zračenje, tj. ne izazivaju nikakve promene u postojećem stanju ili daju takve nivoe, doze zračenja koji mogu biti zanemareni, jer ne predstavljaju nikakvu opasnost, nema štetnih posledica;

2) dogadjaji čije se učestanosti nalaze izmedju velike i male učestanosti, čiji efekti dovode do nepovoljnog radioaktivnog stanja, tj. čije se posledice ne mogu zanemariti;

3) dogadjaji čije su verovatnoće pojavljivanja veoma male ali koji daju visoke nivoe doze zračenja, što odgovara veoma oštrim, jako nepovoljnim posledicama;

4) dogadjaji koji su praktično "nemogući", tako da je mala verovatnoća njihovog pojavljivanja, ali sa katastrofalnim posledicama protiv kojih ne postoji odgovarajuća efikasna zaštita.

Posmatranjem ovih grupa dogadjaja očigledno je da u realnoj analizi dogadjaje četvrte grupe treba odbaciti kao "nemoguće", ili ako se želi, ako se smatra da i njih treba uzeti u obzir, onda treba organizovati poseban pristup radi obrade i takvih dogadjaja. Odbacivanjem četvrte grupe, u analizi su preostalim grupama obuhvaćeni svi dogadjaji - koji daju nivoe, doze zračenja od nultih do najviših.

Na osnovu ove podele po grupama sledi ocena povoljnosti odnosno nepovoljnosti pojavljivanja dogadjaja po sistem sa stanovišta pouzdanosti. Jer, izvesno je da, što se tiče ljudi i okoline, nivoi radioaktivnih zračenja, dozni nivoi ispod neke odredjene vrednosti ne predstavljaju opasnost po zdravlje ljudi niti daju štetne posledice po okolinu. Ta vrednost, koja deli celokupni interval mogućih nivoa radioaktivnog zračenja na dva dela - povoljni i nepovoljni interval nivoa, je dozvoljeni nivo radioaktivnog zračenja ili doze zračenja. Poredjenje dogadjaja prema dozvoljenom nivou daće dve vrste dogadjaja:

- dogadjaji koji daju dozne nivoe od vrednosti nula do vrednosti dozvoljenog nivoa; ovi dogadjaji se najčešće javljaju, imaju najveću verovatnoću pojavljivanja ali njihove posledice nemaju nepovoljno dejstvo, tj. takvi dogadjaji su povoljni sa stanovišta pouzdanosti; ovi dogadjaji pripadaju prvoj grupi dogadjaja i nazivaju se *normalni (povoljni) dogadjaji* sistema i obeležavaju se sa (N);

- preostali dogadjaji, oni koji daju doze iznad dozvoljenog nivoa, očevidno predstavljaju u nekom stepenu opasnost po ljude i okolinu; posledice, kojima su oni uzrok, mogu biti od neznatnih do veoma oštrih, veoma nepovoljnih, zavisno od toga da li su ih izazvali dogadjaji druge ili treće grupe; ovim dvema grupama obuhvaćeni su svi dogadjaji čije je delovanje na

pouzdanost nepovoljno, sa različitim stepenom poremećaja postojećeg radioaktivnog stanja - od normalnog, dozvoljenog nivoa do gornje granice mogućeg, realnog intervala nivoa ili doze zračenja, pa se zato ti dogadjaji nazivaju *nepovoljni dogadjaji* i obeležavaju sa ($\bar{N}$).

Različit stepen delovanja nastalih nepovoljnih dogadjaja nameće uvodjenje još jednog pojma - *udes*. To bi bio nepovoljni dogadjaj sa težim, oštrijim posledicama, pa bi se udesima mogli smatrati dogadjaji treće grupe. U stvari, mogu se svi nepovoljni dogadjaji smatrati udesima, što može biti i stvar dogovora; ipak prirodnije je i realnije udesima smatrati dogadjaje malo verovatne a sa veoma nepovoljnim posledicama. Bez ulaženja u to koji se nepovoljni dogadjaji mogu smatrati udesima, u daljem toku koristiće se izraz nepovoljni dogadjaj kao opštiji, kojim su svakako obuhvaćeni i udesi bez obzira kako su definisani.

4.2. Verovatnoća pojavljivanja dogadjaja

Pojavljivanje dogadjaja rezultat je uticaja raznih uslova rada i njihovog delovanja izazvanog spoljnim i unutrašnjim uzrocima. Raznovrsnost i brojnost tih uticaja je tako veliki da bi bilo teško i nabrojati ih samo. Ali, već je nekoliko puta naglašeno, bitne su posledice koje iz nastanka dogadjaja proističu i, obzirom na razmatranu problematiku, način odražavanja na nivo, dozu radioaktivnog zračenja, kao zajedničkog faktora na osnovu koga se analiza pouzdanosti sprovodi.

Dogadjaj je definisan kao integralni skup uzroka (U), promena parametarskog stanja (PP) i posledica ($d,\bar{d}$) po postojeće radioaktivno stanje, tj. kao objekat od opšteg i zajedničkog interesa za analizu. Način delovanja dogadjaja na radioaktivno stanje, tj. da li izaziva nepovoljne promene stanja ili ne, svrstava ga u grupu nepovoljnih ili normalnih dogadjaja. Prema tome, osnovni motiv za razmatranje dogadjaja je procenjivanje

njegovog uticaja na radioaktivno stanje, kroz promenu tog stanja u vidu nivoa ili doze zračenja. Pri tome, treba naglasiti da jedan dogadjaj daje jedan nivo doze na nekom mestu sistema ili van njega. Verovatnoća tog nivoa doze je u stvari verovatnoća pojavljivanja dogadjaja koja je, na osnovu karakteristika dogadjaja, funkcija verovatnoće uzroka P(U), verovatnoće promene parametarskog stanja P(PP) i verovatnoće posledice $P(d,\bar{d})$, u vidu promene radioaktivnog stanja, što odredjuje povoljnost ili nepovoljnost dogadjaja. Zapravo, verovatnoća pojavljivanja dogadjaja se može predstaviti u obliku

$$P(N,\bar{N}) = P/D(L)=d,\bar{d}/PP/U/ = F/P(d,\bar{d}),P(PP),P(U)/ \qquad (4.1)$$

tj. kao verovatnoća porasta, promene doznog nivoa na mestu L za d ili $\bar{d}$ usled promene parametarskog stanja izazvanog nekim uzrokom, ili kao funkcija odgovarajućih verovatnoća. Odredjivanje ove verovatnoće zasniva se na poznavanju vrednosti verovatnoća - komponenti i njihovom medjusobnom odnosu. Zato je potrebno poznavati osnovne osobenosti tih komponenti.

Verovatnoća uzroka. Reč je o slučajnim ili konstantnim, objektivnim ili subjektivnim, unutar ili van sistema uzrocima koji izazivaju promene kod parametara sistema. Ako se posmatraju uzroci promena u nekom vremenskom periodu, onda se do verovatnoće njihovog pojavljivanja može doći na više načina, pod pretpostavkom da je reč o jednom odredjenom stanju eksploatacije koje se analizira: 1) koristi se iskustvo iz ranije eksploatacije istog sistema ili sličnih stanja eksploatacije drugih sistema; dobija se neka raspodela verovatnoće nastajanja, pojavljivanja njihovog u takvom periodu, odakle je moguće odrediti verovatnoću u bilo kom trenutku analiziranog perioda; 2) koriste se eksperimentalni rezultati koji se odnose na analizirano stanje, koji se verodostojno mogu primeniti u datim slučajevima; 3) nepostojanje navedenih mogućnosti za dobijanje veličine verovatnoće upućuje na jedinu, preostalu mogućnost - pretpostavljanje da će se nešto desiti na odredjen način i sa takvom

pretpostavkom ući u analizu.

Verovatnoća promene parametarskog stanja. Koliku će promenu nastali uzrok izazvati kod nekog parametra zavisi od mnogo okolnosti, a pre svega od osobenosti parametra, od njegove uloge u sistemu i od načina reagovanja na nastale pojave - uzroke promena. Osim toga, svaki parametar može biti u višestrukoj vezi sa drugim parametrima i na odredjeni način se uklopiti u sveukupno delovanje sistema, u rad, u normalnu eksploataciju. Normalna eksploatacija označava normalno, bezbedno - ispod dozvoljenog nivoa ozračivanje svakog posmatranog mesta unutar ili van sistema. Promena normalnog radnog stanja predstavlja promenu normalnog stanja ozračivanja u negativnom smislu. Verovatnoća te promene biće funkcija svih tih mogućih zavisnosti, uticaja, stanja u datom trenutku i predstavljaće ujedno verovatnoću promene, prelaza parametra iz jednog u drugo stanje. Verovatnoća promene parametarskog stanja funkcija je pre svega načina reagovanja na nastali uzrok, uz mnogobrojne ostale uticaje u sistemu, kao i akcije koje se preduzimaju prilikom promena da bi se suzbili nepovoljni efekti. Medjusobno delovanje tih uticaja u datom trenutku i za date uslove biće odlučujući činilac u odredjivanju verovatnoće promene parametarskog stanja.

Verovatnoća posledice. Novonastalo parametarsko stanje izaziva promenu u radioaktivnom stanju sistema. Svaka promena parametarskog stanja se na odredjeni način prostire kroz sistem do posmatranog mesta gde izaziva odgovarajuću promenu radioaktivnog stanja, što je krajnja posledica delovanja uzroka na parametar. Očevidno je da je verovatnoća tih posledica funkcija načina prostiranja nastale promene (poremećaja) od mesta nastanka, kroz postavljene prepreke, do posmatranog mesta. Broj, vrsta, kvalitet prepreka osobenosti su svakog sistema, a brojnost mesta gde se želi utvrditi radioaktivno stanje ukazuje na dodatni broj činilaca pri odredjivanju verovatnoće posledice.

Odredjivanje verovatnoće, odnosno učestanosti pojavljivanja dogadjaja sprovodi se kroz analizu njihovih komponenti u

nekom eksploatacionom periodu. Kakva je funkcionalna zavisnost nekog dogadjaja od njegovih komponenti biće detaljnije u odgovarajućim situacijama objašnjeno, obzirom na neophodnost posebne analize svake komponente u odredjenim eksploatacionim uslovima.

Ono što se na ovom mestu još može reći o verovatnoći dogadjaja jeste da se do nje može doći i posmatranjem i odgovarajućom analizom svih dogadjaja koji se javljaju u nekom periodu eksploatacije. Postojanje podataka o pojavljivanju dogadjaja u nekom eksploatacionom periodu ukazuje na mogućnost dobijanja vrednosti frekvencije pojavljivanja pojedinih dogadjaja. Naravno, vrlo je verovatno postojanje i normalnih i nepovoljnih dogadjaja, pa stoga i odgovarajućih frekvencija,

$$\sum_i f_{N_i} + \sum_j f_{\bar{N}_j} = f_{i,j} \tag{4.2}$$

koje daju ukupnu frekvenciju, $f_{i,j}$. Zato se verovatnoća pojavljivanja normalnih dogadjaja izračunava po formuli

$$P(N) = \sum_i f_{N_i}/f_{i,j} \ , \tag{4.3}$$

a nepovoljnih dogadjaja

$$P(N) = \sum_j f_{\bar{N}_j}/f_{i,j} \ . \tag{4.4}$$

Medjutim, ako se želi odrediti verovatnoća pojavljivanja samo jednog od mogućih normalnih ili nepovoljnih dogadjaja, neophodno je poznavanje njegove frekvencije, recimo f_{N_i}, kao i ukupne frekvencije $f_{i,j}$, što daje

$$P(N_i) = f_{N_i}/f_{i,j} \ . \tag{4.5}$$

Poznavanje frekvencija svih dogadjaja iz nekog eksploatacionog perioda omogućava odredjivanje verovatnoće pojavljivanja bilo kog dogadjaja, a time i njegovo najpovoljnije uključivanje u analizu pouzdanosti.

Ali, kao što je pomenuto, dogadjaji su funkcije brojnih

promena i od interesa je uočiti te zavisnosti, zakonitosti, kao i proceniti njihov doprinos menjanju postojećeg stanja. Takva razmatranja zahtevaju brižljiva proučavanja eksploatacionih uslova i detaljniju analizu uzroka, promena i posledica, radi odredjivanja verovatnoće komponenti dogadjaja i potpunijeg uvida u njihove medjusobne odnose, što će kasnije u pogodnim, odgovarajućim prilikama biti i dato i opisano.

4.3. Raspodela verovatnoće doznih nivoa kao posledica ponašanja jednog parametra u datim uslovima

Razmatranje ponašanja nekog parametra u datim uslovima eksploatacije predstavlja razmatranje uzroka (uslova rada), promena stanja tog parametra i posledica tih promena. To u stvari znači razmatranje uzroka i njihov uticaj na jedan odredjeni parametar, kroz poznavanje frekvencije, verovatnoće promena i posledica u vidu doznih nivoa, kao reakcije parametra na te pojave u datim uslovima. Prema tome, u odredjenom vremenskom periodu dobija se skup doznih nivoa koji karakteriše razmatrani parametar, a svaki dozni nivo ulazi u skup doznih nivoa pripadajućeg parametra sa odredjenom verovatnoćom.

S obzirom na postojanje konstantnih i slučajnih parametara, neminovne su razlike u njihovom reagovanju na nastale uzroke. Na osnovu definicije konstantnog parametra, reakcija takvog parametra na neki uzrok (poremećaj) izražava se samo kroz jedan nivo doze, pa će frekvencija tog nivoa biti jednaka frekvenciji pojavljivanja dogadjaja, kao veličine koja obuhvata sve komponente nastalog poremećaja. Na svaki nastali uzrok parametar (i konstantni i slučajni) u principu reaguje na drugačiji način, u vidu nekog nivoa doze različitog od prethodnog. Zbog toga će ukupni dozni nivo, koji daje konstantni parametar u nekom vremenskom intervalu, biti jednak zbiru pojedinačnih doznih nivoa odgovarajućih dogadjaja, sa frekvencijom koja je jednaka zbiru pojedinačnih frekvencija. Kako je prema (3.1) verovatnoća za

jedan dozni nivo koji daje konstantni parametar jednak jedinici, tj. frekvencija dogadjaja je upravo jednaka frekvenciji doznog nivoa, to će i frekvencija ukupnog doznog nivoa biti jednaka frekvenciji svih dogadjaja, tj. verovatnoća ukupnog doznog nivoa od jednog konstantnog parametra jednaka je jedinici. Drugim rečima, konstantni parametar se ponaša jednostrano sa statističkog stanovišta razmatranih problema i uključuje se sa verovatnoćom jednakom jedinici u analizu. Prema tome, konstantni parametar ne daje raspodelu doznih nivoa već samo jedan nivo doze, čija sigurnost pojavljivanja (p=1) označava pomeranje ukupne raspodele doznog nivoa ka većim vrednostima doznih nivoa upravo za tu vrednost. Zato se analiza ponašanja konstantnog parametra svodi samo na utvrdjivanje posledica koje on može da dā za odredjene uzroke, tj. na utvrdjivanje mogućih nivoa doze, jer je izvesno da ako se javi neki dozni nivo usled nekog uzroka onda je samo i jedino on moguć.

Analiza ponašanja slučajnog parametra je mnogo složenija zbog njihove osnovne karakteristike - slučajnosti reagovanja na nastale promene. Naime, sasvim je neizvesno kakve će se posledice javiti, tj. koji nivoi doze usled nastale promene stanja slučajnog parametra. Postoji, prema tome, mogućnost pojavljivanja više doznih nivoa i stvar je samo slučaja koji će se nivo pojaviti, a ta slučajnost karakteriše se verovatnoćom pojavljivanja nivoa. To znači da svaki uzrok deluje na promenu stanja slučajnog parametra tako da se dobijaju bar dva dozna nivoa, koji čine raspodelu verovatnih nivoa, tj. raspodelu verovatnoće pojavljivanja tih nivoa. Na svaku vrstu uzroka u nekom vremenskom intervalu slučajni parametar reaguje raspodelom doznih nivoa na nekom mestu. Nivo doze, kao što je rečeno, odredjuje povoljnost ili nepovoljnost dogadjaja, ali, kako se u raspodeli mogu naći i povoljni i nepovoljni nivoi, u ovakvim prilikama raspodela mogućih nivoa odredjuje povoljnost (normalnost) ili nepovoljnost dogadjaja, tj. ponašanja slučajnog parametra.

Konačan oblik, vid ponašanja slučajnog parametra u razmatranom vremenskom periodu rezultat je pojavljivanja više uzroka,

odnosno posledica je sažimanja, odredjenim postupkom, pojedinačnih raspodela odgovarajućih uzroka u jednu zajedničku, rezultujuću raspodelu verovatnoća doznih nivoa na nekom mestu.

Postoji više načina za iznalaženje zajedničke raspodele verovatnoće doznih nivoa koju daje neki slučajni parametar. Jedan od načina je posmatranje, snimanje slučajnog parametra u eksploataciji, i dobijenu raspodelu primeniti na iste ili slične eksploatacione uslove koji će nastati ubuduće. Može se raspodela i pretpostaviti, ako se ne može doći do eksploatacionih podataka, tj. ako za pojedina parametarska stanja postoje bilo kakvi eksperimentalni podaci; ili, ako i toga nema, teorijskim pretpostavljanjem zasnovanim na postojanju realnih stanja. Poznavanje posledica od pojedinih parametarskih stanja, stvarnih ili pretpostavljenih, predstavlja način predočavanja mogućeg ponašanja slučajnog parametra.

No, bez obzira kojim se od navedenih načina dolazi do raspodele, važno je ukazati i detaljno opisati način odredjivanja rezultujuće raspodele kada su poznate pojedinačne raspodele odgovarajućih mogućih dogadjaja u razmatranom vremenskom periodu. Pored toga, treba pomenuti da je sažimanje pojedinačnih raspodela datim postupkom moguće ako se radi o medju sobom nezavisnim dogadjajima.

Neka postoje, na primer, dva uzroka U^i i U^j na koje razmatrani slučajni parametar reaguje odgovarajućim raspodelama doznih nivoa D^i (čine je nivoi d_n^i sa verovatnoćom p_n^i), D^j (čine je nivoi d_n^j sa verovatnoćom p_n^j), tj.

$$P(D^i = d_n^i) = p_n^i, \quad P(D^j = d_n^j) = p_n^j , \tag{4.6}$$

gde su

$$d_n^i, d_n^j = 0,1,2,\ldots, \quad \text{za } n = 0,1,2,\ldots . \tag{4.7}$$

Odrediti raspodelu koju daju ove dve raspodele znači odrediti verovatnoću svih doznih nivoa koji mogu nastati kao

kombinacije bilo koja dva dozna nivoa, koji pripadaju raznim raspodelama. Na primer, verovatnoća da istovremeno bude $D^i = d^i_\ell$ i $D^j = d^j_{k-\ell}$ jednaka je

$$P(D^i = d^i_\ell \ , \ D^j = d^j_{k-\ell}) = p^i_\ell \cdot p^j_{k-\ell} \tag{4.8}$$

što znači, prema (4.7), da se javlja doza

$$d^i_\ell + d^j_{k-\ell} = d_k \ , \tag{4.9}$$

a ova doza zasnovana je na uniji odgovarajućih doza dve raspodele

$$(d^i_o, d^j_k, \ \ldots, \ (d^i_\ell, d^j_{k-\ell}), \ldots, \ (d^i_k, d^j_o) \ , \tag{4.10}$$

odnosno, verovatnoća za dozu d_k posledica je unije odgovarajućih verovatnoća

$$(p^i_o, p^j_k), \ \ldots, \ (p^i_\ell, p^j_{k-\ell}), \ldots, (p^i_k, p^j_o) \ . \tag{4.11}$$

Pošto se ovi slučajevi medju sobom isključuju, nezavisni su jedan od drugog, verovatnoća za $D = D^i + D^j = d_k$ dat je izrazom

$$P(D=D_k/D^i,D^j) = p^i_o p^j_k + \ldots + p^i_\ell p^j_{k-\ell} + \ldots + p^i_k p^j_o \ . \tag{4.12}$$

Isti je postupak pri odredjivanju ostalih mogućih kombinacija doznih nivoa dve poznate raspodele. Tako se dobija moguća raspodela verovatnoća doznih nivoa slučajnog parametra kao posledica reagovanja na dva nastala uzroka. Postojanje, pojavljivanje više dogadjaja u razmatranom vremenskom periodu, na primer m dogadjaja, znači da ovaj postupak treba primeniti m-1 put, tj. prethodno dobivenu raspodelu sažimati, množiti sa raspodelom sledećeg nerazmatranog dogadjaja i tako do poslednjeg postojećeg dogadjaja, tj. njegove raspodele.

Prema tome, korišćenje eksploatacionih podataka,

eksperimentalnih podataka ili samo pretpostavki za načine delovanja mogućih uzroka na razmatrani slučajni parametar dovodi do odgovarajućih raspodela doznih nivoa. Sažimanje, množenje pojedinačnih raspodela daje rezultujuću raspodelu slučajnog parametra, kao posledicu njegovog ponašanja u datim uslovima, kao oblik reagovanja na nastale poremećaje u razmatranom vremenskom periodu.

4.4. Verovatnoća nivoa doze kao posledica ponašanja više slučajnih parametara u datim uslovima

Prikazani način odredjivanja raspodele verovatnoće doznih nivoa kao odraza ponašanja jednog slučajnog parametra zahteva potpune, tačno definisane pojedinačne raspodele odgovarajućih dogadjaja. Sažimanje, množenje njihovo daće takodje vrlo tačnu rezultujuću raspodelu sa kojom slučajni parametar učestvuje u daljoj analizi.

Pri razmatranju nekog reaktorskog sistema normalno je pretpostaviti i usvojiti postojanje nekoliko slučajnih parametara. Ako se postavi pitanje kako naći rezultujuću raspodelu nivoa doze, tj. njihove verovatnoće na posmatranom mestu, kao posledicu delovanja svih slučajnih parametara u odredjenim eksploatacionim uslovima i u vremenskom periodu t, bez sumnje bi jedan mogući odgovor bio: isti postupak kao pri odredjivanju raspodele koju daje jedan slučajni parametar. Medjutim, takav postupak može biti prilično složen ako postoji veći broj slučajnih parametara, i utoliko je složeniji ukoliko je broj parametara veći. Ovome treba dodati da se vrednosti doznih nivoa karakterišu verovatnoćama i da, prema tome, kod slučajnog parametra postoji samo mogućnost da se pojavi neki dozni nivo (odredjene verovatnoće), a ne i izvesnost, sigurnost da se baš on pojavi; zato je povoljnije uprostiti postupak dobijanja rezultujuće raspodele, jer, u većini slučajeva, nije potrebna neka izuzetna tačnost, što sledi i iz navedenih osobina slučajnih parametara,i sada i ranije. Naime, razmatranje raspodele slučajnog

parametra kroz veći broj doznih nivoa, kao u opisanom postupku u poglavlju 4.3, vodi tačnijoj, preciznijoj analizi, ali vodi i mnogo komplikovanijem postupku analize više slučajnih parametara. Uprošćenje postupka je potrebno i zbog programiranja celokupne analize pouzdanosti za računsku mašinu, da bi se postigla vremenska ušteda u računanju koje vrši mašina.

Svakako da i oblici raspodela slučajnih parametara,načini njihovog dobijanja, kao i njihova pojedinačna važnost, uloga u pogodnom pristupu analizi predstavljaju činioce koji nameću složeniji ili uprošćeniji postupak. Pojedinačna razmatranja ovih činilaca daje jasniji uvid za koji se postupak treba opredeliti. Na primer, oblik raspodele može slediti neki poznati zakon raspodele, ali u većini slučajeva to će biti neka nepravilna raspodela koju je nemoguće matematički predstaviti, pa je uprošćeniji postupak pogodniji za analizu takvih raspodela.Što se tiče načina dobijanja raspodele, on može biti, kako je već opisano: iskustveni (eksploatacioni), eksperimentalni i zasnovan na pretpostavkama. Odredjivanje raspodele na osnovu pretpostavki, u najvećem broju slučajeva, vodi preko poznatih matematičkih zakona iz statistike, pa će i rezultujuća raspodela slediti neki od tih zakona ili neku njihovu kombinaciju. Sa te strane posmatrani problem verovatno se potpunije, tačnije rešava kroz složeniji, egzaktniji postupak da bi se održao nivo matematičke zakonitosti celim tokom analize. Medjutim, i eksploatacioni i eksperimentalni način odredjivanja raspodele uglavnom ukazuju na slučajnost pojavljivanja doznih nivoa u smislu da ne slede neki od poznatih statističkih zakona; tu nezakonitost je mnogo lakše uklopiti u analizu kroz uprošćeniji postupak. Najzad, uloga i važnost pojedinih slučajnih parametara prevagnuće ka jednom ili drugom postupku. Samo u posebnim prilikama, kada je reč o izuzetnoj važnosti pojedinih parametara, o njihovom znatnom uticaju na radioaktivno stanje sistema, treba primeniti složeniji postupak radi tačne i potpune procene uticaja; ili, kada se traži veoma tačna procena iz bilo kog razloga. U ostalim slučajevima sasvim je zadovoljavajući i uprošćeniji postupak

za odredjivanje rezultujuće raspodele.

Iz izloženog se može zaključiti da je u većini slučajeva pogodniji uprošćeniji postupak, pa je zbog toga neophodno detaljno opisivanje tog postupka.

Neka u razmatranom reaktorskom sistemu postoji m slučajnih parametara i neka raspodele koje im pripadaju sadrže isti broj - K diskretnih vrednosti nivoa doze. Neka se, dalje, izabrano mesto, na kome se želi odrediti raspodela doznih nivoa zbog delovanja svih parametara u periodu t, nalazi na rastojanju L od osnovnog, početnog položaja. Da bi se odredila ta rezultujuća raspodela potrebno je ispitati sve moguće slučajeve pojavljivanja K diskretnih vrednosti svakog od m parametara. Diskretne vrednosti svakog slučajnog parametra ulaze sa istom verovatnoćom u sve moguće kombinacije m parametara. Uzete su jednake, iste verovatnoće zbog uprošćavanja postupka i pojednostavljenja rada. Pojam sve moguće kombinacije odnosno slučajevi podrazumeva, obuhvata sve moguće načine svrstavanja tih K diskretnih vrednosti nivoa doze u grupe od po m članova. Na primer, ako postoje samo dva slučajna parametra sa odgovarajućim diskretnim vrednostima nivoa doze

$$\begin{aligned} &PAR^1(d_1^1, d_2^1, \ldots, d_K^1), \\ &PAR^2(d_1^2, d_2^2, \ldots, d_K^2), \end{aligned} \tag{4.13}$$

tada svi mogući slučajevi pojavljivanja njihovih diskretnih vrednosti u grupama od po dva člana su sledeći:

$$\begin{array}{l} d_1^1 d_1^2 \;\; d_1^1 d_2^2 \;\; \ldots \;\; d_1^1 d_{K-1}^2 \;\; d_1^1 d_K^2 \\ d_2^1 d_1^2 \;\; d_2^1 d_2^2 \;\; \ldots \;\; d_2^1 d_{K-1}^2 \;\; d_2^1 d_K^2 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ d_K^1 d_1^2 \;\; d_K^1 d_2^2 \;\; \ldots \;\; d_K^1 d_{K-1}^2 \;\; d_K^1 d_K^2 \end{array} \tag{4.14}$$

Ima ih ukupno K^2, što nije ništa drugo nego varijacije sa ponavljanjem drugog reda. Ako bi u analiziranom sistemu postojala tri slučajna parametra bilo bi ukupno K^3 mogućih slučajeva (varijacije sa ponavljanjem trećeg reda). Dalje proširenje na veći broj slučajnih parametara, pri čemu svakom od njih odgovara K diskretnih nivoa doze, postoji mogućnost pojavljivanja

$$K^m \tag{4.15}$$

varijacija sa ponavljanjem m-tog reda od K elemenata. Prema tome, postoji K^m mogućih slučajeva delovanja m parametara u obliku doznih nivoa na nekom mestu, kao posledice nastalih dogadjaja u vremenskom periodu t.

Svaka od ovih K^m varijacija daje odredjeni nivo doze koji je jednak zbiru m pojedinačnih nivoa doze. Ako je broj diskretnih vrednosti doza u raspodelama pojedinih parametara veliki i ako je i m veliki broj, tada će i broj varijacija biti veoma veliki, tj. dobiće se veoma veliki broj nivoa doze. To bi otežavalo, učinilo veoma složenim odredjivanje raspodele doznih nivoa na mestu L. To se može izbeći, uraditi jednostavnije i brže ako se mogući interval doze zračenja podeli na zone, u koje će se smestiti pripadajuće doze. Zato, dobijeni nivo doze, kao posledica varijacija m slučajnih parametara, naći će se u jednoj od zona, tj. pašće u interval neke zone. U svakoj zoni pojaviće se odredjeni broj puta nivoi doze koji spadaju u granice te zone. Na primer, k-ta zona obuhvata izvestan broj različitih nivoa unutar svojih granica, s tim što srednji nivo te zone iznosi d_k. Ispitivanjem K^m varijacija dobija se, recimo, u n_k slučajeva da nivo doze d_k na mestu L, zbog nastalih dogadjaja u vremenskom periodu t i reagovanja na te dogadjaje m slučajnih parametara,

$$P\{D(L;t) = d_k/PAR_m\} = \frac{n_k}{K^m} \tag{4.16}$$

Ispitivanje svih varijacija daje nivoe doze koji se rasporedjuju po unapred odredjenim zonama, pa se time dobija

frekvencija svake zone (n_k). Poznavanje frekvencija doznih nivoa utvrdjenih zona omogućava odredjivanje verovatnoće srednjeg nivoa doze svake zone (4.16), što konačno daje raspodelu verovatnoće doznih nivoa na mestu L u periodu t.

Tako, dogadjaji, normalni i nepovoljni, kroz promene stanja slučajnih i konstantnih parametara, na odredjeni način utiču na stanje ozračenosti nekog mesta u odredjenom periodu. Izražavanje tog uticaja kroz verovatnoću veoma je pogodno i sa stanovišta brze procene i uočavanja načina uticaja, i sa stanovišta uključivanja njihovog u razmatranje i analizu pouzdanosti sistema u celini.

5. SIGURNOSNI UREDJAJI

Da bi se sprečilo prostiranje radioaktivnog zračenja kroz sistem postavljaju se fizičke prepreke. U većini eksploatacionih stanja postavljene prepreke predstavljaju efikasna zaštitna sredstva, jer su u pitanju normalna (povoljna) eksploatacionа stanja, tj. normalni (povoljni) dogadjaji čije eventualne neželjene posledice prepreke uspešno otklanjaju. Medjutim, postavlja se pitanje da li prepreke obezbedjuju željenu, potrebnu zaštitu u nepovoljnim eksploatacionim stanjima. Jer, nepovoljna eksploataciona stanja pogodne su situacije za dobijanje takvih nivoa doze zračenja koji u većoj ili manjoj meri premašuju normalni, dozvoljeni nivo doze. U takvim uslovima, u sistem ugradjene fizičke prepreke mogu samo delimično da spreče delovanje neželjenih posledica. Efikasno sprečavanje nastajanja, kao i delovanja nastalih nepovoljnih posledica moguće je ostvariti u zajedničkoj akciji prepreka i dodatnih, za tu svrhu posebno predvidjenih, uredjaja.

5.1. Definicija

Prepreke, kao fizičko sredstvo zaštite od zračenja, imaju stalnu, neprekidnu funkciju delovanja u svim uslovima. Samo, efikasnost njihovog delovanja je ograničena - do nekog nivoa radioaktivnog zračenja uspešno deluju, a zatim njihova zaštitna moć slabi, tj. zavisna je od eksploatacionih uslova u kojima se prepreke mogu naći. Zato, dodatni uredjaji treba da dopune delovanje prepreka u nepovoljnim situacijama, i to kroz kontrolu nastanka nepovoljnih dogadjaja, sprečavanje njihovog daljeg razvoja do potpunog suzbijanja njihovog nastalog delovanja.

Prema tome, glavni zadatak ovih uredjaja je sprečavanje premašivanja dozvoljenog nivoa zračenja u svim radnim uslovima,

tj. održavanje zaštite od radioaktivnog zračenja u bezbednim, sigurnim granicama. Zbog toga se ti uredjaji i nazivaju *sigurnosni uredjaji*. Inače, njihova sigurnosna delovanja, funkcije mogu biti ostvarene na različite načine. U najopštijem značenju sigurnosni uredjaji predstavljaju električne i mehaničke mehanizme, sigurnosna delovanja operatora, kao i njihove kombinacije.

5.2. Osnovne osobine

Raznovrsnost nepovoljnih dogadjaja i odgovarajućih neželjenih posledica, kao i moguća opasnost po ljude i okolinu, uslovljavaju uvodjenje velikog broja sigurnosnih uredjaja. Ti uredjaji moraju biti složenog sastava radi brzog reagovanja i efikasnog delovanja na nastale promene, moraju posedovati i druge kvalitetne osobine da bi ostvarili zadovoljavajuću zaštitu od zračenja u svim uslovima. Sve to ukazuje na potrebu da delovi jednog takvog uredjaja moraju posedovati visoke kvalitete, kako bi u svim uslovima radili pouzdano i time obezbedili pouzdano delovanje uredjaja u celini.

Uticaj nastalih nepovoljnih dogadjaja na pouzdanost sistema podleže delovanju fizičkih prepreka i sigurnosnih uredjaja u smislu slabljenja, otklanjanja i sprečavanja njihovog uticaja. Pri tome, zaštitno delovanje prepreka može se smatrati stalnom, nepromenljivom veličinom - konstantnim parametrom, sem u "nemogućim" ili njima po posledicama bliskim nepovoljnim stanjima eksploatacije, koji mogu izazvati promene osnovnih osobina postavljenih prepreka. Što se tiče sigurnosnih uredjaja, zbog navedenih osobina koje oni treba da poseduju u radu i zbog načina funkcionisanja njihovih delova u raznim uslovima, njihova pouzdanost u radu se ne može smatrati nepromenljivom veličinom. Naprotiv, ona podleže promenama, ima promenljivi, slučajni karakter ponašanja. Ta karakteristika nameće, kao prirodno, izražavanje pouzdanosti sigurnosnih uredjaja verovatnoćom.

Pomenuta i naznačena važnost brzine reagovanja,efikasnosti

delovanja i pouzdanosti uredjaja u radu upućuje, pri analizi nivoa doze na posmatranim mestima, na detaljno razmatranje primene odgovarajućih uredjaja za svaku grupu, vrstu, tip mogućih nepovoljnih dogadjaja, kao i pojedinačne dogadjaje koji se ne mogu svrstati u neku od postojećih grupa. U svakom slučaju, za svaku grupu nepovoljnih dogadjaja neophodno je imati skup sigurnosnih uredjaja, koji će sprečavati i suzbijati nepovoljne uticaje tih dogadjaja. Ti skupovi uredjaja označavaju se sa $S_n(\bar{N}_i)$, tj. ovo predstavlja skup od n predvidjenih uredjaja za sve nepovoljne dogadjaje i-te grupe, vrste, tipa. Radi jednostavnijeg označavanja koristiće se ubuduće oznaka S_n^i za i-tu vrstu nepovoljnih dogadjaja, odnosno S_n ako nije bitno o kojoj vrsti, grupi nepovoljnih dogadjaja je reč.

5.3. Delovanje sigurnosnih uredjaja na nepovoljne dogadjaje

Mera za efikasnost delovanja jednog sigurnosnog uredjaja kada nastane neki nepovoljni dogadjaj, ili, uopštenije rečeno, skupa sigurnosnih uredjaja za grupu nepovoljnih dogadjaja $\bar{N}_i$ jeste verovatnoća $p\left|S_n(\bar{N}_i)\right|$, tj. $p(S_n^i)$. Poznavanje ove verovatnoće, kao i verovatnoće ostvarivanja nepovoljnog dogadjaja kada deluju i kada ne deluju sigurnosni uredjaji omogućava razmatranje slučajeva uspešnog i neuspešnog delovanja uredjaja. A to vodi odredjivanju mogućih nivoa doze i proceni njihovog uticaja na stepen zaštite ljudi i okoline.

5.3.1. Slučaj uspešnog delovanja uredjaja

U principu, kao što je već objašnjeno u (4.1), slučaj da se na posmatranom mestu pojavi nivo doze koji je manji ili jednak dozvoljenom nivou označava se kao povoljni dogadjaj,

$$D = d_\ell \leq d_{doz} \rightarrow N_\ell \ . \qquad (5.1)$$

Ako se razmatra neka, bilo koja vrsta nepovoljnih dogadjaja, $\bar{N}$, i za njih predvidjeni odgovarajući skup sigurnosnih

uredjaja, S_n, tada je verovatnoća da ne bude premašena dozvoljena doza, tj. da se dobije normalan, povoljan dogadjaj, jednaka

$$P(D=d_\ell/\bar{N}) = P(N_\ell/\bar{N}) = P(N_\ell S_n) + P(N_\ell \bar{S}_n) \quad , \qquad (5.2)$$

zbiru verovatnoća $P(N_\ell S_n)$ i $P(N_\ell \bar{S}_n)$ da se dobije normalni dogadjaj N_ℓ kada deluju sigurnosni uredjaji, S_n, i kada su svi sigurnosni uredjaji otkazali, $\bar{S}_n$. Jednačina (5.2) može se razviti u oblik

$$P(N_\ell/\bar{N}) = \prod_n p(S_n)P(N_\ell/S_n) + p(\bar{S}_n)P(N_\ell/\bar{S}_n) \quad , \qquad (5.3)$$

gde $\prod_n$ znači da treba uzeti proizvod od onoliko članova, n, koliko je sigurnosnih uredjaja predvidjeno za razmatranu grupu nepovoljnih dogadjaja; dalje, uzima se da je

$$P(N_\ell/S_n) = 1, \qquad (5.4)$$

tj. ako bar jedan od predvidjenih uredjaja dejstvuje, onda je verovatnoća za normalni dogadjaj N_ℓ jednaka jedinici, odnosno sigurno je da neće biti premašen dozvoljeni dozni nivo. Pored ovoga, treba dodati ,da se umesto izraza $p(\bar{S}_n)$, koji označava verovatnoću da otkažu svi uredjaji, može staviti

$$p(\bar{S}_n) = \prod_n q(S_n) \quad , \qquad (5.5)$$

pa se jednačina (5.3) svodi na

$$P(N_\ell/\bar{N}) = \prod_n p(S_n) + \prod_n q(S_n)P(N_\ell/\bar{S}_n) \quad . \qquad (5.6)$$

Kako je

$$\prod_n p(S_n) = 1 - \prod_n q(S_n) \quad , \qquad (5.7)$$

njegovo uvrštenje u jednačinu (5.6) i sredjivanje daje konačnu jednačinu za verovatnoću suzbijanja nepoželjnih posledica nekog nepovoljnog dogadjaja

$$P(N_\ell/\bar{N})=1-\prod_n q(S_n)\left|1-P(N_\ell/\bar{S}_n)\right| . \qquad (5.8)$$

U ovoj jednačini $\prod_n q(S_n)$ predstavlja verovatnoću da otkažu svi sigurnosni uredjaji, dok $P(N_\ell/\bar{S}_n)$ označava verovatnoću da nepovoljni dogadjaj neće ispoljiti svoje nepovoljno dejstvo iako su otkazali svi sigurnosni uredjaji; zato izraz $|1-P(N_\ell/\bar{S}_n)|$ daje verovatnoću da će se nepovoljni dogadjaj ispoljiti kroz nepovoljne dozne nivoe kada otkažu svi sigurnosni uredjaji, a proizvod ovog izraza i $\prod_n q(S_n)$ daje verovatnoću izvesnosti nepovoljnih doznih nivoa kada su svi uredjaji otkazali. Stoga je uslovna verovatnoća $P(N_\ell/\bar{N})$ za povoljan ishod N_ℓ, nakon nastanka nepovoljnog dogadjaja $\bar{N}$, jednaka jedinici umanjenoj za verovatnoću premašivanja dozvoljene doze kada su otkazali svi sigurnosni uredjaji.

Usvojeni stav da je delovanje jednog uredjaja dovoljno za suzbijanje nepovoljnog dogadjaja odnosi se na one sisteme kod kojih su mesto, kvalitet, pouzdanost i način ugradjivanja i delovanja uredjaja takvi da su u saglasnosti sa postavljenim zahtevima obezbedjenja zadovoljavajuće zaštite od zračenja. Medjutim, ako postoji vremensko kašnjenje u reagovanju uredjaja, razmatrani odnosi izmedju nepovoljnih dogadjaja i uredjaja ne moraju da važe. Ako podaci iz eksploatacije,eksperimenta nameću ovaj složeniji odnos, onda se analiza pouzdanosti može proširiti uključivanjem i takvih slučajeva.

5.3.2. Slučaj otkaza svih uredjaja

Polazeći od toga da je dovoljno delovanje bar jednog sigurnosnog uredjaja da se suzbije nepoželjno delovanje nepovoljnog dogadjaja, ostaje da se razmotri i slučaj kada otkažu svi sigurnosni uredjaji.

Nepovoljni dogadjaj je definisan kao slučaj premašivanja dozvoljenog nivoa doze na nekom mestu. Zato, ako nivo doze zbog nekog iz grupe nepovoljnih dogadjaja $\bar{N}$ dostigne vrednost $d_k > d_{doz}$ to istovremeno označava pojavljivanje nepovoljnog

dogadjaja $\bar{N}_k$,

$$D = d_k > d_{doz} \rightarrow \bar{N}_k \ , \tag{5.9}$$

koji će i stvarno nastati jedino ako otkažu svi sigurnosni uredjaji. Prema tome, verovatnoća za dogadjaj $\bar{N}_k$ je data verovatnoćom istovremenog pojavljivanja dogadjaja $\bar{N}_k$ i otkazivanja svih sigurnosnih uredjaja

$$P(\bar{N}_k/\bar{N}) = P(\bar{N}_k\bar{S}_n). \tag{5.10}$$

Ovo se može napisati u obliku

$$P(\bar{N}_k/\bar{N}) = p(\bar{S}_n)P(\bar{N}_k/\bar{S}_n) \ , \tag{5.11}$$

a korišćenjem jednačine (5.5) dobija se

$$P(\bar{N}_k/\bar{N}) = \prod_n q(S_n)P(\bar{N}_k/\bar{S}_n) \tag{5.12}$$

verovatnoća za nepovoljni dogadjaj $\bar{N}_k$, koja je jednaka proizvodu verovatnoće da otkažu svi sigurnosni uredjaji i verovatnoće da nastane dogadjaj $\bar{N}_k$ kada su otkazali svi uredjaji.

Razmatrana uzajamna delovanja nepovoljnih dogadjaja i sigurnosnih uredjaja izražena verovatnoćom ukazuju na važnost kvalitetnih i u radu pouzdanih uredjaja uklopljenih u sigurnosni deo reaktorskog sistema. Zbog ograničenih mogućnosti fizičkih prepreka, izuzetnu ulogu pri nastanku veoma oštrih i neželjenih posledica imaju sigurnosni uredjaji. Efikasnost njihovog delovanja u raznim uslovima izražena verovatnoćom pogodan je oblik za uključivanje u analizu pouzdanosti kroz metod verovatnoće.

6. METOD VEROVATNOĆE

Detaljno obradjivanje vrsta, tipova dogadjaja kroz odredjivanje verovatnoće nastajanja i preduzimanje mera za suzbijanje njihovog daljeg razvoja, efikasnosti delovanja preduzetih mera, nepovoljnih efekata na rad sistema i dr. ukazuje na mogućnost statističke analize pouzdanosti, koja vodi realnijoj, tačnijoj proceni opasnosti kojoj su ljudi izloženi usled zračenja. Da bi do toga došlo potrebno je parametre sistema statistički obraditi, tj. one (slučajne) o čijem ponašanju postoje statistički, eksploatacioni podaci. U statističkoj obradi bitno je da se sve promene stanja pojedinačnih slučajnih parametara tako razmatraju da se njihov uticaj na sistem da kroz raspodelu verovatnoće mogućih doznih nivoa. Odredjenim postupkom, metodom uklapaju se raspodele verovatnoće u analizu pouzdanosti sa ciljem da se odredi doza zračenja u razmatranim uslovima rada. Analiza delovanja parametara, kroz njihove raspodele verovatnoće i njihovo uklapanje u opštu analizu pouzdanosti sistema, sprovodi se kroz metod verovatnoće, koji kao krajnji rezultat analiziranih radnih (eksploatacionih) uslova i stanja daje raspodelu verovatnoće zračenja na nekom mestu.

6.1. Način uključivanja dogadjaja u metod

Pri analizi dogadjaja i stepenu njihovog uticaja na pouzdanost sistema, odnosno bezbednost i sigurnost ljudi i okoline, bitno je raščlaniti dogadjaj i kroz razmatranje njegovih komponenti doći do konačnog uvida u njegovo delovanje. Osnovne komponente dogadjaja, prema glavi 4, su uzrok, promena parametarskog stanja i posledica u vidu radioaktivnog zračenja na nekom mestu, a njihova uzročna veza je očigledna i logična. Ono što je od interesa za analizu pouzdanosti je kako se, na koji način, taj

logičan tok promena sa krajnjom posledicom odražava na pouzdanost sistema, te prema tome i kako se uključuje u analizu te pouzdanosti.

Objašnjenje ovoga zahteva detaljnije opisivanje logičnog razvoja promena u odredjenim eksploatacionim uslovima. Zapravo, taj razvoj promena (pojavljivanje dogadjaja) započinje nastankom nekog uzroka. Nastali uzrok izaziva promenu stanja nekog parametra. Od mesta nastanka uzroka, izazivača promene stanja, širi se poremećaj kroz sistem. Da bi se uočila promena parametarskog stanja, tj. poremećaj, potrebno je da prodje izvesno vreme od njihovog nastanka. U medjuvremenu, u tom periodu poremećaj, u vidu dodatnog zračenja u odnosu na dotadašnji, postojeći nivo, može stići do prve, druge itd. fizičke zapreke u smeru spoljne okoline sistema, izazivajući iza njih promenu postojećeg radioaktivnog stanja u nepovoljnom smislu.

Pošto je uočen nastanak uzroka, odnosno odgovarajućeg poremećaja, stupaju u dejstvo operatori i sigurnosni uredjaji sa ciljem da na odgovarajući način spreče dalje nepovoljno delovanje poremećaja, kroz slabljenje i potpuno suzbijanje njegovog delovanja. Od mesta nastanka uzroka promene stanja, poremećaja do posmatranog mesta, pod dejstvom fizičkih prepreka, operatora i sigurnosnih uredjaja može nastala parametarska promena PP/U, koja je u stvari promena radioaktivnog stanja - povišenje nivoa ili doze zračenja, biti oslabljena u većoj ili manjoj meri i u zavisnosti od navedenih dejstava rezultovati u normalan (povoljan) ili nepovoljan dogadjaj.

Ovaj logički razvoj promena u datim uslovima može se i matematički predstaviti sa simboličkim relacijama, koje će kasnijim razmatranjima prerasti u egzaktne matematičke oblike. Naime, kako je već opisano, nastali uzrok daje promenu parametarskog stanja, što u sistemu izaziva dozni poremećaj

$$PP/U \rightarrow D_{por} \; . \qquad (6.1)$$

Delovanje fizičkih prepreka, operatora i sigurnosnih uredjaja na

nastali dozni poremećaj može na posmatranom mestu rezultovati u dozu ispod ili iznad dozvoljenog doznog nivoa

$$del(fp,o,S_n)D_{por} \rightarrow D(L) = d,\bar{d} \ , \qquad (6.2)$$

a to zapravo i predstavlja normalni (povoljni) ili nepovoljni dogadjaj

$$D(L) = d,\bar{d}/PP/U = N,\bar{N} \ , \qquad (6.3)$$

što je u saglasnosti sa jednačinom (4.1).

6.1.1. Uzroci

Imajući u vidu da su uzroci izazivači promena kod parametara sistema i da od njih zavisi jačina i smer promene (u povoljnom ili nepovoljnom smislu), a takodje i od načina reagovanja parametara na nastale uzroke, potrebno je detaljnije opisati moguće vrste uzroka u reaktorskim sistemima. Uzimajući u obzir prirodu uzroka, već je rečeno da i oni mogu biti slučajni ili konstantni, objektivni ili subjektivni, unutar ili van reaktorskog sistema. Medjutim, ako se žele navesti moguće vrste uzroka onda su to: oštećenja, kvarovi, pogrešna, neodgovarajuća delovanja operatora i spoljne pojave.

Oštećenja (Š) i kvarovi (C) odnose se na pojedinačne i, uglavnom, grupe parametara, komponenata koje u radu, eksploataciji reaktorskog sistema vrše neku funkciju, deluju na održavanje normalne eksploatacije na odredjeni način. Gubitak njihove funkcije, tj. nemogućnost daljeg normalnog delovanja izaziva poremećaj koji može dovesti do nepovoljnog dogadjaja. Pri tome se, u praksi, ove pojedinačne komponente i grupe komponenata, parametara koji podležu kvarovima i oštećenjima nazivaju opremom, a podela je izvršena na nekoliko grupa tako da se u njima nadju srodne komponente, parametri. Ovome se, zato, može dodati osnovna postavka da oštećenje ili kvar bilo koje od nekoliko grupa opreme može dovesti do istog nepovoljnog dogadjaja. U većini

slučajeva oštećenja ili kvarovi date grupe parametara ne vode do različitih nepovoljnih dogadjaja; mędjutim, moguće su i takve pojave. Ova opštost u zaključivanju o ponašanju grupa parametara, komponenata navodi na uključivanje pojma elementa (glava 3) umesto grupe parametara opreme.

Postojanje oštećenja i kvarova kod elemenata opreme, odnosno reaktorskog sistema ukazuje na dve vrste parametara u okviru opreme sistema, gde jedna vrsta trpi oštećenja a druga podleže kvarovima. Oštećenja parametara opreme predstavljaju objektivne uzroke koji nastaju unutar sistema. Jer, komponente sistema koje mogu biti oštećene su: gorivni elementi, primarne cevi za hladjenje,reaktorski sud i dr. Kvarovi su takodje objektivni i unutar sistema nastali uzroci, a dešavaju se na pojedinačnim pogonskim sistemima reaktora, kao što su: rashladni, ventilacioni, kontrolni itd.

Druga vrsta uzroka odnosi se na pogrešan, neodgovarajući rad operatora u normalnoj eksploataciji, predstavljaju greške operatora (o) u upravljanju eksploatacijom koje mogu dovesti do nepovoljnih situacija, iako nisu nastala nikakva oštećenja ili kvarovi na opremi sistema. Ova vrsta uzroka je očigledno subjektivne prirode i nastaje unutar sistema.

Treću vrstu uzroka sačinjavaju spoljne pojave (H), prirodne i veštačke. Prirodne pojave mogu biti različitih tipova i jačine delovanja, pri čemu se zbog pojava slabijeg delovanja unapred preduzimaju sigurnosne mere, dok se pojave katastrofalnog dejstva zanemaruju, jer su malo verovatne, u stvari nemoguće pojave i praktično je neizvodljiva zaštita od takvih pojava. Veštačke spoljne pojave su i objektivne i subjektivne prirode i predstavljaju veliki broj raznovrsnih mogućnosti ugrožavanja sigurnosti reaktorskog sistema, od manjih neprijateljskih diverzija u mirnodopskom stanju do katastrofalnih pojava (na pr.bombardovanje) u ratnom stanju. I ovde se predvidjaju bezbednosne mere protiv mogućih neprijateljskih dejstava, mada je u većini slučajeva teško obezbediti odgovarajuće mere efikasne zaštite.

Zajednička osobina svih vrsta uzroka je da se uglavnom ne može unapred predvideti pojavljivanje pojedinih uzroka; malo je verovatno da se to može predvideti, naprotiv, pre se na osnovu statistike ili eventualnih pretpostavki mogu sa nekom verovatnoćom uvesti u analizu, što znači da većina uzroka poseduje slučajni karakter ponašanja. To ujedno nameće potrebu za tačnom ili približno tačnom raspodelom verovatnoće pojavljivanja pojedinih uzroka, kako bi se mogli na pogodan način uključiti u analizu kroz metod verovatnoće. Raznovrsnost uzroka i njihov veliki broj ne dozvoljava uvodjenje nekih zajedničkih raspodela pojavljivanja, koje bi bile karakteristične za većinu uzroka. Stvar je načina nastanka, mesta pojavljivanja, brzine otkrivanja koji nameću odgovarajuću raspodelu. Mada je najverovatnija normalna raspodela, ipak se kod oštećenja i kvarova komponenti opreme mora ispitati svaka komponenta u odredjenim eksploatacionim uslovima. Kod grešaka operatora situacija je veoma složena i do njihove raspodele je najteže doći; jer, niti ima dovoljno eksploatacionih podataka, niti je moguće uvesti neke zakonitosti u složenim situacijama upravljanja radom reaktorskih sistema, bilo da je u pitanju puštanje reaktora u rad, normalna eksploatacija ili nepovoljna situacija usled nastalog kvara, oštećenja. Kod prirodnih pojava najčešće važi Poasonova raspodela za dogadjaje koji se retko dešavaju, dok se kod veštačkih pojava teško može reći nešto odredjenije obzirom da stvarnih podataka praktično nema, pa se to pitanje mora rešavati pretpostavkama. No, bez obzira koja raspodela verovatnoće pojavljivanja karakteriše razmatrane uzroke, svakoj vrsti uzroka pripada neka raspodela pojavljivanja u razmatranom vremenskom periodu t, tj. $F_C(t)$ je raspodela kvarova, $F_Š(t)$ je raspodela oštećenja komponenti opreme, $F_O(t)$ je raspodela grešaka operatora, a $F_H(t)$ je raspodela spoljnih pojava, prirodnih i veštačkih.

6.1.2. Promene parametarskih stanja

Kvarovi, oštećenja, greške operatora, spoljne pojave imaju neku verovatnoću pojavljivanja. Promene parametarskih stanja usled tih uzroka mogu biti konstantne i slučajne, ali zbog svoje

jednoznačnosti konstantne promene nisu od interesa za analizu kroz metod verovatnoće. Slučajne promene karakteristične su za slučajne parametre, neizvesnost pojavljivanja odredjene promene zbog nastalog uzroka uslovljava uvodjenje verovatnoće manje od jedinice. To znači da će neki slučajni parametri davati u principu više stanja, može se javiti veći broj promene stanja za odredjeni tip uzroka a da svakom stanju odgovara odredjena verovatnoća pojavljivanja manja od jedinice.

Odnosi izmedju promena parametarskih stanja i pojedinačnih uzroka iziskuju posebna razmatranja, koja su veoma složena imajući u vidu brojnost i raznovrsnost parametara, način njihovog ponašanja, ulogu u sistemu i dr. (Glava 3). Baš uloga pojedinih parametara i mesto, oblast, zona njihovog delovanja najčešće se poklapaju sa odgovarajućim karakteristikama nastalih uzroka, koji izazivaju promene kod tih parametara. Drugim rečima, u odredjenim zonama, oblastima karakteristični su odredjeni tipovi uzroka pa su karakteristične i promene parametara u njima. Redji je slučaj da se uticaj nekog uzroka uočava i van zone, oblasti nastanka s obzirom na jačinu uticaja uzroka i na težnju da se nepovoljne situacije lokalizuju. Ipak, u nepovoljnim situacijama, kada je uticaj uzroka jači moguće je izazivanje promena parametarskih stanja i u više oblasti, zona, što unosi još više detalja i ispitivanja brojnih veza u ionako složeno razmatranje odnosa uzroka i parametara. Ako se ovome doda slučajnost promena parametarskih stanja dobiće se slika o složenosti postupka ispitivanja i utvrdjivanja osobina medjusobnih veza uzroka i parametara.

Sve to ukazuje na obimno razmatranje svih kombinacija mogućih vrsta uzroka i parametara podložnih promenama, uz izvesna uprošćavanja ako je uticaj uzroka ograničen na neku oblast, zonu i ako grupe parametara imaju isti ili sličan način reagovanja, i odredjivanje zakonitosti odnosa PP/U izražene raspodelom verovatnoće kod slučajnih parametara. Ova raspodela označava moguća parametarska stanja, odnosno radioaktivna stanja (nivo zračenja ili doze zračenja) na mestu delovanja parametra izazvanih

odredjenim uzrokom. Ono što je rečeno o raspodelama verovatnoće pojavljivanja uzroka uglavnom važi i za promene parametarskih stanja, jer su u pitanju slučajni parametri koji na više načina mogu da reaguju na nastale uzroke u obliku raznih raspodela.

Za analizu je bitno da se znaju odnosi izmedju parametara i uzroka, tj. verovatnoće odredjenih parametarskih stanja za nastali tip uzroka. Na osnovu naznačenih vrsta uzroka postoje četiri grupe tih verovatnoća, koje treba odrediti u odredjenim uslovima eksploatacije, a to su: P(PP/C) - verovatnoća promene parametarskog stanja usled kvarova, P(PP/Š) - usled oštećenja, P(PP/O) - usled grešaka operatora, P(PP/H) - usled spoljnih pojava. Svaka od ovih verovatnoća obuhvata verovatnoće mogućih parametarskih promena usled svih mogućih, recimo, kvarova, tj. P(PP/C) je predstavnik skupa verovatnoća $P_{i,j}$ (pp_i/C_j), a slično je i sa ostalim promenama usled odgovarajućih vrsta uzroka.

6.1.3. Posledice

Od mesta nastanka promene parametarskog stanja, u vidu nekog nivoa zračenja, prostire se poremećaj kroz sistem u svim pravcima. Slabljenje poremećaja zavisi od postavljenih fizičkih prepreka na pravcima prostiranja i od delovanja sigurnosnih uredjaja predvidjenih za odredjene tipove promena i mesta pojavljivanja.

Fizičke prepreke na pravcu prostiranja zračenja slabe njegovu jačinu srazmerno svojoj apsorpcionoj moći za tu vrstu zračenja. U većini mogućih situacija u eksploataciji, fizičke prepreke imaju konstantan karakter delovanja, sem u "nemogućim" situacijama kada dolazi do razaranja fizičkog sastava prepreke, kada se njeno zaštitno delovanje smanjuje ili potpuno nestaje. Zato je udeo prepreka u smanjenju nivoa zračenja srazmeran njihovom broju i moći slabljenja zračenja, od mesta nastanka (izvora) poremećaja do posmatranog mesta, i predstavlja stalnu vrednost nivoa za odredjenu vrstu zračenja; drugim rečima, fizičke prepreke predstavljaju konstantne parametre u realnim,

verovatnim eksploatacionim situacijama, pa je i njihov doprinos smanjenju nivoa radioaktivnog zračenja stalan, konstantan.

Delovanje sigurnosnih uredjaja (Glava 5) u situacijama koje odstupaju od normalnih izražava se verovatnoćom da će biti sprečen nepovoljan uticaj nastalih promena ili da neće biti sprečen i pored delovanja sigurnosnih uredjaja. Radi povećanja sigurnosti sprečavanja i suzbijanja nepovoljnih posledica obično se za odredjeni tip promena predvidja delovanje više uredjaja. Stupanje u dejstvo bar jednog od njih znači da ta grupa uredjaja efikasno deluje. Zatim, predvidja se delovanje sigurnosnih uredjaja na različitim mestima: na mestima nastanka uzroka ili promene stanja, tj. pojavljivanja radioaktivnog poremećaja, na mestima gde se predvidja kontrola zračenja, na mestima praćenja stanja nekog parametra čiji je doprinos nivou zračenja osoben i značajan, itd. Medjutim, teško je unapred predvideti sve vrste poremećaja, njihova mesta i vreme pojavljivanja; uglavnom, moguće je unapred obezbediti delovanje sigurnosnih uredjaja za odredjene tipove promena i eventualno odredjene lokacije. Zato je realnije na odredjenim, sa stanovišta pouzdanosti važnim mestima obezbediti stalnu kontrolu radioaktivnog stanja i sa predvidjenim sigurnosnim dejstvima obezbediti zadovoljavajuću zaštitu od mogućih poremećaja u radu sistema.

Da se sigurnosni uredjaji uključe u odredjivanje verovatnoće povoljnih i nepovoljnih dogadjaja treba poći od jednačine (4.1),

$$P(N,\bar{N}) = P\{D(L) = d,\bar{d}/PP/U\} ,$$

i obzirom na razmatrane uticaje, medjusobne odnose i značaj uzroka, parametarskih promena i posledica, moguće je tu jednačinu preobratiti u oblik

$$P(N,\bar{N}) = P\{D(L) = d,\bar{d}/PP\} \cdot P(PP/U) . \qquad (6.1)$$

O verovatnoći P(PP/U) bilo je reči u prethodnom odeljku 6.1.2, pa preostaje navodjenje postupka za odredjivanje verovatnoće

$$P|D(L) = d,\bar{d}/PP| \ . \qquad (6.2)$$

Sprečavanje delovanja nastalih parametarskih promena u vidu nivoa doze zračenja na nekom mestu L sprovodi se, prema prethodnim razmatranjima, uvodjenjem sigurnosnih uredjaja i delovanjem fizičkih prepreka - konstantnih parametara, koji kao takvi ne ulaze u ovo razmatranje slučajnih veličina. Prema Glavi 5, pri delovanju sigurnosnih uredjaja mogu nastati i povoljne (d) i nepovoljne posledice ($\bar{d}$), što nameće dva postupka za odredjivanje verovatnoće njihovog nastajanja.

Za razmatranje povoljnih posledica pogodan je i primenjuje se postupak dat u odeljku 5.3.1. Pod pretpostavkom da je predvidjeno i delovanje sigurnosnih uredjaja za razmatrane promene, verovatnoća za dozu d biće

$$P|D(L) = d/PP| = 1 - \prod_n q(S_n)|1-P(d/\bar{S}_n)| \ . \qquad (6.3)$$

Slučaj nastanka nepovoljnih posledica i odredjivanje njihove verovatnoće sledi prema postupku u odeljku 5.3.2, pa se verovatnoća za $\bar{d}$ odredjuje prema jednačini

$$P|D(L) = \bar{d}/PP| = \prod_n q(S_n)P\ d/\bar{S}_n) \ . \qquad (6.4)$$

Na taj način jedn.(6.2) je data u razvijenom i konačnom obliku sa jednačinama (6.3) i (6.4), pa se mogu napisati i jednačine verovatnoće za normalan (povoljan) i nepovoljan dogadjaj:

$$\{P(N) = (1 - \prod_n q(S_n)|1-P(d/\bar{S}_n)|\}\cdot P(PP/U) \ , \qquad (6.5)$$

$$P(\bar{N}) = \prod_n q(S_n)P(\bar{d}/\bar{S}_n)P(PP/U) \ . \qquad (6.6)$$

Ovim verovatnoćama dogadjaji se uključuju u metod verovatnoće radi analize pouzdanosti sistema, ove verovatnoće daju stepen uticaja nastalih poremećaja u datim eksploatacionim uslovima.

6.2. Verovatnoća doze (ili nivoa) zračenja

Jednačine u prethodnom poglavlju donekle su uopštene jer se odnose na bilo koju vrstu uzroka. Razmatranje posledica od pojedinih vrsta uzroka, i u okviru te vrste pojedinačnih uzroka, sadrži izvesne detalje koji upotpunjuju i čine jasnijim jednačine iz prethodnog poglavlja i omogućuju odredjivanje verovatnoće nivoa doze na nekom mestu.

Na primer, pri razmatranju kvarova komponenti opreme sistema, biće jednačina za verovatnoću nekog nivoa doze d_k

$$p_{kC}(L) = P|D(L) = d_k/PP| \cdot P(PP/C) \ . \qquad (6.7)$$

Ako se iz ove vrste kvarova izdvoji jedan kvar C_j i ako on izazove odredjenu promenu (PP_i) kod nekog parametra, štc se sve posmatra u jedinici vremena pogodnoj za ovakvo razmatranje, nastaće na posmatranom mestu L, nakon delovanja ili otkazivanja sigurnosnih uredjaja, nivo ili doza zračenja d_i

$$p_{iC_j}(L) = P|D(L) = d_i/PP_i| \cdot P(PP_i/C_j) \ . \qquad (6.8)$$

Bitne su ovde dve stvari: kakva je promena PP_i, tj. kakav poremećaj izaziva uzrok u radioaktivnom stanju sistema i kako sigurnosni uredjaji reaguju, deluju na nastalu promenu. Iz toga sledi da doza d_i može biti ispod dozvoljene ili iznad dozvoljene vrednosti, što se može izraziti uvrštenjem jednačine (6.3) i (6.4) u jedn.(6.8). Tako za

$$d_i \leq d_{doz} \ ,$$

$$p_{iC_j}(L) = \{1-\prod_n q(S_n)|1-P(d_i/\bar{S}_n)|\}\cdot P(PP_i/C_j) \ , \qquad (6.9)$$

dok je za

$$d_i = \ddot{d}_i > d_{doz} \ ,$$

$$\ddot{p}_{iC_j}(L) = \prod_n q(S_n)P(\ddot{d}_i/\ddot{S}_n)P(PP_i/C_j) \ . \qquad (6.10)$$

Ovim su date mogućnosti za odredjivanje povoljnih (d_i) ili

nepovoljnih ($\bar{d}_i$) doza, a korisno je ukazati i na njihov medjusobni odnos obzirom na mogućnosti delovanja sigurnosnih uredjaja. Naime, nastanak neke parametarske promene PP_i sigurno daje na mestu L ili d_i ili $\bar{d}_i$, tj.

$$P|D(L) = d_i/PP_i| + P|D(L) = \bar{d}_i/PP_i| = 1 . \qquad (6.11)$$

Ako se u ovu jednačinu uvrste jedn.(6.3) i (6.4) dobija se

$$P(d_i/\bar{S}_n) + P(\bar{d}_i/\bar{S}_n) = 1 , \qquad (6.12)$$

tj. u slučaju otkazivanja svih predvidjenih sigurnosnih uredjaja moguće je pojavljivanje i povoljne doze, što zavisi od skupa sigurnosnih uredjaja za datu parametarsku promenu, koja je utoliko veća ukoliko je $P(d_i/\bar{S}_n)$ veće; tome se može dodati i činjenica da delovanje bar jednog sigurnosnog uredjaja obezbedjuje povoljnu dozu na mestu L. Nepovoljna doza ($\bar{d}_i$) uslovljena je ne samo verovatnoćom $P(\bar{d}_i/\bar{S}_n)$, da će se pojaviti na mestu L kada su otkazali svi sigurnosni uredjaji, već i verovatnoćom $\prod_n q(S_n)$ da otkažu svi sigurnosni uredjaji. Svakako da se u praksi teži što manjoj verovatnoći otkazivanja ovih uredjaja, što se postiže ugradnjom kvalitetnih i u svim eksploatacionim uslovima pouzdanih sigurnosnih uredjaja.

Medjutim, u stvarnim eksploatacionim uslovima normalno je i realno da na kvar C_j reaguje više parametara, zavisno od toga na kom se mestu analizira nivo ili doza zračenja. Zato će, kao posledica i parametarskih promena, verovatnoća za dozu na mestu L u jedinici vremena biti

$$P_{kC_j}(L) = P|D(L) = d_k/C_j| = \sum_i P|D(L) = d_i/PP_i| \cdot P(PP_o/C_j), \qquad (6.13)$$

gde je

$$d_k = \sum_i d_i$$

zbir svih doznih nivoa koje daje i parametarskih promena.

Jedn.(6.13) daje verovatnoću nivoa doze zračenja zbog

jednog od mogućih kvarova na opremi sistema, a slične su jednačine za verovatnoće doze zbog pojedinačnih uzroka koji pripadaju grupama oštećenja opreme, grešaka operatora i spoljnih pojava:

$$p_{k\check{S}_j}(L)=P\{D(L)=d_k/\check{S}_j\}=\sum_i P\{D(L)=d_i/PP_i\}\cdot P(PP_i/\check{S}_j) \ , \qquad (6.15)$$

$$p_{kO_j}(L)=P\{D(L)=d_k/O_j\}=\sum_i P\{D(L)=d_i/PP_i\}\cdot P(PP_i/O_j) \ , \qquad (6.16)$$

$$p_{kH_j}(L)=P\{D(L)=d_k/H_j\}=\sum_i P\{D(L)=d_i/PP_i\}\cdot P(PP_i/H_j) \ . \qquad (6.17)$$

Ovaj oblik je najpogodniji za uključivanje uticaja pojedinačnih uzroka u metod verovatnoće i za iznalaženje efekta na bilo kom mestu unutar ili van sistema.

6.3. Verovatnoća pojavljivanja uzroka u vremenskom periodu t

U odeljku 6.1.1. navedene su vrste uzroka i njihove prirodne osobine, od kojih je za ovu analizu najinteresantnija osobenost slučajnosti njihovog pojavljivanja. Različitost prirode navedenih vrsta uzroka ne dozvoljava uvodjenje jednoobraznih oblika njihovog pojavljivanja, već svakoj vrsti i u okviru nje svakom uzroku ili grupi srodnih uzroka odgovaraće neki zakon raspodele pojavljivanja u vremenskom periodu t.

Opšta oznaka za te raspodele je F(T), a odgovarajući indeks uz F označava pripadnost raspodele. Obzirom da je u periodu t moguće pojavljivanje, na primer, uzroka C_j više puta, to je za potrebe statističke analize neophodno odrediti verovatnoću za odredjeni broj njegovog pojavljivanja u tom periodu. Za ovo odredjivanje potrebno je poznavanje prirode ponašanja C_j u vidu raspodele $F_{C_j}(t)$, pomoću koje se dobija verovatnoća za r kvarova opreme C_j u vremenu t označena sa $P_{C_j}(r;t)$. Polazi se od jednačine za verovatnoću da se neće javiti nijedan kvar

$$P_{C_j}(0;t) = 1 - F_{C_j}(t) = R_{C_j}(t) \ , \tag{6.18}$$

gde je $R_{C_j}(t)$ funkcija pouzdanosti, a jednakost

$$R_{C_j}(0;t) = 1 - F_{C_j}(t)$$

sledi iz jednačine

$$P_{C_j}(0;t) + F_{C_j}(t) = 1 \ , \tag{6.19}$$

jer je jasno da se ili neće dogoditi kvar ili će se dogoditi jedan, dva ili više kvarova, što je gornjim dvema funkcijama obuhvaćeno i čija zbirna vrednost iznosi jedan, tj. njima su obuhvaćeni svi mogući slučajevi. Kada se odredi, kada se utvrdi vrednost $P_{C_j}(0;t)$, druge verovatnoće se lako dobijaju iz jednačine

$$P_{C_j}(r;t) = \int_0^t P_{C_j}(r-1;\ t-\tau)dF_{C_j}(\tau) \ . \tag{6.20}$$

Ovo je opšta jednačina za sve vrste uzroka, a broj pojavljivanja pojedinih uzroka zavisiće od njihove raspodele F(t). Pri razmatranju pojedinih vrsta uzroka navedeni su mogući načini njihovog pojavljivanja, a s obzirom na jedn.(6.20) poželjno je da njihove raspodele budu izražene poznatim matematičkim zakonima.

Na primer, ako je verovatnoća da neće nastati kvar u periodu t data izrazom

$$P_{C_j}(0;t) = e^{-\bar{c}_j t} \ , \tag{6.21}$$

gde je $\bar{c}_j$ srednji broj kvarova C_j u periodu t, tada je

$$P_{C_j}(r;t) = \frac{(\bar{c}_j)^r e^{-\bar{c}_j t}}{r!} \tag{6.22}$$

Uzroci koji se redje pojavljuju obično slede Poasonovu raspodelu. Neka su u pitanju, na primer, uzroci tipa j (U_j) i

neka U^*_j izražava uzrok odredjene jačine dejstva (u vidu nivoa ili doze zračenja - D). Ako broj pojavljivanja uzroka U^*_j u vremenu t sledi Poasonovu raspodelu

$$\frac{(\bar{u}^*_j t)^{b^*_j} \cdot e^{-\bar{u}^*_j t}}{n^*_j!} , \qquad (6.23)$$

gde je n^*_j broj pojavljivanja U^*_j u vremenu t, verovatnoća tog broja biće $P(n^*_j;t)$. Neka je dalje, $h_j(D)$ funkcija frekvencije uzroka U_j, onda se raspodela verovatnoće broja pojavljivanja tih uzroka odredjuje jednačinom

$$P_{U_j}(r;t) = \sum_{n^*_j} \binom{n^*_j}{r} p_j^r (1-p_j)^{n^*_j - r} \cdot P(n^*_j;t) , \qquad (6.24)$$

gde je

$$p_j = \int_{M_j}^{\infty} h_j(D)dD , \qquad (6.25)$$

a M_j je maksimalna jačina uzroka U_j koja se po proračunu dozvoljava za dati reaktorski sistem.

Takvim i sličnim postupcima odredjuju se verovatnoće pojavljivanja pojedinih tipova uzroka, a njihove vrednosti se koriste u daljem postupku analize.

6.4. Proizvodna funkcija - osnovni zakon raspodele u metodu

Sva dosadašnja razmatranja svodila su se na dobijanje potrebnih rezultata koji će omogućiti odredjivanje raspodele verovatnoće nivoa doze na nekom mestu L i u vremenskom periodu t. Ovo je moguće ostvariti, jer potrebnih rezultata ima, a za ostvarivanje toga najpogodnije je korišćenje proizvodne funkcije.

Imajući u vidu ono što je u Glavi 2. rečeno o proizvodnoj funkciji, kao i analizirane veličine u narednim glavama, jasno je da su posledice, zbog nekog uzroka i zbog toga izazvanih promena parametarskih stanja, u vidu nivoa doze zračenja slučajne

veličine (D) koje mogu imati vrednosti $d_o, d_1, \ldots, d_k$ sa odgovarajućim verovatnoćama $p_o, p_1, \ldots, p_k$; ove vrednosti i verovatnoće omogućuju da se obrazuje proizvodna funkcija na način dat jednačinom (2.1) za dozu D, a ima oblik

$$G(s) = \sum_{k=o}^{K} p_k \cdot s^{d_k} . \qquad (6.26)$$

Iako su u Glavi 2. date osnovne osobine proizvodne funkcije, doduše za bilo koju opštu veličinu, biće i ovde navedene za slučajnu veličinu D, tj. dozu na nekom mestu. Naime, izvod G(s) po s daje:

$$G'(s) = \sum_{k=o}^{K} d_k p_k s^{d_k - 1} , \qquad (6.27)$$

gde je $d_k - 1 = d_{k-1}$, tj. d_k i d_{k-1} razlikuju se za jedinicu doze; kada se stavi da je s = 1, dobija se srednja doza zračenja μ_D, tj.:

$$G'(1) = \sum_{k=o}^{K} d_k p_k = \mu_D . \qquad (6.28)$$

Druga važna osobina slučajne veličine D je varijanca, tj. kvadrat standardnog odstupanja, koji se obeležava sa σ_D^2, a data je jednačinom, sličnoj jednačini (2.11),

$$\sigma_D^2 = G''(1) + G'(1) - /G'(1)/^2 . \qquad (6.29)$$

Kada su poznate veličine (6.26), (6.28) i (6.29) može se odrediti verovatnoća dostizanja bilo kog nivoa doze iz intervala

$$d_o \leq d_i < d_K . \qquad (6.30)$$

Tako je verovatnoća za

$$D \leq d_i \qquad (6.31)$$

jednaka

$$P(D \leq d_i) = \sum_{k=o}^{i} p_k \,, \tag{6.32}$$

tj. zbiru svih koeficijenata izraza u proizvodnoj funkciji (6.26) koji imaju eksponente manje ili jednake d_i.

Radi jasnijeg, očiglednijeg sagledavanja pogodnosti primene proizvodne funkcije kod problema prostiranja radioaktivnog zračenja, neka posluži primer primene konvolucije (poglavlje 2.3). Ako su D^1 i D^2 dva dogadjaja, naravno slučajna jer imaju proizvodne funkcije $G^1(s)$ i $G^2(s)$, i ako se analizira njihov istovremeni uticaj na radioaktivno stanje nekog mesta, rezultat toga biće neka doza $D = D^1 + D^2$ u posmatranoj jedinici vremena, kome odgovara nova proizvodna funkcija $G^1(s)\cdot G^2(s)$. Prema zakonu konvolucije, ako su D^1 i D^2 nezavisni dogadjaji i ako je $D = d$, biće

$$P(D=d) = \sum_{k=o}^{K} P(D^1=d_k)\cdot P(D^2=d-d_K) \,. \tag{6.33}$$

ovde je $P(D^1=d_k)$ koeficijent uz s^{d_k} u $G^1(s)$, $P(D^2 = d-d_k)$ je koeficijent uz s^{d-d_k} u $G^2(s)$. Očigledno je, prema (6.33), da je koeficijent uz s^d u $G^1(s)\cdot G^2(s)$ jednak

$$\sum_{k=o}^{K} |\text{koef. uz } s^{d_k} \text{ u } G^1(s)|\cdot|\text{koef. uz } s^{d-d_k} \text{ u } G^2(s)|,$$

pa je, prema tome,

$$P(D=d) = |\text{koef. uz } s^d \text{ u } G^1(s)\cdot G^2(s)|. \tag{6.34}$$

Kada se odredi proizvodna funkcija ova dva dogadjaja, tj. kada se znaju koeficijenti te funkcije, verovatnoća za neki dozni nivo d_i biće jednaka zbiru koeficijenata uz s^d za $d = d_i$ (6.32), što omogućava procenu uticaja tih dogadjaja na nekom mestu.

6.4.1. Odredjivanje verovatnoće ukupne (kumulativne) doze

Kada su odredjene, kada se imaju osnovne karakteristike

proizvodne funkcije, moguće je odrediti proizvodnu funkciju $G(s;L,t)$ ukupne (kumulativne) doze za vreme t na mestu L.

Proizvodna funkcija za nivo doze usled kvara C_j je

$$G_{C_j}(s;L) = \sum_{k=o}^{K} p_{kC_j}(L)\cdot s^{d_k} , \qquad (6.35)$$

gde su $p_{kC_j}(L)$ dati jedn.(6.13). Ako postoji r kvarova do vremena t, proizvodna funkcija za svih r kvarova bila bi

$$|G_{C_j}(s;L)|^r . \qquad (6.36)$$

Medjutim, pojavljivanje svakog od r mogućih kvarova u vremenu t uslovljeno je odredjenom verovatnoćom (poglavlje 6.3), te ukupna, konačna proizvodna funkcija ima odgovarajući, složeniji oblik

$$G^*_{C_j}(s;L,t) = \sum_{r=o}^{\infty} |G_{C_j}(s;L)|^r\cdot P_{C_j}(r;t) , \qquad (6.37)$$

gde je $P_{C_j}(r;t)$ odredjeno jednačinom (6.20). Očevidno, jednačina (6.37) je najopštiji oblik, kojim su obuhvaćeni svi mogući slučajevi pojavljivanja kvarova - od nijednog do beskonačno mnogo kvarova. Naravno, u realnoj analizi gornju granicu (beskonačni broj kvarova) treba zameniti realnim, konačnim brojem $M(C_j)$. Korišćenje takvog broja označava i njegov stvarni, uočljivi doprinos analizi, uz istovremeno odbacivanje većih brojeva zbog neznatnog doprinosa. Drugi važan razlog za korišćenje $M(C_j)$ kao gornje granice je mogućnost pojavljivanja više od $M(C_j)$kvarova C_j u vremenu t, u kom slučaju treba ponovo izvesti analizu delovanja kvarova. To navodi na sledeći postupak korišćenja proizvodne funkcije

$$G^*_{C_j}(s;L,t) = \sum_{r=o}^{M(C_j)} |G_{C_j}(s;L)|^r\cdot P^*_{C_j}(r;t) , \qquad (6.38)$$

gde je

$$P^*_{C_j}(r;t) = P_{C_j}(r;t) , \quad r=o,1,2,\ldots,M(C_j)-1 \qquad (6.39)$$

$$P^*_{C_j}\left|M(C_j);t\right| = 1 - \sum_{r=o}^{M(C_j)-1} P_{C_j}(r;t) \qquad (6.40)$$

Proizvodna funkcija za kvarove opreme je, prema tome:

$$G_C(s;L,t) = \prod_{j=1}^{J(C)} G^*_{C_j}(s;L,t) \ , \qquad (6.41)$$

tj. proizvod svih pojedinačnih proizvodnih funkcija. Diferenciranjem ove jednačine po s i stavljanjem $s = 1$ dobija se srednja vrednost nivoa doze

$$\left.\frac{dG_C}{ds}\right|_{s=1} = \sum_{j=o}^{J(C)} \sum_{r=o}^{M(C_j)} \sum_{k=o}^{K} d_k p_{kC_j}(L)\cdot r\cdot P^*_{C_j}(r;t) = \sum_{j=1}^{J(C)} E_{C_j}(D,L)\cdot E(N_{C_j};t) \ , \qquad (6.42)$$

gde je

$$E(N_{C_j};t) = \sum_{r=o}^{M(C_j)} r\cdot P^*_{C_j}(r;t) \qquad (6.43)$$

srednji broj kvarova tipa j u vremenu t, a

$$E_{C_j}(D;L) = \sum_{k=o}^{K} d_k\cdot p_{kC_j}(L) \qquad (6.44)$$

je srednja doza na mestu L usled jednog kvara opreme tipa j.

Slična analiza važi i za oštećenja opreme, greške operatora i spoljne pojave, tj. dobijaju se odgovarajuće proizvodne funkcije oblika (6.41). Prema tome, konačna, ukupna proizvodna funkcija biće rezultat proizvoda proizvodnih funkcija četiri grupe mogućih uzroka, poremećaja radioaktivnog stanja na nekom mestu L u vremenskom periodu t

$$G(s;L,t) = G_C(s;L,t)\cdot G_S(s;L,t)\cdot G_O(s;L,t)\cdot G_H(s;L,t) \ , \qquad (6.45)$$

gde svaka grupa kroz svoju proizvodnu funkciju unosi svoj osobeni uticaj, svoj deo doprinosa ukupnoj promeni radioaktivnog stanja.

Ovako razvijen postupak analize omogućava numeričko odredjivanje, u obliku raspodele, verovatnoće nivoa doze zbog nastalih nepovoljnih dogadjaja. Takodje je moguće uspešno primenjivanje u procesima analize varijacija u reaktorskim proračunima, analize uslova rada i održavanja reaktora i drugim ispitivanjima radi optimizacije rada reaktorskog sistema. Pored toga, vrednosti većine razmatranih parametara potrebno je znati sa tačnošću od jednog reda veličine. Jer, metod dozvoljava neodredjenosti u vrednostima parametara koju prima na sebe raspodela verovatnoće vrednosti ovih parametara. Prirodno je, na osnovu opisanog, da se izloženi metod verovatnoće ne ograničava u primeni samo na reaktorske sisteme, naprotiv, zbog svoje opštosti, može se primeniti na bilo koji problem koji u sebi nosi statistički karakter.

7. PROCENA POUZDANOSTI

Sigurnost reaktorskih sistema ne može biti potpuna, apsolutna. Odredjivanje stepena približavanja potpunoj sigurnosti vrši se kroz detaljna razmatranja ponašanja brojnih parametara sistema u eksploataciji. Ta razmatranja, analiza sprovodi se, kao što je pokazano, kroz metod verovatnoće kao kvantitativnog metoda za rešavanje pomenutog problema. Analiza parametara kroz ovaj metod daje detaljan uvid u stanje nivoa doze radioaktivnog zračenja na nekom mestu, u nekom vremenskom periodu, u odredjenim eksploatacionim uslovima. Zato, doza zračenja, kao faktor uporedjivanja načina delovanja pojedinih parametara sistema, omogućava procenu pouzdanosti i pojedinih parametara, i delova sistema, i sistema u celini sa stanovišta bezbednosti i zadovoljavajuće zaštite ljudi i okoline od radioaktivnog zračenja.

7.1. Pouzdanost parametara

Reagovanje parametara na nastale promene u eksploataciji sistema izražava se nivoom ili dozom zračenja, u kom smislu je i vršeno dosadašnje njihovo razmatranje. Od interesa su, naravno, slučajni parametri čije se ponašanje u datim eksploatacionim uslovima i posmatranom vremenskom periodu daje kroz raspodelu verovatnoće doznih nivoa na nekom mestu. Neizvesnost i neodredjenost načina reagovanja slučajnih parametara na nastale promene, brojnost slučajnih i konstantnih parametara i složenost njihovih medjusobnih odnosa čine raspodelu verovatnoće najpogodnijim oblikom za procenu važnosti, mesta, uloge parametara u postupku odredjivanja pouzdanosti sistema.

Raspodela verovatnoće bilo kog parametra ima opšti oblik kao (2.1), tj.

$$G(s;L,t) = \sum_{k=o}^{K} p_k(L,t)\cdot s^{d_k} \quad . \tag{7.1}$$

Ovom raspodelom obuhvaćene su sve promene nastale u vremenskom periodu t, sa odgovarajućim posledicama u vidu nivoa doze zračenja na mestu L. Da bi se odredila pouzdanost parametra u tim uslovima, iz kojih je proizašla proizvodna funkcija (7.1), neophodno je poznavanje dozvoljenog nivoa doze za posmatrano mesto L. Ako se dozvoljeni dozni nivo označi sa d_m, jasno je da se funkcija (7.1) rastavlja na dva dela

$$G(s;L,t) = \sum_{k=o}^{m} p_k(L,t)\cdot s^{d_k} + \sum_{k=m+1}^{K} p_k(L,t)\cdot s^{d_k} \quad , \tag{7.2}$$

tj.

$$G(s;L,t) = G_m(s;L,t) + \bar{G}(s;L,t) \quad , \tag{7.3}$$

koji predstavljaju bitne, suštinske delove proizvodne funkcije i omogućavaju da se pomoću $G_m(s;L,t)$ proceni pouzdanost, odnosno pomoću $\bar{G}(s;L,t)$ nepouzdanost parametra. Obzirom da dozvoljeni nivo doze, $d_m = d_{doz}$, predstavlja granicu izmedju pouzdanosti i nepouzdanosti parametra, moguće je na osnovu jedn.(7.3), odrediti numeričke vrednosti ovih bitnih karakteristika parametra, tj. vrednost pouzdanosti iznosi

$$R(L,t) = G_m(s;L,t)_{/s=1} = \sum_{k=o}^{m} p_k(L,t) = P(D \leq d_m) \quad , \tag{7.4}$$

dok stepen nepouzdanosti ima vrednost

$$\bar{R}(L,t) = \bar{G}(s;L,t)_{/s=1} = \sum_{k=m+1}^{K} p_k(L,t) = P(D > d_m) \quad . \tag{7.5}$$

$R(L,t)$ i $\bar{R}(L,t)$ su komplementarne vrednosti, tj. ispunjavaju uslov

$$R(L,t) + \bar{R}(L,t) = 1 \quad , \tag{7.6}$$

a za potrebe detaljnijeg analiziranja pouzdanosti koriste se

funkcija pouzdanosti

$$R(s;L,t) = G_m(s;L,t) = \sum_{k=o}^{m} p_k(L,t)\cdot s^{d_k} , \qquad (7.7)$$

i funkcija nepouzdanosti

$$\bar{R}(s;L,t) = \bar{G}(s;L,t) = \sum_{k=m+1}^{K} p_k(L,t)\cdot s^{d_k} . \qquad (7.8)$$

Pojedinačna analiza ove dve funkcije ukazuje na značaj, ulogu, mesto pripadnog parametra u proceni pouzdanosti sistema. A ta analiza sledi prema osobinama i zakonima o proizvodnoj funkciji (glava 2), budući da se funkcije pouzdanosti i nepouzdanosti mogu smatrati novim proizvodnim funkcijama na osnovu (7.7) i (7.8).

7.2. Pouzdanost sistema

Zbog potpunog uvida u stanje pouzdanosti reaktorskog sistema neophodno je uticaj jednog parametra dopuniti sa uticajima i svih ostalih parametara koji istovremeno deluju na posmatrano mesto. Jednovremeno razmatranje raspodela verovatnoće svih parametara vodi do konačne raspodele, odnosno proizvodne funkcije kao odraza njihovog ponašanja u datim uslovima. Ta rezultujuća, konačna proizvodna funkcija (6.45) potrebna je i dovoljna da se, na osnovu dozvoljenog nivoa doze zračenja na datom mestu, zoni, oblasti odrede funkcije pouzdanosti i nepouzdanosti, prema jednačinama (7.7) i (7.8), i dodje do zaključaka o stanju pouzdanosti u kome se sistem nalazi pri datim uslovima eksploatacije.

Procena pouzdanosti sistema najpotpunije i najpogodnije se sprovodi kroz uporedjivanje pouzdanosti sistema u pojedinačnim vremenskim intervalima, približno iste dužine i što je moguće približnijih uslova rada. Ukoliko su uslovi rada u poredjenim periodima sličniji i poredjenje, a na osnovu toga procena pouzdanosti biće tačnija. Što je veći broj perioda koji se medjusobno uporedjuju, tj. što je duži ukupni vremenski interval

analizirane eksploatacije sistema, to je povoljnija situacija za procenu pouzdanosti.

Odredjivanje funkcije pouzdanosti $R_i(s;L,t)$, jedn.(7.7), u pojedinim intervalima i uporedjivanje njihovih vrednosti $R_i(L,t)$, jedn.(7.4), u uzastopnom poretku

$$\ldots R_{i-1}(L,t) \lesseqgtr R_i(L,t) \lesseqgtr R_{i+1}(L,t) \ldots \qquad (7.9)$$

ukazuje na smer vremenskih promena pouzdanosti sistema. Uporedjivanje prethodne i naredne vrednosti pouzdanosti može dati pozitivnu razliku, razliku nula ili blisku nuli i negativnu razliku. Pozitivne razlike označavaju vremenski pad pouzdanosti, razlike bliske nuli označavaju održavanje pouzdanosti na postojećem nivou, a eventualne negativne razlike ukazuju na porast stepena pouzdanosti.

Dobijene razlike omogućavaju obrazovanje nove funkcije - brzine promene pouzdanosti. Ako se načini količnik razlika uzastopnih vrednosti pouzdanosti i razlika njihovih vremenskih perioda,

$$\frac{R_i - R_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} = \frac{\Delta R_i}{\Delta t_i} , \qquad (7.10)$$

i stavi da $\Delta t_i \to 1$, tj.

$$\lim_{\Delta t_i \to 1} \frac{\Delta R_i}{\Delta t_i} = \frac{dR}{dt} = v_R(t) , \qquad (7.11)$$

dobiće se brzina promene pouzdanosti sistema u zavisnosti od vremena rada, eksploatacije. Ova funkcija (7.11) može dati značajne podatke o stanju pouzdanosti sistema u bilo kom trenutku proteklog perioda rada, o smislu promena nastalih u proteklom periodu, o uticaju promena uslova rada na pouzdanost, o uticaju starenja sistema ako se analiza vrši u dovoljno dugom periodu, itd.

Pored funkcija pouzdanosti, slična razmatranja se mogu izvesti i/ili sa funkcijom nepouzdanosti (7.8), dok se ukupne

proizvodne funkcije pojedinih perioda (7.2) mogu uporedjivati preko svojih karakteristika: srednje doze zračenja i standardnog odstupanja od srednje vrednosti. Ove veličine su osnovni podaci za izračunavanje verovatnoće premašivanja odredjenih doznih nivoa, do dozvoljenog i iznad dozvoljenog nivoa. Uporedjivanjem verovatnoća pojedinih nivoa u raznim vremenskim periodima dobija se njihov vremenski tok, što takodje doprinosi potpunijoj proceni načina ponašanja pojedinih parametara, elemenata ili sistema u celini.

Z A K L J U Č A K

Specifični uslovi rada reaktorskih sistema i usled toga mogućnost ugrožavanja zdravlja ljudi, gradjenje sve većih reaktorskih sistema i njihovo smeštanje u neposrednu blizinu naseljenih oblasti upućuju na detaljnu analizu pouzdanosti rada tih sistema. Posledice od prekomernog izlaganja radioaktivnom zračenju mogu biti teške i opasne po zdravlje ljudi, pa i u manjoj meri na ovaj način oštećeno zdravlje teško se može poboljšati. Sve to upućuje na brižljivo proučavanje rada sistema u raznim uslovima, a pre svega u veoma nepovoljnim (udesnim) situacijama, kada dolazi do jačih poremećaja normalnih radnih uslova i do mogućnosti oslobadjanja radioaktivnog zračenja znatno iznad normalnog, dozvoljenog intenziteta.

Prilaz analizi rada može biti različit, a izabran je realan prilaz zasnovan na stvarnim podacima iz eksploatacije i na proverenim eksperimentalnim rezultatima, što predstavlja statistički prilaz analizi pouzdanosti sistema. Na ovakvo, statističko razmatranje problema koji se javljaju u analizi pouzdanosti upućuje i veliki broj parametara, elemenata koji stvaraju raspodelu nivoa zračenja na nekom mestu, u odredjenom periodu vremena i, uglavnom, slučajni karakter njihovog ponašanja i reagovanja na moguće normalne i nepovoljne dogadjaje nastale u eksploataciji sistema. Ovakav prilaz rešavanju problema daje realnija, tačnija, potpunija rešenja sa ciljem da se što bolje iskoriste kapaciteti sistema.

Obzirom da se problemi pouzdanosti obradjuju i rešavaju statističkim postupkom čiju osnovu čine zakoni verovatnoće, pored već poznatih bilo je neophodno uvodjenje i novih metoda radi brzog i uspešnog rešavanja ovih problema. Izloženi, razradjeni metod verovatnoće, kroz raspodelu verovatnoće pojavljivanja doznih nivoa odgovarajućih parametara, elemenata, omogućava

procenjivanje njegovog udela i njegovog uticaja na pouzdanost sistema. Raspodela verovatnoće nekog parametra, elementa, data u obliku proizvodne funkcije doznih nivoa, vodi brzom i tačnom odredjivanju statističkih karakteristika ponašanja parametra, elementa u datim uslovima, neophodnim u analizi. Ostvareni načini delovanja pojedinih parametara, elemenata, kao i svih skupa (6.45), pružaju priliku za detaljnu i realnu analizu pouzdanosti. Sprovodjenjem obimnog statističkog postupka analize, primenom savremenih metoda verovatnoće, dolazi se do potpune i u pogodnom obliku date slike o pouzdanosti reaktorskog sistema u razmatranom vremenskom periodu. Iz takve slike nije teško proceniti pouzdanost u odredjenom trenutku, na odredjenom mestu, doći do zaključaka o smislu promene pouzdanosti i, na osnovu analize rada u dužem vremenskom periodu, predvideti mogući tok promene pouzdanosti ubuduće.

U izloženom metodu nije teško uočiti karakteristike jednog opšteg metoda koji se može primeniti na rešavanje bilo kog problema iz prakse rada reaktorskih sistema, koji se statistički može obraditi. Polazeći od opštosti metoda, u radovima /9, 10/ razradjen je metod za analizu termičke sigurnosti reaktorskog kanala, odnosno konkretnog reaktorskog sistema u odredjenim uslovima rada. Svakako da se izloženi metod verovatnoće ne ograničava samo na reaktorske sisteme, naprotiv, zbog svoje opštosti može se primeniti na bilo koji problem, koji poseduje statističke osobine.

Sveobuhvatna statistička analiza sistema, primenom ovakvih opštih metoda verovatnoće, daje takve rezultate koji ukazuju na glavne karakteristike ponašanja u različitim uslovima rada i koji, izraženi verovatnoćom, daju istovremeno i stepen pouzdanosti sistema. Pored dobijanja opšte slike o pouzdanosti celog sistema, moguće je oceniti i ponašanje svakog dela sistema. A prema tim procenama može se vršiti korekcija u željenom smeru, naravno, pre svega, u smeru smanjenja negativnog uticaja tog dela, u smeru koji obezbedjuje veću pouzdanost u radu.

Još jedan bitan zaključak može se izvući iz prikazanog

načina razmatranja pouzdanosti. Naime, upotrebom ovakvog, statističkog prilaza i obradom podataka iz eksploatacije nekog složenog sistema, mogu se načiniti takve analize koje daju potpuni uvid u pouzdanost tog sistema. Osim toga, dobivene vremenski zavisne funkcije dozvoljavaju preciznu statističku procenu budućeg ponašanja i time daju puni smisao dugogodišnjem sakupljanju podataka o radu sistema.

LITERATURA

1. B.W.le Tourneau, R.E.Grimble
Engineering Hot Channel Factors for Nuclear Reactor Design
Nuclear Science and Engineering, Vol.1, No.5, October 1956.

2. P.A.Rude, A.C.Nelson Jr.
Statistical Analysis of Hot Channel Factors
Nuclear Science and Engineering, 7, 156, 1960.

3. F.H.Tingey
Error Propagation in Hot-Spot, Hot-Channel Analysis
Nuclear Science and Engineering, 9, 127, 1961.

4. F.R.Farmer
Siting Criteria - A New Approach
IAEA Symposium on the Containment and Siting of Nuclear Power Plants, Vienna, April 3-7, 1967.

5. R.J.Mulvihill, F.C.Reed
A Probabilistic Methodology for the Safety Analysis of Power Reactors
International Symposium on Fission Products Release and Transport under Accident Conditions, Oak Ridge, April 5-7, 1965.

6. W.Feller
An Introduction to Probability Theory and its Applications
John Wiley and Sons, New York, 1950.

7. V.Vranić
Vjerojatnost i statistika
Tehnička knjiga, Zagreb, 1958.

8. S.H.Hanauer, P.A.Morris
Technical Safety Issues for Large Nuclear Power Plant
IV International Conference of Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, September 6-16, 1971.

9. S.Milivojević
Model verovatnoće za analizu termičke sigurnosti reaktorskog kanala
IBK-494, decembar 1966.

10. S.Milivojević
Matematički model verovatnoće za analizu termičke sigurnosti reaktorskog jezgra
IBK-613, decembar 1967.

11. S.Milivojević, S.Mitrović
Analiza termičke pouzdanosti jezgra reaktora RA
Internacionalni kongres o difuziji fisionih produkata, Saclay, 4-6 novembar 1969.

Izdavač:
Institut za nuklearne nauke „Boris Kidrič"
Poštanski fah 522
Beograd - Vinča