

VJEROJATNOSNA PROCJENA TEHNIČKIH RIZIKA

Prof. dr. sc. Vladimir M i k u l i č i ć – dr. sc. Zdenko Š i m i ć, Zagreb,
mr. sc. Ivan V r b a n i ć, Jastrebarsko

UDK 614.825:261.31
PRETHODNO PRIOPĆENJE

Današnje moderno društvo što se, u većini slučajeva, bez dvoumljenja služi svim blagodatima razvijene tehnike, istodobno postaje sve više osjetljivo na moguća neželjena prateća događanja te tehnike: ozljede, narušavanja zdravlja, pa čak i prijevremena smrt, ne razumijevajući, ili ne želeći razumjeti, da kontrola i smanjivanje opasnosti ili rizika uzrokovanog uporabom takve tehnike često ujedno znači i smanjivanje njezine koristi. Tu kontradikciju nastoji razriješiti *vjerojatnosna procjena rizika*, novija znanstvena disciplina koja se u posljednje vrijeme ubrzano razvija.

Članak opisuje analitičke postupke provedbe kvantitativne (vjerojatnosne) procjene rizika zbog rada tehničkih sustava (industrijskih postrojenja).

Ključne riječi: rizik, upravljanje rizikom, vjerojatnosna procjena tehničkog rizika, stablo događaja, stablo kvara, analiza važnosti, mjere važnosti.

1. UVOD

Vjerojatnosna procjena rizika kvantitativna je analiza sveukupnog rizika zbog rada tehničkog sustava. Temelji se na uporabi logičkih metoda stabla događaja i stabla kvara. Njezina je važnost što se u osnovi bavi kvarovima, nedjelovanjima, zastojećima, otpovijedima, prekidima, ali i popravcima (predviđanjem, otkrivanjem i otklanjanjem kvarova), održavanjima, obnavljanjima, unaprjeđenjima i poboljšanjima tehničkih sustava, te posljedicama kvarova kako u tehničkim sustavima tako i u okolišu tehničkih sustava, prednost sveobuhvatna temeljitost, a nedostatak dugotrajnost analize i visoka cijena provedbe. Nakana je članka upoznati čitatelja s temeljnim postavkama vjerojatnosne procjene rizika, predložiti mu osnovne postupke i postignuća, misleći pri tome stalno na mogućnosti primjene u tehničkim sustavima.

2. KVALITATIVNA I KVANTITATIVNA PROCJENA RIZIKA

Rizik je potencijalna opasnost gubitka nečega što ima vrijednost, a procjena je rizika postupak prepoznavanja i analize opasnosti, pridruženih različitim ljudskim djelatnostima, te određivanje posljedica i vjerojatnosti gubitka, [3].

U osnovi, procjena rizika može biti kvalitativna i kvantitativna. U kvantitativnim (matematičkim) procjenama rizik je mjera povezanosti vjerojatnosti zbivanja neželjenih događaja i intenziteta neželjenih posljedica takvih događaja. Najčešće, zbog što jednostavnijih pro-

računa, rizik je jednak njihovom produktu. Temeljeno na razvitku teorije vjerojatnosti jedno je od važnijih postignuća suvremene znanosti i tehnike znanje i mogućnost kvantitativne procjene rizika. To omogućuje upravljanje rizicima (ograničavanje, kontrola rizika, gospodarenje, postupanje s rizicima) s kojima se moderno društvo svakodnevno sučeljava.

Kvalitativna je prosudba rizika stara gotovo isto koliko i čovjek. Upravljanje je rizikom, temeljeno na njegovoj kvalitativnoj procjeni, povezano s otkrićem kotača, koji se kotrlja niz brijeg, ubrzava i stoga ga se mora kočiti. Upravljanje je rizikom provedivo i bez kvantitativne procjene rizika, ali nije djelotvorno i ne jamči dugotrajnost. Tek postavljanjem kvantitativnih kriterija prihvatljivosti rizika, tj. njegovih posljedica, odnosno sigurnosnih ciljeva, problemi postaju jasniji i transparentniji. Upravljanje rizikom je pokušaj zadovoljavanja kvantitativnih kriterija. Procjena pak rizika upućuje na načine upravljanja i provjerava postignuto pomoću najrazličitijih mjera što uključuju pouzdanost, raspoloživost, sigurnost i rizik. Pritom su sigurnost i rizik komplementarni pojmovi: veći stupanj sigurnosti znači manji rizik i obratno.

Upravljanje se rizikom svodi u osnovi na odgovore na pitanje što činiti da se smanji rizik, [3]. Postupak identifikacije, procjene, odabira i primjene djelovanja koja vode sniženju rizika je upravljanje rizikom kojima je izloženo ljudsko zdravlje i okoliš. Istodobno se traže i odgovori na pitanja: kako utječu današnje odluke na buduće mogućnosti i koliko to stoji?

Procjena rizika zahtijeva odgovore na pitanja: što učiniti da se provjeri jesu li rezultati zadovoljavajući,

što se nepoželjno (loše) može dogoditi te koja je vjerojatnost takvog događaja i s kakvim posljedicama?

Pri tome su kvantitativne metode procjene rizika ili

- jednostavne (uhodane, izravne) u obavještavanjima o rizicima u području "normalnih" aktivnosti (uobičajeni, svakodnevni, učestaliji događaji, događaji više vjerojatnosti s manjim opsegom pogubnosti posljedica), čiji se rizici procjenjuju na temelju postojećih podataka o frekvenciji javljanja neželjenih događaja i njihovim posljedicama, ili
- komplicirane (zamršene, opsežne, dugotrajne, zahtjevne, skupe, posredne):
 - vjerojatnosne procjene rizika, radi li se o procjeni rizika malo vjerojatnih događaja s potencijalno velikim (pogubnim) posljedicama (npr. rizik zbog rada nuklearnih elektrana).

3. TEORIJA POUZDANOSTI I VJEROJATNOSNA PROCJENA RIZIKA

Teorija pouzdanosti kao grana tehničkih znanosti razvijala se posljednjih desetljeća vrlo dinamično, a čine je sljedeće discipline: analiza pouzdanosti, raspoloživosti, sigurnosti i rizika. Uzrok je tom snažnom razvoju da tehnički rizici, koji nastaju u industrijskim postrojenjima međudjelovanjem tehnike, ljudi i okoliša, postaju danas sve važnijim. To je posljedica rastuće uloge tehnoloških postupaka u modernom društvu, sve većih posljedica kvarova nastalih u industrijskim postrojenjima i okolišu, kao i zbog sve veće kompleksnosti i kompliciranosti takvih postrojenja. Primjena je teorije pouzdanosti u znanosti i tehnici sveobuhvatna. Konvencionalni se iskustveni i intuitivni pristup procjeni adekvatnosti i sigurnosti tehničkih sustava pokazuje nedostatnim u modernim znanstvenim primjenama i stoga postupno zamjenjuje konzistentnim kvantitativnim metodama analize. Osnovno je i zajedničko traženje pri tome razvitak matematičkog modela kojim će biti opisan tehnički sustav. Takav model može biti relativno jednostavan, ili krajnje kompliciran, no mora uvijek biti uporabljiv za kvantitativnu analizu. U ranim se šezdesetim godinama prošlog stoljeća analiza sigurnosti još uvijek temeljila isključivo na iskustvenom pristupu. Pojam je "procjena rizika" bio nepoznat, a riječ se "pouzdanost" rabila samo na izoliranim, specijalističkim područjima industrije oružja i zrakoplovstva. No, već u drugoj polovici sedamdesetih godina prošlog stoljeća sadržaj analize sigurnosti i rizika postaje sve važniji. Živi se u razdoblju kada se očekivano trajanje životnog vijeka svakog pojedinca produljuje djelomično i zbog boljih tehničkih rješenja koja nisu bezopasna i zbog toga se, usprkos svojoj dobrobiti, sve teže prihvaćaju. Nikada nije i nikada ne će postojati bezrizično tehničko rješenje, bez lakših ili težih posljedica kvarova. Taj se rizik oduvijek nastojao svesti na najmanju moguću mjeru pa su stoga razmišljanja o sigurnosti (riziku) teh-

noloških procesa oduvijek bila najvažnija. Trajno se različitim tehničkim sustavima (postrojenjima) po-visuje pogonska sigurnost i oni su sigurniji od većine drugih ljudskih djelatnosti. Pri tome je načelo postizanja visoke sigurnosti: ograničenje mogućnost nastanka kvarova i smanjenje posljedica kvarova ukoliko se dogode. To se ostvaruje na temelju načela koja osiguravaju visoki stupanj pouzdanosti: načela odvojenosti, različitosti, zalihosti (redundancije), neovisnosti i "bezopasnog kvara". Time se postiže da pojedinačni kvarovi komponenata u sustavu ne uzrokuju i kvar sustava. Načelo odvojenosti zahtijeva fizičku odvojenost komponenata različitih sigurnosnih sustava u postrojenju, pa stoga mehanički kvar na jednom mjestu ne utječe na sustav komponenata na drugom mjestu. Načelo različitosti omogućuje obavljanje istog zadatka na više načina, a ono zalihosti znači da je više od jedne komponente raspoloživo za neki zadatak. Načelo neovisnosti zahtijeva neovisnost svakog od sigurnosnih sustava o ostalima, a ono "bezopasnog kvara" uvjetuje da kvar komponente ili sustava automatski uzrokuje zbijanja u sustavu koja osiguravaju, dovode sustav u bezopasno stanje.

3.1. Razlikovnost pojmova pouzdanost, sigurnost i rizik

Valja upozoriti na preklapanja, pa često i zabunu, između pojmova pouzdanost, sigurnost i rizik. Pojam rizik sadrži kako vjerojatnost događaja tako i očekivane posljedice događaja i numerički je jednak njihovom produktu. Ako npr. umire godišnje 5000 ljudi u automobilskim nesrećama u nekoj zemlji s 20 milijuna stanovnika, to je pojedinačni rizik (vjerojatnost) smrti svakog od stanovnika u automobilskoj nesreći u godini dana, uz pretpostavku da se svi stanovnici voze u automobilu, $2,5 \cdot 10^{-4}$. Dakako, rizik će često biti posljedica različita od smrti, pa će općenita (tehnička) definicija rizika biti, [6]:

$$\bullet \text{ rizik [posljedica/vrijeme]} = \text{vjerojatnost (frekvencija) [događaj/vrijeme]} \cdot \text{veličina [posljedica/događaj]}.$$

Analiza je rizika nastavak analize sigurnosti i zahtijeva kako razmatranje vjerojatnosti javljanja neželjenog događaja tako i posljedica. Analiza je pak sigurnosti nastavak analize pouzdanosti i odnosi se, kao i ta analiza, na izučavanje kvarova ili ispravnog rada procesa ili sustava, uređaja ili opreme. Međutim, dok analiza pouzdanosti ustanovljuje samo vjerojatnosti javljanja kvarova komponenata, podsustava i sustava, analiza sigurnosti uključuje i dodatna razmatranja jer se želi, uz analizu kvarova i rada opreme, odrediti i što se događa u tehničkom sustavu kada se zbivaju kvarovi, odnosno, odrediti parametre sigurnosti, tj. utvrditi jesu li moguća, i uz koje okolnosti, oštećenja u promatranom sustavu kao i zbog sustava. Utvrdi li faza proučavanja sigurnosti takve mogućnosti, tada se provodi i analiza rizika kako bi se odredile posljedice kvara što mogu ugroziti ljude i (ili) materijalna dobra.

Sintagma, "vjerojatnosna procjena (tehničkog) rizika (VPR)", podrazumijeva proučavanje ponašanja tehničkih sustava (energetskih, industrijskih, inženjerskih postrojenja i uređaja) tijekom pretpostavljenih poremećaja u radu, te obuhvaća:

- proračun rizika (identifikaciju i kvantifikaciju rizika),
- procjenu rizika (postupak vrednovanja i uspoređivanja različitih vidova rizika kojima je izloženo ljudsko društvo) i
- kontrolu rizika (sustavno izlaganje i primjenu principa sigurnosti).

To predstavlja cjelokupni proces poboljšanja sigurnosti (pouzdanosti, raspoloživosti) postrojenja, odnosno snižavanje rizika zbog rada postrojenja. U osnovi takva je analiza disciplinirano i sustavno razmatranje (i predviđanje) pojava i zbivanja u tehničkom sustavu u kojem se dogodio neki teški, malo vjerojatni kvar ili poremećaj, i zatim uzastopce različiti višestruki kvarovi različitih sigurnosnih komponenata, uređaja i sustava (podsustava). Provodi se sažimajući dva pristupa:

- determinističke analize i
- vjerojatnosne analize.

3.2. Determinističke i vjerojatnosne analize

Determinističke analize ocjenjuju ponašanje tehničkih sustava nakon zbivanja pretpostavljenog početnog događaja (poremećaja) ili kvara pomoću matematičkih modela koji opisuju fizičke procese u sustavu (postrojenju). Cilj je odrediti promjene fizičkih veličina te ustanoviti hoće li projektom određene vrijednosti fizičkih veličina komponenata i podsustava biti prekoračene tijekom zbivanja pretpostavljenih kvarova, odnosno koji će scenariji događanja (razvijanja) kvarova rezultirati prekoračenjima i zbog toga neželjenim posljedicama u postrojenju i okolici. Takve se analize nadopunjuju vjerojatnosnim budući da se kvarovi zbivaju kao slučajni događaji a opasnosti se, uzrokovane kvarovima, (uglavnom) ne mogu izravno mjeriti, moraju se procijeniti. Vjerojatnosne se analize stoga usredotočuju na određivanje vjerojatnosti sljedova kvarova koji će izazvati oštećenja sustava opasna i za sustav i za okoliš. Cilj je utvrditi slabosti i nedostatke u projektu, izvedbi, radu i održavanju sigurnosnih i zaštitnih struktura tehničkog sustava, te odrediti važnost komponenata i podsustava (rangirati događaje, kvarove i komponente prema "doprinosu" kvaru) prigodom održavanja ili unaprjeđenja postojeće razine sigurnosti. Posebice, pritom treba odgovoriti na sljedeća pitanja:

- koji su kvarovi mogući,
- koliko se često mogu dogoditi (kolika im je vjerojatnost),
- kakve su im posljedice (kvantifikacija posljedica),
- kako se mogu spriječiti ili ublažiti posljedice.

Vjerojatnosna procjena rizika omogućuje dubok i sveobuhvatan uvid u tehnički postupak odnosno proces te tehnički sustav (opremu), analizu rada i upravljanja, analizu prevladavajućih kvarova i poremećaja u tehničkom sustavu, ovisnosti u sustavu, utjecaj okoliša, osoblja i regulatorne prakse, kao i u analizu ukupnog rizika. To ujedno potiče nove pristupe i razmišljanja u tehnici i tehničkim znanostima te u regulativi i praksi. Time vjerojatnosna procjena rizika postaje ravnopravna metoda donedavno isključivo determinističkom pristupu ocjeni i upravljanju sigurnosti i rizikom. Ta metoda procjene postaje vodeća u svim oblicima tehničkog planiranja, konstruiranja i eksploatiranja industrijskih postrojenja a obuhvaća:

- sustavno razvijanje kriterija planiranja i konstruiranja za što veću sigurnost koje uzima u obzir važnost i utjecaj nesigurnosti i nepouzdanosti na procjene rizika;
- modeliranje svih tehničkih problema i procjenjivanje izvedbi i rada postrojenja izloženih rizicima; i
- logičke okvire procjenjivanja rizika i dobiti, odnosno procjenjivanja ekonomsko-tehničkih optimalnih rješenja.

Dva su razloga rastućoj ulozi VPR. Prvo, industrijska su postrojenja (tehnički sustavi) postala danas toliko važna da su stoga i potencijalne posljedice poremećaja (nezgoda, kvarova, nesreća) toliko bitne da je nedopustivo iščekivanje statističkih podataka prije nego li se pogreške otklone i posljedice ograniče. Drugo, postrojenja su postala toliko komplicirana i kompleksna da intuicija i iskustvo nisu više dostatni da omogućе sagledavanje i predviđanje svih mogućih i važnih događaja. Teoretski modeli, što redovito rabe zamršene računalne kompjutorske programe, moraju stoga zamijeniti iskustva prakse. Pritom se modeli temelje na raspoloživim informacijama o ponašanju komponenata u tehničkim sustavima i na poznavanju fizikalnih pojava, uključujući pritom nužno vjerojatnosne analize. Naime, današnje se moderne kvantitativne metode modeliranja, analize i procjenjivanja, bez obzira na stupanj dotjeranosti modela, uključujući i modele laboratorijskih pokusa, osnivaju na idealiziranim pretpostavkama ili uvjetima. Informacije izvedene na temelju takvih kvantitativnih modela stoga mogu ali i ne moraju odražavati stvarnost. Slično, razvitak planiranja i izgradnje industrijskih postrojenja često zahtijeva odluke bez obzira na stupanj kompletnosti i kvalitetu informacije i odluke. Događa se zbog toga da odluke moraju biti formulirane i uz određeni stupanj nepouzdanosti. Činjenica je da se informacije često dobivaju zaključivanjem na osnovi sličnih ili različitih okolnosti ili se temelje na modeliranju. Stoga se radi s različitim stupnjevima nesigurnosti, jer su mnoga tehnička rješenja podložna prirodnim pojavama i procesima sa svojstveno slučajnim ponašanjem. Stanja su takvih pojava prirodno neodređena i ne mogu stoga

biti deterministički opisana. Drugim riječima, utjecaji su nesigurnosti (neizvjesnosti, nestabilnosti) neizbježivi i važni pri planiranju, konstruiranju, izgradnji i uporabi industrijskih postrojenja (tehničkih sustava) pa posljedično tehnička analiza mora sadržavati pojmove i metode procjenjivanja tih utjecaja na konstrukciju, izvedbu i rad tehničkih sustava, kao i metode kvantifikacije nesigurnosti. Posljednjih dvadesetak godina sve su opsežnije primjene vjerojatnosnih analiza u tehničkoj inženjerskoj praksi. Načela takvih analiza temelje se na teoriji vjerojatnosti i njezinim srodnim ili izvedenim područjima: matematičkoj statistici i teoriji odlučivanja, te danas već samostalnoj znanstvenoj disciplini, teoriji pouzdanosti. Time pružaju matematičke temelje modeliranja nepouzdanosti i nesigurnosti i analize njihovog utjecaja na planirane ili već izgrađene tehničke sustave. Korist je i važnost teorije vjerojatnosti i matematičke statistike u analizi uzoraka i kontroli kvalitete dobro poznata. Međutim važnost teorije vjerojatnosti i teorije pouzdanosti premašuje stvarno bilo koju specifičnu primjenu. Kako su načela tih teorija neophodna za pravilno tretiranje nepouzdanosti, nesigurnosti i rizika, to se navedenim teorijama, zajedno sa statističkom teorijom odlučivanja i izvedenom znanstvenom disciplinom - vjerojatnosnom procjenom rizika, posvećuje sve veća pozornost i u donedavno isključivo determinističkoj tehničkoj praksi.

3.3. Vjerojatnosna procjena tehničkog rizika

Temeljni zadaci VPR jesu:

- utvrditi vrste nezgoda (kvarova, nesreća) što se mogu zbiti;
- procijeniti njihove vjerojatnosti;
- kvantificirati posljedice.

Na taj se način mogu sniziti vjerojatnosti zbiljavanja kvarova i pratećih gubitaka u ljudstvu, ekonomskih gubitaka te onečišćavanja okoliša. Pri tome gubici u ljudstvu uključuju smrt, ozljede, slabost ili nesposobnost, ekonomski gubici, npr. obustavu proizvodnje ili rada, nestandardnu proizvodnju ili oštećenje opreme. Onečišćenje okoliša uključuje utjecaj na zrak, vodu, zemljišta, te druge utjecaje na okolicu: buku, vibracije i sl. Takvi se gubici javljaju kada jedan ili više osnovnih događaja kvara uzrokuju kvar postrojenja (odnosno /sigurnosnih/ sustava ili podsustava postrojenja). Tri su osnovna tipa događaja kvara o kojima se najčešće radi ova:

- događaji kvarova zbog ljudi (pogreške konstrukcije i izvedbe, pogreške osoblja postrojenja, pogreške održavanja);
- događaji kvarova zbog opreme (npr., ispuštanje otrovnih tvari kroz ventil, gubitak maziva u motorima, netočna mjerenja raznih uređaja);
- događaji kvarova zbog djelovanja okolice (potresi ili uleknuća zemljišta, oluje, poplave, požari uzrokovani munjama, ...).

Međutim, kvar je sustava vrlo često uzrokovan i kombinacijom spomenutih vrsta kvarova.

Tipični načini smanjivanja vjerojatnosti kvara postrojenja uključuju:

- zalihost opreme;
- nadzor i održavanje;
- zaštitne i sigurnosne sustave;
- alarmne sustave.

U sklopu svojih mogućnosti VPR omogućuje:

- identificiranje uzročne povezanosti između djelovanja što uzrokuju kvar postrojenja (djelovanje opreme, okolice i ljudi);
- nalaženje putova poboljšanja sigurnosti postrojenja pomoću rekonstrukcije i usklađivanja u postrojenju.

Vjerojatnosna procjena (tehničkog) rizika uključuje (slika 1, [1]):

- upoznavanje postrojenja;
- identifikaciju mogućih kvarova i njihovog djelovanja;
- izgradnju logičkih modela (stabla događaja i stabla kvara);
- kvalitativnu analizu logičkih modela;
- analizu podataka o događajima kvarova;
- kvantitativnu vjerojatnosnu analizu logičkih modela;
- analizu važnosti podsustava i komponenata tehničkog sustava;
- analizu posljedica kvarova u postrojenju i okolišu;
- analizu nesigurnosti kako bi se utvrdio utjecaj pouzdanosti podataka, pretpostavki, postupaka, sveobuhvatnosti (popunosti) analiza i matematičkih modela na rezultate analize.

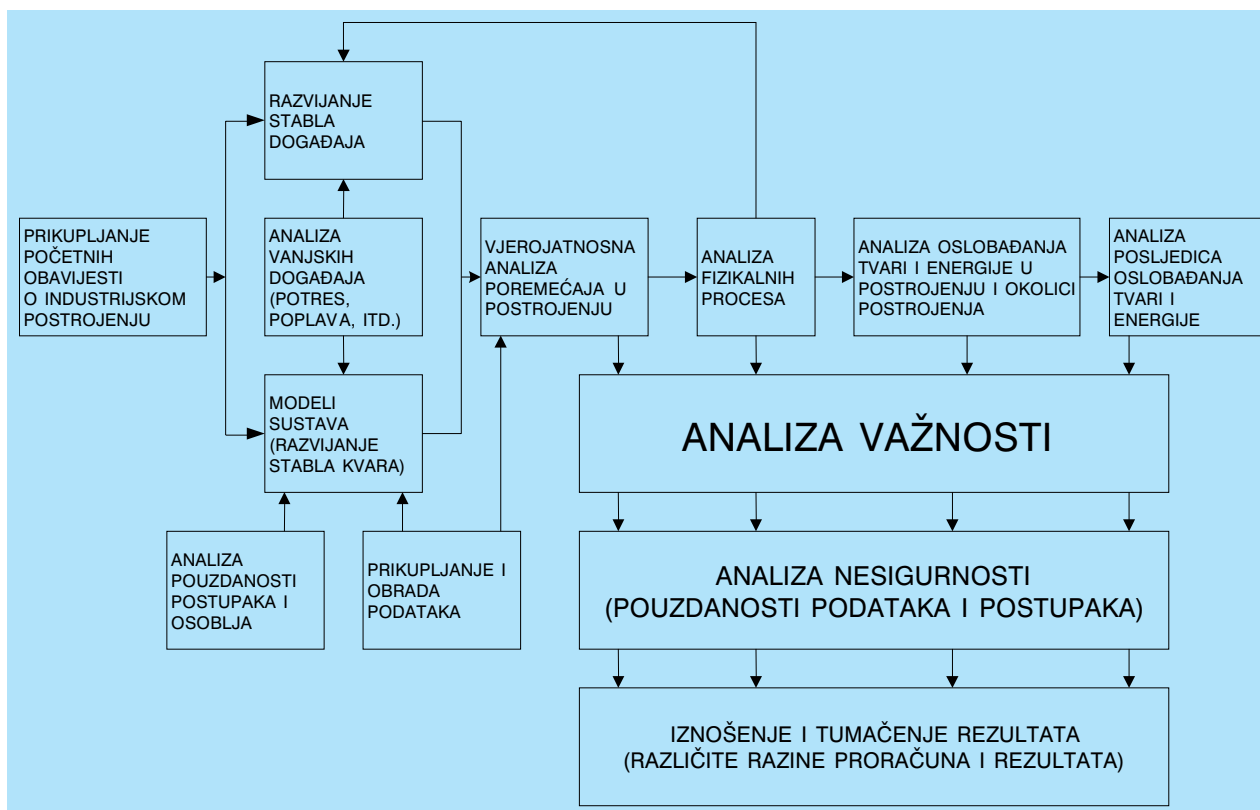
Naime, uzročna se povezanost između djelovanja što uzrokuju kvarove komponenata i kvar sustava najlakše otkriva pomoću dviju logičkih metoda, [6]:

- metode stabla događaja i
- metode stabla kvara.

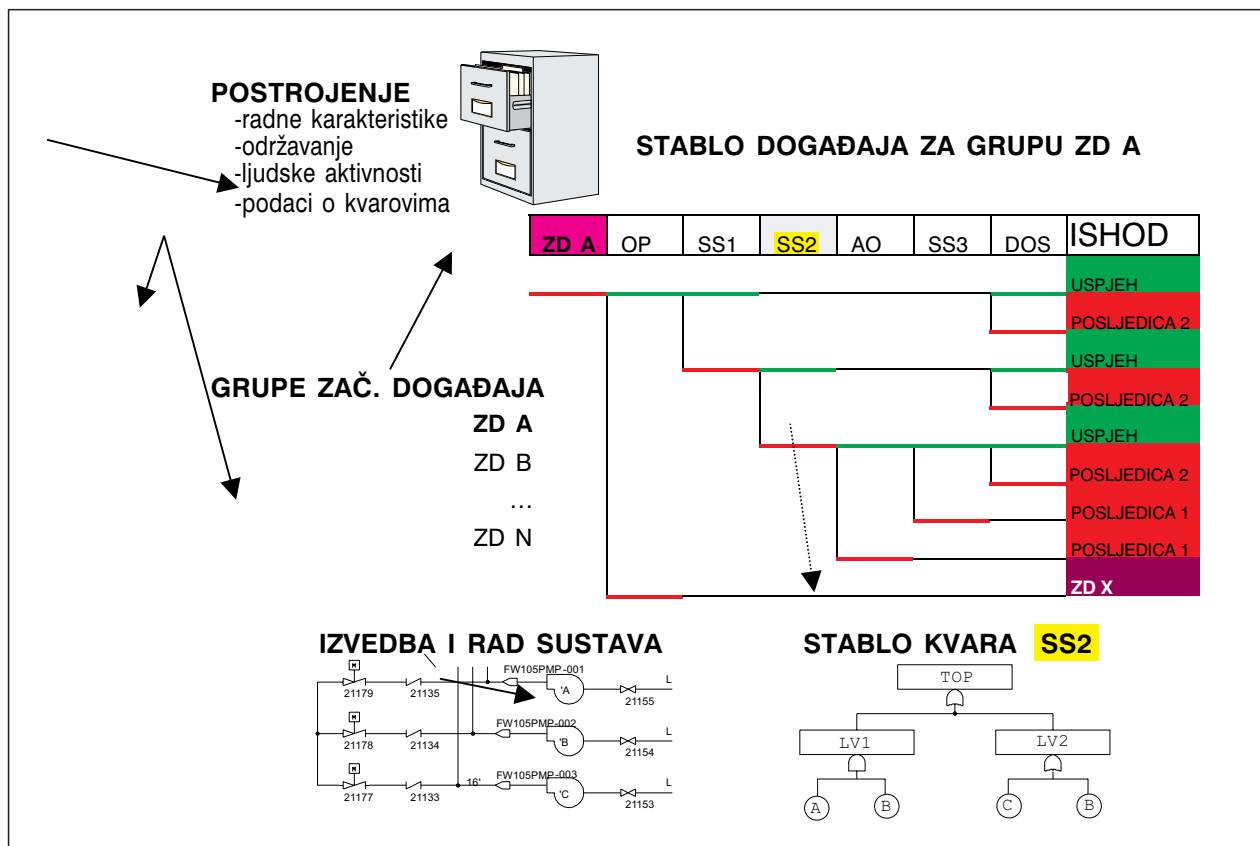
Metoda "stabla događaja" induktivna je metoda identificiranja različitih mogućih ishoda pretpostavljenog početnog događaja (slika 2). Započinje definiranjem (odabiranjem) moguće nezgode (nesreće, poremećaja, kvara) u postrojenju, dakle, inicirajućeg, početnog događaja. Početni događaji pri tome mogu biti različiti događaji kvara u postrojenju, ali i prijelazni događaji poput naglih promjena opterećenja ili gubici opterećenja. Mogu biti potaknuti i događajima izvan postrojenja, no uvijek predstavljaju visoke zahtjeve na siguran rad postrojenja.

3.4. Stabla događaja i stabla kvara

Postavlja se pitanje što se dalje događa ili može dogoditi u postrojenju nakon što se zbio početni događaj? Pretpostavljaju se stanja podsustava i komponenata i određuje njihovo djelovanje na sustav. Trenutkom definiranja početnog događaja svi se podsustavi (komponente), koji se mogu koristiti nakon nezgode, moraju



Slika 1. Postupak provedbe VPR u industrijskom postrojenju



Slika 2. Vjerojatnosna procjena rizika - ilustracija primjene stabla događaja i stabla kvara

definirati i identificirati. Ti podsustavi (komponente) postaju tako dio strukture "stabla događaja". Nakon identificiranja uključenih podsustava za promatrani početni događaj, mora se definirati i procijeniti skup svih mogućih stanja podsustava s obzirom na ispravni rad ili kvar podsustava; veliki se dio te analize obavlja "metodom stabla kvara" (slika 2).

Metoda "stabla kvara", [4], deduktivna je metoda koja odgovara na pitanje: kako se nešto dogodilo ili kako se moglo nešto dogoditi? "Stablo kvara" pritom je grafički prikaz uzročnih veza u postrojenju (sustavu, podsustavu), s obzirom na kvarove komponenata sustava, dobivenih deduktivnim zaključivanjem na moguće uzroke pretpostavljenog kvara u sustavu ili kvara sustava. Ta metoda omogućuje uspostavljanje veze između mnogobrojnih događaja, čije međudjelovanje rezultira novim događajima, uporabom logičkih funkcija (I, ILI), te tako i metodičnu izgradnju strukture što predstavlja sustav. Npr. postavlja se pitanje: kako se može dogoditi "prekid opskrbe električnom energijom"? Zatim se konstruira "stablo kvara" za podsustav opskrbe električnom energijom u postrojenju. Struktura je stabla zbog toga ovakva: neželjeni se događaj, a to je kvar postrojenja ili neka druga ispitivana nezgoda (poremećaj), stavlja na vrh stabla i zatim veže, logičkim funkcijama i određenim specijalnim opisima događaja, s događajima (kvarovima) koji su po svojoj prirodi "osnovniji", odnosno, koji zajedno "pridonose" pretpostavljenom kvaru postrojenja. "Stablo kvara" na taj način završava s temeljnim događajima koji predstavljaju primarne, osnovne kvarove u postrojenju. Proces, naime, obuhvaća pomicanje unazad u vremenu tragajući za mogućim korijenima uzroka neželjenog događaja (poremećaja, kvara). Pri tome se "stablo kvara" može razviti do proizvoljne razine detalja, a preporučeni je pristup razvijanje stabla kvara do razine za koju postoje odgovarajući podaci. Naprimjer, stablo će kvara za neki elektronički sustav završiti, primjerice s pojačalom, umjesto s tranzistorima i otporima od kojih je izgrađeno pojačalo, ako postoje zadovoljavajući podaci o kvarovima takvih naprava. Metoda, dakle, pretpostavlja stanje sustava (kvar), a određuju se stanja komponenata (temeljni događaji). Dakako, konstrukcija "stabla kvara" kompliciranijeg i kompleksnijeg sustava zahtijeva potpuno poznavanje funkcioniranja sustava. Pri tome velika su pomoć modeli pouzdanosti sustava i fizički modeli sustava. Na taj je način omogućeno jasno grafičko predstavljanje analitičkog procesa.

Formiranjem se strukture stabla provodi dalje kvalitativna pa zatim i kvantitativna analiza. Cilj je kvalitativne analize uporabom Booleove algebre reduciranje stabla kvara na logički ekvivalentan, no jednostavniji oblik kombiniranjem temeljnih događaja, što uzrokuju neželjeni događaj. Na temelju vjerojatnosti zbivanja temeljnih događaja provodi se kvantitativna analiza stabla kvara koja se sastoji u transformaciji logičke strukture stabla kvara u ekvivalentni vjerojatnosni oblik

lik i numeričkog proračuna vjerojatnosti kvara sustava (neželjenog događaja), tj. nepouzdanosti sustava. Pritom su vjerojatnosti temeljnih događaja jednake vjerojatnosti kvarova komponenata unutar predviđenog radnog vijeka. Riječ je o nepouzdanosti komponenata. Proračun se nepouzdanosti provodi uz pretpostavku konstantne učestalosti kvara komponenata i uz pretpostavku međusobne isključivosti temeljnih, osnovnih događaja. No, usprkos tome, analiza stabla kvara iole kompliciranijih i kompleksnijih postrojenja zahtijeva uporabu opsežnih računalnih programa. Pretpostavka je statističke neovisnosti temeljnih događaja prihvatljiva ako se ne radi o "kvarovima sa zajedničkim uzrokom". To su kvarovi što se javljaju zbog djelovanja "zajedničkog uzroka" ili "zajedničkog početnog poticajnog događaja", odnosno, uzrok je svim kvarovima u sustavu zajednički: primjerice, potres, požar, oluja itd. Međutim, to može biti i kvar nekog tehničkog sustava (raspad elektroenergetskog sustava, eksplozija nekog sustava), ali i djelovanje čovjeka (pogreške ljudi, nasilno djelovanje i sl.). Zajednički uzrok kvara može biti lako uočljiv, npr. lom parovoda i oštećenje susjednih komponenata djelovanjem pare, ali i manje uočljiv - povećanje opterećenja druge pumpe nakon kvara prve itd. Termin "zajednički način kvara" opisuje zajednički uzrok kvarova što djeluje na funkcionalno identične komponente ili podsustave, tj. na udvostručene ili redundantne, dakle, paralelne komponente ili podsustave, odnosno komponente ili podsustave što obavljaju istu funkciju.

Mehanizme što doprinose ili uzrokuju zajednički način kvarova moguće je kategorizirati na sljedeći način:

- konstrukcijske pogreške
- razlike u kontroli proizvodnje i kvalitete
- pogreške prilikom testiranja, održavanja i popravljavanja
- pogreške ljudi
- promjene okoline (onečišćenje, temperatura, tlak, vlažnost, vibracije itd.)
- okolnosti što se javljaju tijekom rada komponenata ili postrojenja (promjene opterećenja, kvarovi, popravci).

Pojmovi se "zajednički način" i "zajednički uzrok" često upotrebljavaju izmjenično (jedan umjesto drugog), budući da su usko povezani i da je njihova identifikacija vrlo slična za vrijeme analize stabla kvara. Stoga se najčešće govori samo o "ovisnim kvarovima", odnosno, "ovisnim komponentama" ili "ovisnim događajima".

Ovisni kvarovi uzrok su što vjerojatnosti u postrojenju postaju uvjetne vjerojatnosti čija interpretacija, s obzirom na fizikalnu stranu problema, redovito nije jasna. Točan je pristup takvim proračunima tada s pomoću Markovljevih procesa. No, ta je metoda, zbog opsežnosti potrebnog računanja, praktički neprovediva i s najvećim elektroničkim računalima. Stoga se uvjetne vjerojatnosti određuju različitim približnim metodama. Pritom treba napomenuti da su današnji naponi pri postizanju visoke sigurnosti industrijskih

postrojenja uklanjanje upravo ovisnih kvarova i poboljšanja konstrukcije koja će spriječiti djelovanje zajedničkog uzroka kvarova.

3.5. Kvantitativna analiza stabla kvara

Jednom konstruirano, stablo kvara omogućuje kvantitativnu analizu sigurnosti sustava (postrojenja) u dva koraka. U prvom se koraku stablo kvara opisuje pomoću niza Booleovih jednadžbi; jedna jednadžba za svaka vrata u stablu. Za svaka su vrata ulazni događaji (poput primarnih događaja kvara) neovisne varijable, a izlazni događaj (neki međudogađaj) ovisna varijabla. Koristeći se pravilima Booleove algebre moguće je riješiti te jednadžbe i dobiti tako međudogađaje i neželjeni događaj (kvar sustava) pojedinačno izražene članovima skupa komponenata koje predstavljaju samo osnovne događaje (kvar komponente). Na taj se način dobivaju svi skupovi (kombinacije) komponenata čiji istodobni kvar uzrokuje i kvar postrojenja (zbivanje neželjenog događaja).

Svi se kvarovi postrojenja (neželjeni događaj) mogu predstaviti kvarovima komponenata koje su članovi tih skupova. Stoga se u drugom koraku vjerojatnost kvara sustava (neželjenog događaja) određuje s pomoću vjerojatnosti unije događaja koji predstavljaju zbivanja kvarova komponenata u skupovima. Vjerojatnost je kvara postrojenja njegova nepouzdanost ili neraspoloživost, ovisno o tome računa li se s nepouzdanošću ili neraspoloživošću komponenata. U općem će slučaju, dakle, biti:

$$Q_s(t) / N_s(t) / P(S_1 S_2 \dots S_n) \quad (1)$$

gdje je s $Q_s(t)$ označena nepouzdanost postrojenja, s $N_s(t)$ neraspoloživost postrojenja, a sa S_i i -ti skup komponenata (i -ta kombinacija komponenata) čiji istodobni kvar uzrokuje i kvar postrojenja.

Budući da je jednadžbom (1) određena vjerojatnost unije događaja koji se međusobno ne isključuju, to razvijena jednadžba (1) sadrži $2^n - 1$ članova, dakle, radi se o opsežnom računu:

$$Q_s(t) / N_s(t) / \left(P(S_i) - \sum_{i,j} P(S_i S_j) + \sum_{i,j,k} P(S_i S_j S_k) - \dots + P(S_1 S_2 \dots S_n) \right) \quad (2)$$

4. ANALIZA VAŽNOSTI PODSUSTAVA I KOMPONENTATA TEHNIČKOG SUSTAVA

Nakon provedbe vjerojatnosne analize stabla kvara provodi se analiza važnosti (AV), želi li se identificirati i rangirati komponente i sustave (podsustave) važne za sigurnost postrojenja, budući da AV omogućuje:

- rangiranje komponenata i sustava prema utjecaju na nepouzdanost (neraspoloživost) postrojenja,
- rangiranje komponenata i sustava (podsustava) prema utjecaju na održavanje postignute razine sigurnosti postrojenja, i
- rangiranje komponenata i sustava (podsustava) prema utjecaju na povećanje razine sigurnosti.

Na taj način AV omogućuje usporedbu i ocjenu kao i procjenu prikladnosti različitih konstrukcija postrojenja, odnosno sigurnosnih sustava u postrojenju. Primjerice, visoke vrijednosti pod b), za pojedini sigurnosni sustav postrojenja, znače (dramatično) povećanje nesigurnosti postrojenja ukoliko je taj sustav neraspoloživ. U tom slučaju valja se uvjeriti da je pouzdanost (raspoloživost) tog sustava i njegovih komponenata ostvariva i zajamčena. U protivnom radi se o neujednačenoj konstrukciji. Ako su komponente visoko rangirane pod a) morat će biti komponente s inherentno visokom pouzdanošću; u protivnom radi se o lošoj konstrukciji. Najjednostavniji je pak sljedeći primjer "procjene prikladnosti konstrukcije". Ustanovi li se analizom važnosti da je sustav (podsustav) opskrbe električnom energijom potrošača u postrojenju visoko rangiran pod b), takvo se postrojenje smije priključiti jedino na visoko pouzdane dijelove elektroenergetskog sustava.

Analiza se važnosti provodi unutar vjerojatnosne procjene rizika pa zahtijeva stoga, dakako, gotovo identične postupke. To su:

- identifikacija početnih događaja (Početni događaji su ujedno i početni poremećaji (to mogu biti kvarovi u postrojenju ili vanjska djelovanja koja mogu uzrokovati kvarove u postrojenju ili kvar postrojenja) što iniciraju djelovanje različitih komponenata (sigurnosnih sustava) u postrojenju.)
- odabir početnog događaja (Najuporabljiviji se rezultati postižu odabirom ozbiljnog događaja kvara u postrojenju, odnosno nekog kvara postrojenja.)
- specificiranje podataka o osnovnim događajima (kvarovima komponenata) (Specificiranje podataka traži određivanje podataka potrebnih za proračun pouzdanosti (neraspoloživosti) osnovnih događaja (komponenta). To su: učestalosti kvara komponenata, vremena trajanja popravka postrojenja, vjerojatnosti pogrešaka osoblja i frekvencije testiranja i održavanja.)
- proračun nepouzdanosti (neraspoloživosti) komponenata (osnovnih događaja)
- konstrukcija logičkog modela (Logički je model stablo kvara svih sustava (podsustava) u postrojenju predviđenih za siguran rad postrojenja.)
- određivanje skupova (kombinacija) komponenata (To su skupovi komponenata čije nefunkcioniranje uzrokuje nefunkcioniranje sigurnosnog sustava.)
- matematički model poremećaja (Matematički je model poremećaja Booleovom algebrom ispisana unija događaja kvarova podsustava (komponenta), na temelju stabla događaja, čije istodobno zbivanje izaziva poremećaj (kvar) u postrojenju.)
- određivanje vjerojatnosti poremećaja (kvara)
- određivanje važnosti komponenata
- određivanje mjera važnosti komponenata.

4.1. Mjere važnosti

Mjere su važnosti razvijene s nakanom kvantitativnog procjenjivanja dostignuća konstrukcije, izvedbe i prikladnosti sustava ograničavanja i kontrole rizika, odnosno, povećanja sigurnosti. Na temelju se rezultata AV, naime, definiraju tri matematička izraza, [5], pomoću kojih se kvantificiraju vrijednosti mjera važnosti. Radi se pri tom o

- mjeri smanjenja rizika (MSR),
- mjeri povećanja rizika (MPR) i
- mjeri važnosti komponente (V_{MK}).

Tim se mjerama kvantitativno rangira "doprinos" pojedine komponente i/ili skupova komponenata kvaru (nepouzdanosti, neraspoloživosti) postrojenja, dakle i riziku zbog postojanja postrojenja, i isto tako pojedinih (sigurnosnih) sustava vjerojatnosti zbivanja poremećaja u postrojenju, odnosno i uloga komponente ili sustava u smanjivanju vjerojatnosti kvara postrojenja ili vjerojatnosti pojave poremećaja, odnosno smanjivanju rizika.

MPR kvantificira važnost komponente (podsustava, sustava) u održavanju postignute razine sigurnosti (rizika) postrojenja. Ta mjera pokazuje povišenje vjerojatnosti kvara postrojenja (povišenje vjerojatnosti zbivanja poremećaja) ako se smanji pouzdanost (raspoloživost) komponente (sigurnosnog sustava, podsustava). Istodobno ukazuje na komponentu (sustav, podsustav) čija se pouzdanost (raspoloživost) ne smije snižavati. Komponente su stoga s najvećim mjerama povišenja rizika iznimno važne u procjeni i održavanju sigurnosti (postignute razine rizika), za programe postizanja i kontrole kvalitete i za aktivnosti inspekcije.

MSR kvantificira ulogu komponente (sustava) u daljnjem sniženju rizika (povećanju sigurnosti). Ta mjera pokazuje sniženje vjerojatnosti kvara postrojenja (zbivanja poremećaja u postrojenju) povisi li se pouzdanost (raspoloživost) komponente (sustava, podsustava). Stoga su komponente (sustavi, podsustavi) s najvećim mjerama smanjenja rizika važne za različita nastojanja snižavanja rizika odnosno povećanja sigurnosti.

Konačno, mjera važnosti komponente (sustava, podsustava), V_{MK} , pokazuje koliki je udio te komponente (sustava, podsustava) u postojećoj razini rizika.

MPR komponente (sustava, podsustava) određuje se tako da se najprije odredi povišenje rizika ako je promatrana komponenta (sustav, podsustav) neraspoloživa. Kvantitativna se vrijednost mjere može pritom odrediti na dva načina:

1. određivanjem omjera razine rizika ako je K-ta komponenta (sustav, podsustav) neraspoloživa i postojeće razina rizika:

$$MPR_K = \frac{R_{Kn}}{R_p}, \text{ ili,} \quad (3)$$

2. određivanjem razlika razine rizika ako je K-ta komponenta (sustav, podsustav) neraspoloživa i postojeće razina rizika,:

$$\overline{MPR}_K = R_{Kn} - R_p, \quad (4)$$

gdje su: R_p = postojeća razina rizika, a R_{Kn} = razina rizika ako je K-ta komponenta (sustav, podsustav) neraspoloživa.

Različite su mogućnosti odabiranja veličine R_p - "postojeća razina rizika". To može biti, primjerice, vjerojatnost kvara postrojenja, ili očekivani broj smrtnih slučajeva zbog oslobađanja energije i/ili tvari iz postrojenja u okoliš. Ali i nepouzdanost (neraspoloživost) nekog sigurnosnog sustava ili dijelova sustava (podsustava) u postrojenju itd.

Slično, MSR komponente (sustava, podsustava) odredit će se s pomoću sniženja rizika za slučaj povišenja pouzdanosti (raspoloživosti) komponente (sustava, podsustava):

$$MPR_K = \frac{R_p}{R_{Kp}}, \text{ odnosno,} \quad (5)$$

$$\overline{MPR}_K = R_p - R_{Kp}, \quad (6)$$

gdje je R_{Kp} = razina rizika ako je pouzdanost (raspoloživost) promatrane komponente (sustava, podsustava) povišena.

U našim ćemo razmatranjima mjere važnosti (3) i (5) određivati pomoću mjere važnosti komponente (sustava, podsustava). Mjera je važnosti komponente (sustava, podsustava) K definirana ovako, [1]:

$$V_{MK} = \frac{N_s(t)}{K} \frac{P(K)}{P(N_s)} \quad (7)$$

S $P(N_s)$ označena je numerička vrijednost "postojeće razine rizika" koja će u ovom slučaju biti numerička vrijednost nepouzdanosti (neraspoloživosti) sigurnosnog sustava u postrojenju, s $N_s(t)$ analitički izraz za nepouzdanost (neraspoloživost) tog sustava, s K promatrana komponenta (sustav, podsustav), a s $P(K)$ numerička vrijednost nepouzdanosti (neraspoloživosti) te komponente (sustava, podsustava). Mjere se rizika tada mogu izraziti i na sljedeći način, [1]:

$$MSR_K = \frac{P(N_s)}{P(N_s) \text{ kad } P(K) = 0} = \frac{P(N_s)}{P(N_s)'} \text{ i} \quad (8)$$

$$MPR_K = \frac{P(N_s) \text{ kad } P(K) = 1}{P(N_s)} = \frac{P(N_s)''}{P(N_s)} \quad (9)$$

gdje je $P(N_s)'$ nepouzdanost (neraspoloživost) sigurnosnog sustava kad nepouzdanost (neraspoloživost) promatrane komponente (sustava, podsustava) teži prema nuli (komponenta (sustav, podsustav) je savršeno pouzdana), a $P(N_s)''$ nepouzdanost (neraspoloživost) sigurnosnog sustava kad vjerojatnost kvara (nepouzdanost, neraspoloživost) promatrane komponente (sustava, podsustava) teži prema jedinici (komponenta (sustav, podsustav) je pokvarena, neraspoloživa).

položiva, neoperabilna), i zatim ti izrazi pojednostavniti. Mijenja li se, naime, vjerojatnost kvara komponente (sustava, podsustava), mijenjat će se i vjerojatnost kvara sigurnosnog sustava:

$$P(N_S)_K = P(K) \frac{N_S(t)}{K} \quad (10)$$

Izraz (10), prema (7), možemo pisati i ovako:

$$P(N_S)_K = P(K) V_{MK} \frac{P(N_S)}{P(K)} \quad (11)$$

Kad vjerojatnost kvara komponente (sustava, podsustava) teži prema nuli, promjena vjerojatnosti kvara komponente (sustava, podsustava) teži prema $-P(K)$.

Slijedi:

$$P(N_S)_K - V_{MK}P(N_S) \quad (12)$$

i (8) postaje:

$$MSR_K = \frac{P(N_S)}{P(N_S) + P(N_S)_K} \frac{1}{1 - V_{MK}} \quad (13)$$

Slično, kad vjerojatnost kvara komponente (sustava, podsustava) teži prema jedinici, promjena je vjerojatnosti kvara komponente (sustava, podsustava):

$$P(K) = 1 - P(K)$$

Dobiva se za (11):

$$P(N_S)_K = 1 - P(K) V_{MK} \frac{P(N_S)}{P(K)} \quad (14)$$

pa (9) postaje:

$$MPR_K = \frac{P(N_S) + P(N_S)_K}{P(N_S)} = 1 + V_{MK} \frac{1}{P(K)} - 1 \quad (15)$$

Na kraju, nakon analize posljedica zbijanja razmatranog neželjenog događaja u postrojenju i okolišu, često se provodi i analiza nesigurnosti kako bi se utvrdio utjecaj pouzdanosti podataka, pretpostavki, postupaka, sveobuhvatnosti (popunosti) analiza i matematičkih modela na rezultate analize.

5. ZAKLJUČAK

Postupci su vjerojatnosne procjene tehničkog rizika primijenjivi i vrlo djelotvorni prigodom vrednovanja pouzdanosti, raspoloživosti i sigurnosti industrijskog postrojenja (tehničkih sustava), te procjenjivanja rizika zbog rada postrojenja. Vjerojatnosna procjena (tehničkog) rizika omogućuje, naime, uvid u prikladnost konstrukcije i rada postrojenja, omogućuje iznalaženje propusta i slabosti konstrukcija, kvantificiranje pretpostavki o pojavama poremećaja, nedostacima i povoljnostima konstrukcija, kao i kvantificiranje izvora nesigurnosti i njihovih posljedica u postrojenju i okolišu. Posebice analiza važnosti podsustava i komponenta tehničkog sustava, koja se provodi unutar VPR, omogućuje identifikaciju i rangiranje komponenata i podsustava najvažnijih za sigurnost industrijskog pos-

trojenja i tako usporedbu i ocjenu kao i procjenu prikladnosti i dosljednosti različitih (alternativnih) izvedaba postrojenja i postupaka snižavanja rizika zbog rada postrojenja.

LITERATURA

- [1] V. MIKULIČIĆ, D. ŠKRLEC, B. TOMIĆ: "Racionalno korištenje energije i sigurnost industrijskih postrojenja", Seminar "Racionalno korištenje energije u industriji", Republički komitet za energetiku, industriju, rudarstvo i zanatstvo SR Hrvatske, Elektrotehnički fakultet Zagreb, Zagreb, 20. studenoga 1986., Zbornik radova (7.00-7.45)
- [2] D. ŠKANATA, V. MIKULIČIĆ: "Rizik, komuniciranje i odlučivanje", Zbornik savjetovanja Hrvatskog društva za sustave i Hrvatske akademije tehničkih znanosti: "Stvaranje stabilnog, prilagodljivog i životno sposobnog hrvatskog gospodarstva u uvjetima globalizacije i nastajanja informacijskog društva", str. 191-197, Zagreb, 1995.
- [3] H. KUMAMOTO, E. J. HENLY: "Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists", Second Edition, 1996, IEEE Press Marketing, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08855-1331
- [4] W. E. VESELY, F. F. GOLDBERG, N. H. ROBERTS, D. F. HAASL: "Fault Tree Handbook", Systems and Reliability Research Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. 20555
- [5] LAMBERT, J. MARTORE: "Importance Ranking of Systems and Components at Nuclear Power Plants: Methodology and Use" Submitted to the International Atomic Energy Agency, to appear in "Manual for Probabilistic Safety Assessment Utilization and Implementation For Safety Decisions", Vienna, 1985.
- [6] "IAEA Training Course in PRA Methods in Safety Analysis for NPPS", Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA, Argonne, 1983.

RELIABILITY ASSESSMENT OF TECHNICAL RISKS

Today's modern society, which, in the majority of cases, makes use of all advantages of up-to-date techniques at the same time undoubtedly becomes susceptible to unwanted side effects: injuries, health damage, and even premature death, not understanding or not willing to understand that control and decrease of danger or risk caused by the usage of those techniques means the decrease of its usefulness. *Reliability evaluation of technical risks* tries to resolve this contradiction, as a relatively new scientific discipline that has been developing quickly recently.

The paper describes the analytical tools of quantitative (reliability) risk assessment caused by technical system operation (industrial facilities).

ABSCHÄTZUNG DER WAHRSCHEINLICHKEIT TECHNISCHER RISIKEN

Die moderne Gesellschaft von heute, welche sich meistens, ohne zu zweifeln, mit allen Wohltaten der entwickelten Technik bedient, wird gleichzeitig immer empfindlicher auf ihre mögliche unerwünschte Folgen: Verletzungen, Gesundheitsschaden, sogar voreiliges Sterben, ohne zu

verstehen - oder verstehen wollen-dass die Kontrolle und die Einschränkung der durch die Anwendung einer solchen Technik verursachten Gefahren bzw. Risikos, gleichzeitig die Einschränkung der von ihr errungenen Nutzen bedeutet. Es wird versucht diesen Widerspruch durch die neue, sich in der letzten Zeit schnell entwickelnde, wissenschaftliche Gattung - *Wahrscheinlichkeitsabschätzung technischer Risiken* - entgegenzukommen.

Im Artikel werden analytische Verfahren zur Durchführung quantitativer (der Wahrscheinlichkeit nach) Abschätzung von, durch den Betrieb technischer Systeme (Industrieanlagen) verursachten Risiken, beschrieben.

Naslov pisaca:

Prof. dr. sc. Vladimir Mikuličić, dipl. ing.
dr. sc. Zdenko Šimić, dipl. ing.

**Fakultet elektrotehnike
i računarstva, Unska 3,
10000 Zagreb, Hrvatska**

mr. sc. Ivan Vrbanić, dipl. ing.
**Nuklearna elektrana "Krško",
Vrbina 12, 8270 Krško, Slovenija**

Uredništvo primilo rukopis:
2001-07-12.