

KVAROVI SA ZAJEDNIČKIM UZROKOM U VJEROJATNOSNIM ANALIZAMA SIGURNOSTI TEHNIČKIH SUSTAVA

Igor Vuković, Zagreb – dr. sc. Ivan Vrbanić, Jastrebarsko – dr. sc. Zdenko Šimić
– prof. dr. sc. Vladimir Mikuličić, Zagreb

UDK 658.26:620.9
PRETHODNO PRIOPĆENJE

Sigurnost tehničkih sustava (energetskih, industrijskih, inženjerskih postrojenja) danas je važan predmet za razmatranje zbog sve izraženije uloge tehnoloških postupaka u modernom društvu, zbog sve većih posljedica kvarova postrojenja i njihove sve veće složenosti. Posljednjih su tridesetak godina u tehničkoj inženjerskoj praksi sve prisutnije u primjeni vjerojatnosne analize. Stablom kvara sustava matematički se eksplicitno modeliraju različite vrste kvara analiziranog sustava. Statistička neovisnost osnovnih događaja, od kojih je izgrađeno stablo kvara, nije prihvatljiva za kategoriju događaja zvanih kvarovi sa zajedničkim uzrokom. Članak razmatra načine matematičkog modeliranja kvarova sa zajedničkim uzrokom u stablima kvara tehničkih sustava u sklopu vjerojatnosne analize sigurnosti te daje praktičan osvrt temeljen na dosadašnjem iskustvu.

Ključne riječi: vjerojatnosna analiza sigurnosti, međusobno zavisni kvarovi, zajednički uzrok, stablo kvara, sigurnost.

1. UVOD

Vjerojatnosna analiza sigurnosti (VAS) kvantitativna je analiza sveukupnog rizika zbog rada tehničkog sustava. VAS koriste metodologiju stabala događaja i stabala kvarova. Metoda stabla kvara deduktivna je metoda kod koje se istražuje koji sljedovi događaja vode do određenog neželjenog događaja (npr. otkaz sigurnosnog sustava postrojenja). S druge strane, stablo događaja povezuje određeni začetni događaj s ishodima koji mogu dovesti do neželjenih posljedica za sigurnost objekta i okoline. Kako će začetni događaj utjecati na sigurnost postrojenja (npr. elektrane) ovisi o radu (otkazu) mnogih sigurnosnih (pod)sustava. Nakon utvrđivanja začetnih događaja utvrđuju se (sigurnosni) sustavi čiji ispravan rad sprječava napredovanje nezgode. Na temelju toga izgrađuju se stabala događaja na način da se analiziraju svi zamislivo mogući tijekovi događanja (sekvence). Unutar strukture stabla događaja postoje mjesta grananja. Grananjem stabla razdvajaju se različiti ishodi (u pravilu, uspjeh od neuspjeha) kod događaja koji predstavljaju stanja pojedinih sigurnosnih sustava ili, primjerice, potrebne radnje pogonskog osoblja.

Korijeni ove vrste analiza dolaze iz nuklearne industrije, a na važnosti dobivaju u tehničkim postrojenjima kod

razmatranja kvarova s relativno malom učestalosti i potencijalno velikim posljedicama. VAS su se pojavile 70-ih godina prošlog stoljeća kao nadopuna determinističkim sigurnosnim analizama. Pored naziva vjerojatnosna analiza sigurnosti (engl. *probabilistic safety assessment*) u uporabi je, naročito u SAD, i izraz vjerojatnosna analiza rizika (engl. *probabilistic risk assessment*). Među najraširenije primjene VAS spadaju: proračun pouzdanosti i raspoloživosti sustava koji su već u pogonu; usporedba različitih tehnologija pri gradnji novih postrojenja glede njihove pouzdanosti i usklađenosti sa sigurnosnim zahtjevima; izravna provjera postavljenih projektnih kriterija; određivanje važnosti pojedinih komponenti ili podsustava u sveukupnoj sigurnosti. Takve analize su investitoru postrojenja velika pomoć pri izboru postrojenja, kao i pri ocjeni samog projekta i kasnijoj uporabi. Značaj VAS je u tome da se ne gledaju odvojeno pojedini dijelovi ili sustavi postrojenja, nego cjelokupan skup sustava postrojenja, te se prati i optimizira pouzdanost i raspoloživost cjeline.

Postoje razni mehanizmi koji doprinose ukupnoj nerasploživosti komponente, kao što su: kvar kod djelovanja na zahtjev, kvar tijekom rada nakon uspješnog starta, testiranje, održavanje, pogreške pogonskog osoblja, višestruki otkazi opreme koji su međusobno povezani. U slučaju ovih posljednjih govorimo o kvarovima sa

zajedničkim uzrokom (KZU; engl. *common cause failures* – CCF). Vjerojatnost pojave takvih događaja je također potrebno ugraditi u stabla kvarova. Neki potencijalni zajednički uzroci mogu biti: potres, poplava, visoka temperatura, vlažnost, radijacija, uvjeti povezani s lokacijom na kojoj se nalaze dijelovi opreme o kojima je riječ, uvjeti povezani s njihovim projektom ili izradom itd. Članak upoznaje čitatelja s fenomenologijom ove vrste kvarova, različitostima njihovih matematičkih modela i mogućnostima primjene u analizama tehničkih sustava.

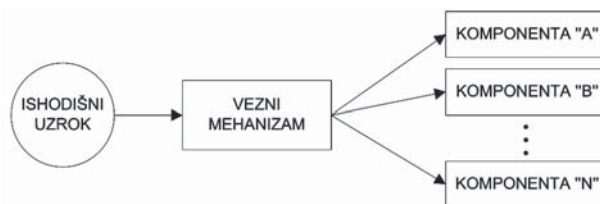
2. POVEZANI DOGAĐAJI I NJIHOVI MEHANIZMI

Za razumijevanje povezanih (međusobno ovisnih) događaja i njihovo modeliranje potrebno je odgovoriti na sljedeća pitanja. Zašto se komponente kvare ili zašto su neraspoložive? Koji su uzroci višestrukih kvarova? Koji su čimbenici i obrambeni mehanizmi kojima bi se moglo spriječiti pojavljivanje takvih višestrukih događaja? Ova pitanja vode na razmatranje tri mehanizma. Prvi od njih, ishodišni uzrok (engl. *root cause*), mehanizam je kojim komponenta iz stanja raspoloživosti prelazi u stanje kvara ili funkcionalne neraspoloživosti. Pod funkcionalnom neraspoloživostu komponente podrazumijeva se da je ova u mogućnosti raditi, ali funkcija koju normalno obavlja neraspoloživa je zbog nedostatka ulaznih uvjeta ili podataka, nedostatka potporne funkcije iz vanjskog izvora (npr. aktivacijski signal ili pogonska snaga), održavanja, ispitivanja, ili zbog nepropisnog sučelja s osobljem. U idealnom slučaju, kategorije ishodišnih uzroka trebaju biti dovoljno široke i međusobno isključive kako bi se izbjegle nejasnoće (dvosmislenosti) kod klasifikacije.

Na opisani ishodišni uzrok, nadovezuje se drugi segment – vezni mehanizam (engl. *coupling mechanism*). On pojašnjava zašto pojedini uzrok utječe na neke komponente. Svaka komponenta kvare se zbog svoje podložnosti uvjetima nastalim po pojavi ishodišnog uzroka, a uloga veznog mehanizma je u stvaranju uvjeta zajedničkih tim komponentama. Primjerice, neka su dvije komponente smještene u istoj prostoriji podložne povećanoj vlažnosti zraka. Kvar sa zajedničkim uzrokom može nastati kao ishod događaja u tehničkom sustavu koji rezultira povećanom razinom vlažnosti u prostoriji. Povišena vlažnost je ishodišni uzrok kvara za obje komponente, dok odmah prepoznatljivi vezni mehanizam leži u činjenici što su obje komponente smještene u istoj prostoriji. Prema tome, ovisni kvarovi nastaju zbog suprisutnosti dvaju čimbenika (slika 1), jednog koji osigurava podložnost komponenata kvaru ili neraspoloživosti zbog nekog ishodišnog uzroka, i jednog koji je vezni mehanizam – za više komponenti ostvaruje uvjete u kojima su sve zahvaćene istim uzrokom.

Treći mehanizam je postojanje ili nedostatak inženjerskih i operativnih obrana od neočekivanih kvarova opreme. Uobičajena uvažena obrambena strategija podrazumijeva

kontrolu konstrukcije, odjeljivanje (separaciju) opreme, kvalitetno pripremljene postupke za ispitivanje i nadzor, održavanje postupaka, pregled procedura, osposobljenost osoblja, izgradnju kontrole kvalitete itd. Fizičkim razdvajanjem opreme sa zalihom smanjuje se mogućnost istodobnog kvara opreme zbog učinaka iz okolice. Druge strategije mogu biti učinkovitije u smanjivanju vjerojatnosti neovisnih kvarova kao i ovisnih smanjivanjem podložnosti komponenata određenim vrstama ishodišnih uzroka.



Slika 1. Čimbenici međusobno ovisnih događaja

Ovisni kvarovi uzrok su što vjerojatnosti otkaza u postrojenju postaju uvjetne vjerojatnosti čija interpretacija, s obzirom na fizikalnu stranu problema, redovito nije jasna. Egzaktan pristup je proračun pomoću Markovljevih procesa, no zbog opsežnosti računa taj pristup je teško provediv i s najjačim računalima pa se uvjetne vjerojatnosti određuju približnim metodama. Današnji naponi za postizanje visoke sigurnosti tehničkih sustava idu u smjeru eliminacije ovisnih kvarova i poboljšanja konstrukcije koja će spriječiti djelovanje zajedničkog uzroka kvarova [2].

Ova razmatranja odnose se na sve vrste ovisnih događaja, a daljnji je naglasak članka samo na izgradnji vjerojatnosnih modela kvarova sa zajedničkim uzrokom.

2.1. Klasifikacija ovisnih događaja

Sve ovisnosti u sustavu mogu se podijeliti na tri vrste: (1) funkcijska ovisnost, npr. baterija gubi kapacitet nakon prekomjerne uporabe; (2) fizička (prostorna) ovisnost, npr. požar uzrokuje gubitak pričuvne pumpe; i (3) ljudska ovisnost, npr. pogreška prilikom konstrukcije pumpe.

Unutar VAS razlikujemo sljedeće kategorije ovisnosti:

1. Funkcijske ovisnosti u sekvenci – pokazuju učinke statusa jednog sustava ili sigurnosne funkcije na uspjeh ili kvar drugog sustava. Takve ovisnosti eksplicitno su modelirane unutar stabala događaja u sklopu VAS.
2. Međusustavne ovisnosti – uključuju fizičke i funkcijske ovisnosti. One su u pravilu izravno modelirane bilo na razini stabala kvara ili na razini stabala događaja. Prvi slučaj se javlja kod primjene tzv. metode povezivanja stabala kvarova (engl. *fault tree linking methodology*), dok se drugi slučaj javlja kod primjene metode stabala događaja s graničnim uvjetima (engl. *event tree with boundary condition*).

3. Ovisnosti među komponentama – do kojih dolazi zbog raznih veznih mehanizama. Ovakve ovisnosti u pravilu nisu uočljive na prvi pogled, a mogućnost njihovog postojanja je latentna. One mogu dovesti do kvarova sa zajedničkim uzrokom koji uključuju više (redundantnih) komponenti. Modeliranje međusobno ovisnih događaja koji predstavljaju ovakvu vrstu kvarova razmatra se u nadolazećim poglavljima.
4. Ovisnosti zbog djelovanja pogonskog osoblja – kao što su kriva kalibracija senzora ili instrumenata, pogreške kod dijagnosticanja stanja i slično, modeliraju se eksplicitno kao osnovni događaji unutar stabala kvarova i analiziraju u sklopu analize ljudske pouzdanosti.

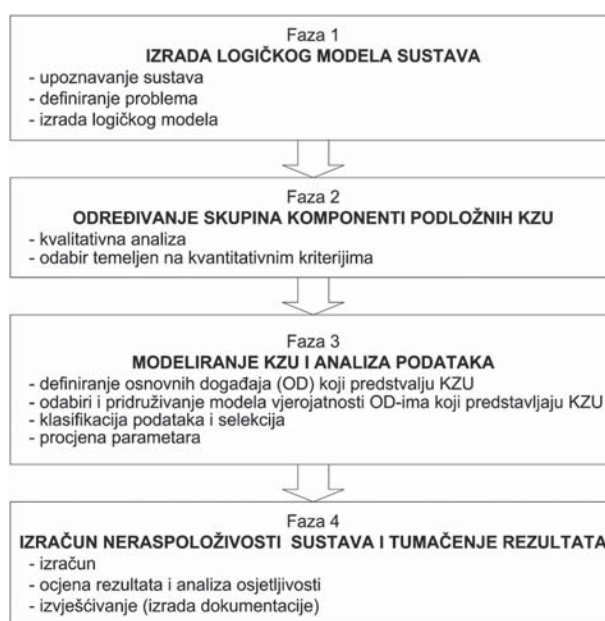
Učinci začetnih događaja koji uzrokuju višestruke otkaze redundantne opreme (npr. zemljotres, požari, ...) u pravilu se, također, izravno modeliraju na razini stabala događaja ili stabala kvarova (primjerice, kao odgovarajući rubni ili začetni uvjeti). Analiza kvarova sa zajedničkim uzrokom na taj način u većini slučajeva obuhvaća samo događaje ishodišnog uzroka koji dovode do višestrukog ispada komponenti zbog istog uzroka i koji spadaju u neku od sljedećih kategorija:

- neprijemnost (neprikladnost) pri projektu/proizvodnji/izradi/ugradnji, ili unutrašnji uzroci,
- nenormalni radni uvjeti u okolici,
- radnje održavanja i radnje osoblja koje nisu izravno modelirane.

Neprikladnost pri projektu/proizvodnji/izradi/ugradnji, ili unutrašnji uzroci, obuhvaća radnje i odluke prilikom projekta, proizvodnje ili ugradnje komponenata prije početka i za vrijeme rada tehničkog sustava. U ovu kategoriju uključen je također i slab rad nekog dijela unutar komponente kao rezultat uobičajene istrošenosti ili drugi bitni kvar i utjecaj normalnog ambijenta u okolici. Ovi ishodišni uzroci zahvaćaju slične komponente. Nenormalni radni uvjeti u okolici uključuju sve uzroke vezane za okolicu koja nije unutar projektnih kriterija komponente. Ova vrsta ishodišnog uzroka (npr. vibracije, temperatura, vlažnost, tlak, onečišćenje, elektromagnetska interferencija, zračenje, korozija, vodljivi medij) zahvaća opremu smještenu u istom prostoru koja je osjetljiva na ovakve grube uvjete u okolici. Radnje i djelovanje osoblja prigodom održavanja, upravljanja ili pogona u pravilu obuhvaćaju opremu čiji se pogon ili održavanje (servisiranje) odvija na temelju istog pisanog postupka (uputstva). Pod pogreškama misli se na pogreške u pisanom postupku, pogreške osoblja te planirana i neplanirana održavanja.

2.2. Pregled redoslijeda postupaka u analizi kvarova sa zajedničkim uzrokom

Kod provedbe analize kvarova sa zajedničkim uzrokom uočljive su četiri glavne faze (slika 2) od kojih svaka ima nekoliko koraka [6].



Slika 2. Načelni prikaz postupaka pri provođenju analize kvarova sa zajedničkim uzrokom

Slijede kratki opisi pojedinih faza.

Faza 1. – Izrada logičkog modela sustava. Svrha je ove faze konstruirati logički model koji identificira doprinose stanja komponenti koja dovode do neželjenog stanja sustava.

Faza 2. – Određivanje skupina komponenti podložnih KZU. Cilj ovog selektivnog procesa je:

- odrediti skupine komponenti unutar sustava koje će biti uključene ili, pak, izbačene iz analize KZU,
- odrediti prioritete skupina komponenti odabranih za daljnju analizu kako bi se vrijeme i resursi najbolje alocirali tijekom analize,
- osigurati inženjerske argumente kao pomoć pri koraku analize podataka (za fazu 3),
- osigurati inženjerska opažanja za naknadno oblikovanje obrambenih alternativa i određivanje preporuka u fazi 4.

Faza 3. – Modeliranje KZU i analiza podataka. Po završetku faze 2, analitičar ima razvijeni logički model sustava na razini komponenti i definiran opseg analize KZU u smislu utvrđenih skupina. Svrha je ove faze dograditi logički model sustava uključivanjem KZU. Pri tome se za svaki pojedini KZU koji će biti uključen u model sustava izgrađuje odgovarajući logičko-vjerojatnosni model te provodi analiza podataka radi utvrđivanja vrijednosti njegovih parametara.

Faza 4. – Kvantifikacija sustava i interpretacija rezultata. Svrha je ove faze povezati ključne rezultate prethodnih faza za utvrđivanje vjerojatnosti otkaza sustava, te provođenje analize osjetljivosti i tumačenje rezultata.

3. KVAROVI SA ZAJEDNIČKIM UZROKOM

Kvarovi sa zajedničkim uzrokom (KZU) čine potkategoriju klase ovisnih događaja. Definirani su kao kvarovi više komponenti zbog pojave istog ishodišnog uzroka. Ključno svojstvo događaja kvara sa zajedničkim uzrokom je da su dvije ili više komponenti zahvaćene istim uzrokom koji nije kvar ili funkcionalna neraspoloživost druge komponente [5].

KZU spadaju u implicitne ovisnosti. To su ovisnosti koje nije moguće opisati konkretnim osnovnim događajima (eksplicitno), ali postoji jasna predodžba o njihovom postojanju. Prema tome, KZU kao dijelovi logičkog modela postrojenja (stabala kvarova i stabala događaja) predstavljaju one međukomponentne ovisnosti, razmatrane kao potencijalno manje značajne, a čiji mehanizmi nisu eksplicitno ugrađeni u logički modela postrojenja. Specifične mehanizme ovisnih kvarova potrebno je eksplicitno (izravno) modelirati kad god je moguće i preporuča se jasno razlikovati takav način modeliranja od načina na koji se modeliraju KZU [4].

VAS provedene u posljednja dva desetljeća pokazale su važnost provedbe analize kvarova sa zajedničkim uzrokom zbog njihovog relativno velikog utjecaja u smislu doprinosa neraspoloživosti sustava. Jednostavno zanemarivanje modeliranja KZU i modeliranje samo slučajnih statistički neovisnih kvarova značajno bi podcijenilo neraspoloživost tehničkog sustava i dalo krive pokazatelje o važnosti zalihosti opreme i njenom prostornom smještaju u sustavu. To posebice dolazi do izražaja kod složenih tehničkih sustava kod kojih razmatramo rizik od malo vjerojatnih događaja s potencijalno velikim posljedicama (rizik od nesreće u nuklearnoj elektrani, pad zrakoplova, ...).

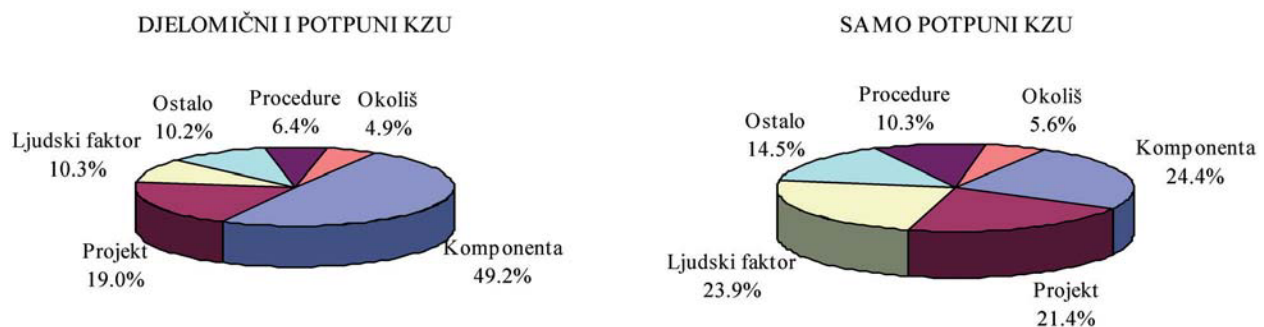
Pod terminom "kvarovi sa zajedničkim uzrokom" podrazumijevamo kvarove što se javljaju zbog djelovanja "zajedničkog uzroka" ili "zajedničkog početnog poticajnog događaja", odnosno, uzrok je svim kvarovima u sustavu zajednički. To može biti kvar nekog tehničkog sustava (npr. raspad elektroenergetskog sustava), ali i djelovanje čovjeka (pogrješke 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 pumpe nakon kvara prve). Termin "zajednički način kvara" opisuje zajednički uzrok kvara što djeluje na funkcionalno identične komponente ili podsustave, tj. duplicirane ili redundantne, dakle paralelne komponente ili podsustave što obavljaju istu funkciju.

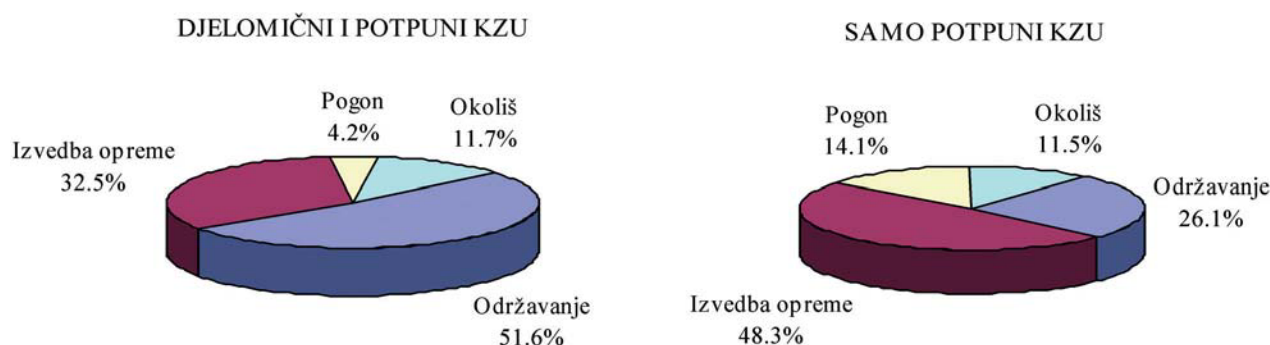
Mehanizme koji doprinose ili uzrokuju zajednički način kvarova moguće je karakterizirati ovako: konstrukcijske pogrješke; razlike u kontroli proizvodnje i kvalitete; pogrješke prilikom testiranja, održavanja i popravljanja; pogrješke ljudi; promjene okolice (onečišćenje, temperatura, tlak, vlažnost, vibracije itd.); okolnosti što se javljaju tijekom rada komponenti ili postrojenja (promjene opterećenja, kvarovi, popravci) [1].

Banka podataka US NRC-a (engl. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*), temeljena na 15-godišnjoj statistici kvarova sa zajedničkim uzrokom (1980.-1995.), pokazuje da je udio KZU u ukupnom broju svih kvarova 9,8%, a samo 1,3% svih kvarova pripada klasi potpunih KZU (sve redundantne komponente promatrane skupine su u stanju kvara) [14]. Slika 3 prikazuje razdiobu KZU-događaja prema ishodišnom uzroku, dok slika 4 opisuje razdiobu KZU-događaja prema veznom mehanizmu.

Pristup temeljen na generičkom uzroku (engl. *generic cause approach* [4]) sustavan je i strukturirani način pregleda skupina komponenti podložnih KZU. U osnovi, za svaku kombinaciju komponenti bi se moglo reći da ima odgovarajući potencijal za pojavu KZU. Pokazalo se da široka primjena ovog pristupa, ili drugih tehnika kvalitativnog pregleda/selekcije zahtijeva previše vremena. Kakogod, teško da postoji ikoji primjer VAS s punim opsegom (engl. *full-scope PSA*) gdje je kvalitativna selekcija po dubini primijenjena na velik broj komponenti. Preporuča se odrediti opseg analize po dubini primjenom kvantitativnog pregleda, te selekcije a priori tipova komponenti koje je na osnovi proteklog iskustva potrebno detaljnije analizirati. Prema postojećim naputcima preporuča se neke tipove komponenti koje su prema proteklom iskustvu, ili djelomično podložne KZU i/ili su kritične za razinu sigurnosti postrojenja, redovito uključiti u relativno detaljniju analizu KZU. U tom kontekstu fokus je na aktivnim redundantnim komponentama i doprinosima unutar sustava.



Slika 3. Raspodjela kvarova sa zajedničkim uzrokom prema ishodišnom uzroku



Slika 4. Raspodjela kvarova sa zajedničkim uzrokom prema veznom mehanizmu

3.1. Pretpostavka simetričnosti

U okviru VAS, osnovni događaj kvara zbog zajedničkog uzroka definira se kao "događaj koji predstavlja višestruke kvarove određene skupine (obično sličnih) komponenata zbog istog uzroka" [4]. Tako za modeliranje jednostavnog sustava od tri komponente "A", "B" i "C", uz postojeće osnovne događaje, A_1 , B_1 i C_1 , koji predstavljaju neraspodjenu ili kvar jedne i samo jedne komponente, potrebno je razmotriti i osnovne događaje kvara zbog zajedničkog uzroka, C_{AB} , C_{AC} , C_{BC} i C_{ABC} gdje indeks označava skupinu komponenti koje su u kvaru zbog tog uzroka. Nakon što su definirani svi osnovni događaji u pravilu se uzima u obzir jednostavna pretpostavka temeljem koje se smanjuje broj parametara modela koje treba procijeniti. Prema toj pretpostavci vjerojatnosti pojavnosti **sličnih osnovnih događaja** koji uključuju **isti broj komponenata**, su iste. Za navedeni sustav od tri identične komponente, tada je:

$$P(A_1) = P(B_1) = P(C_1) = Q_1 \quad (1a)$$

$$P(C_{AB}) = P(C_{AC}) = P(C_{BC}) = Q_2 \quad (1b)$$

$$P(C_{ABC}) = Q_3 \quad (1c)$$

Vjerojatnost pojave osnovnog događaja, Q_k , je funkcija od m , ukupnog broja komponenti koje tvore KZU-grupu. Slijedi opći izraz za vjerojatnost pojave osnovnog događaja:

$$Q_k^{(m)} \equiv \text{vjerojatnost pojave kvara sa zajedničkim uzrokom koji uključuje } k \text{ komponenti } (1 \leq k \leq m) \text{ iz KZU-skupine od } m \text{ komponenti} \quad (2)$$

i, općenito je:

$$Q_k^{(m)} \neq Q_k^{(l)} \quad l \neq m \quad (3)$$

3.2. Metode za modeliranje kvarova sa zajedničkim uzrokom

Više je modela predloženo od različitih autora za evaluaciju KZU, ali jedino oni korišteni u sklopu VAS pripadaju grupi parametarskih modela. Dvije studije (European CCF

benchmark exercise, Poucet et al., 1987; Scandinavian benchmark exercise, Hirschberg, 1987) pokazale su da odabir modela KZU nije bitan ako se koristi konzistentan skup podataka. S druge strane neki od raspoloživih modela strukturirani su tako da zahtijevaju složenu analizu podataka. Tablica 1 prikazuje osnovne karakteristike parametarskih modela.

Tablica 1 prikazuje kategorizaciju ovih modela na osnovi načina kako se procjenjuju vjerojatnosti osnovnih događaja. Dvije su osnovne kategorije modela: šok modeli i ne-šok modeli. Šok modeli razlikuju dva mehanizma kvara, prvi, individualni kvarovi komponenata zbog slučajnih uzroka, i drugi, kvarovi jedne ili više komponenata zbog zajedničkog uzroka (šoka) koji utječe na sustav određenom vjerojatnosti. Stoga šok modeli određuju frekvenciju drugog tipa kvarova kao umnožak vjerojatnosti pojavljivanja šoka i uvjetne vjerojatnosti kvara komponente ako se zna da je nastupio šok [5]. Ne-šok modeli procjenjuju vjerojatnosti osnovnih događaja bez postuliranja modela za odgovarajući mehanizam kvara. Temeljni parametarski model koristi se za izravnu procjenu vjerojatnosti osnovnih događaja. Ostali modeli koji se spominju detaljnije u sljedećim podpoglavljima mogu se svi izvesti iz tog modela.

3.2.1. Temeljni parametarski model (engl. basic parameter model)

Ovo je model kod kojega se vjerojatnosti KZU-događaja definiraju izravno relacijom (2). Za parametre $Q_k^{(m)}$ definirane relacijom (2) ukupna vjerojatnost kvara, Q_r , komponente u KZU-skupini od m komponenti je:

$$Q_r = \sum_{k=1}^m \binom{m-1}{k-1} Q_k^{(m)} \quad (4)$$

gdje je $\binom{m-1}{k-1}$ broj različitih načina na koji se dotična komponenta može pokvariti s $k-1$ drugom komponentom u skupini od m sličnih komponenti. U formulaciji (4) događaji $Q_k^{(m)}$ su isključivi.

Tablica 1. Glavne karakteristike parametarskih modela KZU (prema NUREG/CR-4780)

	Model	Parametri modela	Opći oblik formule za vjerojatnost višestrukog kvara
NE-ŠOK MODELI	Temeljni parametarski model	Q_1, Q_2, \dots, Q_m	$Q_k = Q_k \quad k = 1, 2, \dots, m$
	Model beta-faktora	Q_p, β	$Q_k = \begin{cases} (1-\beta)Q_t & k=1 \\ 0 & 2 \leq k < m \\ \beta Q_t & k=m \end{cases}$
	Model grčkog alfabeta	$Q_t, \underbrace{\beta, \gamma, \dots}_{m-1 \text{ parametar}}$	$Q_k = \frac{1}{\binom{m-1}{k-1}} \left(\prod_{i=1}^k \rho_i \right) (1-\rho_{k+1}) Q_t \quad k=1, \dots, m$ $\rho_1 = 1, \rho_2 = \beta, \rho_3 = \gamma, \dots, \rho_{m+1} = 0$
	Model alfa-faktora	$Q_p, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$	$Q_k = \frac{1}{\binom{m-1}{k-1}} \frac{\alpha_k}{\alpha_t} Q_t \quad k=1, \dots, m$ $\alpha_t \equiv \sum_{k=1}^m k \alpha_k$
ŠOK MODELI	Model s dva stanja (ispravno/neispravno)	Q_p, μ, ρ, w	$Q_k = \begin{cases} \mu \rho^k (1-\rho)^{m-k} & k \neq m \\ \mu \rho^m + w & k = m \end{cases}$
	Model s višestrukim stanjima (više načina kvara)	$\mu, Q_p, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_m$	$Q_k = \begin{cases} \mu \Phi_k & k=2, \dots, m \\ Q_t + \mu \Phi_1 & k=1 \end{cases}$

3.2.2. Model beta-faktora (engl. beta factor model)

Ovo je jednoparametarski model koji koristi dodatni parametar pored ukupne vjerojatnosti kvara komponente da bi se odredile vjerojatnosti KZU. Model pretpostavlja da se konstantan udio (β) vjerojatnosti kvara komponente može povezati s događajima zajedničkog uzroka dijeljenim među komponentama te grupe. Drugo, kad god postoji KZU, onda se pretpostavlja da je to kvar svih komponentata definirane grupe. Stoga, za grupu od m komponentata, svi $Q_k^{(m)}$ iz (4) jednaki su nula osim Q_1 i Q_m . Konačno vjerojatnosti događaja iz KZU grupe od m komponentata su:

$$Q_k = \begin{cases} (1-\beta)Q_t & k=1 \\ 0 & 2 \leq k < m \\ \beta Q_t & k=m \end{cases} \quad (5)$$

Procjenitelji β -faktora ne ovise eksplicite o podatku o uspjehu komponente/sustava koji su općenito neraspoloživi, a uz to, procjene β -faktora za bitno različite vrste komponentata ne variraju zamjetno. Zbog ovih činjenica te jednostavnosti modela razumljiva je i njegova velika raširenost u analizama rizika i pouzdanosti [5].

Iako statistički podaci na osnovi radnog iskustva ukazuju na to da KZU ne zahvaćaju uvijek sve redundantne komponente, iskustvo iz korištenja ovog jednostavnog

modela, otkriva da, u nekim slučajevima, daje razumno točan (i pomalo konzervativan) rezultat za razine zalihosti do tri ili četiri. No, iznad tih razina zalihosti ovaj model daje konzervativne rezultate. Kada je od interesa specifičan doprinos trećeg ili višeg reda preporuča se koristiti općenitije parametarske modele, posebice kod velikog doprinosa KZU [6].

3.2.3. Model grčkog alfabeta (engl. multiple greek letter model – MGL)

Ovaj model poopćenje je beta faktor modela u smislu uvođenja dodatnih parametara k β -faktoru kako bi se uzeli u obzir i KZU bilo kojeg broja komponenti unutar grupe. MGL parametri su: (1) ukupna vjerojatnost kvara komponente, Q_p , što uključuje pojedinačan doprinos kao i doprinos zbog KZU, i (2) niz udjela u kvaru korištenih za kvantificiranje uvjetnih vjerojatnosti nastupa (svih mogućih kombinacija) KZU ako je poznato da je nastupio kvar dotične komponente. Za skupinu od m redundantnih komponenti i za svaki primjenjivi način rada definirano je i m parametara. Primjerice, prva četiri parametra ovog modela su:

$Q_t \equiv$ ukupna vjerojatnost kvara komponente (zbog individualnog kvara i KZU-ova)

te

$\beta \equiv$ uvjetna vjerojatnost da je uzrok kvara koji se očitovao na jednoj komponenti, zahvatio jednu ili više dodatnih komponenti;

$\gamma \equiv$ uvjetna vjerojatnost da je uzrok kvara koji se očitovao na dvije komponente, zahvatio jednu ili više dodatnih komponenti;

$\delta \equiv$ uvjetna vjerojatnost da je uzrok kvara koji se očitovao na tri komponente, zahvatio jednu ili više dodatnih komponenti.

Opći izraz za vjerojatnost KZU k specifičnih unutar grupe od m komponenti, Q_k , u MGL parametrima konzistentan je s gornjom definicijom. Za grupu od 4 slične komponente definiraju se sljedeći parametri:

$$Q_t = Q_1^{(4)} + 3Q_2^{(4)} + 3Q_3^{(4)} + Q_4^{(4)} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \beta^{(4)} &= \frac{3Q_2^{(4)} + 3Q_3^{(4)} + Q_4^{(4)}}{Q_1^{(4)} + 3Q_2^{(4)} + 3Q_3^{(4)} + Q_4^{(4)}} \\ \gamma^{(4)} &= \frac{3Q_3^{(4)} + Q_4^{(4)}}{3Q_2^{(4)} + 3Q_3^{(4)} + Q_4^{(4)}} \\ \delta^{(4)} &= \frac{Q_4^{(4)}}{3Q_3^{(4)} + Q_4^{(4)}} \end{aligned} \quad (7)$$

Potrebno je naglasiti da su parametri iz (7) funkcija veličine grupe, m , te je potrebno voditi računa da se ne primjenjuju raspoloživi parametri grupe od m komponenti za parametre KZU grupe od n komponenti ($n \neq m$). Rješavanjem sustava jednačbi (6, 7) za ovu istu grupu dobivaju se vjerojatnosti KZU, Q_k :

$$\begin{aligned} Q_1 &= (1 - \beta)Q_t \\ Q_2 &= \frac{1}{3}\beta(1 - \gamma)Q_t \\ Q_3 &= \frac{1}{3}\beta\gamma(1 - \delta)Q_t \\ Q_4 &= \beta\gamma\delta Q_t \end{aligned} \quad (8)$$

Poopćenje na grupu od m komponenti vodi na relaciju za $Q_k^{(m)}$:

$$Q_k = \frac{1}{\binom{m-1}{k-1}} \left(\prod_{i=1}^k \rho_i \right) (1 - \rho_{k+1}) Q_t \quad (k = 1, \dots, m) \quad (9)$$

gdje su: $\rho_1 = 1, \rho_2 = \beta, \rho_3 = \gamma, \dots, \rho_{m+1} = 0$.

3.2.4. Model alfa-faktora (engl. alpha factor model)

Alfa faktor model definira vjerojatnosti KZU preko niza omjera vjerojatnosti kvarova i ukupne vjerojatnosti kvara komponente, Q_k . U smislu vjerojatnosti KZU događaja, alfa faktori definiraju se kao

$$\alpha_k^{(m)} = \frac{\binom{m}{k} Q_k^{(m)}}{\sum_{k=1}^m \binom{m}{k} Q_k^{(m)}} \quad (10)$$

gdje je $\binom{m}{k} Q_k^{(m)}$ vjerojatnost KZU događaja koji uključuje k od m komponenti grupe. Drugim riječima, $\alpha_k^{(m)}$ je omjer vjerojatnosti događaja KZU k komponenti grupe i ukupne vjerojatnosti svih KZU događaja u grupi od m komponenti. Primjerice, za grupu s tri slične komponente definirani su:

$$\begin{aligned} \alpha_1^{(3)} &= \frac{3Q_1^{(3)}}{3Q_1^{(3)} + 3Q_2^{(3)} + Q_3^{(3)}} \\ \alpha_2^{(3)} &= \frac{3Q_2^{(3)}}{3Q_1^{(3)} + 3Q_2^{(3)} + Q_3^{(3)}} \\ \alpha_3^{(3)} &= \frac{Q_3^{(3)}}{3Q_1^{(3)} + 3Q_2^{(3)} + Q_3^{(3)}} \end{aligned} \quad (11)$$

i vrijedi $\alpha_1^{(3)} + \alpha_2^{(3)} + \alpha_3^{(3)} = 1$. Koristeći relacije (10, 11) vjerojatnost KZU, Q_k , je:

$$Q_k^{(m)} = \frac{m}{\binom{m}{k}} \frac{\alpha_k^{(m)}}{\alpha_t} Q_t \quad (12)$$

gdje je

$$\alpha_t = \sum_{k=1}^m k \alpha_k^{(m)} \quad (13)$$

Postoji međusobna povezanost parametara između alfa faktor i MGL modela preko niza jednostavnih relacija. Npr. za KZU grupu s tri komponente MGL parametri su dani s:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2\alpha_2 + 3\alpha_3}{\alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3} \\ \gamma &= \frac{3\alpha_3}{2\alpha_2 + 3\alpha_3} \end{aligned} \quad (14)$$

Slično, reparametrizacijom moguće je dobiti parametre alfa faktor modela:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 3(1 - \beta) \\ \alpha_2 &= \frac{3}{2}\beta(1 - \gamma) \\ \alpha_3 &= \beta\gamma \end{aligned} \quad (15)$$

3.2.5. Procjenitelji i neodređenost parametara modela

Za procjenu vrijednosti opisivanih parametara KZU modela potrebno je definirati procjenitelje koji se odnose

na mjerljive veličine izvučene iz raspoloživih podataka formiranih na temelju pogonske povijesti (višegodišnjeg vođenja statistike kvarova) tehničkog postrojenja. Postoji više vrsta procjenitelja koji se u tradi mogu koristiti. Najjednostavniji od njih su tzv. procjenitelji najveće vjerodostojnosti. Kod analize neraspoloživosti tehničkog sustava vrlo je često poželjno imati podatak o neodređenosti procjene. Bitan detalj na koji treba obratiti pozornost su statistički modeli koji se koriste za prezentiranje neodređenosti procjenitelja parametra spomenutih parametarskih KZU-modela. Neodređenosti o kojima ovdje govorimo povezane su sa statističkim zaključivanjem na temelju ograničene veličine uzorka. Za analizu neodređenosti može se koristiti Bayesov pristup kod kojega se razdioba KZU parametra, θ , uz poznatu pogonsku povijest, E , izračunava prema formulaciji:

$$\pi(\Theta|E) = \frac{L(E|\Theta)\pi_0(\Theta)}{\int_{\Theta} L(E|\Theta)\pi_0(\Theta)d\Theta} \quad (16)$$

gdje je

$\pi(\theta|E) \equiv$ razdioba parametra θ a posteriori (uz poznatu pogonsku povijest E);

$\pi_0(\theta) \equiv$ razdioba parametra θ a priori (bez poznavanja pogonske povijesti E);

$L(E|\theta) \equiv$ funkcija vjerodostojnosti odnosno vjerojatnost pogonske povijesti E ako je poznat parametar θ .

Procjenitelji parametara modela i pripadne neodređenosti posebna su i kompleksna tema te se stoga neće detaljno razrađivati unutar ovog rada već je dan kratak osvrt na neke specifične aspekte s naglaskom na spomenute modele. Budući da su raspoloživi statistički podaci o kvarovima dani u obliku broja događaja koji uključuju KZU određenog broja komponenti iz skupine, parametri koji se temelje na broju i vrsti događaja, kao što je to slučaj kod alfa faktora, moguće je procijeniti izravno iz tih podataka. S druge strane, MGL parametri po svojoj su naravi parametri temeljeni na komponenti, te se ne mogu izravno odrediti [6]. Otuda i proizlazi značaj modela alfa-faktora kroz izravno određivanje njegovih faktora (na temelju statistike kvarova) koji koreliraju s faktorima u primjeni vrlo raširenog MGL modela. Valja naglasiti da primjena Bayseovog pristupa nije jednako kompleksna kod ova dva modela. U slučaju provođenja Bayseovog pristupa na parametre alfa faktor modela opisane Dirichletovom razdiobom $\pi_0(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ nužno je samo odrediti a posteriori Dirichletovu razdiobu $\pi(\alpha_1, \dots, \alpha_m|E)$. Određivanje a posteriori razdiobe MGL parametara ide neizravno preko određivanja a posteriori razdiobe parametara alfa faktor modela. Potom se koristi standardna korelacija koja vrijedi između $m-1$ parametara MGL modela i m parametara alfa faktor modela [6]:

$$\pi(\underbrace{\beta, \gamma, \dots}_{m-1}|E) = \frac{\pi(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m|E)}{|J(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m)|} \quad (17)$$

Izraz u nazivniku predstavlja Jacobijevu determinantu. Ovako određena razdioba ima nedostatak da je do njene srednje vrijednosti moguće doći isključivo numeričkim postupkom. Zbog navedenih razloga je razumljivo da se u novije vrijeme jedan dio analitičara okreće modelu s alfa-faktorima.

3.3. Neka praktična razmatranja

Usporedan pregled analize ovisnih kvarova unutar VAS šest švedskih nuklearnih elektrana, prema [13], pokazao je da najveći doprinos KZU, prema tipovima komponenata, nose motorom upravljani ventili i pumpe. Kao sljedeći mogući doprinositelji navedeni su dizel-generatori, el. akumulatori, rasteretni ventili, zrakom upravljani ventili, kontrolni ventili, nepovratni ventili, ispadni ventili, kanali logike sustava za zaštitu reaktora, prekidači i senzori. Rezultati VAS provedenih u SAD-u potvrđuju ove zaključke te kao važnima za KZU ocjenjuju i KZU sklopke za obustavu reaktora. Postojeća iskustva pokazuju da je kod provođenja VAS nuklearnih elektrana potrebno, u najmanju ruku, uzeti u obzir gore navedene vrste komponenti. Provođeci kvantitativni pregled/selekciju moguće je odrediti stupanj do kojeg je potrebno istražiti utjecaj ovih i dodatnih skupina identičnih, funkcionalno "nerazličitih", aktivnih, redundantnih komponenti.

U pravilu funkcionalno različite komponente ne razmatraju se kao podložne KZU-ima. Pasivne komponente također su rijetko predmetom analize KZU. Međutim, potrebno je raditi provjere da su događaji, kao npr. začepljenje filtra rešetke redundantne pumpe, izravno umodelirani u logički model elektrane.

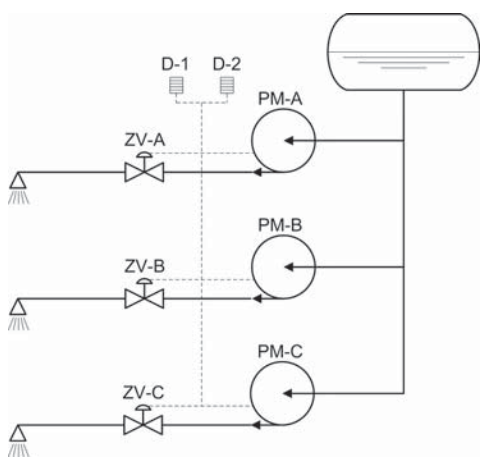
Drugi segment koji utječe na opseg analize je pitanje modeliranja svih primjenjivih redova višestrukosti kvarova (npr. uključanje dvostrukih, trostrukih i četverostrukih KZU kod elektrane s četiri redundantne grane unutar sigurnosnog sustava). Preporuča se kad je god moguće uzeti čim veći red višestrukosti kvarova. Današnji računalni programi prate preporuke teoretičara o pojednostavljenju KZU modela (s obzirom na činjenicu da s porastom broja komponenti eksponencijalno raste i broj događaja) gdje je to moguće s time da su rezultati još uvijek na konzervativnoj strani. Npr, za sustav s KZU grupom od 6 komponenti, svaki događaj koji uključuje 4 ili više komponente računao bi se kao kvar svih 6 komponenti.

Za praktično provođenje analize KZU unutar VAS raspoloživa je različita suvremena računalna programska podrška. Pri tome nakon definiranja određene KZU grupe, pridružuju joj se osnovni događaji koji predstavljaju određenu vrstu kvara komponente članice grupe. Dodatno definiraju se i parametri KZU modela, a neki programi automatski proširuju stablo kvara na način da osnovni događaj zamijene ILI-vratima na čijem ulazu su individualni kvar i sve kombinacije KZU kvarova.

4. PRIMJERI ANALIZE KVARA SA ZAJEDNIČKIM UZROKOM U TEHNIČKOJ PRAKSI

Za ilustraciju odabrana su dva primjera sigurnosnih sustava koji su u pripravnosti i očekuje se njihovo vremenski ograničeno djelovanje nakon aktivacije. Za prvu ilustraciju poslužit će shema pojednostavljenog sustava protupožarne zaštite na slici 5. Za prepoznavanje požara instalirana su dva detektora (D-1 i D-2) koji potom aktiviraju centrifugalne pumpe i otvore zrakom upravljane ventile po načelu da je dovoljna aktivacija barem jednog od dva detektora. Pumpe uzimaju vodu iz spremnika i kroz mlaznice raspršuju vodu u području zahvaćenom požarom.

Prikazane su tri redundantne pruge (pumpa, zrakom upravljani ventil, mlaznica) premda je za normalan rad dovoljna jedna, a preostale su u pripravnosti. Rezultati analize KZU provedene za ovaj sustav uz varijacije broja raspoloživih grana od jedne do četiri daje slika 6. Modelirane su četiri KZU grupe: kvarovi zrakom upravljanih ventila, kvarovi pumpi (pri zagonu i pri radu nakon uspješnog zagona) i kvarovi detektora. Zbog jednostavnosti, neraspoloživost zbog ispitivanja i održavanja modelirana je na razini grane (umjesto na razini pojedinih komponenti), a kvarovi potpornih sustava (napajanje pumpi, sustav stlačenog zraka za upravljanje ventilima, upravljačka logika) zanemareni su.



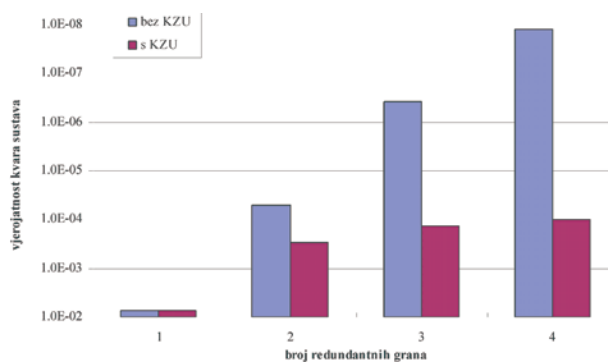
Komponenta	Mod kvara	Vrijednost parametra q [/zahtjev] / λ [/sat]
Detektor požara	RK	1,00E-04
	FS	3,00E-03
Motorna pumpa	FR	3,00E-05
	TM	2,00E-03
Zrakom upravljani ventil	RK	2,00E-03
Spremnik vode	puknuće	1,00E-06

Legenda: RK – razni kvarovi
 FS – kvar pri zagonu
 FR – kvar tijekom rada nakon uspješnog zagona
 TM – neraspoloživost zbog ispitivanja i održavanja

Veličina skupine (m)		2		3		4	
Komponenta	Mod kvara	β	β	γ	β	γ	δ
Detektor požara	NC	1,12E-02	NA	NA	NA	NA	NA
Motorna pumpa	FS	5,56E-02	5,53E-02	5,34E-01	5,33E-02	5,40E-01	7,66E-01
	FR	2,09E-02	2,80E-02	3,01E-01	2,83E-02	5,03E-01	3,89E-01
Zrakom upravljani ventil	NC	3,97E-02	5,28E-02	4,19E-01	5,97E-02	4,97E-01	5,21E-01

Legenda: RK – razni kvarovi, FS – kvar pri zagonu, FR – kvar tijekom rada nakon uspješnog zagona, NA – nije primjenjivo

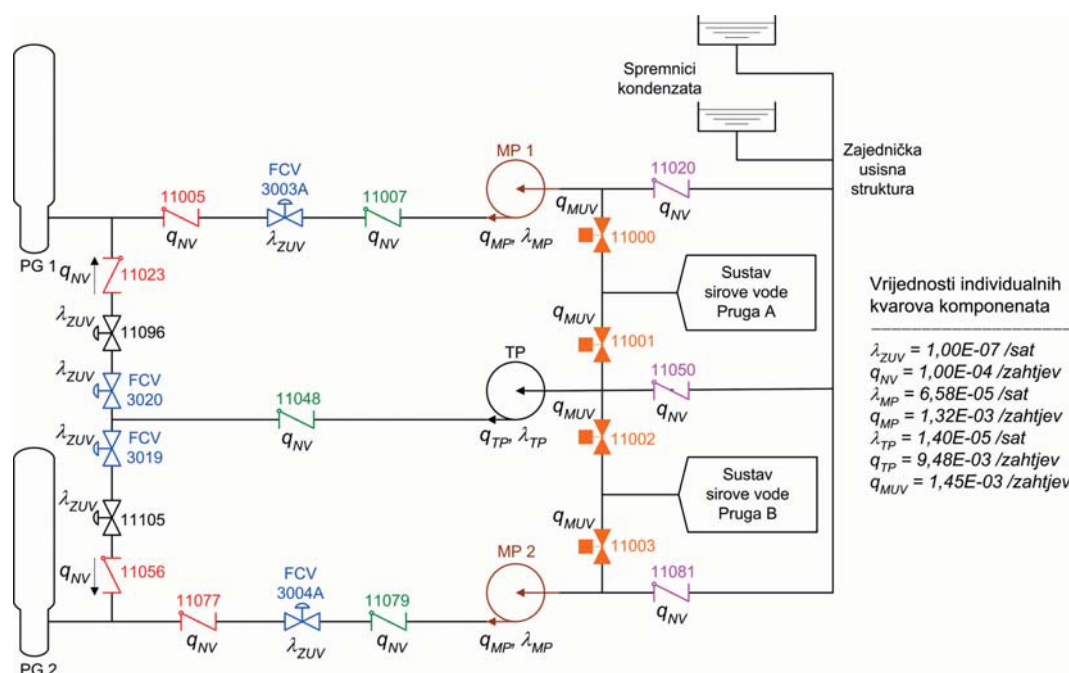
Slika 5. Shema pojednostavljenog protupožarnog sustava i ulazni parametri za proračun neraspoloživosti



Slika 6. Ovisnost vjerojatnosti kvara sustava o broju redundantnih grana sa i bez KZU

Pokazuje se da kod visokoredundantnih sustava dominantan doprinos u vrijednosti vjerojatnosti KZU ima upravo kvar svih komponentata u grupi. Uključenje KZU u VAS značajno ograničava smanjenje vjerojatnosti kvara sustava povećanjem broja redundantnih pruga. Stoga je izračun KZU parametara važno pitanje.

Drugi primjer analize KZU je na sustavu pomoćne pojne vode nuklearne elektrane. Pojednostavljeni dijagram toka ovog sustava prikazuje slika 7. Sustav se sastoji od tri pumpe (dvije motorne, A i B, s 50% kapaciteta i jednom turbinskom, C, sa 100% kapaciteta) čime je ispunjena



Slika 7. Dijagram toka sustava pomoćne pojne vode u nuklearnoj elektrani

potreba za zalihošću opreme i vrstu pogonskog sredstva. Na izlazu svake pumpe nalazi se i nepovratni ventil te lokalno nadzirani izolacijski ventil. On sprječava promjenu smjera toka vode kroz pumpu i omogućava održavanje nepovratnog ventila i pumpe.

Svaka električna pumpa napaja vodom pripadni parogenerator (izmjenjivač topline), dok turbinska pumpa osigurava dotok vode prema oba parogeneratora. Usisni dijelovi cjevovoda spojeni su na zajedničku usisnu strukturu vezanu na spremnike kondenzata. Za slučaj neraspoloživosti spremnika kondenzata postoji alternativni usis vode iz sustava sirove vode. Oba izlaza iz električnih pumpi i oba izlaza iz turbinske pumpe opremljena su normalno otvorenim

kontrolorima toka prema parogeneratorima. Nepovratni ventil i lokalno nadzirani izolacijski ventil smješteni su "nizvodno" od kontrolora toka. Na svakoj izlaznoj strani turbinske pumpe nalazi se pneumatski normalno otvoreni izolacijski ventil "nizvodno" od kontrolora toka koji sprječava previsok protok. Tablica 2 sadrži podatke o KZU grupama, modelima i parametrima za komponente ovog sustava.

Potrebno je naglasiti da turbinska pumpa nije modelirana u KZU-skupini s dvije motorne pumpe, budući da je ona funkcionalno različita. VAS ovog sustava provedena je uz pretpostavku da je za uspješan rad sustava dovoljno potrebno vrijeme rada u trajanju od 24 sata. Rezultati

Tablica 2. KZU-skupine, KZU-modeli i KZU-parametri za komponente sustava pomoćne pojne vode

Opis KZU-skupina	m	KZU-model	Komponente	β	γ	δ
KZU zrakom upravljanih ventila (ventili nadzora toka)	4	MGL	3003A, 3004A, 3019, 3020	5,97E-02	4,97E-01	5,21E-01
KZU nepovratnih ventila	3	MGL	11020, 11050, 11081	1,17E-01	6,92E-01	NA
KZU otvaranja linijskih izlaznih nepovratnih ventila	4	MGL	11005, 11023, 11056, 11077	1,31E-01	6,48E-01	8,72E-01
KZU otvaranja nepovratnih ventila na izlazima pumpi	3	MGL	11007, 11048, 11079	1,17E-01	6,92E-01	NA
KZU motorom upravljanih ventila	4	MGL	11000, 11001, 11002, 11003	5,97E-02	4,97E-01	5,21E-01
KZU zagona motornih pumpi	2	Beta faktor	MP1, MP2	1,32E-01	NA	NA
KZU nastavka rada (nakon uspješnog zagona) motornih pumpi tijekom 24h	2	Beta faktor	MP1, MP2	2,20E-03	NA	NA

pokazuju da vjerojatnost kvara sustava uz modelirane KZU iznosi $2,7 \cdot 10^{-4}$, odnosno 10% više u odnosu na slučaj kada su KZU zanemareni. Ilustracije radi, kada bi razmatranje dodatno "proširili" na vjerojatnosnu analizu posljedice "taljenje jezgre" zbog svih unutrašnjih početnih događaja, pokazuje se da bi domodeliranje KZU povećalo učestalost taljenja jezgre za 27%. Time se vidi kvantitativni učinak u podcjenjivanju neraspodivnosti sustava kada se zanemare KZU i stoga opet naglašava važnost modeliranja ove vrste kvarova u smislu izgradnje što realnijeg modela.

5. ZAKLJUČAK

Članak je opisao fenomenologiju kvarova sa zajedničkim uzrokom i mogućnosti njihovog matematičkog modeliranja u sklopu vjerojatnosnih analiza sigurnosti. Modeliranje KZU se u pravilu izvodi za skupine identičnih, funkcionalno "nerazličitih", aktivnih, redundantnih komponenti.

Detaljno su razrađeni postojeći općeprihvaćeni KZU-modeli: temeljni parametarski model, model beta-faktora, model grčkog alfabeta i model alfa-faktora. Danas je najrašireniji pristup modeliranja ove vrste kvarova modelom beta-faktora za skupine s dvije komponente te modelom grčkog alfabeta za skupne s više od dvije komponente.

Potrebni podaci za procjenu vjerojatnosti pojave KZU su broj neovisnih kvarova i broj višestrukih kvarova zbog zajedničkog uzroka. S obzirom da je često prisutan nedostatak podataka o kvarovima za analizirano postrojenje, koriste se parametri iz generičkih baza podataka. U slučaju postojanja podataka karakterističnih za postrojenje oni se trebaju iskoristiti za osvježavanje generičkih parametara primjenom Bayesove analize.

Kod tehničkih postrojenja primjenjuju se radni postupci, programi održavanja opreme i stalnog obučavanja i certificiranja pogonskog osoblja. Projekt s višestrukom zalihom, striktni postupci, i administrativne kontrole pokazale su se nedovoljno učinkovitim za potpuno sprječavanje kvarova sa zajedničkim uzrokom, time ponovno naglašavajući nužnost modeliranja ovih zavisnih kvarova.

Jednostavno zanemarivanje modeliranja kvarova sa zajedničkim uzrokom, odnosno modeliranje samo slučajnih statistički neovisnih kvarova, značajno bi podcijenilo neraspodivnost tehničkog sustava i dalo krive pokazatelje o važnosti zalihosti opreme i njenom prostornom smještaju u sustavu.

LITERATURA

- [1] V. MIKULIČIĆ – Z. ŠIMIĆ – I. VRBANIĆ: "Vjerojatnosna procjena tehničkih rizika", *Energija*, 51/2002/2, Zagreb, 2002, str.85-94.
- [2] V. MIKULIČIĆ – D. ŠKANATA – D. ŠINKA – Z. ŠIMIĆ – B. ČAVRAK: "Metode procjene i upravljanja rizikom u procesnoj industriji", Fakultet elektrotehnike i računarstva & Enconet International d.o.o., Zagreb, 1999.
- [3] V. MIKULIČIĆ – D. ŠKRLEC – B. TOMIĆ: "Racionalno korištenje energije i sigurnost industrijskih postrojenja"
- [4] International Atomic Energy Agency, "Procedures for Conducting Common Cause Failure Analysis in Probabilistic Safety Assessment", IAEA-TECDOC-648, 1992
- [5] K. N. FLEMING – S. B. RAO – G. A. TINSLEY – A. MOSLEH – A. AFZALI: "A Database of Common-Cause Events for Risk and Reliability Applications", EPRI TR-100382, Electric Power Research Institute, Paolo Alto, CA., 1992.
- [6] A. MOSLEH – K. N. FLEMING – G. W. PARRY – H. M. PAULA – D. M. RASMUSON – D. H. WORLEDGE: "Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies", NUREG/CR-4780, EPRI NP-5613, Electric Power Research Institute, Paolo Alto, CA., Vol. 1 (1998), Vol. 2 (1999)
- [7] I. BAŠIĆ: "Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plant Krško, Level 1 Report", Section 8 "Common Cause Analysis Notebook", Revision 1, NEK – Westinghouse, 1995
- [8] I. VUKOVIĆ – V. MIKULIČIĆ – I. VRBANIĆ: "Comparing Two Different Approaches to Modeling of the Common Cause Failures in Fault Trees", Proceedings of the 4th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Dubrovnik, June 16-20, 2002.
- [9] I. VRBANIĆ – I. KOŠUTIĆ – I. VUKOVIĆ – Z. ŠIMIĆ: "Presentation of Common Cause Failures in Fault Tree Structure of Krško PSA: An Historical Overview", Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe 2003, Portorož, September 8-11, 2003
- [10] R. JORDAN CIZELJ – I. VRBANIĆ: "Uncertainty Analysis of Multiple Greek Letter Parameters in Common Cause Failure Model", Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe 2003, Portorož, September 8-11, 2003.
- [11] Relcon AB, "Risk Spectrum Professional User's Manual", 1998
- [12] "Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plant Krško, Level 1 Report", NEK – Westinghouse, 1994.
- [13] S. HIRSCHBERG: "Dependencies, Human Interactions and Uncertainties in Probabilistic safety Assessment, Final Report of the NKA Project RAS 470", Nordic Liaison Committee for Atomic Energy, 1990.
- [14] D. M. RASMUSON – A. MOSLEH – F. M. MARSHALL: "Some General Insights from the USNRC's Common Cause Failure Database", Proceedings of the International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM4, New York, September 13-18, 1998.
- [15] I. VRBANIĆ – R. JORDAN CIZELJ: "Parameter Uncertainty in Level 1 PSA Model of Krško NPP with Focus on CCF", PSAM 7 – ESREL '04 Conference Proceedings, Berlin, June 14-18, 2004.

COMMON CAUSE FAILURES IN PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT OF TECHNICAL SYSTEMS

Nowadays technical systems' safety (power-generating, industrial, engineers' facilities) is a significant issue due to widespread usage of technological processes in modern society, increasing consequences of facilities' failures and their increased importance. Over the last thirty years the probabilistic safety analyses have been increasingly applied in technical engineering practice. Various failure modes of system of concern are mathematically and explicitly modelled by means of fault tree structure. Statistical independence of basic events from which the fault tree is built is not acceptable for an event category referred to as common cause failures. The paper considers the mathematical modelling of common cause failures within the fault trees of technical systems as a constituting part of the overall probabilistic safety assessment and gives the practical overview based on the experience gained so far.

FEHLER MIT GEMEINSAMER URSACHE IN DER WAHRSCHEINLICHKEITSANALYSIS DER SICHERHEIT TECHNISCHER SYSTEME

Wegen immer mehr ausgeprägten Rolle der Verfahrenstechnik in der modernen Gesellschaft, und immer grösserer und schwierigerer Folgen der Fehler in den Anlagen, stellt heuer die Sicherheit technischer Systeme (der energetischen, industriellen und gerätebaulichen Anlagen) einen wichtigen

Gegenstand der Einschätzung dar. In etwa dreissig letzten vergangenen Jahren findet die Anwendung solcher Einschätzungen in der technischen Ingenieur Tätigkeit immer mehr statt. Eigener Fehlerkern dient für die rein mathematische Formulierung verschiedener Fehlerarten des überprüften Systems. Statistische Unabhängigkeit der den Fehlerkern bildenden Grundereignisse ist für die Gattung der Fehler mit gemeinsamer Ursache nicht annehmbar. Im Rahmen der Wahrscheinlichkeitsanalyse werden im Artikel verschiedene mathematische Modellierungen der Fehler mit gemeinsamer Ursache in Fehlerkernen technischer Systeme erörtert und ein praktischer Rückblick auf Grund bisheriger Erfahrungen gegeben.

Naslov pisaca:

Igor Vuković, dipl. ing.

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

dr. sc. Ivan Vrbanić, dipl. ing.

**APoS – Analize pouzdanosti
i sigurnosti sustava**

Repovec 23b, 49210 Zabok, Hrvatska

dr. sc. Zdenko Šimić, dipl. ing.

prof. dr. sc. Vladimir Mikuličić, dipl. ing.

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

Uredništvo primilo rukopis:

2004 – 10 – 05.