

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

POSLIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

**UNAPRJEĐENJE POUZDANOSTI PROCESA PROIZVODNJE
U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI PRIMJENOM PFMEA
ANALIZE**

Nikola Banduka

Split, svibnja 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POUZDANOST PROCESA PROIZVODNJE U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI	3
2.1 Inženjering pouzdanosti	5
2.1.1 Pregled povijesnog razvoja inženjeringa pouzdanosti	6
2.2 Proces proizvodnje.....	7
2.3 Metode za analizu i poboljšavanje pouzdanosti procesa proizvodnje.....	8
2.4 Trenutno stanje.....	9
2.5 Budući trendovi.....	10
3. FMEA	12
3.1 Općenito o FMEA.....	12
3.2 Nedostaci FMEA.....	14
3.2.1 Nedostaci vezani za utjecaj ljudskog faktora na FMEA	14
3.2.2 Nedostaci FMEA strukture	15
3.2.3 Nedostaci FMEA procedure.....	16
3.3 Pregled literature	16
3.3.1 Pregled literature općenito	16
3.3.2 Pregled literature za FMEA u integraciji sa <i>Lean</i> pristupom.....	19
3.3.3 Pregled literature za FMEA po pitanju troškova.....	20
3.3.4 Pregled automatiziranih FMEA i softverskih rješenja	22
4. PFMEA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI	25
4.1 PFMEA procedura	25
4.2 PFMEA izvješće i prateća terminologija	27
4.3 PFMEA tim.....	31
4.4 Međunarodni standardi kojima je propisana PFMEA u automobilskoj industriji.....	32
4.4.1 PFMEA i IATF 16949:2016	32
4.5 Buduća istraživanja	34
5. ZAKLJUČAK	36
LITERATURA	37

POPIS OZNAKA I KRATICA	43
SAŽETAK.....	46

1. UVOD

U vrijeme početka globalne krize, kada je svijet počeo brinuti zbog ubrzane potrošnje globalnih rezervi nafte, znanstvenici su počeli pronalaziti nova rješenja za pogon automobila. Tako su se na tržištu pojavili automobili na struju, vodikove ćelije i sl. Neprekidni razvoj novih tehnologija i globalnih inovacija dovodi do opstanka automobilske industrije na svjetskom tržištu. Automobilska industrija sadrži bitan udio svjetskog globalnog tržišta i kao takva predstavlja veliki izazov za istraživače. Pored uvođenja inovacija u novim tehnologijama, poznati su i drugi primjeri revolucija u automobilskoj industriji. Na primjer, pojave novih efikasnijih i produktivnijih proizvodnih sustava.

Proces proizvodnje je jedan od važnijih segmenata proizvodnog sustava¹. Može se definirati kao skup ljudi, strojeva i opreme, materijala, i informacija s ciljem proizvodnje poluproizvoda ili gotovog proizvoda odnosno usluge. Proces proizvodnje se sastoji iz niza operacija. Prema Kostina [2] u današnjici uspjeh i održivost tvrtki na globalnom tržištu u velikoj mjeri zavisi od pouzdanosti procesa proizvodnje. Pouzdanost procesa proizvodnje podrazumijeva osiguranje stabilnosti operacija unutar procesa proizvodnje. Ta stabilnost se uglavnom postiže smanjivanjem grešaka² koje se javljaju tijekom procesa proizvodnje.

Pouzdanost procesa proizvodnje u automobilskoj industriji je u današnjici izrazito bitna iz više razloga. Kupci zahtijevaju proizvod isporučen točno na vrijeme, sa odgovarajućom kvalitetom i naravno uz prihvatljivu cijenu. Pouzdanost u ovom slučaju znači da će dogovoreni uvjeti prema kupcu biti ispunjeni. Da bi se to postiglo, neophodno je između ostalog zaštititi proizvod i tijekom procesa proizvodnje od pojave neželjenih zastoja, grešaka u proizvodnji i svih drugih neželjenih čimbenika ili aktivnosti koje bi mogle dovesti do neispunjavanja dogovorenih uvjeta sa kupcem. Preporuka autora Stamatasa [3] je da se ovakvi tipovi grešaka koji mogu poremetiti uvjete pouzdanog rada proizvodnog procesa, otklanjaju sustavom kvaliteta na izvoru, primarnije prevencijom nego detekcijom.

Najbolje klasificirana kvalitativna metoda za preventivno otklanjanje grešaka koje se javljaju tijekom procesa proizvodnje u automobilskoj industriji je analiza grešaka i njihovih posljedica u procesu proizvodnje, u literaturi poznatija kao PFMEA³ (Process Failure Mode and Effect Analysis). Ova analiza je propisana međunarodnim standardom koji se primjenjuje u automobilskoj industriji IATF 16949 [4]. Pored toga što je klasificirana kao najbolja metoda za osiguravanje pouzdanosti procesa proizvodnje u automobilskoj industriji, PFMEA ima veliki broj nedostataka koji mogu dovesti do propusta.

Tematika kojom će se baviti ovaj kvalifikacijski rad će biti usko vezana za prostor za poboljšavanje pouzdanosti procesa proizvodnje u automobilskoj industriji. Prvo će biti dat detaljniji osvrt na pouzdanost procesa proizvodnje u automobilskoj industriji. Zatim će se navesti osnove o FMEA, da bi se bolje mogla shvatiti PFMEA, sa osvrtom na detaljan pregled literature odnosno na trenutno stanje. Na kraju će biti detaljnije objašnjen okvir PFMEA

¹ Proizvodni sustav se može definirati kao kombinacija ljudi, strojeva i opreme međusobno povezanih u cjelinu preko toka materijala i informacija. Ova cjelina ima za cilj pretvaranje ulaza u željeni izlaz koji je uglavnom u obliku gotovog proizvoda/usluge/informacije. Neke od aktivnosti koje se realiziraju unutar proizvodnih sustava su: dizajn proizvoda, proces proizvodnje, planiranje procesa, kontrola proizvodnje, održavanje, itd. [1].

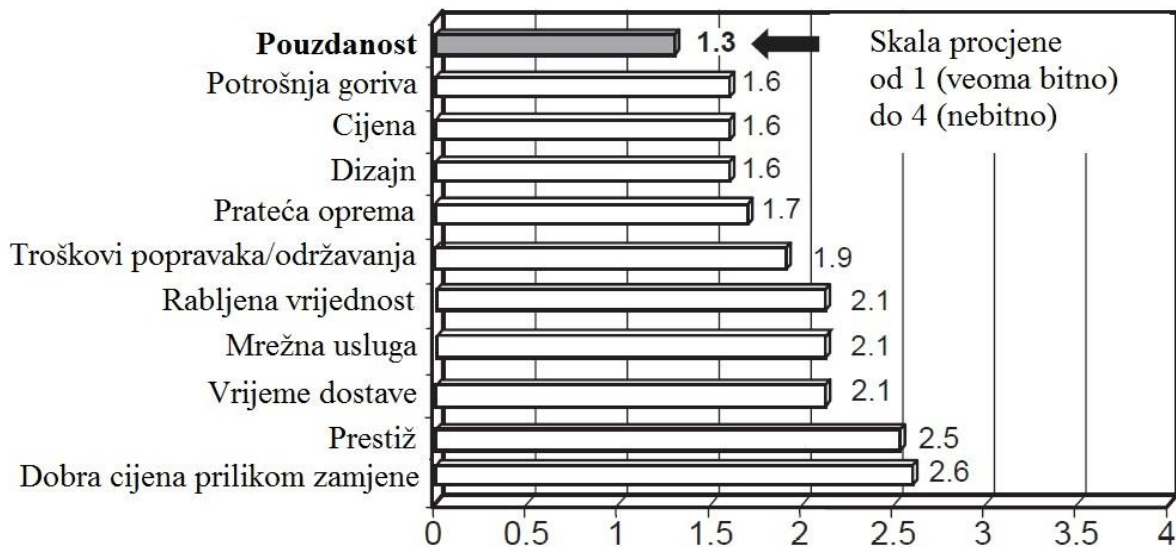
² Greška ili defekt (može biti i odstupanje ili kvar) u proizvodnji se definira kao režim u kome proizvod ili proces ne ostvaruju svoju primarnu funkciju na odgovarajući način.

³PFMEA je skraćenica od engleskog naziva „Process failure mode and effect analysis“ što bi u prijevodu značilo – Analiza režima grešaka i posljedica koje te greške izazivaju. Konkretno se odnosi na proces proizvodnje. Obzirom na to da skraćenica sadrži u sebi riječ analiza, u daljem tekstu će biti korišten samo skraćenica PFMEA bez analiza. Ovo se odnosi i na ostale skraćenice koje definiraju ovu metodu.

namijenjene za potrebe automobilske industrije sa osvrtom na buduće trendove za dalja istraživanja.

2. POUZDANOST PROCESA PROIZVODNJE U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

Općenito pouzdanost u automobilskoj industriji igra jako bitnu ulogu. O tome može posvjedočiti i studija o relevantnosti kriterija pri odabiru automobila od strane kupaca (Slika 2.1). U studiji je postavljeno 11 ključnih kriterija i to: pouzdanost, potrošnja goriva, cijena, dizajn, prateća oprema, troškovi popravaka/održavanja, rabljena vrijednost, mrežna usluga, vrijeme dostave, prestiž i dobra cijena prilikom zamjene. Kriteriji su ocjenjeni pomoću skale od 1 (veoma bitno) do 4 (nebitno). Prema ispitanim kupcima, pouzdanost je na prvom mjestu kao najbitnija, sa vrijednošću 1.3 na skali procjene. Samo su troškovi/cijena u nekoliko slučajeva bili bitniji od pouzdanosti [5].



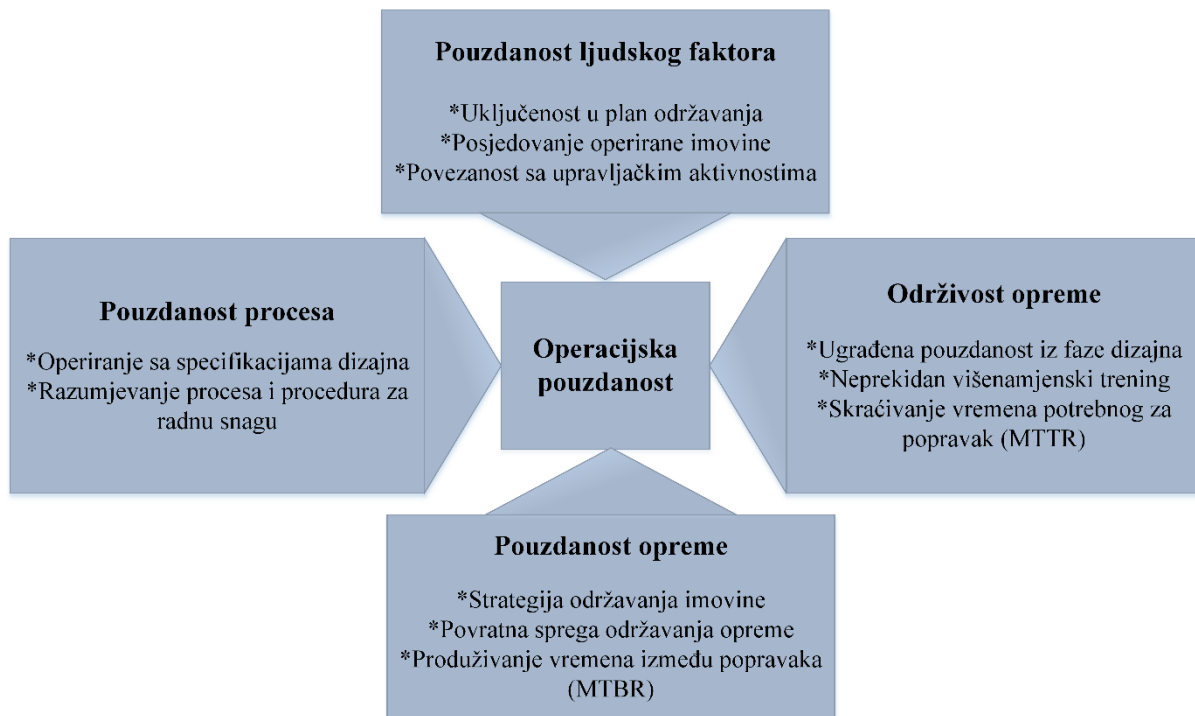
Slika 2.1. Kriteriji kupaca pri kupovini automobila [5].

Prema prethodno navedenoj studiji, očigledno je da kupci prvenstveno žele pouzdan proizvod. Da bi im se to omogućilo, veoma je bitno da proizvod bude pouzdan tijekom cijelog svog životnog ciklusa. Bertsche [5] ističe da su mnoge tvrtke potvrdile tu mogućnost, te je prema tome njihova preporuka da bi metode za unaprjeđenje pouzdanosti trebalo uvesti što ranije kako bi se dobila bolja profitabilnost. Od navedenih metoda se izdvajaju dva tipa koje se najčešće koriste i spominju u literaturi, a to su kvalitativna i kvantitativna.

Proces proizvodnje je jedan jako bitan dio životnog ciklusa proizvoda, te se prema tome mora obratiti posebna pozornost na osiguranje pouzdanosti procesa proizvodnje. Pouzdanost procesa proizvodnje neki od autora definiraju i kao operacijska pouzdanost [2, 6]. Termin operacijska pouzdanost je navodno prvi upotrijebio Duran još 2000. godine, ali takav podatak ne postoji nigdje osim u literaturama [2, 6]. Prema Duranovoj definiciji, operacijska pouzdanost je fleksibilni proces koji optimizira ljude, procese i tehnologiju u cilju podizanja dostupnosti⁴ i dodatne vrijednosti proizvodnih sredstava. Operacijska pouzdanost se sastoji iz četiri ključna segmenta: pouzdanosti ljudskog faktora, pouzdanosti opreme, održavanja opreme i pouzdanosti procesa (prikazano na Slici 2.2). Obzirom na to da je izvor nepouzdan, u ovom radu će biti

⁴ Dostupnost je širi pojam koji izražava omjer dostavljene usluge u odnosu na očekivanu [7].

zadržan termin pouzdanost procesa proizvodnje, dok će se operacijska pouzdanost razmatrati kao sinonim.



Slika 2.2 Čimbenici koji utječu na operacijsku pouzdanost prema Duranu [2, 6].

Nepouzdan proces proizvodnje može dovesti do serija grešaka na proizvodima, a u najgorem slučaju se to može otkriti tek kada proizvodi stignu do kupaca. Kvantitativne metode koje se koriste za procjenu i unaprjeđenje pouzdanosti proizvodnih procesa su uglavnom statističke metode i teorije vjerojatnosti. Sa druge strane, kao kvalitativna metoda se u automobilskoj industriji za osiguravanje pouzdanosti procesa proizvodnje najčešće koristi PFMEA.

Birolini [7] je identificirao 10 osnovnih aktivnosti koje treba sprovoditi da bi se osigurala pouzdanost faze procesa proizvodnje:

1. Upravljanje konfiguracijom proizvoda. Dakle, pregled i uvođenje dokumentacije, kontrole, i predračuna, nakon uvedenih promjena i modifikacija.
2. Odabir i kvalifikacija proizvodnih postrojenja i procesa.
3. Praćenje i kontrola proizvodnih procedura.
4. Zaštita od oštećenja u toku procesa proizvodnje.
5. Sustavno prikupljanje, analiza i korekcije grešaka koji se javljaju u procesu proizvodnje.
6. Osiguravanje kvalitete i pouzdanosti u toku nabave (pregled dokumentacije, ulazna kontrola, audit dobavljača, itd.).
7. Kalibracija mjerne i testne opreme.
8. Performance unutar procesa i završnog testiranja.
9. Prikazivanje kritičnih komponenti i sklopova.
10. Optimiranje troškova i vremenskog planiranja za testiranje i prikazivanje.

Što se tiče povijesnog razvoja pouzdanosti procesa proizvodnje u automobilskoj industriji, može se reći da se može podijeliti u dvije faze. Prva faza u kojoj se javila potreba za inženjeringom pouzdanosti proizvodnih procesa u automobilskoj industriji se vezuje za pojavu

masovne proizvodnje, a prvi put se javila u tvrtki Ford Motors početkom dvadesetog stoljeća. Obzirom na to da je tada ova tvrtka više bila usmjerena prema fazi razvoja proizvoda, nego fazi procesa proizvodnje, taj koncept tada nije primijenio u nekoj ozbiljnijoj mjeri. Ozbiljnija potreba za inženjeringom pouzdanosti proizvodnih procesa u automobilskoj industriji je nastala 1980-ih godina, kada su japanska automobilska poduzeća (najviše Toyota) iznenadila američko tržište svojim proizvodima odgovarajuće kvalitete i prihvatljive cijene. Umjesto masovne proizvodnje, japanske automobilske tvrtke su proizvodile samo ono što bi kupac od njih naručivao, te je fokus ovih tvrtki bio najviše usmjeren prema procesu proizvodnje. Vremenom je ovaj način poslovanja i proizvodnje doveo japanske automobilske tvrtke na sam vrh svjetske liste proizvođača, te je interes za Japanskim konceptom proizvodnje znatno poraslo zadnjih desetljeća. Današnji popularni Japanski koncept pouzdanosti proizvodnih procesa u užem smislu se opisuje riječju „*lean*“ koja u suštinskom prijevodu znači *vitak, uzak*. *Lean* je američka riječ koja se danas u svijetu koristi da bi se opisao Toyotin proizvodni sustav.

U sljedećim potpoglavljima će biti produbljena tema pouzdanosti iz inženjerskog aspekta, s osvrtom na povijesni pregled. Zatim će biti malo više riječi o procesu proizvodnje općenito. U nastavku je dat dublji pregled kvalitativnih i kvantitativnih metoda. Na kraju je naveden kraći osvrt na trenutno stanje i buduće trendove vezane za pouzdanost procesa proizvodnje.

2.1 Inženjering pouzdanosti

U globalu se termin pouzdanost može definirati kao sposobnost neke organizacije⁵ da ispuni unaprijed definirane uvjete i zahtjeve, u određenom vremenskom roku. Pouzdanost se uglavnom može promatrati iz dva ključna gledišta: gledište kupca/korisnika i gledište proizvođača. Iz gledišta kupca/korisnika pouzdanost podrazumijeva ispunjavanje svih dogovorenih uvjeta i karakteristika vezanih za gotovi proizvod/uslugu. Sa druge strane, prema Birolini [7] pouzdanost iz gledišta proizvođača znači da će proizvod biti proizveden prema odgovarajućim zahtjevima kupca u dogovorenom vremenskom roku i prema dogovorenoj cijeni. Obzirom na to da se ovaj kvalifikacijski rad bavi inženjerskom tematikom, u fokusu rada će biti inženjering pouzdanosti proizvodnih procesa. Prema literaturi se inženjering pouzdanosti najčešće definira kao vjerojatnost da će neki predmet⁶ izvršiti zahtijevanu funkciju bez režima greške u datom vremenskom roku, pri određenim uvjetima [8]. Osnovne vještine koje su potrebne za efikasno upravljanje inženjeringom pouzdanosti su inženjersko znanje i iskustvo primijenjeno u fazi razvoja ili proizvodnje. Inženjering pouzdanosti se prema tome može kvantificirati ili kvalificirati primjenom raznih alata, metoda i tehnika u zavisnosti od faze u kojoj se proizvod nalazi. Uglavnom su to dvije faze: faza dizajna/razvoja i faza proizvodnje/operacija.

O'Connor [7] je identificirao četiri osnovna cilja inženjeringa pouzdanosti koji su navedeni prema prioritetu:

1. Primjena stručnih i znanstvenih inženjerskih tehnika u cilju prevencije ili smanjenja pojave grešaka.
2. Otkrivanje i otklanjanje uzroka grešaka, unatoč naporima da se spriječe.
3. Iznalaženje načina za suočavanje sa greškama koje se javljaju, ukoliko njihovi uzroci nisu otklonjeni.

⁵ Organizacija u ovom kontekstu predstavlja širi termin kojim se opisuju poduzeća, tvrtke, korporacije, i slično.

⁶ Predmet u ovom slučaju podrazumijeva objekat za koji se promatra pouzdanost. Dakle to može biti u zavisnosti od aspekta promatranja, proizvod, sustav, proces, oprema, radnik, i sl.

4. Primjena metoda za procjenu pouzdanosti novog stanja, ali i za analiziranje podataka o pouzdanosti.

U nastavku poglavlja će biti napravljen pregled razvoja i uporabe termina pouzdanost općenito i inženjering pouzdanosti kroz povijest, uz osvrt na pojavu i definiranje standarda kojima je pouzdanost propisivana u industrijama.

2.1.1 Pregled povijesnog razvoja inženjeringa pouzdanosti

Mnogi autori se slažu sa činjenicom da se inženjering pouzdanosti ne bi mogao zamisliti bez vjerojatnosti i statistike. Obzirom na to da se vjerojatnost prvi put počela koristiti za potrebe igara i kockanja još u 17. stoljeću, može se reći da su se tada pojavili prvi uvjeti za procjenu inženjeringa pouzdanosti. Teoriju koju je postavio znanstvenik Paskal, unaprijedio je Laplas 1812. godine. Laplas je predstavio seriju novih tehnika i proširio primjenu teorije vjerojatnosti pri rješavanju praktičnih problema poput: demografije, procjene populacije, životnog osiguranja, itd. [9].

Prva ozbiljnija potreba za inženjeringom pouzdanosti se javila sredinom 19. stoljeća i početkom 20. stoljeća. Uzrok tome je bila pojava masovne proizvodnje standardiziranih proizvoda u većim količinama. Tvrtke koje su među prvima počele uvoditi takav vid proizvodnje su Springfieldska oružarnica 1863. godine koja se bavila proizvodnjom pušaka i Ford Motors 1913. godine proizvodnjom automobila modela T [9]. U to vrijeme se nije mnogo pridavalo važnosti kvaliteti, već je težište bilo usmjereno prema proizvodnji što većih količina proizvoda. Prema tome je stupanj nepouzdanosti proizvoda bio u daleko većoj mjeri nego što je to danas.

U biti se može reći da su statistika i masovna proizvodnja bili glavni čimbenici za pojavu inženjeringa pouzdanosti i da je samo bilo pitanje vremena kada će se javiti potreba za upravljanju pouzdanošću. Događaj koji je ubrzao pojavu inženjeringa pouzdanosti je II svjetski rat. Pojačana potreba za vakumskim cijevima (1906. godine izmišljene od strane Lee de Foresta) koje su tada bile nepouzidane, a jako bitne, je dala poticaj inženjerima da bolje obrate pozornost na pouzdanost vakumskih cijevi.

Inženjering pouzdanosti je kao disciplina nastao sredinom 1950-ih u SAD [8]. Ubrzan napredak elektronske industrije je doveo do potrebe za evolucijom razvoja i proizvodnje elektronskih komponenti, te je samim tim proizvodnja postala kompliciranija i nepouzdanija. Stoga je 1952. godine odjel za obranu SAD i elektronska industrija zajednički uspostavili *Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment* (AGREE) grupaciju. Misija AGREE je bila da [10]:

1. Preporučiti mjere koji će povećati pouzdanost opreme
2. Pomaganje pri implementaciji programa pouzdanosti u vladinim i građanskim agencijama
3. Širenje obrazovanja o pouzdanosti

AGREE grupacija je odmah potom otpočela složena ispitivanja elektronske opreme. Njihov način ispitivanja opreme je ubrzo postao standardna procedura, jer se pokazao kao vrlo učinkovit. Prvo zvanično pojavljivanje inženjeringa pouzdanosti kao discipline se se javlja 1957. u izvješću AGREE. Odjel za obranu je odmah potom ponovno izdao AGREE izvješće za testiranje, samo pod nazivom „*Reliability Qualification and Production Approval Tests*“, kao Vojni standard SAD (MIL-STD-781) [8].

Saleh i Marais [9] su identificirali dva smjera napretka inženjeringa pouzdanosti u 1960-im godinama:

1. Pojačana specijalizacija unutar inženjeringa pouzdanosti kao discipline, koja se dalje razvila u tri smjera:
 - Pojačana primjena statističkih tehnika poput: modeliranja redundancije, *Bayesian*-statistike, Markove analize, itd.)
 - Fizika grešaka na komponentama (iz koje je proizašla fizika pouzdanosti)
 - Strukturna pouzdanost koja se odnosi na strukturni integritet zgrada, mostova, i dugih građevinskih i konstrukcijskih objekata.
2. Prelazak pouzdanosti sa razine komponente na razinu aktivnosti unutar sustava (pouzdanost sustava, pouzdanost procesa, efektivnost, dostupnost, itd.). Ova strana je omogućila ubrzan razvoj složenih inženjerskih sustava za potrebe vojnih i svemirskih programa poput: ICBM, F-111, Mercury, Gemini, Apollo, itd.

1970-ih godina je pouzdanost igrala ključnu ulogu u razvoju novih tehnologija, sigurnosti sustava, i softvera [9]. Knight [11] navodi da su uređaji sa integracijom velikih razmjera (LSI uređaji) doveli do glavnih promjena kod elektronskih tehnologija, što je uzrokovalo novom potrebom za poboljšanjem pouzdanosti. Prema tome se mogu naglasiti tri područja u kojima je povećan interes za pouzdanošću [9]:

1. Pouzdanost na razini sustava i sigurnosti. Neke od industrija kod kojih je povećan interes u ovom području su industrija nafte i plina, kemijska industrija i industrija nuklearnih elektrana.
2. Razvoj softverske pouzdanosti.
3. Poboljšanje pouzdanosti garancija. Ovo područje se uglavnom odnosilo na povećanje pouzdanosti garancija za vojnu industriju.

1980-ih godina je standarde za pouzdanost počela uvoditi i Velika Britanija. Britanska institucija za standarde je razvila standard BSS 5760 pod nazivom „*Guide on Reliability of Systems, Equipment and Components*“ [9].

Zatim samo destljeće kasnije, 1990-ih je uvođenje standarda pouzdanosti postao trend i širom Europe. Serija Europskih standarda pouzdanosti⁷ koja se počela razvijati 1990-ih, kasnije je integrirana u ISO. Jedan od takvih primjera je ISO/IEC 60 300 standard kojim su opisani koncept i principi sustava upravljanja pouzdanošću⁸ [9]. 1990-e godine je pouzdanost također obilježio ubrzan razvoj tehnologije, koji je doveo do dostupnosti računala široj društvenoj zajednici po prihvatljivim cijenama [12].

2.2 Proces proizvodnje

Proizvodnja predstavlja jedan od ključnih segmenata industrijskih aktivnosti i zauzima oko 20-30% ukupne vrijednosti svih proizvedenih dobara ili pruženih usluga. Rao [13] je definirao proizvodnju kao primjenu strojarskih, fizičkih i kemijskih procesa s promjenom geometrije, svojstava, i/ili izgleda sirovine u cilju dobivanja gotovog proizvoda ili poluproizvoda. Prema potrebi se proizvodnja može podijeliti na proizvodnju koja se bavi proizvodnjom određenih dijelova (proizvodnja) i na proizvodnju koja se bavi spajanjem već proizvedenih dijelova (montaža) [14]. Neke od aktivnosti koje se sprovode u toku proizvodnje su: upravljanje

⁷ Europski standardi pouzdanosti su pored pouzdanosti podrazumjevali i održivost, dostupnost i sigurnost. Razlika između ove pouzdanosti i pouzdanosti koja je tema kvalifikacijskog rada je pored navedenih čimbenika i u prijevodu na engleski jezik. Pouzdanost se izvorno prevodi *Reliability*. Dok se druga pouzdanost koja je prisutna u tim Europskim standardima pouzdanosti iz 1990-ih godina, prevodi kao *Dependability*.

⁸ Odnosi se na pouzdanost koja se prevodi kao *Dependability*

dokumentacijom i dizajnom proizvoda, izbor materijala, planiranje, proces proizvodnje, osiguravanje kvalitete, marketing, itd.

Proces montaže predstavlja jedan od dva tipa proizvodnje i može funkcionirati na tri načina (odnosno kombiniranjem): rukovanjem, sastavljanjem i kontrolom [15]. Sa druge strane, proces proizvodnje predstavlja jednu od bitnih aktivnosti u toku same proizvodnje. Ubrzanim napretkom tehnologije, naročito posljednjih desetljeća, proces proizvodnje je postao vrlo složen. Proces proizvodnje koji se odnosi na proizvodnju gotovih dijelova se može klasificirati u pet glavnih kategorija [13]:

1. Procesi kojima se mijenja oblik materijala. Za ovaj tip procesa se obično koriste mehaničke ili toplinske sile kako bi se promijenila geometrija materijala. Neki od tih procesa su: lijevanje i toplo i hladno deformiranje (na primjer: kovanje, istiskivanje, valjanje, stezanje, itd.), operacije za obradu lima (probijanje, savijanje, odsijecanje, itd.), plastično oblikovanje, itd.
2. Procesi kojima se obrađuju dijelovi prema određenim dimenzijama. U ove procese spadaju konvencijalna obrada odvajanjem čestica (bušenje, oblikovanje, brušenje, razvrtanje, glodanje, honovanje, poliranje, tokarenje, itd.) i nekonvencijalna obrada odvajanjem čestica.
3. Procesi koji se koriste za obradu površina. U ove procese spadaju operacije čišćenja (uklanjanje prljavštine, ulja i sličnih sastojaka s površine predmeta obrade), površinske operacije (pjeskarenje, difuziranje, jonska transplatacija, itd.), operacije premazivanja (galvanizacija, anodizacija, itd.) i procesi taloženja tankih slojeva (fizičko taloženje pare, kemijsko taloženje pare, itd.)
4. Procesi koji se koriste za spajanje dijelova. To su uglavnom: zavarivanje, lemljenje, sinteriranje, prešanje, zakivanje, itd.
5. Procesi koji se koriste za poboljšavanje svojstava materijala. Neki od tih procesa su: žarenje, normalizacija, kaljenje, sinteriranje, itd.

2.3 Metode za analizu i poboljšavanje pouzdanosti procesa proizvodnje

Kao što je već prethodno napomenuto, postoje dva tipa metoda za procjenu i analizu pouzdanosti procesa proizvodnje: kvantitativne i kvalitativne metode. Kvantitativne metode se prvenstveno temelje na statističkim metodama i teorijama vjerojatnosti i određuju se na osnovu već poznatih podataka. Kvantitativne metode se temelje na predviđanju pouzdanosti, određivanju stope grešaka, analiziranju vjerojatnosti u pouzdanosti, i sl. Neke od metoda koje se koriste za ove potrebe su: Boolean analiza, Markova analiza, FTA (*Failure three analysis*), itd. Sa druge strane, kvalitativne metode se baziraju na određivanju grešaka, njihovih posljedica, ali i uzroka koji su doveli do pojave greške, uglavnom na osnovu mišljenja eksperata. Jednom riječju sistematički pristup identificiranju cijele konstrukcije greške. Neke od metoda koje se najčešće koriste su: FMEA/FMECA, analiza slijeda događaja, spiskovi, FTA (FTA može biti i kvalitativna i kvantitativna metoda). FMEA nalazi najveću primjenu od svih kvalitativnih metoda.

I poslije uvođenja analitičkih metoda, i preventivskih i korekcijskih mjera, u sustavu i dalje postoji mogućnost pojave nekih odstupanja uzrokovanih od strane različitih čimbenika koji utječu na proces proizvodnje (na primjer ljudski faktor). Najbitnije je da se ta odstupanja reguliraju uvođenjem sustava i metoda za neprekidno unaprjeđivanje. Uvođenje ovakvih metoda i tehnika smanjuje troškove i mogućnost od ponovne pojave grešaka, a ujedno povećava pouzdanost i produktivnost procesa proizvodnje. Neke od tih metoda su [8]:

- Upotreba jednostavnih dijagrama. Dijagrami se najčešće koriste da bi se identificirali i riješili problemi odstupanja. Neki od primjera tih dijagrama su Pareto dijagram (još poznat i kao princip 80/20) i dijagram uzroka i posljedica (još poznat i kao Isikawa dijagram ili riblja kost).
- Kontrolni plan. Kontrolni planovi se često koriste nakon uvođenja nekih korektivnih ili preventivnih mjera u procesu proizvodnje, a naročito ako postoje neke specijalne karakteristike (preporučene od strane kupaca ili definirane od strane dobavljača ili proizvođača). Neke od ovih specijalnih karakteristika mogu biti: fluktuacije temperature, odstupanja u procesu između i nakon postavke, promjena operatera, promjena materijala, itd. Jako je bitno da se prati vrijeme i datum na kontrolnom planu da bi se otkrili uzroci ovakvih promjena.
- Dijagrami višestruke ovisnosti. Ovaj tip dijagrama se koristi za identificiranje glavnih uzroka odstupanja u procesu, ako na neki proces utječe više čimbenika. Mogu se koristiti za razvoj procesa i/ili za rješavanje problema, a ujedno su vrlo efikasni prilikom smanjenja brojnih odstupanja koje bi trebalo uključiti u statističku analizu.
- Statističke metode. Ove metode su prethodno navedene da spadaju u kvantitativne metode, ali se isto tako efektivno mogu koristiti za smanjenje odstupanja u toku procesa proizvodnje. U osnovi se koriste za unaprjeđenje procesa proizvodnje, kao i prilikom inicijalnog dizajna procesa ili proizvoda.
- „Bez greške“. Ova metoda je više kao idejni koncept ili težnja u današnjici. Ovaj pristup kontroli kvalitete je razvijen u SAD 1960-ih. Neki od koncepata koji se bave ovim tipom pristupa su Lean i 6 sigma.
- Krugovi kvalitete. Ova metodologija se javila 1950-ih u Japanu, a danas je u primjeni širom svijeta. Zasniva se na učenju radnika da prate značajke kvalitete, da analiziraju probleme i predlažu rješenja menadžmentu. Radnici se okupljaju u manje radne grupe i biraju među sobom voditelja grupe. Ove grupe su sa ograničenim ovlastima. Prema tome radnici mogu uvesti neka rješenja i bez odobrenja od strane menadžmenta, ali u području njihovih ovlasti. Ona rješenja koja nisu u njihovoj ovlasti moraju prvo predstaviti menadžmentu. Radne grupe uče sedam alata kvalitete⁹ koje kasnije primjenjuju pri rješavanju problema. Da bi radne grupe funkcionirale prema ovom principu, potrebno je da budu upoznati s *Kaizenom* (japanska riječ za kontinuirano unaprjeđenje).

2.4 Trenutno stanje

U današnjici su jako popularni novi koncepti proizvodnje sa svojim pratećim alatima, metodama i tehnikama. Koncepti koji su najpopularniji u automobilske industriji su Lean koncept proizvodnje i Šest sigma. Lean je i nastao kao odgovor na potrebu za radikalnom promjenom principa procesa proizvodnje u automobilske industriji. Te su unutar tvrtke Toyota razvijene različite metode koje se bave prvenstveno prevencijom i korekcijom grešaka koje se javljaju u toku procesa proizvodnje, što dovodi do povećanja pouzdanosti procesa proizvodnje. Sa druge strane Šest sigma je koncept u kome su svi poznati alati, metode i tehnike sabrani u cilju poboljšanja pouzdanosti, efikasnosti, produktivnosti, i poslovanja općenito. Oba koncepta imaju za cilj težnju ka osiguravanju apsolutne pouzdanosti, odnosno anuliranje grešaka u procesu proizvodnje. Lean se služi principom „nula grešaka“, dok koncept Šest sigma ima raspon od jedan do šest sigma, u kome šesto sigma predstavlja nultu grešku.

⁹ Sedam alata kvalitete su: 1. Brainstorming; 2. Prikupljanje podataka; 3. Metode za analiziranje podataka; 4. Pareto dijagram; 5. Histogram; 6. Ishikawa dijagram; 7. Dijagram statističke procesne kontrole.

Formalno, pouzdanost u automobilskoj industriji je uglavnom određena standardima kvalitete ISO 9000 i IATF 16949. Unutar ISO 9000, pouzdanost je općenito definirana klauzulom 3.5.3 Pouzdanost¹⁰, kao jedan od termina koji se koristi da bi se opisale karakteristike kvalitete [16]. U okviru IATF 16949 se pouzdanost procesa proizvodnje spominje u nekoliko poglavlja, koje će biti detaljnije objašnjene u narednim poglavljima.

Kvantitativne metode nisu određene standardima i uglavnom njihova upotreba unutar tvrtki ovisi od razine razvoja tvrtke. Kvalitativna metoda koja se najčešće koristi za analiziranje i procjenu rizika¹¹ i pouzdanosti kod procesa proizvodnje, a koja je propisana standardom kvalitete IATF 16949 je PFMEA. Upotreba PFMEA prilagođene za automobilsku industriju, je bliže određena priručnikom „Potential FMEA“ objavljenog od tvrtki General Motors, Ford i Chrysler. Obzirom na to da postoje mnogobrojne studije koje pokazuju da PFMEA nije baš potpuno pouzdana analiza, a primarna funkcija joj je procjena pouzdanosti ili rizika, trebalo bi obratiti više pozornosti na implementaciju i upotrebu ove analize u automobilskoj industriji. Jedan od najvećih problema implementacije ove metode je ovisnost o ljudskom faktoru, koja može za posljedicu imati neka odstupanja unutar procesa proizvodnje. Pored ovog problema, PFMEA sadrži i brojne konceptijske probleme koji dovode do nepraktičnosti prilikom upotrebe, te ova analiza vremenom postaje samo još jedan administrativni proces. Još jedan od problema i nelogičnosti kod PFMEA je preporuka da se PFMEA treba upotrebljavati kao živi dokument, odnosno da bi je trebalo tokom vremena dopunjavati i modificirati unošenjem novih podataka. Praktički se može reći da postoji potreba da PFMEA postane i kvantitativna i kvalitativna metoda u jednom, te mnoge kompanije koriste različite softvere.

2.5 Budući trendovi

Obzirom na činjenicu da je tehnologija u današnjici u porastu više nego ikada, proizvodni sustavi, a samim tim i procesi proizvodnje će biti sve složeniji i složeniji. Povećana složenost procesa proizvodnje općenito dovodi i do odstupanja, te se pouzdanost procesa proizvodnje proporcionalno smanjuje. Prema tome, može se reći, da će u budućnosti postojati povećana potreba za sveobuhvatnijim rješenjima za upravljanje pouzdanošću proizvodnih procesa. Zio [12] također u svom radu predviđa potrebu za efikasnijom praktičnom primjenom i teoretskim napretkom sustava pouzdanosti. Prema prethodnom pregledu literature može se izvesti zaključak da će u budućnosti postojati povećana potreba za:

- Detaljnijim regulacijskim okvirima kojima će se definirati utjecaj korištenja metoda pouzdanosti u praksi [12].
- Uključenošću čimbenika sigurnosti u toku procesa proizvodnje, kao i sigurnosti proizvoda nakon proizvodnje od potencijalnih utjecaja nastalih tijekom proizvodnje.
- Uključenošću čimbenika kvalitete proizvoda u toku procesa proizvodnje, kao i održivosti kvalitete proizvoda nakon proizvodnje.
- Uključenošću troškova prilikom analize pouzdanosti proizvodnih procesa [12]. Neki troškovi poput troškova osiguranja ili pokretanjem tužbi, kao i troškova nastalih zbog škarta moraju biti na neki način praćeni i kalkulirani, jer indirektno utječu na pouzdanost.

¹⁰ Odnosi se na pouzdanost koja se prevodi kao *Dependability*

¹¹ Rizik kao termin je definiran od strane autora na različite načine. Neki ga definiraju kao vjerojatnost pojave štete, neki kao vjerojatnost da će se dogoditi povrijeda na radu ili gubici, itd. Uglavnom, najveći broj definicija rizika sadrži dva osnovna elementa: 1. Vjerojatnost da će se rizik pojaviti; 2. Posljedice koje će rizik izazvati (troškovi, povrijeđeni na radu, gubici, itd.). Može se reći da rizik u ovom slučaju predstavlja vjerojatnost da će se neka greška pojaviti i izazvati neželjeno djelovanje na proizvod, proces proizvodnje ili okruženje (opremu, ljudski faktor, infrastrukturu, itd.).

- Uključenošću utroška vremena potrebnog da se sprovedu analize pouzdanosti procesa proizvodnje [12]. U tvrtkama obično ne postoji samo jedan zaposleni koji se bavi isključivo problemom pouzdanosti procesa proizvodnje, te više zaposlenih moraju odvojiti svoje vrijeme za obavljanje ovih poslova. Obično se to smatra dodatnom aktivnošću u opisu posla koja je često dugotrajna. Ovo može dovesti do demotiviranosti zaposlenih da procjenjuju pouzdanost na odgovarajući način.
- Sveobuhvatnom bazom podataka u koju će biti svrstani svi podaci, neophodni da bi se osigurao pouzdan proces proizvodnje [12]. Sveobuhvatna baza podataka bi mogla biti od velikog značaja za donošenje odluka, kalkuliranje i predviđanje grešaka, ali i kao model za pristup pouzdanosti svih procesa proizvodnje unutar jednog proizvodnog sustava.
- Odgovarajućim razumljivim softverom koji bi mogao povezati sve prethodno navedene elemente u jednu cjelinu [12]. Svi ovi čimbenici ne bi mogli funkcionirati posebno, odnosno ne postoji mogućnost da bi se jedna osoba mogla baviti ujedno svim ovim čimbenicima. Stoga postoji potreba za softverskim rješenjem koje će pomoći da se znatno olakša kontrola i smanji količina obrade podataka neophodnih da bi se pratila pouzdanost procesa proizvodnje.

3. FMEA

Da bi se uloga PFMEA mogla shvatiti na odgovarajući način neophodno je prvo razumjeti FMEA općenito. Pod tim se podrazumijevaju počeci FMEA sa povijesnim pregledom, zatim područja primjene FMEA, tipovi FMEA i sl. FMEA je analiza koja je u upotrebi dugi niz godina u različitim područjima primjene, a opet kao takva ima veliki broj nedostataka. U ovom poglavlju će također biti napravljen cjelokupan i sveobuhvatan pregled nedostataka tradicionalne FMEA sa osvrtom na dosadašnja istraživanja izvršena u cilju otklanjanja tih nedostataka i problema koje navedeni nedostaci izazivaju. Poseban osvrt će biti dat na tri posebna trenda kod FMEA: kombiniranje lean pristupa i FMEA, troškove, i softverska i automatizirana FMEA rješenja.

3.1 Općenito o FMEA

FMEA (ili često u literaturi FMECA¹²) je kao što i sam naziv kaže analiza grešaka koje se javljaju u određenim uvjetima i posljedica do kojih te iste greške dovode. Jedan od glavnih ciljeva ove analize je da se pomoću nje identificiraju i procjene potencijalne greške odnosno, da se otkriju uzroci njihove pojave, kao i posljedice koje te greške mogu izazvati, i na kraju da se predlože rješenja za smanjenje i otklanjanje tih grešaka. Krajnji cilj je proizvodnja bez grešaka, poboljšanje sigurnosti i pouzdanosti, te poboljšanje zadovoljstva kupaca. Još jedna od karakteristika FMEA je ta što je predviđena da bude živi dokument, što znači da bi je trebalo neprestano dopunjavati novijim podacima, naročito nakon nekih promjena na dizajnu ili unutar procesa proizvodnje. Također bi trebalo imati u vidu da se FMEA može koristiti i preventivno i korektivno, s tim što je mnogo bitnije da se uvijek koristi preventivno, kada za to postoji odgovarajuća mogućnost.

Prvobitna verzija FMEA je osmišljena za potrebe vojske SAD pod nazivom vojna procedura MIL-P-1629, a dokumentirana je 09.11.1949. godine [17]. Iz navedene procedure MIL-P-1629 su kasnije 1974. godine nastala dva vojna standarda SAD-a: MIL-STD-1629 i MIL-STD-1629A. Ova analiza se tada koristila kao tehnika za određivanje režima grešaka u sustavima, kao i za određivanje posljedica koje te greške izazivaju. Koncept provođenja FMEA koji se tada koristio, danas nije u upotrebi, jer su korisnici FMEA novijeg doba u potpunosti prilagodili koncept i procedure svojim standardima i potrebama. Prva formalna upotreba FMEA kakvu industrije danas poznaju je bila 1963. godine za potrebe svemirske industrije. Konkretno je NASA upotrijebila ovu analizu za preventivno upravljanje pouzdanošću i rizicima na projektu „Apolio“ [17]. Nešto kasnije 1965-e godine počela je aktivna primjena FMEA za potrebe svemirske tehnologije i aeronautike, a desetak godina kasnije i za potrebe nuklearne industrije [18]. Tek u ranim 1980. godinama FMEA nalazi primjenu u automobilskoj industriji. Američke tvrtke (među prvima Ford Motors 1973. godine) počinju da uvode FMEA procedure u procesima razvoja proizvoda. Ford Motors je 1977. godine zvanično uveo FMEA kao preventivnu metodu za upravljanje kvalitetom u fazi razvoja proizvoda, ali i u fazi proizvodnje proizvoda [18]. 1990. godina su automobilske tvrtke iz SAD-a (čuvena trojka Ford Motors, Chrysler i General Motors) uvele FMEA kao obaveznu proceduru svojim dobavljačima, a 1984. su izdali priručnik „Potential failure mode and effect analysis handbook“ prema kome je trebalo sprovesti FMEA. Ovaj priručnik je bio jako kompliciran za korištenje zbog neslaganja između različitih regulacija, što je dobavljačima stvaralo mnogobrojne probleme prilikom provođenja

¹² FMECA je skraćena za „Failure mode, effects and criticality analysis“. To je oblik FMEA koji se posebno bazira na rješavanju kritičnih rizika, zato je i dodatak „criticality“ što na engleskom jeziku znači kritično. Često se u literaturi FMEA i FMECA poistovjećuju, što je pogrešno, jer se radi o dvije principijski vrlo slične analize ali različite prema upotrebi.

FMEA. Prema tome je AIAG¹³ grupacija spojila sve regulacije i napravila jednu jedinstvenu prilagođenu dobavljačima, što je rezultiralo izdavanjem priručnika „Potential Failure Mode and Effect Analysis“ 1993. godine. Drugo izdanje tog priručnika je izdato u veljači 1995. godine, treće u srpnju 2001., i četvrto trenutno aktivno izdanje je iz lipnja 2008. [19].

Danas FMEA nalazi široku primjenu i može se reći da je postala standardna praksa u različitim tvrtkama širom svijeta [17]. Onodera [20] je još 1997. godine identificirao preko 100 različitih primjena ove analize u Japanu. Mnogi drugi autori su također naveli široku primjenu FMEA u različitim industrijama. Neke od njih su: među najzastupljenijima automobilska i zrakoplovna industrija [3, 17, 18, 20-33], vojna industrija [3, 17, 21, 22, 24, 32-35], industrija proizvodnje elektronskih komponenti [17, 23, 25, 29, 30, 33], nuklearna industrija [3, 22-24, 27, 28, 33, 34], u medicini i industriji za proizvodnju medicinske opreme [3, 24, 30, 32-36]. FMEA je pored navedenih industrija također zastupljena i u: potrošačkoj, mehaničkoj, kemijskoj i uslužnoj industriji, zatim tvrtkama za izradu hardvera i softvera, informacijskim sustavima, tvrtkama za proizvodnju hrane, tvrtkama za brizganje plastike, itd. U elektranama, građevini, konstrukcijama, telekomunikacijama, itd. [3, 17, 23-25, 33, 35-39].

FMEA se sprovodi u timu ispunjavanjem unaprijed definirane forme FMEA izvješća i proračunom tradicionalnog broja prioriteta rizika u literaturi poznatijeg kao RPN¹⁴. Tradicionalni RPN se dobiva množenjem tri indeksa¹⁵ S, O i D, kao što je prikazano jednadžbom 3.1. Obično se svaki od tri navedena indeksa kreće u vrijednosti od 1 do 10. Prema tome se RPN može kretati u vrijednosti od 1 do 1000. U literaturi se nekada spominje i skala od 1 do 5 [3]. Prema nekim pravilima koja su najvjerojatnije usvojena iz automobilske industrije, korektivne mjere se obavezno uvode kada RPN prelazi vrijednost 100, ili kada neki od tri indeksa S, O ili D ima vrijednost veću od 8. U biti bi ta pravila trebalo prilagoditi prema potrebi.

$$S * O * D = RPN \quad (3.1)$$

gdje je:

- S indeks ozbiljnosti greške,
- O indeks učestalosti pojave greške
- D indeks sposobnosti otkrivanja greška

U ranim počecima upotrebe ove analize, FMEA je bila jedinstvena analiza. Nakon upotrebe ove analize za potrebe automobilske industrije, FMEA je podijeljena na dvije analize prema fazi u kojoj se proizvod trenutno nalazi. Te su prema tome nastale dizajn FMEA (DFMEA) koja se primjenjuje u fazi dizajna proizvoda i proces FMEA (PFMEA) koja se primjenjuje u fazi procesa proizvodnje proizvoda. Jedna od osnovnih razlika između ove dvije analize je ta što se prilikom izrade DFMEA za krajnjeg korisnika uzima sam kupac, dok kod PFMEA to može biti i sljedeći korisnik unutar procesa proizvodnje, ali i krajnji kupac. PFMEA je dugotrajnija za izradu i kompliciranija od DFMEA. Također, prema redoslijedu prvo ide

¹³ AIAG – *Automotive Industry Action Group* agencija za automobilsku industriju osnovana od strane tri automobilske tvrtke: Ford Motors, Chrysler i General Motors.

¹⁴ RPN je skraćenica za Engleski termin „Risk Prioriti Number“ što u prijevodu znači indeks prioriteta rizika. Ovaj indeks se koristi pokazatelj kritične vrijednosti nekog rizika. Što je veća vrijednost, rizik je veći. U daljem tekstu će biti naveden samo kao RPN.

¹⁵ S – *severity* u prijevodu, ozbiljnost, O – *Occurance* u prijevodu učestalost, i D – *Detection* u prijevodu znači otkrivanje.

DFMEA, te onda PFMEA. U današnjici postoji veliki broj različitih FMEA, a neke od njih su [3]:

- Sustav ili koncept FMEA (S/CFMEA). FMEA koja se sprovodi za provjeru sustavnih funkcija. Obično se sprovodi u najranijoj fazi prije određivanja određenog hardvera.
- DFMEA i PFMEA koje su već spomenute, a koje se koriste u fazi dizajna i procesa proizvodnje.
- Servis FMEA. Ova FMEA se koristi kao standardizirana tehnika za vrednovanje sustava i komponenata u fazi koncipiranja ili fazi dizajna. Osnovni cilj ove FMEA je poboljšanje mogućnosti servisiranja proizvoda
- FMEA okoliša. Ova FMEA se koristi za procjenu vremenskih prilika. Sprovodi se u cilju provjere ispunjavanja uvjeta analiziranog dizajna, procesa, strojeva.
- FMEA strojeva. Ovo je FMEA koja se sprovodi u cilju provjere strojeva, alata i opreme. Uglavnom se proširuje u metodu DFMEA.
- Softver FMEA. Ovaj tip FMEA je također kao i prethodni dio DFMEA koji se odnosi na softverska pitanja.
- FMEA svojstava. Ovaj tip FMEA predstavlja metodologiju koja prevodi željena svojstva proizvoda predložena od strane kupaca u koordinirani dizajn i verifikacijski plan integriranje ciljeva kaskade procesa i robusnosti alata.

3.2 Nedostaci FMEA

Iako je FMEA definirana različitim standardima i može se reći da je oko 60 godina u aktivnoj upotrebi, i pored toga se kod ove analize mogu identificirati brojni nedostaci (ograničenja). Nedostaci FMEA se mogu raspodijeliti po grupama u ovisnosti od prirode problema vezane za FMEA. Te se prema tome može reći da postoje 3 grupe nedostataka FMEA: nedostaci FMEA vezani za utjecaj ljudskog faktora na FMEA, strukturni nedostaci FMEA i proceduralni nedostaci FMEA. Nedostaci su prema ozbiljnosti respektivno nabrojani od najutjecajnijih do manje utjecajnih nedostataka.

3.2.1 Nedostaci vezani za utjecaj ljudskog faktora na FMEA

Ljudski faktor predstavlja osnovni problem koji se javlja kod FMEA, a koji je ujedno vrlo teško kontrolirati, iz razloga što se FMEA izvješće (u kvalitativnim smislu) ispunjava na osnovu subjektivnog mišljenja ljudskog faktora, odnosno FMEA tima. Vjerodostojnost utvrđivanja grešaka, posljedica, uzroka, S, O i D indeksa, najčešće u potpunosti zavisi od mišljenja eksperata tima, što u biti dovodi do relativnosti po pitanju pouzdanosti procesa proizvodnje. Neki od problema koji se javljaju kod ovog tipa nedostatka FMEA su:

- Problemi pri odlučivanju. Ovaj tip problema se javlja u svim fazama provođenja FMEA. Od početka kada se donose odluke pri formiranju FMEA tima, preko odlučivanja u fazi identificiranja i vrednovanja grešaka, do faze uvođenja rješenja.
- Problemi nesavjesnosti pri provođenju FMEA [40, 41]. Ovi problemi su česta pojava u mnogim tvrtkama različitih tipova industrija, te i u automobilskoj. Osnovni uzrok pojave problema nesavjesnosti je nedostatak zajedničke kulture i filozofije u okviru neke tvrtke. FMEA je živi dokument koji neprestano treba ažurirati. Stoga je neophodno da FMEA sprovode savjesni zaposlenici koji će redovito ažurirati FMEA izvješće i kontinuirano unaprjeđivati identificirane probleme ili pogreške. Neki od dodatnih problema koji mogu utjecati na ovaj problem su nedostatak motiviranosti i vremena kod zaposlenih.
- Problemi sa dugotrajnošću provođenja FMEA [42].

- Problemi nedostatka obuke [41]. Za efikasno i efektivno provođenje FMEA je neophodno iskustvo, ali pogrešno iskustvo pri provođenju FMEA može voditi tim u krivom smjeru. Studija sprovedena nad 150 dobavljača iz automobilske industrije je pokazala da PFMEA nije baš najbolje shvaćena od strane PFMEA timova, kao i da se na PFMEA gledao kao na dodatnu administrativnu obavezu [41]. Pokazano je da su ispitanici često miješali uzroke i posljedice, a u nekim slučajevima i režime grešaka. Također su preventivne (korektivne) mjere uvođene samo kada RPN prelazi zadovoljavajuću granicu. Ovi pokazatelji ukazuju na nedostatak odgovarajuće obuke.

3.2.2 Nedostaci FMEA strukture

Strukturni okvir FMEA (FMEA izvješće) sadrži mnogobrojne nedostatke identificirane od strane različitih autora. O ovim nedostacima postoji čitava pregledna studija sprovedena od strane Hu-Chen Liu-a sa pregledom od oko 75 znanstvenih članaka [33]. Neki od problema koji se javljaju kod ovog tipa nedostataka su:

- Ograničen prostor za popunjavanje FMEA izvješća. Prostor za popunjavanje polja unutar FMEA je ograničen i svaka opširnija objašnjenja dovode do nepreglednosti.
- Nemogućnost ponovnog korištenja FMEA izvješća [21].
- Ograničenja S, O i D indeksa [33, 41]. Problem subjektivnosti S, O i D indeksa se može rastaviti na tri zasebna problema za svaki od indeksa. Indeks S označava ozbiljnost greške, koja se uglavnom promatra iz aspekta osiguravanja kvalitete ili u rijetkim slučajevima gledišta iz aspekta sigurnosti. Uopće se ne uzimaju drugi faktori utjecaja kao što su na primjer raspoloživo vrijeme za provođenje FMEA ili troškovi greške. O indeks je možda i najveći problem jer zavisi isključivo od predviđanja, vjerojatnoće odnosno statistike. D indeks je još i najblaži po pitanju problematičnosti. Mada neki autori i kod njega vide problem preciznog određivanja vrijednost [43]. Pored posebnog promatranja ograničenja svakog od tri indeksa, u Liu-ovom preglednom članku su navedena 3 problema koja se odnose na S, O i D indekse skupa [33]:
 1. Relativna važnost između S, O i D indeksa nije uzeta u razmatranje. Odnosno S, O i D indeksi ne mogu imati istu težinu. Na primjer, RPN sa vrijednostima S, O i D indeksa 8, 8 i 2 (RPN=128) respektivno može imati manju vrijednost od RPN-a sa S, O i D indeksima 4, 6 i 6 (RPN=144). Slučaj dva sa RPN-om 144 je prema pravilu prioritetniji, iako je prvi slučaj sa RPN-om 128 kritičniji.
 2. Ova tri indeksa je teško precizno vrednovati. Obično su S, O i D indeksi ocjenjeni kao niski, visoki, umjereni i sl. Ne postoji jasna definicija rizika. O indeks je skoro nemoguće definirati sa preciznošću.
 3. Svaki od indeksa se vrednuje prema različitom značenju, te je upitna mogućnost množenja istih.
- Ograničenja RPN-a [19, 33]. Ograničenja RPN-a su predstavljena i u AIAG-ovom priručniku “*Potential FMEA*”, ali i u Liu-ovoj preglednoj studiji. Liu Izdvaja čak 7 bitnih nedostataka RPN-a identificiranih od strane različitih autora navedenih u studiji [33]:
 1. Različite kombinacije S, O i D indeksa mogu dati istu vrijednost RPN, ali rizici koje greške izazivaju mogu dati potpuno različite ishode.
 2. Matematička formula za kalkuliranje RPN-a je upitna i diskutabilna.
 3. RPN se ne može koristiti za mjerenje efektivnosti preventivskih (korekcijskih) aktivnosti
 4. RPN-ovi nisu kontinuirani, odnosno mijenjaju se tijekom vremena.
 5. Matematička formula za izračunavanje RPN-a je jako osjetljiva na promjene pri vrednovanju faktora rizika

6. RPN elementi imaju mnoge dvostruke čimbenike
 7. RPN promatra samo tri čimbenika rizika i to uglavnom po pitanju kvalitete i sigurnosti.
- Troškovi nisu uključeni u FMEA [41]. Troškovi koje greške mogu izazvati su mnogobrojni. Sve greške koje prođu neopaženo kroz proces proizvodnje i stignu do kupca odnosno korisnika, predstavljaju financijski potencijalnu opasnost po tvrtku u ovisnosti od ozbiljnosti greške. Također ne postoji uključenost troškova pri donošenju odluka o uvođenju korektivnih mjera (odnosno S indeks ne uključuje troškove). Pored troškova koji se odnose na kupca, postoje i troškovi koje greške izazivaju a odnose se na samu tvrtku. Te bi prema tome PFMEA trebalo da prati i troškove odnosno financijske gubitke koji nastanu u toku procesa proizvodnje.

3.2.3 Nedostaci FMEA procedure

Proceduralni nedostaci opet djelomično ovise o ljudskom čimbeniku, ali i o strukturi FMEA. Može se reći da ovaj tip nedostataka nastaje uslijed interakcije ljudskog faktora i FMEA izvješća. Ovaj tip nedostataka su uočili Johnson i Khan [41] i naveli su ga kao „upravljanje FMEA analizom“. Neki od problema koji se javljaju kod ovog tipa nedostataka su:

- Međuovisnost između različitih režima grešaka i posljedica nije uzeta u promatranje [33].
- Pogrešan pristup određivanju korijena uzroka pojave grešaka, već se samo površno definira uzrok [40].
- Ne postoji princip standardizacije grešaka, već se stare greške ponavljaju u FMEA izvješćima [40].
- Popunjavanje FMEA izvješća odnosno provođenje FMEA procedure je dugotrajan proces i zahtjeva posvećenost [28, 40]. Vrijeme je jako bitan čimbenik koji utječe na FMEA, jer utječe i na ljudski faktor. FMEA timu provođenje FMEA nije primarna aktivnost, te se dovodi u pitanje koliko tim može vremena može posvetiti provođenju FMEA, a samim tim i pozornosti.
- U proceduri nije naveden pristup kontinuiranom unaprjeđivanju i obaveznom rješavanju grešaka, te se prema tome često dešava da se greške rješavaju samo kada RPN ili S, O i D indeksi prelaze zadovoljavajuće vrijednosti.

3.3 Pregled literature

U ovom kvalifikacijskom radu će biti obrađeni samo znanstveni radovi objavljeni u relevantnim časopisima, koji su se bavili metodama i tehnikama za unaprjeđenje nedostataka tradicionalne FMEA. Pored primjene standardnih metoda i tehnika, biti će naveden pregled i primjene Lean metoda i tehnika u integraciji sa FMEA. Razlog za ovo je što sve više tvrtki primjenjuje Lean pristup za poboljšanje pouzdanosti, a FMEA moraju koristiti kao obaveznu metodu. Stoga je u posljednje vrijeme integracija Lean pristupa i FMEA u porastu. Također će biti napravljen pregled troškovnih modela sa osvrtom mogućnosti primjene istih u automobilske industriji. Na kraju će biti napravljen pregled automatiziranih FMEA i softverskih rješenja.

3.3.1 Pregled literature općenito

FMEA je u upotrebi u automobilske industriji već oko 60 godina, te zbog toga postoji veliki broj znanstveni radova objavljenih na ovu temu. Svi radovi objavljeni u relevantnim časopisima od 1992. godine do 2012. godine su navedeni u Liu-ovom preglednom članku iz 2013. Hu-Chen Liu [33] dijeli metode primijenjene na FMEA u 5 grupa (Tablica 3.1), i to: višekriterijsko odlučivanje, matematičko programiranje, umjetna inteligencija, hibridni pristup i drugi pristupi.

Tablica 3.1. Klasificiranje metoda primijenjenih od 1992. do 2012. za unaprjeđenje nedostataka FMEA [33].

Kategorije	Pristupi	Ukupan broj primjena od 1992. – 2012. godine
Umjetna inteligencija 40%	Sustav zasnovan na pravilima	1
	Sustav zasnovan na fuzzy pravilima	29
	Fuzzy ART algoritmi	1
	Fuzzy kognitivne mape	1
Višekriterijsko odlučivanje 22.5%	ME-MCMD	1
	Teorija dokaza	2
	AHP/ANP	4
	Fuzzy TOPSIS	1
	Siva teorija	7
	DEMATEL	1
	Tehnika intuitivnog rangiranja fuzzy skupovima	1
Drugi pristupi 17.5%	VIKOR	1
	Modeli temeljeni na troškovima	6
	Monte Carlo simulacija	1
	Teorija presjeka minimalnih skupova	1
	Boolean metoda	1
	Digrafski i matricni pristup	1
	Kano model	1
	QFD	2
Integrirani pristupi 11.25%	Teorija vjerojatnosti	1
	Fuzzy AHP i sustav temeljen na fuzzy pravilima	1
	WLSM-MOI metoda parcijalnog rangiranja	1
	OWGA operater – DEMATEL	1
	IFS - DEMATEL	1
	2-tuple-OWA operater	1
	FER – siva relacijska metoda	1
	Fuzzy AHP - Fuzzy TOPSIS	1
Matematičko programiranje 8.75%	ISM-ANP-UPN	1
	Linearno programiranje	4
	DEA/Fuzzy DEA	3

Najbrojniju primjenu ima umjetna inteligencija sa ukupno 40% primjene, a neki od pristupa korištenih su: sustav temeljen na pravilima, sustav temeljen na fuzzy pravilima, fuzzy-ART algoritam i fuzzy kognitivne mape. Drugi po redu su višekriterijski pristupi sa 22.5% ukupne primjene. Zatim drugi pristupi sa 17.5%, te integrirani pristupi sa 11.25% i na kraju matematičko programiranje sa 8.75% ukupne primjene.

Fuzzy ekspert sustav se izdvaja kao jedan od boljih i najčešće korištenih pristupa koji u odnosu na tradicionalni pristup ima brojne prednosti. Pored brojnih prednosti ovaj pristup sadrži i brojne nedostatke, te time ostavlja prostora istraživačima da dodatno istražuju i unaprjeđuju ovaj pristup. Jedan od najpopularniji problema u literaturi je poistovjećivanje težine svakog od

S, O i D indeksa. Za ovaj problem su primjenjivane metode ponderiranja koje su predstavljene u Tablici 3.2 i podijeljene u tri grupe. Također je potrebno napomenuti da je fuzzy metodologija teško primjenjiva u praksi.

Tablica 3.2. Metode ponderiranja S, O i D indeksa [33].

Kategorije	Metode ponderiranja	Ukupan broj primjena od 1992. – 2012. godine
Direktno ponderiranje	/	8
Subjektivno ponderiranje	Direktan pristup od strane eksperata	6
	AHP/ANP	10
Objektivno ponderiranje	Naručeno ponderiranje	3
	DEA	3
	Minimalni presjek skupova	1

Nakon 2012. godine je trend interesa za višekriterijskim analizama za odlučivanje još više porastao. Hu-Chen Liu [44] u novoj studiji iz 2016. godine (Tablica 3.3), prikazuje nova istraživanja svrstana u šest grupa: višekriterijske metode za odlučivanje temeljene na mjerenju udaljenosti, višekriterijske metode za odlučivanje s kompromisnim rangiranjem, višekriterijske metode za odlučivanje s preuzimanjem prioriteta, višekriterijske metode za odlučivanje s usporedbom parova, druge višekriterijske metode za odlučivanje i višekriterijske metode za odlučivanje temeljene na hibridnom pristupu.

Tablica 3.3. Ukupan broj primjena višekriterijskih analiza za odlučivanje od 2012. – 2016. godine [44].

Kategorije višekriterijskih metoda za odlučivanje	Pristupi	Ukupan broj primjena od 2012. – 2016. godine
Temeljene na udaljenosti	Mjerenje distance	1
	GRA	6
Temeljene na kompromisnom rangiranju	VIKOR	3
	TOPSIS	6
Temeljene na preuzimanju prioriteta	QUALIFLEX	1
	ELECTRE	1
	PROMETHEE	1
Temeljene na usporedbi parova	AHP	2
	ANP	1
Drugi	MULTIMORA	2
	COPRAS-G	1
	ER	1
	DEMATEL	4
	Digraf i matrice	1
Hibridni	VIKOR i AHP	1
	VIKOR, DEMATEL i AHP	1
	ER i TOPSIS	1
	GRA i DEMATEL	1
	TOPSIS i DEMATEL	1

3.3.2 Pregled literature za FMEA u integraciji sa *Lean* pristupom

Kao i FMEA, i *lean* pristup se može koristiti sa pratećim alatima, metodama i tehnikama za unaprjeđenje industrijskih procesa. *Lean* u današnjici nalazi na široku primjenu u automobilskim tvrtkama širom svijeta. Prema studiji slučaja provedenoj nad 300 proizvođača, evidentno je da 90% njih primjenjuje *lean* pristup [45]. Također, prema istraživanjima iz 2015. godine objavljenim od strane konzultantske grupe Boston, 30% svjetskih OEM (*Original equipment manufacturer*) koristi *lean* pristup u svojim proizvodnim sustavima [46]. Prema tome se može reći da je potreba za uvođenjem *lean* pristupa u proizvodna (montažna) poduzeća u porastu. Studijom slučaja u automobilskoj industriji je pokazano da se integracijom *lean* pristupa u FMEA može doći do znatnih poboljšanja pouzdanosti FMEA [40]. Obzirom na to da praktički FMEA i *lean* pristup služe istoj svrsi, trebalo bi u budućnosti razmišljati o njihovoj integraciji.

Lean je američki termin kojim se opisuje Toyotin proizvodni sustav (TPS). Počeci TPS-a se vezuju za period nakon drugog svjetskog rata. Tvrtki Toyota je bilo potrebno rješenje koje će pokrenuti tvrtku i učiniti je konkurentnijom na tržištu. TPS je bio to rješenje. Masovna proizvodnja koja je tada bila u širokoj primjeni širom svijeta, zamijenjena je „sustavom povlačenja“, ili proizvodnjom samo onoga što kupac potražuje [47]. Usmjerenje tvrtki je promijenjeno prema neprestanom unaprjeđivanju i upravljanju kvalitetom u svakom koraku. TPS nije bio poznat izvan tvrtke Toyota i njenih dobavljača sve do 80ih godina 20. stoljeća, kada je prva naftna kriza zahvatila svijet. Najbitnija činjenica od svih je da je upravo TPS vodio Toyota tvrtku prema prvom mjestu na listi svjetskih proizvođača automobila. *Lean* se počeo uvoditi širom svijeta tek nakon 1990. godine [48].

Integrirani *lean* pristup podrazumijeva korištenje *lean* razmišljanja, principa, alata, metoda i tehnika pri provođenju FMEA. *Lean* principi se najbolje mogu razumjeti kroz četiri osnovna Toyotina principa: *Genchi Genbutsu* (idi i vidi na licu mjesta), *Kaizen* (kontinuirano unaprjeđivanje), timski rad i poštovanje prema ljudima, i izazovi. Na osnovu ovih principa je Liker [48] utemeljio svoja četiri principa poznata i kao 4P: filozofija, proces, ljudi, partneri i rješavanje problema. Pored industrije, *lean* se može primijeniti na bilo koji bilo koji drugi poslovni ili životni aspekt. Prvenstveno je *lean* pristup bio primjenjivan za potrebe unaprjeđenja procesa proizvodnje – *lean* proizvodnja. Danas *lean* pristup nalazi široku primjenu: *lean* poduzeće, *lean* ured, *lean* start-up, *lean* razvoj, *lean* sustav, itd. Konkretno u automobilskoj industriji se najčešće koristi *lean* pristup za unaprjeđenje procesa proizvodnje. Za ovo potrebe su razvijeni različiti alati, metode i tehnike: *jidoka*, *Poka-yoke*, *Kanban*, *SMED* (*Single minute exchange of a die*), *just in time*, *5S*, standardizirani rad, 5 x zašto?, cjelokupno produktivno održavanje, taktno vrijeme, PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), itd.

Različiti autori su provodili slična istraživanja integriranjem ova dva pristupa, samo koristeći se FMEA u cilju poboljšanja *lean* sustava. Shekari i ostali [49] su koristili modificiranu FMEA kao alat za otkrivanje grešaka, da bi unaprijedili *lean* sustav. Sawhney i ostali [50] su predstavili modificirani FMEA pristup za unaprjeđenje pouzdanosti *lean* sustava. Shahrabi i ostali [51] su primijenili FMEA i AHP metode za poboljšavanje održavanja *lean* sustava. Ovaj pristup nije neophodan, jer tvrtke koje koriste *lean* pristup ne trebaju FMEA da bi preventivno zaštitile sustav od grešaka. Automobilska industrija je jedan od izdvojenih primjera jer je FMEA obavezna, a većina automobilskih tvrtki koristi *lean*, te postoje povoljni uvjeti za integraciju. Neka od istraživanja u kojima je u FMEA integriran *lean* su: primjer korištenja *lean* alata *poka-yoke* za unaprjeđenje FMEA i integriranje *lean* pristupa u PFMEA za poboljšanje PFMEA u automobilskoj industriji [40, 52, 53].

3.3.3 Pregled literature za FMEA po pitanju troškova

Trošak je jedan od vrlo bitnih čimbenika koji utječe na pouzdanost i profitabilnost tvrtki, a nije uključen u PFMEA. Kroz proračun ozbiljnosti greške se mogu vidjeti posljedice koje utječu na tvrtku i na kupca, ali samo po pitanju sigurnosti ili kvalitete. Učestalost pojave greške se mjeri prema broju grešaka koje su se javile u određenoj količini proizvedenih proizvoda, dok se uopće ne uzima u obzir koji su troškovi zbog škarta, dorade ili reklamacije i slično.

Prema najboljem saznanju i prema širokom pregledu znanstvenih baza Scopus, Web Of Science i Google Scholar, identificirano je (od 1993. godine do 2017. godine) 20 radova iz relevantnih časopisa i 17 konferencijskih radova na temu troškova u FMEA. U literaturi se izdvajaju dva pristupa uključivanju troškova u FMEA. Prvi pristup je uključivanje troškova samo radi donošenja odluka, a koji pri tom ne utječu na tradicionalni RPN (pristupi prikazani u Tablici 3.4). Dok se kod drugog pristupa tradicionalni RPN mijenja nekim drugim pristupom određivanja prioriteta (pristupi prikazani u Tablici 3.5a sa nastavkom u Tablici 3.5b).

Tablica 3.4. Pristupi uključivanja troškova koji sadrže tradicionalni RPN.

Autori	Metodologija	Godina
Gilchrist, W [54]	Troškovni model	1993.
Ben-Daya, M. i Raouf, A. [55]	Unaprijeđen Gilchristov troškovni model	1996.
Tarum, C. D. [56]	Troškovi procesa u automobilske industriji	2001.
Vintr, Z. i Vintr, M. [57]	Troškovi garancije	2009.
Popović, V. i ostali [58]	Očekivani troškovi	2010.
Chen, C. C. [59, 60]	Očekivani troškovi	2010. i 2014.
Kahrobaee, S. i Asgarpoor, S. [61]	Troškovne posljedice	2011.
Rezaee, M. J. i ostali [62]	Troškovi za donošenje odluka	2016.

Tablica 3.5a. Pristupi sa promjenjenim tradicionalni RPN-om

Autori	Metodologija	Godina
Braglia, M. [63]	AHP	2000
Kmenta, S. i Ishii, K. [64, 65]	Troškovi temeljeni na scenariju	2000 i 2004
Locatelli, E. i ostali [66]	Troškovi temeljeni na scenariju	2002
Rhee, S. J. i Ishii, K. [45, 67, 68]	Troškovi životnog ciklusa i Monte Carlo	2002 i 2003
Spencer, C. M. i Rhee, S. J. [69, 70]	Troškovi životnog ciklusa	2003 i 2004
D'Urso, G. i ostali [71]	Troškovni model	2005
Dong, C. [31]	Fuzzy	2007
Chin, K. S. i ostali [28]	Fuzzy i softverski prototip	2007
von Ahsen, A. [72]	Troškovni model	2008
Hassan, A. i ostali [73, 74, 75]	ABC, QFD i QCCPP	2008 i 2010
Carmignani, G. [76]	PC-FMECA	2009
Jamshidi, A. i Kazemzadeh, R. B. [77]	Fuzzy i AHP	2010
Abdelgawad, M. i Fayek, A. R. [78]	Fuzzy FMEA i Fuzzy AHP	2010
Vykydal, D. i ostali [79]	Troškovni model	2011

Tablica 3.5b. Pristupi kod kojih se tradicionalni RPN mijenja nekim drugim pristupom za procjenu prioriteta (nastavak Tablice 3.5a)

Autori	Metodologija	Godina
Zammori, F. i Gabrielli, R. [80]	AHP i ANP	2011
Abbasgholizadeh Rahimi, S. i ostali [81]	Fuzzy, GRA i teorija profitabilnosti	2013
Shafiee, M. i Dinmohammadi, F. [82]	Troškovni model	2014
Lillie, E. i ostali [83]	Troškovne posljedice	2014
Bakhtair, A. i ostali [84]	PC-FMEA i AHP	2016
Peng, Y. i ostali [85]	Fuzzy FMEA zasnovana na troškovima	2016
Boufaied, A. i ostali [86]	Troškovi temeljeni na scenariju	2016
Issad, M. i ostali [87]	Troškovi temeljeni na scenariju	2017
Tazi, N. i ostali [88]	Hibridni pristup troškovnoj FMEA	2017

Gilchrist, W. [54] je među prvima koristio troškove pri donošenju odluka. On je predložio troškovni model zasnovan na očekivanim troškovima prema kupcu. Također je predložio proširenje svog modela za tri različita scenarija:

1. Scenarij kada se uzme u obzir skriveni uzrok koji se može javiti sa vjerojatnošću p .
2. Scenarij kada se uzme u obzir greška koja je došla do kupca. S tri slučaja: 1) da kupac otkrije grešku te da traži troškove garancije 2) da je ne otkrije i 3) da doživi nesreću zbog greške, te tuži tvrtku.
3. Slučaj kada jedan uzrok proizvodi više tipova grešaka.

Gilchrist ne koristi tradicionalni RPN za proračun već sve gleda kroz ozbiljnost, dakle: ozbiljnost pojave greške S , ozbiljnost da se greška pojavi S_f i ozbiljnosti ne otkrivanja greške S_d . On je također identificirao određeni broj ograničenja svog modela. Rješavanjem tih ograničenja su se bavili Ben-Daya i Raouf [55] i svoja istraživanja temeljili na unaprjeđenju Gilchristovog troškovnog modela. Prvi detaljniji pristup definiranju troškova za odlučivanje pri provođenju PFMEA je preložio Tarum [56]. Vintr. Z. i Vintr, M. [57] su predložili pristup detaljnom definiranju troškova garancije. Popović i ostali [58] su koristili očekivane troškove za pomoć pri odlučivanju prilikom provođenja FMEA za određivanje grešaka kod životnog ciklusa autobusa. Chen [59, 60] je koristio očekivane troškove unutar FMEA za potrebe poslovnih procesa. Kahrobaee i Asgarpoor [31] su proračunavali troškove posljedica kod vjetroturbina. Rezaee i ostali [62] su koristili troškove pri donošenju odluka kod FMEA za potrebe industrije obrade kamena.

Prvi integrirani pristup sa integracijom troškova u strukturu FMEA se javio kod Braglia [63]. On je pored tri čimbenika koja je Gilchrist predložio (S , S_f i S_d) dodao i očekivane troškove, te je onda postavio različite kriterije za svaki od čimbenika. Kmenta i Ishii [64, 65] su predstavili novi oblik FMEA zasnovan na scenarijima. Za procjenu troškova su koristili pojednostavljen Gilchristov troškovni model. Locatelli i ostali [66] su primijenili Kmentin troškovni model zasnovan na scenarijima na primjeru proizvodnje bicikli. Rhee i Ishii [45, 67, 68] su tradicionalni RPN u potpunosti zamijenili novim načinom određivanja prioriteta koji su nazvali FMEA temeljena na troškovima životnog ciklusa koju su kombinirali sa Monte Carlo simulacijom. U njihovoj studiji je prikazana usporedba tradicionalnog RPN-a, FMEA temeljene na troškovima životnog ciklusa i FMEA temeljene na troškovima životnog ciklusa u kombinaciji sa Monte Carlo simulacijom koja se pokazala kao najbolje rješenje. Spencer i Rhee [69, 70] su kasnije samo koristili prethodno spomenutu FMEA temeljenu na troškovima

životnog ciklusa na primjeru nelinearnih sudarača magneta. D'Urso i ostali [71] su zamijenili tradicionalni RPN novim I indeksom koji je temeljen na računanju troškova i vremena. Dong [31] navodi da je nemoguće uvrstiti u tradicionalni proračun RPN-a, te prema tome koristi teoriju korisnosti da integrira troškove u svaki od tri indeksa i fuzzy da odredi različite kriterije. Troškovni model koji je predstavio je modificirana verzija Gilchristovog troškovnog modela pri čemu je razlika samo u tome što se očekivani troškovi povećavaju kada se povećava vjerojatnost od pojave greške, a smanjuju kada se vjerojatnost za otkrivanje greške povećava. Chin i ostali [28] su predložili softverski prototip EPDS-1 temeljen na primjeni fuzzy FMEA metodologije, pomoću koga se između ostalog mogu odrediti i određeni troškovi. Von Ahsen [72] je razvila novi troškovni model sa novim RPN_c indeksom koji uključuje interne i eksterne troškove. Ona umjesto S indeksa koristi troškovni indeks. Hassan i ostali [73, 74, 75] su 2008. koristili ABC za definiranje troškova, zatim je na ABC dodana i QFD (*Quality functional deployment*) analiza, i na kraju je 2010. godine studija proširena dodavanjem QCCPP (*Quality/cost-based conceptual process planning*). Carmignani [76] je razvio novu PC-FMECA analizu kojom bi se mogli riješiti neki nedostaci tradicionalne FMEA. Nova PC-FMECA se između ostalog bavi i rješavanjem ekonomskog gledišta. U prvobitnom modelu su definirani neki od nedostataka koji su riješeni u istoj studiji. U ovoj studiji je također korištena i AHP analiza za postavljanje kriterija između tri indeksa. Jamshidi i Kazemzadeh [77] su proširili Dongovu prethodnu studiju dodavanjem AHP analize za postavljanje prioriteta unutar tri indeksa. Abdelgawad i Fayek [78] su koristili Fuzzy AHP hibridni pristup za rješavanje nedostataka FMEA za potrebe građevinske industrije. Vykydal i ostali [79] su predstavili novi troškovni model sa novim RPN-om za proračun troškova koji se javljaju uslijed defekata na valjanim žicama. U ovom pristupu su u S indeks integrirane ljestvice kvalitete, vremena i troškova. Na sličan način su Zammori i Gabbrielli [80] integrirali troškove u S indeks. Oni su također koristili AHP i ANP metode za postavljanje kriterija za svaki od tri indeksa. Abbasgholizadeh Rahimi i ostali [81] su koristili Jamshidijev proširen pristup Fuzzy troškovne FMEA i Carmignanijev PC-FMECA pristup u kombinaciji sa GRA (Gray relational analysis) za postavljanje kriterija između tri indeksa. Ova kombinacija je korištena za potrebe određivanja troškova pri rješavanju uslužnih problema u medicini. Shafiee i Dinmohammadi [82] su S indeks zamijenili troškovnim indeksom, a RPN je zamijenjen novim CPN (*Cost priority number*) troškovnim indeksom. Ovi autori su koristili troškovnu FMEA za određivanje troškova koji se javljaju kod vjetroturbina. Lillie i ostali [83] su integrirali troškove u ozbiljnost. Također su uključili i troškove implementacije sa procjenom uloženog povraćaja ROI (*return of investment*) Bakhtair i ostali [84] su kombinirali PC-FMECA i AHP. Boufaied i ostali [85] su koristili Kmentin pristup temeljen na troškovnim scenarijima za određivanje troškova zbog kašnjenja kod tvrtki koje se bave transportom. Peng i ostali [86] su koristili Fuzzy FMEA temeljenu na troškovima u cilju određivanja troškova koje izazivaju greške sustava za praćenje kod vjetroturbina. Samo godinu kasnije su Issad i ostali [87] isti princip primijenili na sustavu željeznica. Tazi i ostali [88] su predstavili hibridni pristup određivanju troškova kod FMEA za potrebe vjetroturbina.

3.3.4 Pregled automatiziranih FMEA i softverskih rješenja

Obzirom na činjenicu da je FMEA dugotrajna i robusna za provođenje, i da pri tome sadrži veliki broj nedostataka, mnogi autori preporučuju neko sveobuhvatno rješenje. Jedino sveobuhvatno rješenje koje bi moglo pojednostaviti FMEA i integrirati u nju spektar mnogobrojnih rješenja predloženih od strane različitih autora je softversko rješenje. Softver FMEA bi mogao integrirati i sve obuhvatiti rješenja mnogih nedostataka, smanjiti dugotrajnost popunjavanja FMEA izvješća, smanjiti razinu kompliciranosti pri donošenju odluka, povećati točnost podataka, itd. Potreba za softverskim rješenjem je pokazana i istraživačkom studijom

koju su proveli Johnson i Khan [41]. Oni ističu da postoji prostor za razvijanje softverskih rješenja, a naročito sustava temeljenog na znanju.

U dodatku pregledne studije koju je proveo Liu [33] je pregledano 15 različitih softverskih pristupa od 1995. do 2012. godine. Na taj pregled je dodat i pregled autora od 2012. do 2017. godine, kao i još neki radovi koji su izostavljeni u Liu-ovoj studiji (pregled je prikazan u Tablici 3.6).

Tablica 3.6. Pregled automatiziranih i softverskih rješenja FMEA.

Autori	Metodologija	Godina
Hunt, J. E. i ostali [89]	Sustav funkcionalnog modeliranja	1993.
Russomanno, D. J. i ostali [90]	Umjetna inteligencija	1994.
Hunt, J. E. i ostali [91]	Automatizirana FMEA i funkcionalno modeliranje	1995.
Wirth, R. i ostali [92]	Sustav temeljen na znanju	1996.
Price, C. J. i ostali [93]	Dijagnostički sustav	1997.
Hawkins, P. G. i Woollons, D. J. [94]	Sustav funkcionalnog modeliranja	1998.
Huang, G. Q. i Mak, K. L. [95]	Internet	2000.
Price, C. J. i Taylor, N. S. [96]	Automatizirana FMEA	2002.
Teoh, P. C. i Case, K. [97]	Sustav temeljen na znanju	2004.
Teoh, P. C. i Case, K. [23]	Automatizirana FMEA	2005.
Chin, K. S. [28]	EPSP-1	2005.
Kurtoglu, T. i Tumer, I. Y. [98]	FFIP	2008.
Li, G. i ostali [99]	Sustav temeljen na znanju	2009.
Ebrahimipour, V. i ostali [100]	Model temeljen na onkologiji	2010.
Noh, K. W. i ostali [101]	MFP	2011.
Gan, L. i ostali [102]	Automatizirana FMEA	2012.

Hunt i ostali [89] su predstavili program koji automatizira predviđanje posljedica grešaka koje se javljaju kod automobilskih električnih sustava. Ovo rješenje sadrži pet načina rješavanja problema i biblioteku podataka skupa integriranih u arhitekturu distribuiranog rasuđivanja. Russomanno i ostali [90] su povezali FMEA proces sa različitim tehnikama umjetne inteligencije, što olakšava provođenje računarske simulacije procesa. Hunt i ostali [91] su razvili softverski prototip FMEA sustava, kao i funkcionalno modeliranje sustava koje se temelji na rezultatima dobivenih od strane temeljnog strukturnog simulatora. Wirth i ostali [92] su predložili WIFA projekt koji se temelji na bazi znanja ili FMEA temeljenu na znanju kao prezentiranje znanja standarda funkcije i sustava u FMEA. Price i ostali [93] su spojili funkcionalno rasuđivanje sa strukturnim rasuđivanjem da bi proveli sigurnosnu analizu električnog dizajna. Za tu potrebu su razvili automatiziran FMEA sustav. Hawkins i Woollons [94] su razvili metodu grafičkog modela za kvantitativno rasuđivanje o ponašanju promjena kod FMEA koje sadrži kompletne i djelomične greške. Huang i Mak [95] su predložili FMEA pristup temeljen na Web-u pomoću koga se prikupljaju FMEA podaci na internetu za FMEA informacije u distribucijskim uvjetima. Za razliku od tradicionalnog, FMEA pristup zasnovan na Web-u može pružiti bolju podršku za provođenje FMEA. A može se koristiti i u cilju uključivanja kupaca i dobavljača u provođenje FMEA. Price i Taylor [96] su koristili približnu stopu grešaka komponenata da bi odredili najčešće kombinacije grešaka za automatizirana istraživanja pomoću simulacija. Otkrili su da se važne informacije mogu automatski otkriti prema izvješću rezultata, pri tom omogućujući korisnicima olakšano proučavanje i pregledanje. Teoh i Case [97] su predstavili pristup reprezentiranju znanja u cilju stvaranja FMEA modela.

Također su uključili i tehniku funkcionalnog rasuđivanja da bi omogućili automatsko generiranje FMEA s podacima iz prošlosti. Teoh i Case [23] su samo godinu dana kasnije predložili metodu generiranja FMEA - FMAG (*Failure Mode Analysis Generation*) za generičku primjenu korištenjem minimalne količine informacija tijekom faze konceptualnog dizajna. Za ovu svrhu je izrađen softverski prototip da bi omogućio lakše upravljanje znanjem i generiranje izvješća kod FMEA. Chin [28] je razvio softverski prototip "EPDS-1" koji neiskusnim korisnicima može pomoći pri poboljšanju pouzdanosti i kvalitete. Ovaj softverski model za razliku od prethodnih uključuje i određene troškove, a temeljen je na fuzzy pristupu postavljanja kriterija. Kurtoglu i Tumer [98] su predložili analitički okvir za funkcionalno određivanje i širenje grešaka - FFIP (*Functional-failure identification and propagation*). Ovaj FMEA pristup je temeljen na grafičkom modeliranju koje izražava ulazne i izlazne interakcije između modula u cilju otkrivanja što većeg broja grešaka. Li i ostali [99] su predstavili formalni model prezentacije znanja o greškama u cilju olakšavanja modeliranja i rasuđivanja FMEA. Metodologija modeliranja je sadržala polihromatske skupove za predstavljanje grešaka, i njihovih uzroka i posljedica u jedinstvenom matematičkom jeziku. U kombinaciji sa matricama rasuđivanja, ovaj model može poslužiti kao temelj za automatiziranje procesa analize posljedica koje greške izazivaju. Ebrahimipour i ostali [100] su razvili onkološki pristup upravljanja FMEA informacijama. Noh i ostali [101] su razvili model sa više formalnih funkcija koji uključuje širenje grešaka, koji su nazvali model širenja grešaka temeljen na modulima MFP (*Module-based failure propagation*). Ovaj model je razvijen u cilju rješavanja ograničenja prethodnih FMEA pristupa. MFP model se temelji na funkcionalnoj dekompoziciji modela drveta, grafičkom modelu konfiguracije toka, funkcijskim pravilima i pravilima grešaka. Gan i ostali [102] su predstavili računalni integriran FMEA pristup koji je poboljšao FMEA za potrebe upravljanja dobavljačkim lancima kroz automatsku obradu korištenjem fuzzy pristupa i kompjuterski integriranog sučelja (s internet podrškom) koji služi za podršku prilikom implementacije sustava. Ovaj sustav može pomoći pri prevenciji mogućih grešaka u fazi dizajna, procesa, itd., u području osiguranja kvalitete dinamičkih dobavljačkih lanaca u fleksibilnom okruženju.

4. PFMEA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

Početak upotrebe PFMEA u automobilske industriji se vezuju za 1980. godine kada su poznate automobilske korporacije SAD uvele svojim dobavljačima obavezno provođenje ove analize. PFMEA je tip FMEA koji se koristi u fazi procesa proizvodnje. Primjena PFMEA u fazi proizvodnje je obavezna za sve tvrtke koje se bave proizvodnjom (montažom) dijelova za automobilsku industriju, te se može reći da ova analiza danas nalazi veliku primjenu. Neki od ovih standarda i propisa kojima je PFMEA propisana (ili je bila propisana) su: APQP (*Advanced process quality planning*), PPAP (*Production part approval process*), TE9000, ISO 9000, QS 9000, ISO/TS 16949, IATF 16949, Šest sigma metodologija, itd.

Čak i pored toga što ova analiza nalazi obaveznu primjenu u automobilske industriji, identificirana su razni tipovi ograničenja prilikom provođenja. Većina tih ograničenja se odnosi na koncept PFMEA izvješća i način klasificiranja i vrednovanja rizika od pojave greške. Pored ovih ograničenja se javljaju i druga ograničenja vezana za ljudski faktor, poput nerazumijevanja bitne primjene PFMEA i slično. Prema tome se može reći da PFMEA i u današnjici nakon dugog vremenskog perioda postojanja nalazi interes kod znanstvenika za unaprjeđenja. Pored brojnih nedostataka, naravno postoje i brojne prednosti uslijed odgovarajućeg provođenja ove analize u automobilske industriji [3]:

- Povjerenje da su svi rizici identificirani u ranoj fazi procesa proizvodnje, ili čak prije početka proizvodnje i da su nad njima provedene odgovarajuće preventivne i korektivne aktivnosti.
- Prioriteti i obrazloženja za aktivnosti unaprjeđenja proizvoda ili procesa.
- Smanjenje škartu, dorade i troškova proizvodnje
- Očuvanje i stjecanje znanja o procesima ili proizvodima
- Smanjenje grešaka u određenom polju i troškova garancije
- Dokumentiranje grešaka i aktivnosti unaprjeđenja za neke buduće procese proizvodnje
- Identificiranje potencijalnih režima grešaka
- Identificiranje potencijalnih posljedica koje te greške izazivaju
- Ocjenjivanje ozbiljnosti svake od grešaka
- Određivanje potencijalnih uzroka pojave grešaka
- Uvođenje novog dizajna ili kontrola koji će spriječiti pojavu greške u budućnosti
- Identificiranje korektivnih aktivnosti potrebnih da bi se spriječila pojava grešaka
- Postavljanje prioriteta za uvođenje korektivnih aktivnosti u fazi procesa proizvodnje

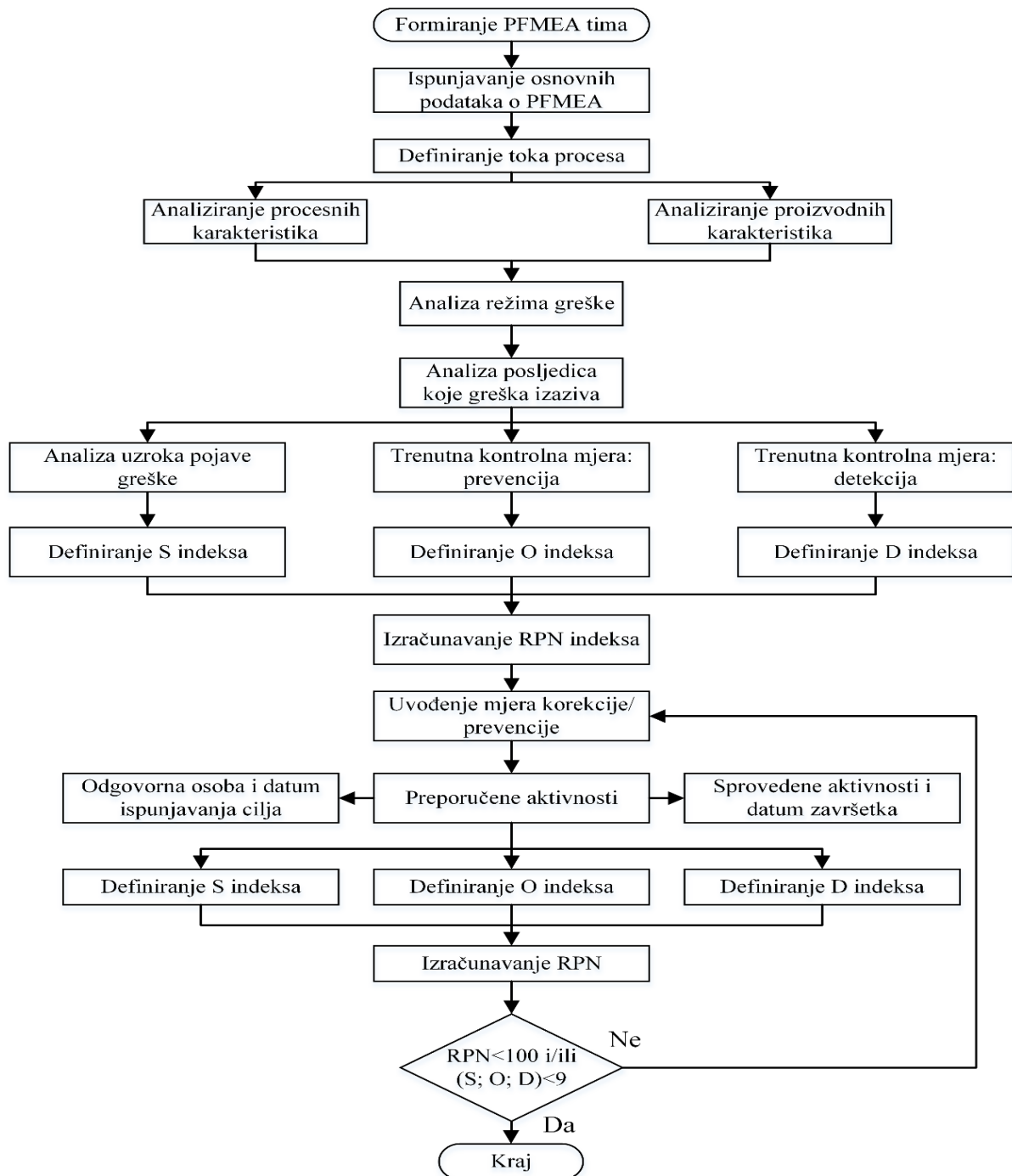
Provođenje PFMEA se vrši u timu korištenjem procedure sa unaprijed definiranim koracima. U ovom poglavlju će biti predstavljena procedura za provođenje PFMEA u automobilske industriji, sa objašnjenjem terminologije koja se javlja unutar analize. Također će biti malo više riječi o PFMEA timu koji čini važan čimbenik PFMEA općenito.

4.1 PFMEA procedura

Za provođenje procedure¹⁶ PFMEA postoji određeni redoslijed koraka. Ovaj redoslijed može se mijenjati od tvrtke do tvrtke, te se uglavnom definira prema potrebi određene tvrtke. U brojnoj literaturi postoji tradicionalna procedura za provođenje PFMEA koji se naziva tradicionalna ili konvencionalna procedura PFMEA. Tradicionalni procedura za provođenje

¹⁶ Procedura u ovom slučaju podrazumjeva specifikaciju serije skivnosti, radnji ili operacija koje bi trebalo izvršiti da bi se dobio određeni izlaz u obliku PFMEA izvješća.

PFMEA (Prikazan na Slici 4.1) je usvojena prema AIAG (*Automotive Industry Action Group*) priručniku „Potential FMEA“.



Slika 4.1 Tradicionalna procedura za sprovođenje tradicionalne PFMEA.

Prije početka provođenja PFMEA se formira multidisciplinarni tim. O timu će biti više riječi u jednom od narednih poglavlja. Zatim se ispune osnovni podaci o PFMEA da bi bila se lakše pratila u dokumentaciji. Nakon toga se definira tok procesa, kako bi se za svaki poseban korak u procesu provodila analiza grešaka. Također prije početka same analize greške treba provjeriti specijalne karakteristike naznačene od strane proizvođača ili od strane dizajna u DFMEA izvješću. Tek se onda sprovodi analiza potencijalne greške, odnosno režima greške. Nakon toga se analiziraju posljedice koje ta greška može izazvati, kao i uzroci pojave greške i provjera

trenutnog stanja (da li su i koje preventivne i korektivne mjere uvedene). Nakon svih ovih analiza dolazi procjena rizika i vrednovanje S, O i D indeksa koji rezultiraju dobivanjem RPN-a. Za određene rizike se zatim uvode preventivne ili korektivne mjere, u zavisnosti od politike tvrtke odnosno PFMEA tima. Ukoliko RPN ili neki od S, O ili D indeksa prelaze granične mjere onda se obavezno uvode preventivne ili korektivne mjere. Za preporučene aktivnosti se definira odgovorna osoba i datum ispunjavanja ciljeva, te se na kraju ispunjavanja ciljeva dokumentiraju provedene aktivnosti sa ispunjenim datumima. Nakon uvedenih aktivnosti se radi ponovna procjena i vrednovanje S, O i D indeksa i provjerava se da li je RPN smanjen uvođenjem preventivnih odnosno korektivnih mjera. Ukoliko RPN ili neki od S, O ili D indeksa prelazi granične vrijednosti, proces uvođenja preventivnih, odnosno korektivnih mjera se ponavlja. Ukoliko ne prelazi onda je PFMEA provedena za određenu grešku. Proces se ponavlja za svaku novu grešku.

4.2 PFMEA izvješće i prateća terminologija

PFMEA se sprovodi ispunjavanjem PFMEA izvješća. Standardno izvješće sa minimalnim sadržajem informacija za provođenje PFMEA je predloženo od strane AIAG (Slika 4.2), i uglavnom se taj oblik izvješća najčešće i koristi u praksi, premda su tvrtke slobodne prilagoditi izvješće svojim uvjetima i potrebama.

PFMEA izvješće														FMEA broj: _____			
Predmet: _____				Odgovornost za proces: _____				Stranica: _____				Sproveo/la: _____					
Model i godina: _____				Ključni datum: _____				Datum sprovođenja: _____				Glavni tim: _____					
Procesni korak/funkcija	Zahtjevi	Potencijalni rešim greške	Potencijalna posljedica koju greška izaziva	Ozbiljnost Klasifikacija	Potencijalni uzrok pojave greške	Trenutna kontrol procesa prevencija	Učestalost greške	Trenutna kontrol procesa detekcija	Detekcija	RPN	Preporučene akcije	Odgovornost i datum ispunjavanja cilja	Sprovedene aktivnosti i datum završetka	Ozbiljnost	Učestalost greške	Detekcija	RPN

Slika 4.2 PFMEA izvješće preporučeno od strane AIAG [19].

PFMEA izvješće se sastoji iz dvije posebne cjeline: zaglavlja i tijela. U zaglavlju su sadržani osnovni podaci i predmetu ili procesu nad kojim se provodi PFMEA, kao i o PFMEA timu. Dok su u tijelu PFMEA izvješća sadržani proceduralni koraci za provođenje PFMEA analize. U daljem tekstu će biti detaljno objašnjen svaki od navedenih termina u tablicama.

Zaglavlje teksta se sastoji od sljedećih podataka [19]:

- PFMEA broj – Ovaj broj služi za numeriranje PFMEA izvješća.
- Predmet – Predstavlja broj ili oznaku proizvoda za koji se provodi PFMEA.
- Odgovoran za proces – Navodi se organizacija ili osoba za čiji je proizvod dizajniran proces.

- Model i godina – Godina u kojoj je proces realiziran.
- Ključni datum – Datum kada je prvo provedena PFMEA. Datum ne bi trebalo da prelazi datum početka proizvodnje (montaže) određenog proizvoda.
- Datum provođenja – Datum revizije PFMEA izvješća, odnosno datum kada su uvođenje zadnje izmjene.
- Glavni tim – Podrazumijeva glavne članove tima koji su sudjelovali u provođenju PFMEA.
- Proveo/la – Osoba koja je PFMEA voditelj, odnosno odgovorna osoba za provođenje PFMEA.

Tijelo PFMEA izvješća se sastoji iz [19]:

- Procesni korak/funkcija – Ovo polje se može sastojati od jednog, ali i dva posebna polja. Procesni korak predstavlja korak u dijagramu toka. Dok funkcija može biti operacija u toku procesa, u ovisnosti na koji je način dijagram toka koncipiran.
- Zahtjevi – Ovo polje se popunjava ukoliko postoje određeni zahtjevi od strane kupaca, korisnika ili su unaprijed definirani u fazi dizajna proizvoda.
- Potencijalni režim greške – Definiira se kao događaj ili aktivnost u kojoj proces ne obavlja zadovoljavajuću funkciju, odnosno ne ispunjava odgovarajuće zahtjeve. Ovaj termin je također poznat još i kao: greška, kvar ili odstupanje.
- Potencijalne posljedice koje greška izaziva – To su posljedice koje se direktno odražavaju na zadovoljstvo kupaca. Ove posljedice također mogu imati i karakter opasnosti po sigurnost kupca.
- Ozbiljnost (S) – S indeks određuje nivo ozbiljnosti posljedice koja se odražava na kupca/korisnika. Ozbiljnost greške se određuje skalom od 1-10 koju je propisao AIAG (Tablica 4.1). Prema preporuci AIAG, kada S indeks ima vrijednost 9 ili 10, korektivne odnosno preventivne mjere se moraju uvesti, dok se S sa vrijednošću 1 zanemaruje.
- Klasifikacija – Ovo polje se koristi da se istaknu posebno prioritetne greške koje možda zahtijevaju dodatnu procjenu ili pozornost.
- Potencijalni uzrok pojave greške – Uzrok pojave greške je neki indikator koji je doveo do pojave greške. Obično se treba baviti rješavanjem uzroka grešaka prije nego posljedica. Česta je pojava da PFMEA tim ne pravi razliku između posljedica i uzroka.
- Učestalost greške (O) – O indeksom se definiira opseg u kome se greška javlja određeni broj puta. Ovaj indeks je također definiran skalom od 1-10 predloženom od strane AIAG (Tablica 4.2). Isto kao i kod S važi pravilo za uvođenje preventivnih i korektivnih mjera.
- Trenutna kontrola grešaka – Pod preventivnom kontrolom se podrazumijeva mjera za otklanjanje uzroka greške ili smanjenja stope pojave greške. Dok se pod detekcijskom kontrolom podrazumijeva detektiranje uzroka pojave greške.
- Detekcija (D) – D indeks označava razinu sposobnosti procesa da se u njemu detektiraju greške. D indeks je također kao i S i O indeksi definiran skalom od 1-10 predstavljenom od strane AIAG (Tablica 4.3a i Tablica 4.3b). Kao i za S i O indekse, isto tako i za D indeks važe korektivne i preventivne mjere.
- RPN – Ova aktivnost se odnosi na procjenu prioriteta na osnovu ukupne vrijednosti rizika dobivene množenjem tri indeksa S, O, i D. RPN ne služi da bi se odredila potreba za uvođenjem preventivne ili korektivne aktivnosti, već samo da bi se postavio prioritet prema aktivnostima. Raspon vrijednosti RPN se za automobilsku industriju kreće od 1-1000. Prioritetni rizici nad kojima se moraju uvesti preventivne, odnosno korektivne mjere su rizici koji prelaze vrijednost 100.

- Preporučene akcije – Preporučene aktivnosti se sprovode u cilju smanjenja vrijednosti S, O, ili D indeksa. Ove akcije preporučuje PFMEA tim.
- Odgovornost i datum ispunjavanja cilja – U ovom polju se definira odgovorna osoba (ili organizacija) koja treba ispuniti postavljeni cilj, sa datum ispunjavanja cilja. Kontrolu efikasnog ispunjavanja cilja treba obaviti osoba odgovorna za proces.
- Provedene aktivnosti i datum završetka – Kao što i sam naziv kaže, u ovom polju se upisuju aktivnosti koje su provedene u cilju ispunjavanja postavljenog cilja, kao i datum kada su aktivnosti implementirane.

Tablica 4.1. Tablica S indeksa preporučena od strane AIAG [19].

Posljedica	Kriterij: ozbiljnost posljedice po proizvod (posljedica na kupca)	Rang	Posljedica	Kriterij: ozbiljnost posljedice po proces (proizvodnje/montaže)
Greška koja ugrožava sigurnost ili regulacione zahtjeve	Potencijalni režim greške koji utječe na sigurnost upravljanja vozilom i/ili dovodi do neslaganja sa pravnim normama bez ikakvog upozorenja	10	Greška koja ugrožava sigurnost ili regulacione zahtjeve	Može ugroziti operatera (stroj ili montažnu liniju) bez upozorenja
	Potencijalni režim greške koji utječe na sigurnost upravljanja vozilom i/ili dovodi do neslaganja sa pravnim normama sa upozorenjem	9		Može ugroziti operatera (stroj ili montažnu liniju) sa upozorenja
Gubitak ili degradacija primarnih funkcija	Gubitak primarne funkcije (neupravljivo vozilo, ne ugrožava sigurno upravljanje vozilom)	8	Veliki poremećaj	100% proizvoda može postati škart. Gašenje ili zaustavljanje linije.
	Degradacija primarne funkcije (upravljivo vozilo, ali na smanjenoj razini značajki)	7	Značajan poremećaj	Dio proizvodne serije može postati škart. Odstupanje od željenog stanja procesa uključujući smanjenje brzine protoka kroz proizvodne linije ili dodavanje radne snage
Gubitak ili degradacija sekundarnih funkcija	Gubitak sekundarne funkcije (vozilo upravljivo, ali ugodnost/funkcija udobnosti nefunkcionalna)	6	Umjeren poremećaj	100% proizvodne serije mora biti dorađeno izvan linije i prihvaćeno
	Degradacija sekundarne funkcije (vozilo upravljivo, ali ugodnost/funkcija udobnosti na smanjenoj razini performansi)	5		Dio proizvodne serije mora biti dorađeno izvan linije i prihvaćeno
Smetnje	Smetnja u vidu pojačanog zvuka, vozilo upravljivo, predmet ne zadovoljava i primijećeno je od strane velikog broja korisnika (> 75%)	4	Umjeren poremećaj	100% proizvodne serije mora biti dorađeno u radnoj stanici prije nastavka serije
	Smetnja u vidu pojačanog zvuka, vozilo upravljivo, predmet ne zadovoljava i primijećeno je od strane velikog broja korisnika (> 50%)	3		Dio proizvodne serije mora biti dorađen u radnoj stanici prije nastavka serije
	Smetnja u vidu pojačanog zvuka, vozilo upravljivo, predmet ne zadovoljava i primijećeno je od strane velikog broja korisnika (< 25%)	2	Manji poremećaj	Lagana smetnja procesu, operaciji, ili operateru
Bez posljedica	Neprijetne posljedice	1	Bez posljedica	Neprijetne posljedice

Tablica 4.2. Tablica O indeksa preporučena od strane AIAG [19].

Vjerojatnost pojave greške	Kriterij: Pojavljivanje uzroka – PFMEA (incidenti po predmetu/vozilu)	Rang
Veoma visoka	≥ 100 na tisuću ≥ 1 u 10	10
Visoka	50 na tisuću 1 u 20	9
	20 na tisuću 1 u 50	8
	10 na tisuću 1 u 100	7
Umjerena	2 na tisuću 1 u 500	6
	0,5 na tisuću 1 u 2 000	5
	0,1 na tisuću 1 u 10 000	4
Niska	0,01 na tisuću 1 u 100 000	3
	$\leq 0,001$ na tisuću 1 u 1 000 000	2
Veoma niska	Greška je otklonjena preventivnom kontrolom	1

Tablica 4.3a. Tablica D indeksa preporučena od strane AIAG [19].

Prilika za otkrivanje	Kriterij: Vjerojatnost otkrivanja kontrolom procesa	Rang	Vjerojatnost za otkrivanje
Nema prilike za otkrivanje	Trenutno nema kontrole procesa; Ne može se otkriti ili analizirati	10	Skoro nemoguće
Teško za otkrivanje na bilo kojoj razini	Režim greške i/ili greška (uzrok) se ne može lako otkriti (na primjer: nasumičan audit).	9	Niska
Otkrivanje problema nakon obrade	Otkrivanje režima greške nakon obrade od strane operatera pomoću vizualnih/osjetnih/čujnih sredstava.	8	Umjerena
Otkrivanje problema na izvoru	Otkrivanje režima greške u radnoj stanici od strane operatera, pomoću vizualnih /osjetnih/čujnih sredstava ili nakon procesa korištenjem mjernih pomagala (ide/ ne ide, ručni zakretni moment itd.)	7	Umjereno visoka
Otkrivanje problema nakon obrade	Otkrivanje režima greške nakon obrade od strane operatera korištenjem različitih mjernih pomagala ili u radnoj stanici od strane operatera korištenjem mjernih pomagala (ide/ ne ide, ručni zakretni moment itd.).	6	Visoka
Otkrivanje problema na izvoru	Otkrivanje režima greške ili greške (uzroka) u radnoj stanici od strane operatera korištenjem različitih mjernih pomagala ili automatskom kontrolom u radnoj stanici koja može otkriti proturječan dio i obavijestiti operatera (svjetlo, zvučni signal, itd.). Baždarenje se vrši prilikom postavke procesa i prilikom provjere prvog komada u seriji (u slučaju postojeće postavke).	5	Veoma visoka

Tablica 4.3b. Tablica D indeksa preporučena od strane AIAG [19] (nastavak Tablice 4.5a).

Prilika za otkrivanje	Kriterij: Vjerojatnost otkrivanja kontrolom procesa	Rang	Vjerojatnost za otkrivanje
Otkrivanje problema nakon obrade	Otkrivanje režima greške nakon obrade pomoću automatske kontrole koja će otkriti problematičan dio i zaustaviti ga da bi se uvele preventivne mjere obrade.	4	Niska
Otkrivanje problema na izvoru	Otkrivanje režima greške u stanici pomoću automatske kontrole koja će otkriti problematičan dio i zaustaviti ga za bi se uvele preventivne mjere obrade.	3	Umjerena
Otkrivanje greške I/ili prevencija problema	Otkrivanje greške (uzroka) u stanici automatskom kontrolom koja otkriva grešku i onemogućava problematičan dio da bude izrađen.	2	Umjereno visoka
Otkrivanje nije primijenjeno; Prevencija greške	Prevencija greške (uzroka) kao rezultat odgovarajućeg dizajna, dizajna stroja, ili dizajna dijelova. Problematičan dio ne može biti izrađen jer je predmet otporan na greške.	1	Visoka

4.3 PFMEA tim

PFMEA je analiza koja je predviđena da se radi u timu, a prema nekim standardu za automobilsku industriju je to čak i obavezno. IATF 16949 standardom u klauzulama 8.3.2.1 i 8.3.3.3 je propisano da se PFMEA mora provoditi unutar multidisciplinarnog tima [4]. Relevantnost i pouzdanost PFMEA ovisi od eksperata iz raznih polja. Prema tome se može reći da se PFMEA najčešće sastoji iz multidisciplinarnog tima na čelu sa PFMEA voditeljem. Prema nekim autorima, preporučeni broj članova tima je od 4 do 6 [103, 104]. S druge strane, Stamatis [3] preporučuje od 5 do 8 (najbolje 5) članova tima. U principu je broj članova tima relativan i određuje se prema potrebama procesa proizvodnje (montaže) za koji se tim formira. Pored redovnog sastava tima formiranog u okviru tvrtke, prilikom provođenja PFMEA se mogu uključiti: kupci i dobavljači, vanjske tvrtke, članovi DFMEA tima, u nekim slučajevima i radnici iz proizvodnje, itd. PFMEA tim može biti posebna tema istraživanja u okviru rješenja za unaprjeđivanje PFMEA, jer kvaliteta i pouzdanost PFMEA u najvećoj mjeri ovise od ljudskog faktora, odnosno članova tima. Detaljnija uputstva za formiranje tima, upravljanje timom i ljudskim resursima unutar tima se mogu naći kod Stamatisa [3].

Provođenje PFMEA vodi voditelj tima. Voditelja tima obično bira menadžment tvrtke, ali također može u određenim slučajevima biti i izabran od strane samog tima. Često se pravi greška kada se kaže da je voditelj tima čimbenik sa odlučujućom ulogom u PFMEA timu. Voditelj tima treba imati apsolutno ista prava i obaveze kao i ostali članovi tima. Neke od nadležnosti voditelja tima su: planiranje i provođenje sastanaka, osiguravanje neophodnih resursa, osiguravanje pouzdanosti provođenja PFMEA [103, 104]. Pored PFMEA voditelja, značajna osoba za PFMEA je procesni stručnjak. Ovaj profil je bitan zbog poznavanja samog procesa. Idealan slučaj je kada je voditelj tima ujedno i procesni stručnjak.

Da bi tim mogao obavljati svoju ulogu u provođenju PFMEA na odgovarajući način, neophodno je da članovi tima prije svega prođu i odgovarajuću obuku. Ukoliko članovi tima imaju neke certifikate ili su već prolazili odriješenu obuku, ili možda imaju iskustva u provođenju PFMEA onda dodatna obuka nije nužna, ali je svakako poželjna. Ukoliko neka automobilska tvrtka koristi neki neuobičajeni pristup provođenju PFMEA ili neki softver koji članovima tima nije poznat, onda je neophodno da svi članovi tima prođu odgovarajuću obuku. Pored obuke za provođenje PFMEA analize, poželjno je da članovi tima prođu i obuku za timski rad.

4.4 Međunarodni standardi kojima je propisana PFMEA u automobilskoj industriji

Temeljni međunarodni standard kvalitete koji opisuje temeljne koncepte i principe kvalitete je ISO 9000 (aktualna verzija ovog standarda je ISO 9000:2015). U okviru ovog standarda je propisano preventivno upravljanje rizicima [16]. Prema Stamatis [3] PFMEA je potrebna za ispunjavanje specificiranih zahtjeva ISO 9001 (aktivna verzija ovog standarda je ISO 9001:2015). Po tom pitanju se i dalje ništa nije promijenilo, dakle i danas postoji ista potreba. Ovo se također može reći i za ISO 9004 (aktivna verzija je ISO 9004:2010) [105]. Kod svih navedenih standarda ISO 9000:2015, ISO 9001:2015 i ISO 9004:2010 postoji potreba za PFMEA analizom, ali nigdje nije određeno definirana.

Postoji nekoliko standarda kvalitete kojima je propisano korištenje PFMEA za preventivno upravljanje rizicima u najranijoj fazi dizajna proizvodnje u automobilskoj industriji. Prvi standard kvalitete koji je propisivao korištenje PFMEA analize u automobilskoj industriji je skup zahtjeva sustava kvalitete - QS 9000 nastao 1994. godine za potrebe automobilske industrije [106]. Iste godine su Američke tvrtke Ford, Chrysler i General Motors obavezale svoje dobavljače da zamjene prethodne regulacije QS 9000 standardom. Unutar QS 9000 standarda se PFMEA spominje u raznim klauzulama. Također je važno spomenuti da je u okviru ovog standarda bilo definirano obavezno korištenje AIAG-ovog „Potential FMEA“ priručnika. QS 9000 je ukinut 2006. godine, a zamijenjen je ISO/TS 16949 standardom kojim se također preporučuje korištenje AIAG-ovog „Potential FMEA“ priručnika [107]. ISO/TS 16949 (zadnja verzija je bila ISO/TS 16949:2009) je 2016. godine povučen iz upotrebe i zamijenjen je novim standardom za automobilsku industriju IATF 16949 (aktivna verzija ovog standarda je IATF 16949:2016). Jedan od čvrstih dokaza o relevantnosti FMEA analize u automobilskoj industriji je također taj što su se do sada promijenila tri međunarodna standarda kvalitete za potrebe automobilske industrije, a PFMEA je ostala u istom obliku do danas.

4.4.1 PFMEA i IATF 16949:2016

IATF 16949 je automobilski sustav upravljanja kvalitetom (SUK) standard je novi standard kvalitete koji je nedavno zamijenio ISO/TS 16949:2009. Cilj ovog standarda je razvoj SUK koji će omogućiti kontinuirano unaprjeđenje uvođenjem boljih preventivnih mjera za smanjenje grešaka i varijacija, kao i gubitaka općenito unutar dobavljačkog lanca [4].

Prva verzija ISO/TS 16949 je izdata 1999. godine od strane *International Automotive Task Force* (IATF)¹⁷. Primarni cilj formiranja ovog standarda je bio harmonizacija različitih pristupa i certificiranih sustava širom svijeta u sektoru automobilske industrije. Druga verzija ovog standarda je izdata 2002. godine, a treća 2009. godine [4].

Za razliku od prethodnih standarda za automobilsku industriju (QS 9000 i ISO/TS 16949) u kojima se PFMEA spominje samo u nekoliko klauzula, u IATF 16949:2016 standardu se PFMEA spominje čak u 18 članaka i to [4]:

1. 4.4.1.2 Sigurnost proizvoda. Organizacija bi trebala imati dokumentirane procese za potrebe upravljanja sigurnošću proizvoda za određene proizvode i proizvodne procese, što bi trebalo uključiti gdje je to god moguće i posebna odobrenja PFMEA.
2. 7.2.4 Kompetencije internog audita. Organizacija bi trebala imati dokumentirane procese kako bi se mogla potvrditi kompetentnost internih auditora uzimajući u obzir i specijalne zahtjeve kupaca. Svi ti auditori bi trebali biti u mogućnosti da demonstriraju određene kompetencije. Auditori određenih procesa proizvodnje bi u okviru tih

¹⁷ IATF je grupa proizvođača automobila i njihovih uglednih prodajnih asocijacija, formirana s ciljem da se kupcima osigura što bolja kvaliteta proizvoda.

kompetencija trebali biti u stanju da demonstriraju i tehničko razumijevanje procesa proizvodnje za koje se vrši audit, što između ostalog uključuje i razumijevanje i poznavanje PFMEA.

3. 7.2.4 Kompetencije auditora druge strane¹⁸. Kao i kod prethodne klauzule i auditori druge strane moraju pokazati određene kompetencije koje uključuju i PFMEA.
4. 7.5.3.2.2 Inženjerske specifikacije. Uslijed ažuriranja ili pregleda dokumentacije procesa, treba obavezno ažurirati i PFMEA.
5. 8.3.2.1 Planiranje dizajna i razvoja - Dodatni. Organizacija bi trebala osigurati planiranje dizajna i razvoja u različitim područjima. Jedan od tih područja je razvoj i pregled PFMEA.
6. 8.3.3.3 Specijalne karakteristike. Organizacija se obavezuje da koristi više-disciplinarni pristup pri uspostavljanju dokumenata i implementaciji procesa u cilju identificiranja specijalnih karakteristika. Pod te karakteristike spadaju i one određene od strane kupaca kao i analize rizika (PFMEA) provedene od strane same organizacije.
7. 8.3.5.2 Outputi dizajna procesa proizvodnje. Organizacija bi trebala dokumentirati izlaze dizajna procesa proizvodnje na način kojim će se omogućiti potvrđivanje ulaza dizajna procesa proizvodnje. Izlazi dizajna procesa proizvodnje bi između ostalog trebalo da uključuju i PFMEA.
8. 8.5.1.1 Kontrolni plan. U ovom članku je navedeno obavezno korištenje kontrolnog plana koji prati PFMEA analizu. Također se ističe da se nakon svake revizije kontrolnog plana mora revidirati i PFMEA, važi i obratno.
9. 8.5.6.1.1 Privremena promjena procesnih kontrola. Navodi se da bi organizacija trebala dokumentirati proces koji se bavi korištenjem alternativnih metoda kontrole. Proces treba uključiti i PFMEA.
10. 8.7.1.4 Kontrola doradenih proizvoda. Organizacija bi trebala koristiti PFMEA metodologiju za procjenu rizika kod procesa dorade.
11. 8.7.1.5 Kontrola popravljenih proizvoda. Organizacija bi trebala koristiti PFMEA metodologiju za procjenu rizika kod procesa dorade.
12. 9.1.1.1 Praćenje i mjerenje procesa proizvodnje. Organizacija bi trebala održavati sposobnost procesa proizvodnje ili rezultate performansi specificirane od strane kupaca, te bi u okviru toga trebalo potvrditi i PFMEA.
13. 9.1.1.2 Identificiranje statističkih alata. Organizacija bi trebala ustanoviti odgovarajuće statističke alate. Pri tome bi trebalo verificirati uključenost tih alata u napredni proces planiranja kvalitete proizvoda u koji se uključuje i PFMEA.
14. 9.2.2.3 Audit procesa proizvodnje. Organizacija treba auditirati sve procese proizvodnje svake tri godine kako bi utvrdila efikasnost i efektivnost procesa. Ovaj audit također uključuje i auditiranje efikasnog korištenja i PFMEA.
15. 9.3.2.1 Inputi upravljanja pregledom - Dodatni. Ovi inputi bi trebali uključiti između ostalog i PFMEA.
16. 10.2.3 Rješavanje problema. Organizacije bi trebalo imati dokumentirane procese za rješavanje problema, koji uključuju pregled PFMEA i dodavanje informacija tamo gdje je to neophodno.
17. 10.2.4 Preventivna zaštita od grešaka. Organizacija bi trebala imati dokumentiran proces za određivanje korištenja odgovarajuće metodologije za preventivnu zaštitu od grešaka. Jedna od tih metoda je PFMEA.
18. 10.3.1 Kontinuirano unaprjeđenje – Dodatni. Organizacija bi trebala imati dokumentiran proces o kontinuiranom unaprjeđenju. U okviru toga bi trebala imati i PFMEA.

¹⁸ Druga strana su uglavnom kupci ili korisnici za koje se proizvodi ili kojima tvrtka pruža neku uslugu.

Na osnovu navedenog se može izvući zaključak da je važnost PFMEA u automobilskoj industriji u značajnom porastu u odnosu na prethodne godine i standarde.

4.5 Buduća istraživanja

Za razliku od ostalih tipova i primjena FMEA u različitim interesnim područjima, okvir PFMEA za automobilsku industriju je propisan standardima i regulacijama. Prema tome, ne postoji mnogo stupnjeva slobode za promjenu strukture i procedure PFMEA u eksternom pogledu. Izgled PFMEA izvješća mora biti prilagođen standardu posebno zbog eksternih audita od strane dobavljača i kupaca. U internom pogledu se PFMEA može promijeniti i strukturno i proceduralno, ali se te promjene na kraju moraju prilagoditi standardnom PFMEA okviru. Ova transformacija može dovesti do još veće dugotrajnosti provođenja PFMEA.

U svakom slučaju, tradicionalni PFMEA okvir sadrži veliki broj nedostataka koji su navedeni u prethodnom poglavlju, a koji su sadržani i u tradicionalnoj FMEA. Te se prema tome može reći da postoji potreba za unaprjeđivanjem ove analize. Liu [33] je najavio porast u istraživanjima vezanim za FMEA (mogu se odnositi i na PFMEA) u budućnosti u velikoj mjeri, zbog sve veće i veće važnosti FMEA. Godine 2003. je provedena studija od strane Johnson i Khan [41] na 150 dobavljača u automobilskoj industriji, u kojoj postoji dosta prostora za unaprjeđivanje PFMEA. Obzirom na činjenicu da je studija provedena prije 14 godina, a u međuvremenu je predložen veliki broj rješenja za različite nedostatke i probleme koji se javljaju uslijed tih nedostataka, trebalo bi provesti ponovnu studiju u cilju određivanja trenutnog stanje PFMEA u automobilskoj industriji. Nakon te pregledne istraživačke studije bi trebalo postaviti smjernice za buduća istraživanja.

Nedostaci vezani za tradicionalni RPN i S, O i D indekse su riješeni brojnim rješenjima predloženim od strane različitih znanstvenika. Za rješavanje ovih problema su korištene višekriterijske metode za odlučivanje, matematičko programiranje, umjetna inteligencija, integrirani ili hibridni pristupi, metode ponderiranja, i mnogi drugi pristupi. Jedan od pristupa koji se pokazao kao vrlo efikasan je Fuzzy, koji je ujedno i najmnogobrojniji u literaturi. Fuzzy pristup sadrži veliki broj prednosti, ali i određeni broj nedostataka. Jedan od najvećih nedostataka koji se može izdvojiti je teška (skoro nemoguća) primjena u praksi, zbog potrebe za definiranjem velikog broja pravila. Sa druge strane, postavljanje prioritetnih kriterija između S, O i D indeksa se pokazalo jako efikasnim primjenom metoda ponderiranja. Metoda koja se pokazala kao najprimjenjivija i najefikasnija je AHP.

Na osnovu obimnog pregleda literature i prijedloga drugih znanstvenika koji su se bavili tematikom, mogu se izdvojiti sljedeći budući trendovi unaprjeđenja PFMEA analize:

- Postoji potreba za rastavljanjem S, O ili D indeksa na niže činioce radi detaljnijeg određivanja svakog od indeksa [33].
- Ponderiranje S, O ili D indeksa i određivanje prioritetnih kriterija [33].
- Korištenje hibridnih pristupa kombiniranje dvije ili više višekriterijske metode pri određivanju prioritetnih rizika [33].
- Formiranje troškovnog modela prema specijalnoj potrebi za PFMEA u automobilskoj industriji. Na osnovu pregleda svih modela utvrđeno je da je najveći broj modela skoro neprimjenjiv za potrebe PFMEA za automobilsku industriju, ali se kombiniranje raznih elemenata tih modela može doći do prikladnog rješenja.
- Unaprjeđenje upravljanja PFMEA integracijom suvremenih metoda poput *lean* pristupa za unaprjeđenje procesa proizvodnje i poslovanja.
- Sveobuhvatna baza podataka. Formiranje baze podataka koja će sadržati sve PFMEA analize radi lakšeg upravljanja podacima. Baza bi također trebalo da sadrži mogućnost

praćenja, prikupljanja i mjerenja podataka o pojavi grešaka, odnosno promjenama O indeksa.

- Softversko rješenje [41]. Softversko rješenje olakšava upravljanje PFMEA i povećava razinu pouzdanosti ljudskog faktora pri izradi PFMEA izvješća.

Pored navedenih prijedloga za unaprjeđenje strukture i procedure FMEA analize, mogu se uzeti u obzir i buduća unaprjeđenja nedostataka koja nastaju uslijed ljudskog faktora. Ova pitanja zahtijevaju multidisciplinarnost, što u startu može biti ograničenje za inženjere. Ovim problemima se najviše u literaturi bavio Stamatidis [3]. Neka od potencijalnih unaprjeđenja mogu biti u području:

- Idealnog vremena za provođenje PFMEA analize i uključenost vremenskog čimbenika u proračun rizika. Zbog nedostatka vremena da se provede PFMEA analiza na odgovarajući način, može doći do propusta i pojave kritičnih grešaka.
- Upravljanja ljudskim faktorom prilikom provođenja PFMEA. Ovo može također biti jedan od izazova, jer najviše grešaka i problema vezanih za PFMEA nastaje zbog pogrešnog pristupa ljudskog faktora.
- Treninga [41]. Odgovarajući i adekvatan trening čini jako bitan dio pripreme i osposobljavanja zaposlenih za provođenje PFMEA analize. Mogla bi se napraviti čitava studija na temu odgovarajućeg treninga. Također bi pri tome trebalo uzeti u obzir i kulturni aspekt primjene PFMEA, odnosno svrhu primjene PFMEA u automobilske industriji.

5. ZAKLJUČAK

FMEA analiza nalazi sve veću i veću primjenu u praksi u različitim područjima. Pored skoro 70 godina postojanja, i dalje predstavlja trend i izazov raznim znanstvenicima za istraživanja. Poseban slučaj je automobilska industrija kod koje su se promijenila tri međunarodna standarda od 1994. godine do danas. Prvo QS 9000, zatim ISO/TS 16949 i sada je aktualan IATF 16949 koji također sadrži PFMEA kao obaveznu kvalitativnu metodu za potrebe otklanjanja rizika i unaprjeđenja pouzdanosti procesa proizvodnje.

I pored toga što nalazi široku primjenu u različitim industrijama i oblastima, PFMEA sadrži veliki broj nedostataka. Mnogobrojni autori su ove nedostatke rješavali na različiti načine, ali i dalje ima prostora i mogućnosti za unaprjeđenje.

Na osnovu svega navedenog i pregledanog može se reći da postoji veliki broj rješenja za PFMEA analizu i da svako od unaprjeđenja daje određene rezultate. Ali je i dalje potrebno sveobuhvatno rješenje koje će obuhvatiti sva pojedinačna unaprjeđenja u jednu zajedničku cjelinu. Ovo rješenje bi bilo najfunkcionalnije u softverskom obliku. Također bi trebalo uzeti u obzir činjenicu da PFMEA za automobilsku industriju treba ostati u odgovarajućim okvirima predloženim PFMEA standardima i vodičem propisanim tim standardima. To je dodatan razlog za softverskim rješenjem koje bi samo prevodilo promjene strukture ili procedure zbog unaprjeđenja u prvobitni zahtijevani PFMEA okvir.

LITERATURA

- [1] Kumar, S. A., & Suresh, N. (2009). *Operations management*. New Age International.
- [2] Kostina, M. (2012). Reliability Management of Manufacturing processes in Machinery Enterprises, PhD thesis, Tallin University of Technology.
- [3] Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution, ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, USA.
- [4] IATF 16949:2016. (2017). *Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations*, International Automotive Task Force.
- [5] Bertsche, B. (2008). *Reliability in automotive and mechanical engineering: determination of component and system reliability*. Springer Science & Business Media.
- [6] Schuman, C. A., & Brent, A. C. (2005). Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(6), 566-579.
- [7] Birolini, A. (2007). *Reliability engineering* (Vol. 5). Heidelberg: Springer.
- [8] O'Connor, P. D., O'Connor, P., & Kleyner, A. (2012). *Practical reliability engineering*. John Wiley & Sons.
- [9] Saleh, J. H., & Marais, K. (2006). Highlights from the early (and pre-) history of reliability engineering. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(2), 249-256.
- [10] Coppola, A. (1984). Reliability engineering of electronic equipment a historical perspective. *IEEE Transactions on Reliability*, 33(1), 29-35.
- [11] Knight, C. R. (1991, January). Four decades of reliability progress. In *Reliability and Maintainability Symposium, 1991. Proceedings., Annual* (pp. 156-160). IEEE.
- [12] Zio, E. (2009). Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 125-141.
- [13] Rao, R. V. (2010). *Advanced modeling and optimization of manufacturing processes: international research and development*. Springer Science & Business Media.
- [14] Singh, R. (2006). *Introduction to Basic Manufacturing Process and Workshop Technology*. New Age International.
- [15] Andreasen, M. M., Kähler, S., & Lund, T. (1982). Design for assembly-an integrated approach. *Assembly Automation*, 2(3), 141-145.
- [16] HRN EN ISO 9001:2015 hr. (Travanj, 2016). *Sustavi upravljanja kvalitetom – zahtjevi*, HZN – Hrvatski zavod za norme.
- [17] Pentti, H., & Atte, H. (2002). Failure mode and effects analysis of software-based automation systems. *VTT Industrial Systems, STUK-YTO-TR*, 190, 190.
- [18] Korenko, M., Krocko, V., & Kaplík, P. (2012). Use of FMEA method in manufacturing organization. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 11(2), 48-50.
- [19] Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation (2008). *POTENTIAL FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)*, AIAG – Automotive Industry Action Group, Dostupno na stranici: www.engmatl.com/home/finish/20-engineering.../160-fmeamanual, Pristupljeno: 12.04.2017.
- [20] Onodera, K. (1997, January). Effective techniques of FMEA at each life-cycle stage. In *Reliability and Maintainability Symposium. 1997 Proceedings, Annual* (pp. 50-56). IEEE.

- [21] Teoh, P. C., & Case, K. (2005). An evaluation of failure modes and effects analysis generation method for conceptual design. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(4), 279-293.
- [22] Singh, V., Pungotra, H., Singh, S., & Gill, S. S. (2013). Prioritization of Failure Modes in Process FMEA using Fuzzy Logic. *International Journal Of Enhanced Research In Science Technology & Engineering*, 2(2).
- [23] Dinmohammadi, F., & Shafiee, M. (2013). A fuzzy-FMEA risk assessment approach for offshore wind turbines. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 4(13), 59-68.
- [24] Breiing, A. J., & Kunz, A. M. (2002, April). Critical Consideration and Improvement of the FMEA. In *Proceedings of the TMCE* (pp. 519-530).
- [25] Deng, W. J., Chiu, C. C., & Tsai, C. H. (2007). The Failure Mode and Effects Analysis Implementation for Laser Marking Process Improvement: A Case Study. *Asian Journal on Quality*, 8(1), 137-153.
- [26] Chin, K. S., Chan, A., & Yang, J. B. (2008). Development of a fuzzy FMEA based product design system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(7-8), 633-649.
- [27] Guimarães, A. C. F., & Lapa, C. M. F. (2007). Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems. *Applied Soft Computing*, 7(1), 17-28.
- [28] Arabian-Hoseynabadi, H., Oraee, H., & Tavner, P. J. (2010). Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(7), 817-824.
- [29] Dong, C. (2007). Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24(9), 958-971.
- [30] Khasha, R., Sepehri, M. M., & Khatibi, T. (2013). A Fuzzy FMEA Approach to Prioritizing Surgical Cancellation Factors. *International Journal of Hospital Research*, 2(1).
- [31] Keskin, G. A., & Özkan, C. (2009). An alternative evaluation of FMEA: fuzzy ART algorithm. *Quality and Reliability Engineering International*, 25(6), 647-661.
- [32] Rahmani, H., & Jasemi, M. (2014). Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) by Fuzzy Data Envelop Analysis (Fuzzy-DEA). *Journal of Mathematics and System Science*, 4(3), 173.
- [33] Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert systems with applications*, 40(2), 828-838.
- [34] Hedderich, C. P. (1996). Navy proactive maintenance. *Naval engineers journal*, 108(6), 41-57.
- [35] Rivera, S. S., & McLeod, J. E. N. (2009). Recommendations generated about a discontinuous distillation plant of biofuel. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* (Vol. 1, pp. 651-56).
- [36] Reiling, J. G., Knutzen, B. L., & Stoecklein, M. (2003). FMEA-the cure for medical errors. *Quality progress*, 36(8), 67-71.
- [37] Stålhane, T., & Wedde, K. J. (1998). Modification of safety critical systems: an assessment of three approaches. *Microprocessors and Microsystems*, 21(10), 611-619.
- [38] Goddard, P. L. (2000). Software FMEA techniques. In *Reliability and Maintainability Symposium, 2000. Proceedings. Annual* (pp. 118-123). IEEE.
- [39] Scipioni, A., Saccarola, G., Centazzo, A., & Arena, F. (2002). FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company. *Food control*, 13(8), 495-501.

- [40] Banduka, N., Veza, I., & Bilic, B. (2016). An integrated lean approach to Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA): A case study from automotive industry. *Advances in Production Engineering & Management*, 11(4), 355-365.
- [41] Johnson, K. G., & Khan, M. K. (2003). A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1), 348-356.
- [42] Montgomery, T. A., & Marko, K. A. (1997, January). Quantitative FMEA automation. In *Reliability and Maintainability Symposium. 1997 Proceedings, Annual* (pp. 226-228). IEEE.
- [43] Rhee, S. J., & Ishii, K. (2003). Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability. *Advanced Engineering Informatics*, 17(3), 179-188.
- [44] Liu, H. C. (2016). FMEA using uncertainty theories and MCDM methods. In *FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods* (pp. 13-27). Springer Singapore.
- [45] Biddle, J. The lean benchmark report, iz izvora: <http://consumergoods.edgl.com/column/The-Lean-BenchmarkReport48987>, pristupljeno 04.04.2017 godine.
- [46] Lorenc, M., Jentzsch, A., Andersen, M., Noack, B., Waffenschmidt, L., Schuh, G., Rudolf, S. The lean advantage in engineering: developing better products faster and more efficiently, iz izvora: <https://www.bcgperspectives.com>, pristupljeno 04.04.2017 godine.
- [47] Herzog, N. V., & Tonchia, S. (2014). An instrument for measuring the degree of lean implementation in manufacturing. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 60(12), 797-803.
- [48] Liker, J. K. (2004). *The toyota way*. Esensi.
- [49] Shekari, A., & Fallahian, S. (2007). Improvement of Lean methodology with FMEA. In *Proceedings of the 18th Annual*.
- [50] Sawhney, R., Subburaman, K., Sonntag, C., Rao Venkateswara Rao, P., & Capizzi, C. (2010). A modified FMEA approach to enhance reliability of lean systems. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 27(7), 832-855.
- [51] Shahrabi, M., & Shojaei, A. A. (2014). Application of FMEA and AHP in lean maintenance. *Int J Mod Eng Sci*, 3, 61-73.
- [52] Puvanasvaran, A. P., Jamibollah, N., Norazlin, N., & Adibah, R. (2014). Poka-Yoke Integration into Process FMEA. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(7), 66-73.
- [53] Puvanasvaran, A. P., Jamibollah, N., & Norazlin, N. (2014). Integration of POKA YOKE into process failure mode and effect analysis: a case study. *American Journal of Applied Sciences*, 11(8), 1332.
- [54] Gilchrist, W. (1993). Modelling failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 10(5).
- [55] Ben-Daya, M., & Raouf, A. (1996). A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13(1), 43-47.
- [56] Tarum, C. D. (2001). *FMERA-failure modes, effects, and (financial) risk analysis* (No. 2001-01-0375). SAE Technical Paper.
- [57] Vitr, Z., & Vitr, M. (2009, July). An application of FMEA for warranty cost assesment. In *Reliability, Maintainability and Safety, 2009. ICRMS 2009. 8th International Conference on* (pp. 612-616). IEEE.
- [58] Popović, V., Vasić, B., & Petrović, M. (2010). The possibility for FMEA method improvement and its implementation into bus life cycle. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 56(3), 179-185.

- [59] Chen, C. C. (2014). A FMEA-aided Project Bidding Decision System. *Advances in Industrial Engineering and Management*, 3(1), 21-28.
- [60] Chen, C. C., & Ammad, T. (2006). A Lowest-expected-cost Project bidding Decision Method using FMEA Analysis. *Risk*, 14.
- [61] Kahrobaee, S., & Asgarpoor, S. (2011, August). Risk-based failure mode and effect analysis for wind turbines (RB-FMEA). In *North American Power Symposium (NAPS), 2011* (pp. 1-7). IEEE.
- [62] Rezaee, M. J., Salimi, A., & Yousefi, S. (2016). Identifying and managing failures in stone processing industry using cost-based FMEA. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-14.
- [63] Braglia, M. (2000). MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17(9), 1017-1033.
- [64] Kmenta, S., & Ishii, K. (2000, September). Scenario-based FMEA: a life cycle cost perspective. In *Proc. ASME Design Engineering Technical Conf. Baltimore, MD*.
- [65] KMENTA, S., & ISHII, K. (2004). Scenario-based failure modes and effects analysis using expected cost. *Journal of mechanical design*, 126(6), 1027-1035.
- [66] Locatelli, E., Valsecchi, N., Maccarini, G., & Bugini, A. (2002). Failure scenario FMEA: theoretical and applicative aspects. In *AMST'02 Advanced Manufacturing Systems and Technology* (pp. 657-664). Springer Vienna.
- [67] Rhee, S. J., & Ishii, K. (2002, January). Life cost-based FMEA incorporating data uncertainty. In *ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 309-318). American Society of Mechanical Engineers.
- [68] Rhee, S. J., & Ishii, K. (2003, January). Life cost-based FMEA using empirical data. In *ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 167-175). American Society of Mechanical Engineers.
- [69] Spencer, C. M., & Rhee, S. J. (2003, May). Cost based failure modes and effects analysis (FMEA) for systems of accelerator magnets. In *Particle Accelerator Conference, 2003. PAC 2003. Proceedings of the* (Vol. 4, pp. 2177-2179). IEEE.
- [70] Spencer, C. M., & Rhee, S. J. (2004). Comparison study of electromagnet and permanent magnet systems for an accelerator using cost-based failure modes and effects analysis. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 14(2), 413-416.
- [71] D'Urso, G., Stancheris, D., Valsecchi, N., Maccarini, G., & Bugini, A. (2005). A new FMEA approach based on availability and costs. In *AMST'05 Advanced Manufacturing Systems and Technology* (pp. 703-712). Springer Vienna.
- [72] von Ahsen, A. (2008). Cost-oriented failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(5), 466-476.
- [73] Hassan, A., Dayarian, I., Siadat, A., & Dantan, J. Y. (2008, September). Cost-based FMEA and ABC concepts for manufacturing process plan evaluation. In *Cybernetics and Intelligent Systems, 2008 IEEE Conference on* (pp. 197-202). IEEE.
- [74] Hassan, A., Siadat, A., Dantan, J. Y., & Martin, P. (2009). A quality/cost-based improvement approach for conceptual process planning. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 4(3), 188-197.
- [75] Hassan, A., Siadat, A., Dantan, J. Y., & Martin, P. (2010). Conceptual process planning—an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(4), 392-401.

- [76] Carmignani, G. (2009). An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(4), 861-871.
- [77] Jamshidi, A., & Kazemzadeh, R. B. (2010, January). A fuzzy cost-based FMEA model. In *International Conference on Industrial Experting and Operations Management*.
- [78] Abdelgawad, M., & Fayek, A. R. (2010). Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 1028-1036.
- [79] Vykydal, D., Fabík, R., & Kelblerová, M. (2011). Cost-oriented FMEA of hot rolled wire production, In *International Conference on Metal*, 1310-1317.
- [80] Zammori, F., & Gabbriellini, R. (2012). ANP/RPN: A multi criteria evaluation of the risk priority number. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(1), 85-104.
- [81] Abbasgholizadeh Rahimi, S., Jamshidi, A., Ait-Kadi, D., & Ruiz, A. (2015). Using Fuzzy Cost-Based FMEA, GRA and Profitability Theory for Minimizing Failures at a Healthcare Diagnosis Service. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(4), 601-615.
- [82] Shafiee, M., & Dinmohammadi, F. (2014). An FMEA-based risk assessment approach for wind turbine systems: a comparative study of onshore and offshore. *Energies*, 7(2), 619-642.
- [83] Lillie, E., Sandborn, P., & Humphrey, D. (2015). Assessing the value of a lead-free solder control plan using cost-based FMEA. *Microelectronics Reliability*, 55(6), 969-979.
- [84] Bakhtiar, A., Purwanggono, B., & Pramesti, R. A. C. (2016). Defect Analysis on Smoothmill Facility Using Priority-Cost Failure Mode, Effect, And Criticality Analysis (PC-FMECA), In *International conference of management science*.
- [85] Boufaied, A., Thabet, R., & Korbaa, O. (2016, October). Dynamic delay risk assessing using cost-based FMEA for transportation systems. In *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 001057-001062). IEEE.
- [86] Peng, Y., Asgarpoor, S., Qiao, W., & Foruzan, E. (2016, September). Fuzzy cost-based FMECA for wind turbines considering condition monitoring systems. In *North American Power Symposium (NAPS), 2016* (pp. 1-6). IEEE.
- [87] Issad, M., Kloul, L., & Rauzy, A. (2017, January). A scenario-based FMEA method and its evaluation in a railway context. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2017 Annual* (pp. 1-7). IEEE.
- [88] Tazi, N., Châtelet, E., & Bouzidi, Y. (2017). Using a Hybrid Cost-FMEA Analysis for Wind Turbine Reliability Analysis. *Energies*, 10(3), 276.
- [89] Hunt, J. E., Price, C. J., & Lee, M. H. (1993). Automating the FMEA process. *Intelligent Systems Engineering*, 2(2), 119-132.
- [90] Russomanno, D. J., Bonnell, R. D., & Bowles, J. B. (1994). Viewing computer-aided failure modes and effects analysis from an artificial intelligence perspective. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 1(3), 209-228.
- [91] Hunt, J. E., Pugh, D. R., & Price, C. J. (1995). Failure mode effects analysis: a practical application of functional modeling. *Applied Artificial Intelligence an International Journal*, 9(1), 33-44.
- [92] Wirth, R., Berthold, B., Krämer, A., & Peter, G. (1996). Knowledge-based support of system analysis for the analysis of failure modes and effects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 9(3), 219-229.
- [93] Price, C. J., Snooke, N., Pugh, D. R., Hunt, J. E., & Wilson, M. S. (1997). Combining functional and structural reasoning for safety analysis of electrical designs. *The knowledge engineering review*, 12(03), 271-287.

- [94] Hawkins, P. G., & Woollons, D. J. (1998). Failure modes and effects analysis of complex engineering systems using functional models. *Artificial intelligence in engineering*, 12(4), 375-397.
- [95] Huang, G. Q., & Mak, K. L. (2003). Failure mode and effect analysis (FMEA) over the WWW. In *Internet Applications in Product Design and Manufacturing* (pp. 135-146). Springer Berlin Heidelberg.
- [96] Price, C. J., & Taylor, N. S. (2002). Automated multiple failure FMEA. *Reliability Engineering & System Safety*, 76(1), 1-10.
- [97] Teoh, P. C., & Case, K. (2004). Failure modes and effects analysis through knowledge modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 253-260.
- [98] Kurtoglu, T., & Tumer, I. Y. (2008). A graph-based fault identification and propagation framework for functional design of complex systems. *Journal of mechanical design*, 130(5), 051401.
- [99] Li, G., Gao, J., & Chen, F. (2009). A novel approach for failure modes and effects analysis based on polychromatic sets. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 23(02), 119-129.
- [100] Ebrahimipour, V., Rezaie, K., & Shokravi, S. (2010). An ontology approach to support FMEA studies. *Expert Systems with Applications*, 37(1), 671-677.
- [101] Noh, K. W., Jun, H. B., Lee, J. H., Lee, G. B., & Suh, H. W. (2011). Module-based Failure Propagation (MFP) model for FMEA. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(5), 581-600.
- [102] Gan, L., Xu, J., & Han, B. T. (2012). A computer-integrated FMEA for dynamic supply chains in a flexible-based environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(5-8), 697-717.
- [103] Mikulak, R. J., McDermott, R., & Beauregard, M. (2008). *The basics of FMEA*. CRC Press.
- [104] Press, D. (2003). *Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), for Automotive, Aerospace, and General Manufacturing Industries*. CRC Press.
- [105] HRN EN ISO 9004:2010 en. (Kolovoz, 2010). *Upravljanje u svrhu trajne uspješnosti organizacije – Pristup upravljanju kvalitetom (ISO 9004:2009; EN ISO 9004:2009)*, HZN – Hrvatski zavod za norme.
- [106] QS 9000:1998 (March, 1998). *Quality system requirements*. Automotive Industry Action Group (AIAG).
- [107] ISO/TS 16949:2009 (May, 2010). *Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations*. ,Bureau of Indian standards, New Delhi.

POPIS OZNAKA I KRATICA

Popis oznaka i kratica navodi se abecednim redom.

ABC	Trošak zasnovan na aktivnosti (en. <i>Activity Based Cost</i>)
AIAG	Grupacija osnovana od strane Forda, Chrislera i General Motorsa (en. <i>Automotive Industry Action Group</i>)
AGREE	Savjetodavna grupacija za pouzdanost elektronske opreme (en. <i>Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment</i>)
AHP	Hijerarhija analitičkog procesa (en. <i>Analytic Hierarchy process</i>)
ANP	Mreža analitičkog procesa (en. <i>Analytic network process</i>)
APQP	Napredno planiranje kvalitete proizvoda (en. <i>Advanced product quality planning</i>)
ART	Teorija adaptivne rezonance (en. <i>Adaptive Resonance Theory</i>)
COPRAS-G	Proporcijaska procjena sive-kompleksnosti (en. <i>Grey-complex proportional assessment</i>)
CPN	Broj prioritetnog troška (en. <i>Cost Priority Number</i>)
D	Indeks sposobnosti da se greška otkrije (en. <i>Detection</i>)
DEA	Analiza umotavanja podataka (en. <i>Data Envelopment Analysis</i>)
DEMATEL	Sud o donošenju odluka i laboratorija vrednovanja (en. <i>Decision Making Trial and Evaluation Laboratory</i>)
DFMEA	Analiza grešaka i posljedica koje se javljaju u fazi dizajna proizvoda (en. <i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i>)
EPDS-1	Softverski prototip za FMEA
ER	Entitetski odnos (en. <i>Entity relationship</i>)
FER	Fuzzy dokazno rasuđivanje (en. <i>Fuzzy Evidential Reasoning</i>)
FFIP	Identificiranje i prikazivanje funkcionalnih grešaka (en. <i>Functional-Failure Identification and Propagation</i>)
FMAG	Analiza generacije grešaka (en. <i>Failure Mode Analysis Generation</i>)

FMEA	Analiza grešaka i posljedica koje izazivaju (en. <i>Failure Mode and Effect Analysis</i>)
FMECA	Analiza kritičnosti grešaka i njihovih posljedica (en. <i>Failure Mode and Effect Criticality Analysis</i>)
FTA	Analiza drveta otkaza (en. <i>Failure Three Analysis</i>)
GRA	Siva relacijska analiza (en. <i>Grey Relation Analysis</i>)
IATF	Grupacija proizvođača automobila (en. <i>International Automotive Task Force</i>)
ICBM	Interkontinentalna balistička raketa (<i>Intercontinental Ballistic Missile</i>)
IFS	Intuitivni fuzzy skup (en. <i>Intuitionistic fuzzy set</i>)
ISM	Interpretativno strukturalno modeliranje (en. <i>Interpretive Structural Modelling</i>)
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju (en. <i>International Standardization Organization</i>)
LSI	Integracija krupnih razmjera (en. <i>Large Scale Integration</i>)
ME-MCMD	Više Ekspertne - Višekriterijske metode odlučivanja (en. <i>Multi Expert - Multi Criteria Decision Making</i>)
MFP	Propagiranje grešaka zasnovanih na modulima (en. <i>Module-based Failure Propagation</i>)
MTBR	Vrijeme između popravke (en. <i>Mean Time Between Repair</i>)
MTTR	Skraćivanje vremena potrebnog za popravak (en. <i>Mean Time To Repair</i>)
MULTIMOORA	Analiza više-objektivne optimizacije prema omjeru (en. <i>Multi-Objective Optimization by ratio Analysis</i>)
O	Indeks učestalosti pojave greške (en. <i>Occurrence</i>)
OEM	Proizvođači originalne opreme za automobile (en. <i>Original Equipment Manufacturer</i>)
OWA	Ponderirani prosjek naručivanja (en. <i>The Order Weighted Averaging</i>)
OWGA	Ponderirani geometrijski prosjek naručivanja (en. <i>The Order Weighted Geometric Averaging</i>)

PC-FMECA	FMECA sa prioritetnim troškovima (en. <i>Priority-Cost FMECA</i>)
PFMEA	Analiza grešaka i posljedica koje se javljaju u fazi procesa proizvodnje (en. <i>Potential Failure Mode and Effect Analysis</i>)
PPAP	Proces odobravanja dijelova proizvodnje (en. <i>Production Part Approval Process</i>)
PROMETHEE	Metoda optimizacije rangiranja prednosti za obogaćivanje procjena (en. <i>Preference Ranking Optimization Method for Enrichment Evaluations</i>)
QCCPP	Konceptualno procesno planiranje zasnovano na troškovima i kvaliteti (en. <i>Quality/Cost-based Conceptual Process Planning</i>)
QFD	Funkcionalni razvoj kvalitete (en. <i>Quality Functional Deployment</i>)
QUALIFLEX	Kvalitativno-fleksibilna metoda za više-kriterijsko odlučivanje
ROI	Povraćaj od ulaganja (en. <i>Return of investment</i>)
RPN	Broj prioritelnog rizika (en. <i>Risk Priority Number</i>)
S	indeks ozbiljnosti greške (en. <i>Severity</i>)
SAD	Sjedinjene Američke Države
S/CFMEA	Sustav/koncept analiza grešaka i posljedica koje izazivaju (en. <i>System/Concept Failure Mode and Effect Analysis</i>)
SUK	Sustav upravljanja kvalitetom
TOPSIS	Tehnika za određivanje prednosti prema sličnosti ka idealnom rješenju (en. <i>The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)
UPN	Prioritet korisnosti (en. <i>Utility Priority Number</i>)
VIKOR	Višekriterijska optimizacija i kompromisno rješenje
WIFA	Projekt vezan za unaprjeđenje baza zasnovanih na znanju
WLSM-MOI	Metoda parcijalnog rangiranja

SAŽETAK

Tematika ovog kvalifikacijskog rada je prvenstveno vezana za unaprjeđenje pouzdanosti procesa proizvodnje u automobilskoj industriji pomoću PFMEA. Prema tome, prvo je dat pregled pouzdanosti općenito s osvrtom na pouzdanost procesa proizvodnje u automobilskoj industriji. Također su obuhvaćene i metode koje se koriste za poboljšanje pouzdanosti. Na temelju navedenog je izvučen zaključak o trenutnom stanju i budućim trendovima u upravljanju pouzdanošću procesa proizvodnje u automobilskoj industriji. Obzirom na to da se do poboljšanja pouzdanosti prvenstveno dolazi smanjenjem broja grešaka, dalji tijek rada je bio usmjeren na PFMEA za preventivno identificiranje i otklanjanje grešaka unutar procesa proizvodnje. Da bi se PFMEA shvatila na odgovarajući način napravljen je opsežan pregled FMEA općenito, s osvrtom na nedostatke i obiman pregled literature u periodu od 1993. do danas. Pored općenitog pregleda literature, posebna pažnja je posvećena FMEA u integraciji sa *Leanom*, troškovnim FMEA i automatiziranim FMEA sa softverskim rješenjima. Nakon opsežnog uvoda u FMEA analizu, navedeno je detaljno upoznavanje s PFMEA analizom za potrebe automobilske industrije, pri čemu je poseban osvrt bio na proceduri FMEA, strukturi FMEA, FMEA timu, i pratećim standardima kojima je PFMEA definirana u automobilskoj industriji. IATF 16949:2016 standard za automobilsku industriju je posebno obrađen pri čemu je napravljen pregled svih klauzula u kojima se spominje PFMEA. Na osnovu sveukupnog pregleda FMEA i PFMEA u automobilskoj industriji, izveden je zaključak i date su smjernice o budućim potrebama i trendovima istraživanja PFMEA u automobilskoj industriji.