

Uporaba metode FMEA za analizo odpovedi železniške proge

Miran Abram

Slovenske železnice-Infrastruktura,d.o.o., Kolodvorska 11, 1506 Ljubljana, Slovenija, miran.abram@slo-zeleznice.si

V prispevku je opisana metoda analize načinov odpovedi in njihovih učinkov FMEA (ang. Failure Modes and Effects Analysis). Predstavljene so štiri faze te metode. Metoda je aplicirana na železniško progo, ki je pomemben del železniškega prometnega sistema. Izvedba posamezne faze je ponazorjena na primeru tirnice sistema 49E1, ki je vgrajena v železniški tir odprte proge v Slovenskih železnicah. Pokazali smo, kako na osnovi podatkov o delovanju proge določimo kvantitativno oceno za kritičnost posameznih načinov odpovedi elementov železniške proge.

Ključne besede: FMEA, železniški prometni sistem, železniška proga, način odpovedi, vzrok, učinek, kritičnost

1 Uvod

Pri analizi zanesljivosti kompleksnih tehničnih sistemov so zelo učinkovite metode, ki temeljijo na študiju načinov odpovedi njihovih elementov. Kompleksnejši kot je sistem, večja je potreba po natančnem in sistematičnem pristopu pri identifikaciji in klasifikaciji načinov in učinkov odpovedi. Rezultati študija načinov odpovedi omogočajo odkrivanje tistih mest v sistemu, ki so s stališča zanesljivosti kritična, in planiranje ustreznih vzdrževalnih postopkov ter ukrepov za izboljšanje zanesljivosti. Izsledki v literaturi kažejo, da se je na tem področju uveljavila metoda FMEA (ang. Failure Modes and Effects Analysis; glej npr. Pham, 1998; Kmenta, Fitch in Ishii, 1999; Braglia, 2000; Price in Taylor, 2002; Xu, 2002; Pillay in Wang, 2003; Stamatis, 2003; Hu in Yu, 2009; Walker idr. 2009; Fraracci, 2010).

Primer kompleksnega sistema je železniški prometni sistem (v nadaljevanju ŽPS), čigar osnovna funkcija je varen in urejen prevoz potnikov in tovara iz ene lokacije na drugo na podlagi veljavnega voznega reda. Pomembno vlogo pri izvajanju osnovne funkcije ŽPS igra železniška proga. Odpoved železniške proge namreč lahko povzroči odpoved celotnega ŽPS, kar negativno vpliva na razpoložljivost sistema in ogroža varnost v železniškem prometu.

V članku bomo opisali metodo FMEA, ki jo bomo aplicirali na železniško progo. Izvedbo posamezne faze FMEA bomo prikazali na primeru tirnice sistema 49E1, ki je vgrajena v železniški tir odprte proge v Slovenskih železnicah.

2 Teoretične osnove

2.1 Definicije osnovnih pojmov

Definicije osnovnih pojmov so povzete po Hudoklin in Rozman (2004) in Villemeur (1992).

Nerazpoložljivost sistema pomeni nezmožnost sistema za izvajanje njegove osnovne funkcije. Glavni vzrok za nerazpoložljivost predstavljajo odpovedi sistema in njegovih elementov.

Odpoved sistema oziroma elementa sistema pomeni prenehanje njegove sposobnosti, da zadovoljivo opravlja zahtevano funkcijo. Odpovedi lahko klasificiramo glede na različne kriterije kot npr.:

- hitrost nastajanja (nenadne ali postopne odpovedi),
- stopnja (delne ali popolne odpovedi),
- obdobje v življenjski dobi sistema/elementa sistema (odpovedi v zgodnjem obdobju življenjskega cikla, slučajne odpovedi v obdobju normalnega delovanja ali odpovedi v obdobju staranja),
- odvisnost (primarne ali sekundarne).

V praksi se pogosto uporablja delitev odpovedi na katastrofalne (nenadna in popolna odpoved) in degradacijske odpovedi (postopna in delna odpoved).

Način odpovedi opredelimo kot obliko, v kateri se odpoved pokaže.

Vzrok načina odpovedi opredelimo kot okoliščine, ki so ta način odpovedi povzročile.

Učinek načina odpovedi opredelimo kot skupek vseh možnih posledic posameznega načina odpovedi.

Kritičnost načina odpovedi opredelimo s kombinacijo verjetnosti za nastanek posameznega načina odpovedi in pomembnosti njegovega učinka.

2.2 Metoda FMEA

Pri študiju odpovedi kompleksnih sistemov učinkovito uporabimo metodo FMEA. Uporaba metode FMEA predstavlja prvi korak v procesu priprave in izvajanja programa vzdrževanja sistema na podlagi njegove zanesljivosti (ang. Reliability Centered Maintenance; Moubray, 1997). Poznavanje elementov, ki jih vključuje FMEA, predstavlja osnovo za planiranje korektivnih ukrepov za izboljšanje razpoložljivosti celotnega sistema (Villemeur, 1992).

Metoda FMEA je induktivna metoda, ki obsega štiri faze (glej npr. Hudoklin in Brezavšček, 1994):

- opredelitev sistema, elementov sistema in njihovih funkcij,
- identifikacija načinov odpovedi elementov sistema in njihovih vzrokov,
- študij učinkov različnih načinov odpovedi elementov sistema na različnih nivojih v zgradbi sistema,
- zaključki in priporočila.

V nadaljevanju bomo posamezne faze metode FMEA podrobneje opisali.

1. faza FMEA:

V okviru prve faze je potrebno natančno opredeliti sam sistem in njegove elemente. Priporočljivo je, da izdelamo ustrezno hierarhično strukturo. Število nivojev v tej strukturi je odvisno od kompleksnosti sistema. Na vseh nivojih v hierarhični strukturi je potrebno definirati funkcije sistema in posameznih elementov. Izdelati je potrebno tudi ustrezne

funkcionalne in logične diagrame, ki ponazarjajo medsebojne povezave elementov sistema.

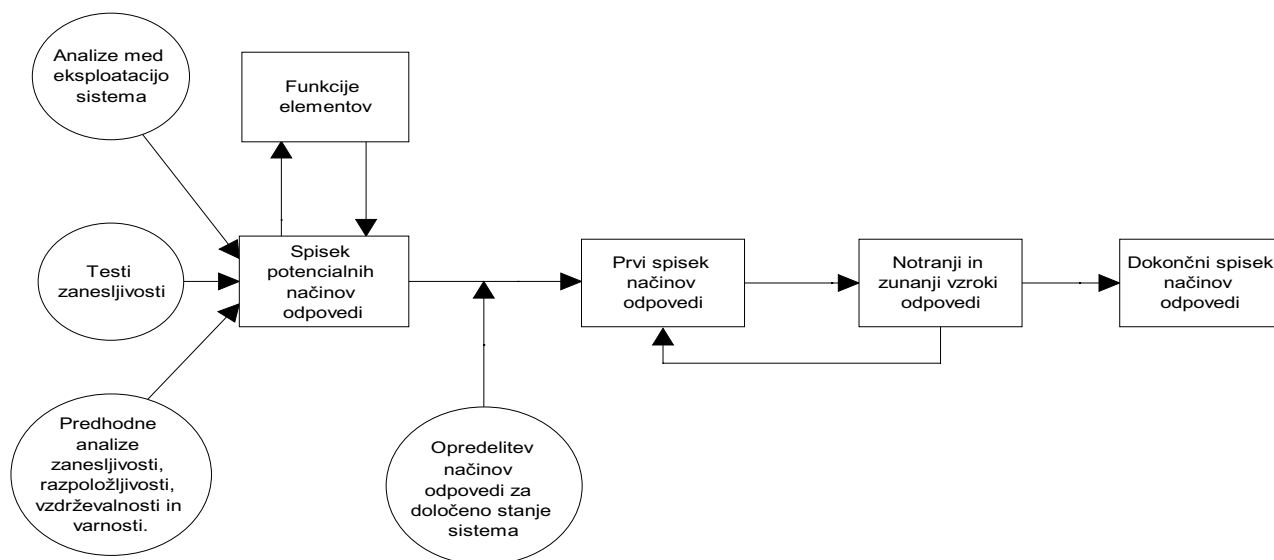
Opredeliti je potrebno pogoje eksploatacije sistema in njegovih elementov, kar predstavlja osnovo za opredelitev različnih stanj sistema in njegovih elementov. V FMEA vključimo le tiste elemente sistema, katerih odpovedi lahko neposredno ali posredno privedejo do stanj, ki pomenijo delno ali popolno odpoved sistema. Pravimo, da so ti elementi za nastanek določene odpovedi pomembni. Če se izkaže, da kateri od elementov sistema ni pomemben, ga iz nadaljnje analize izločimo.

2. faza FMEA:

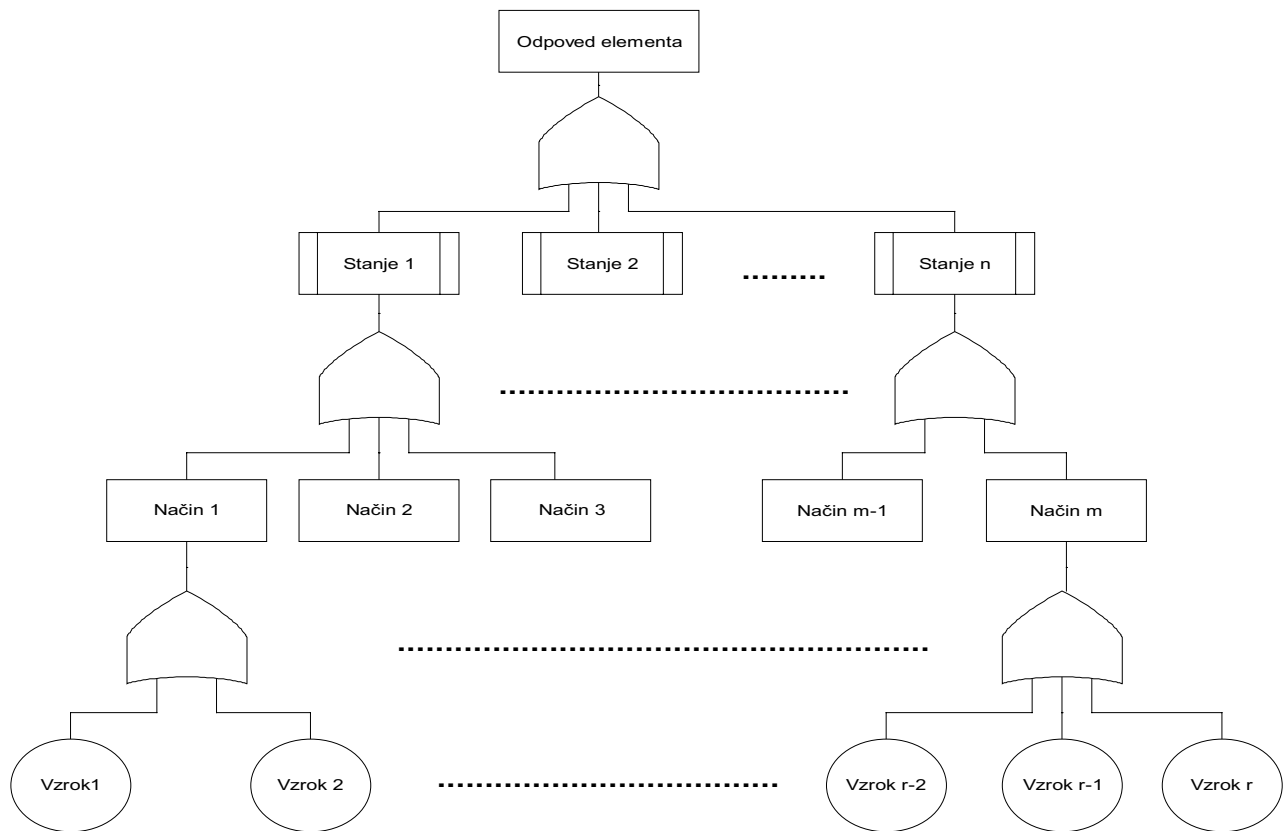
V okviru druge faze metode FMEA je potrebno za vsak element sistema, ki je bil v prvi fazi opredeljen kot pomemben za odpoved sistema v določenem stanju, ugotoviti možne načine odpovedi. Postopek identifikacije načinov odpovedi je prikazan na sliki 1.

Na podlagi podatkov iz eksploatacije sistema, testov zanesljivosti ali predhodnih analiz je potrebno izdelati spisek potencialnih načinov odpovedi elementov sistema v določenem stanju, kar predstavlja osnovo za nadaljnjo analizo. Istočasno je potrebno ugotoviti tudi vzroke posameznih potencialnih načinov odpovedi, ki jih bomo potrebovali za ocenjevanje verjetnosti nastanka odpovedi, odkrivanje sekundarnih odpovedi in planiranje korektivnih ukrepov.

Ločevanje med načinom in vzrokom odpovedi ni vedno enostavno. Pri tem nam je lahko v pomoč tudi deduktivna metoda drevesa odpovedi (glej npr. Hudoklin in Rozman, 2004). Drevo odpovedi je poseben primer logičnega diagrama kombinacije dogodkov, ki vodijo v glavni dogodek. Glavni dogodek je na vrhu drevesa odpovedi in običajno predstavlja neželeni dogodek za obravnavani sistem (Sinnamon in Andrews, 1997; Rosenberg, 1996). Primer drevesa odpovedi za analizo načinov odpovedi in njihovih vzrokov je prikazan na sliki 2.



Slika 1: Postopek identifikacije načinov odpovedi in njihovih vzrokov (Hudoklin in Brezavšček, 1994)



Slika 2: Drevo odpovedi za analizo načinov odpovedi in njihovih vzrokov

3. faza FMEA:

Vsakega izmed načinov odpovedi elementa sistema ovrednotimo glede na njegove učinke. Učinke načinov odpovedi ugotavljamo na vseh nivojih hierarhične strukture sistema. Na posameznem nivoju hierarhične strukture lahko določen način odpovedi ne povzroči nobenih učinkov, lahko povzroči omejeno delovanje, lahko pa povzroči prekinjeno delovanje tega dela sistema. Postopek ocenjevanja učinkov načina odpovedi pričnemo na tistem nivoju v hierarhični zgradbi sistema, kjer se opazovani element nahaja, in nadaljujemo na višjih nivojih vse do nivoja celotnega sistema.

Potrebno je določiti tudi pomembnost posameznega načina odpovedi. Podobno kot učinek načina odpovedi ugotavljamo njegovo pomembnost lokalno, na nivoju opazovanega elementa sistema, in na vseh višjih nivojih do nivoja celotnega sistema (glej npr. Dutuit in Rauzy, 2001; Caror in Sanz, 2000). Pomembnost posameznega načina odpovedi lahko ocenimo kvalitativno tako, da uporabimo več razredov kot npr.: majhen, znaten, kritičen, katastrofalen.

Poleg pomembnosti posameznega načina odpovedi določimo tudi verjetnost njegovega nastanka, ki jo v primeru kvalitativnega ocenjevanja lahko klasificiramo npr. kot: zelo majhno, majhno, srednjo ali veliko.

V praksi je koristno opredeliti tudi kritičnost načina odpovedi, ki je določena s kombinacijo njegove pomembnosti in verjetnosti za nastanek. Način odpovedi določenega elementa

sistema, katerega verjetnost nastanka je zelo velika, ima lahko zanemarljiv učinek na funkcijo sistema, njegova kritičnost je torej majhna. Kak drug način odpovedi elementa je zelo malo verjeten, vendar lahko povzroči popolno izgubo funkcije sistema in škodo na sistemu. Pomembnost tega načina odpovedi je torej velika, kritičnost pa razmeroma majhna.

Kritičnost načina odpovedi lahko ovrednotimo tudi kvantitativno. V ta namen moramo določiti ocene za naslednje parametre za elemente sistema:

λ - pogostost odpovedi,

α - delež pogostosti posameznega načina odpovedi v celotni pogostosti odpovedi,

β - verjetnost učinka posameznega načina odpovedi,

t - čas delovanja.

Pogostost odpovedi elementa sistema določimo na osnovi preskusov zanesljivosti ali iz podatkov o uporabi elementa sistema.

Delež pogostosti kakega načina odpovedi v celotni pogostosti odpovedi pomeni verjetnost, da bo element sistema odpovedal na ta način. Ocenimo ga na osnovi podatkov o uporabi elementa sistema.

Verjetnost učinka določenega načina odpovedi je pogojna verjetnost, da se učinek realizira pri pogoju, da je element sistema odpovedal na določen način. Verjetnost učinka načina odpovedi ocenimo na osnovi podatkov o uporabi elementa sistema in analitikove presoje.

Čas delovanja elementa sistema v urah ali ciklih izhaja iz definicije sistema in ga prav tako ocenimo na osnovi podatkov o uporabi elementa sistema.

Upoštevaje ocene za λ , α , β , t izračunamo oceno za kritičnost določenega načina odpovedi elementa po enačbi:

$$C_n = \lambda \cdot \alpha \cdot \beta \cdot t \quad (1)$$

4. faza FMEA:

V četrti fazi metode FMEA oblikujemo priporočila za povečanje učinkovitosti sistema, ki naj upoštevajo naslednje prioritete:

- odpraviti vzroke za posamezne načine odpovedi,
- zmanjšati verjetnost, da pride do uresničitve načina odpovedi,
- zmanjšati učinek načina odpovedi,
- povečati verjetnost, da bo potencialna odpoved elementa sistema pravočasno odkrita.

2.3 Omejitve pri uporabi metode FMEA

Pri izvajanju metode FMEA v praksi se pokažejo določene omejitve te metode, kot so:

- kvantitativno določanje ocene za kritičnost posameznega načina odpovedi je pogosto oteženo, ker je večina vhodnih parametrov izražena kvalitativno;
- veliko elementov sistemov se po določenem času uporabe nahaja v številnih različnih stanjih, kar je težko kvantificirati;
- medsebojne odvisnosti med različnimi načini odpovedi in njihovimi učinki na sistem na različnih nivojih hierarhične strukture sistema je težko upoštevati.

Opisane pomanjkljivosti metode FMEA lahko v fazi razvoja novih izdelkov odpravimo z uporabo metodologije, ki

temelji na teoriji mehke logike oziroma teoriji mehkih množic. Razlogi za uporabo mehke logike pri izvajanju FMEA so predvsem naslednji:

- vse informacije, povezane z izvajanjem FMEA, so pridobljene in shranjene v naravnem jeziku;
- uporaba mehke logike omogoča uporabo nenatančnih podatkov, zato omogoča obravnavo različnih stanj elementov sistema ter drugih, v FMEA vključenih kvalitativnih informacij;
- uporaba mehke logike pri izvajanju FMEA omogoča kombiniranje kvalitativnih ocen ekspertov glede medsebojnih povezav načinov odpovedi in njihovih vzrokov.

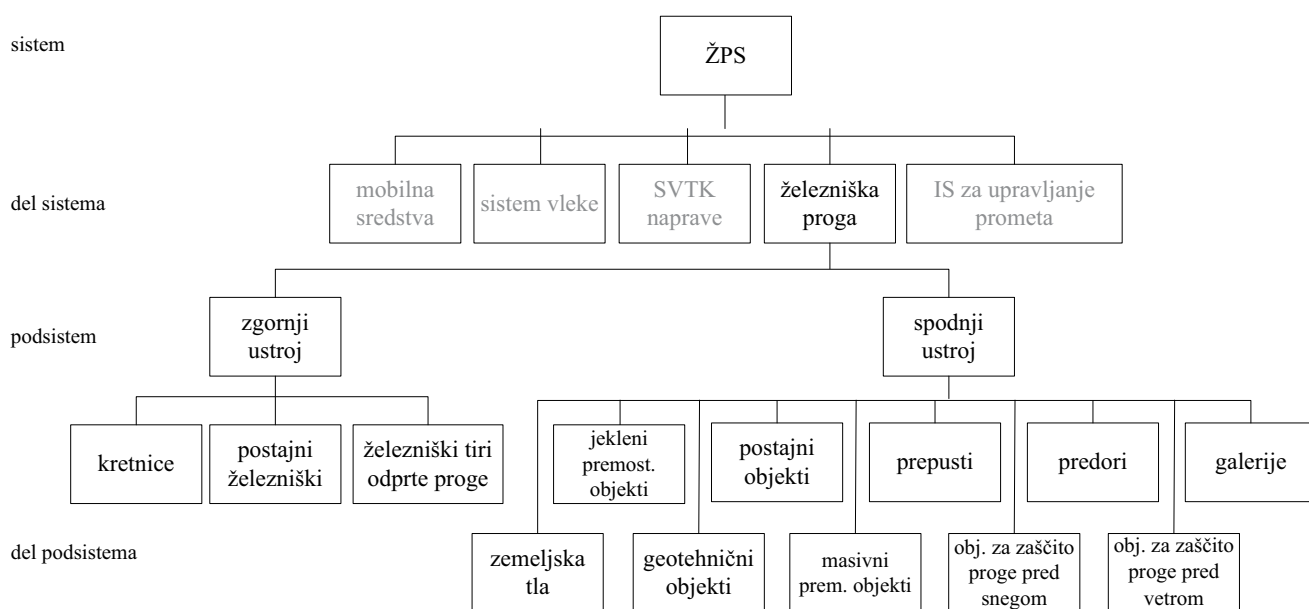
3 Aplikacija metode FMEA na železniško progo

V nadaljevanju bomo prikazali primer uporabe metode FMEA pri analizi odpovedi železniške proge in njenih elementov. Ponazorili bomo izvedbo vseh štirih, v poglavju 2.2 opisanih, faz metode FMEA. Za ilustracijo posamezne faze bomo uporabili primer tirnice sistema 49E1, ki je vgrajena v železniški tir odprte proge v Slovenskih železnicah.

1. faza FMEA:

V prvi fazi je potrebno opredeliti sistem, njegove elemente in funkcije. Osnovna funkcija železniške proge je nudenje transportne poti za izvajanje osnovne funkcije ŽPS. Železniška proga kot del ŽPS je kompleksen sistem, ki ga lahko ponazorimo s hierarhično strukturo na sliki 3.

Železniška proga predstavlja del ŽPS, zgornji in spodnji ustroj pa predstavljata podsisteme ŽPS. Elementi na zadnjem nivoju v hierarhični strukturi na sliki 3 predstavljajo dele podsistemov, ki jih nadalje razdelimo na tri nivoje: nivo funkcionalnih enot, nivo sklopov in nivo komponent. V določenih



Slika 3: Hierarhična struktura sistema železniške proge kot dela ŽPS

primerih (npr. v primeru manjše kompleksnosti) je nivo sklopa lahko izpuščen.

Za potrebe metode FMEA smo izdelali šifrant elementov železniške proge, kjer je vsak element enolično opredeljen z desetmestno šifro, katere struktura temelji na hierarhični strukturi iz slike 3. Prvi dve mesti določata podsistem, drugi dve del podсистema, naslednji dve funkcionalno enoto, še naslednji dve sklop in zadnji dve mesti komponento železniške proge.

Za potrebe metode FMEA smo izdelali šifrant elementov železniške proge, kjer je vsak element enolično opredeljen z desetmestno šifro, katere struktura temelji na hierarhični strukturi iz slike 3. Prvi dve mesti določata podsistem, drugi dve del podсистema, naslednji dve funkcionalno enoto, še naslednji dve sklop in zadnji dve mesti komponento železniške proge. Skladno z opisanim smo npr. tirnici sistema 49E1 dodelili šifro 0103030001, kjer posamezne oznake pomenijo naslednje:

01	03	03	00	01
oznaka podsistema (zgornji ustroj)	oznaka dela podсистema (železniški tiri odprte proge)	nivo funkcionalne enote	nivo sklopa (oznaka 00 pomeni, da je nivo sklopa izpuščen)	nivo komponente

V šifrantu elementov železniške proge opredelimo tudi vrsto posameznega elementa in način njegovega delovanja, kar predstavlja osnovo za opredelitev različnih stanj elementov železniške proge.

Na vseh nivojih v hierarhični zgradbi železniške proge definiramo funkcije posameznih elementov. Izdelamo tudi funkcionalne in logične diagrame, proučimo medsebojne odvisnosti in opredelimo vezavo elementov s stališča zanesljivosti.

2. faza FMEA:

Na podlagi podatkov iz eksploatacije železniških prog ter na osnovi predhodnih analiz izdelamo spisek potencialnih načinov odpovedi elementov železniških prog pri čemer uporabimo deduktivno metodo drevesa odpovedi. Pri tem upoštevamo predhodno opredeljene funkcije elementov železniške proge in tista stanja elementov, za katera je smiselno izvajati FMEA metodo. Na primer, za tirnico sistema 49E1, vgrajeno v železniški tir odprte proge, upoštevamo v analizi FMEA naslednja štiri stanja tirnice:

- tirnica zavarjena v neprekinjeno zavarjeni tir (NZT) - železniška vozila ne vozijo preko tirnice,
- tirnica zavarjena v NZT - med vožnjo železniških vozil preko tirnice,
- tirnica vgrajena v stikovani tir - železniška vozila ne vozijo preko tirnice,
- tirnica vgrajena v stikovani tir - med vožnjo železniških vozil preko tirnice.

Sočasno s pripravo spiska potencialnih načinov odpovedi opredelimo tudi njihove vzroke. Zaradi lažjega ločevanja med načinom in vzrokom odpovedi razdelimo možne načine odpovedi na odpovedi v zgradbi elementa, mehanske odpovedi in električne odpovedi, vzroke načinov odpovedi pa na vzroke znotraj elementa in vzroke zunaj elementa železniške

proge. Rezultat izvedene druge faze FMEA so izdelani šifranti možnih načinov odpovedi in njihovih vzrokov za elemente železniške proge. Izsek iz šifranta potencialnih načinov odpovedi elementov železniške proge prikazuje tabela 1, izsek iz šifranta njihovih vzrokov pa je podan v tabeli 2.

Tabela 1: Izsek iz šifranta potencialnih načinov odpovedi elementov železniške proge

Šifra načina odpovedi	NAČIN ODPOVEDI ELEMENTA ŽELEZNIŠKE PROGE
100	ODPOVEDI V ZGRADBI ELEMENTA
101	Zlom
102	Zlom vara
103	Zlom sestavnega dela
104	Počenost
105	Razrahljanost ločljive zveze (klasičnega spoja)
...	...
199	Ostalo
200	MEHANSKE ODPOVEDI
201	Vdor vode
202	Vdor olja hidravličnega sistema
203	Iztekanje olja iz hidravličnega sistema
204	Zamašenost
205	Erozijsko delovanje vode
...	...
299	Ostalo
300	ELEKTRIČNE ODPOVEDI
301	Prekinitev vrvi (zvezne, ozemljilne)
302	Prekinitev tokokroga
303	Kratek stik (preboj)
304	Prekoračitev dopustne upornosti
305	Sprememba električnih lastnosti materialov
...	...
399	Ostalo

Tabela 2: Izsek iz šifranta vzrokov potencialnih načinov odpovedi elementov železniške proge

Šifra vzroka načina odpovedi	VZROK NAČINA ODPOVEDI ELEMENTA ŽELEZNIŠKE PROGE
100	VZROKI ZNOTRAJ ELEMENTA
101	Nepravilna konstrukcija elementa
102	Nepravilna izdelava elementa
103	Nepravilna montaža elementa
...	...
	Odpoved drugega elementa
150	Previsoka temperatura okolice
151	Nepravilen tlak
152	Slabo tesnjenje
...	...

170	Nepravilna uporaba kretnice
171	Neplanska eksploatacija elementa
172	Nepravilno posluževanje elementa
...	...
199	Ostalo
200	VZROKI IZVEN ELEMENTA
201	Visoka temperatura
202	Nizka temperatura
203	Visoka vlažnost
...	...
299	Ostalo

3. faza FMEA

V okviru te faze proučimo, kakšen je učinek posameznega načina odpovedi na posameznih nivojih v hierarhični zgrabi železniške proge. Z določanjem učinkov načinov odpovedi pričnemo na tistem nivoju hierarhične strukture, na katerem se opazovani element nahaja in nadaljujemo do najvišjega nivoja tj. nivoja celotne železniške proge. Pri opredeljevanju učinka načina odpovedi elementov železniške proge uporabljamo naslednje vrednosti:

številka 0 pomeni, da določeni način odpovedi na danem nivoju v hierarhični strukturi ne učinkuje;

številka 1 pomeni, da način odpovedi povzroči na danem nivoju v hierarhični strukturi omejeno delovanje;

številka 2 pomeni, da način odpovedi povzroči na danem nivoju v hierarhični strukturi prekinjeno delovanje.

Glede na to, da smo železniško progo popisali s 6 nivojsko hierarhično strukturo, ovrednotimo učinek načina odpovedi s šestmestnim zaporedjem števil 0,1 in 2, pri čemer upoštevamo, da je lahko učinek načina odpovedi na določenem nivoju največ iste stopnje kot učinek načina odpovedi na nižjem nivoju. Če smo v hierarhični strukturi nivo sklopa izpustili, to ustrezno upoštevamo tudi pri določanju učinkov načinov odpovedi.

Za primer vzemimo način odpovedi "zlom tirnice" sistema 49E1 železniškega tira odprte proge. Denimo, da smo učinku tega načina odpovedi pripisali šifro 2-2111, kar lahko ponazorimo tudi takole:

komponenta	sklop	funkcionalna enota	del pod-sistema	pod-sistem	del sistema
2	-	2	1	1	1

Šifra učinka načina odpovedi v tem primeru pomeni, da zlom tirnice povzroči prekinjeno delovanje komponente, prekinjeno delovanje funkcionalne enote, omejeno delovanje dela pod-sistema, omejeno delovanje pod-sistema, in omejeno delovanje železniške proge kot celote. Iz pričujoče šifre učinka zloma tirnice je razvidno, da je v primeru tirnice sistema 49E1 nivo sklopa v hierarhični strukturi izpuščen.

Poleg učinka posameznega načina odpovedi določimo tudi njegovo pomembnost, verjetnost nastanka in kritičnost. Slednje bomo zopet ilustrirali na primeru tirnice sistema 49E1 in izbranega načina odpovedi "zlom tirnice". Določili bomo

kvantitativno oceno za kritičnosti zloma tirnice. Izračun bomo izvedli le za stanje 2, ko je tirnica zavarjena v NZT - med vožnjo železniških vozil preko tirnice in stanje 4, ko je tirnica vgrajena v stikovani tir - med vožnjo železniških vozil preko tirnice. To sta namreč stanji, v katerih nastane največ zlomov tirnic. V analizi upoštevamo katastrofalne in degradacijske odpovedi tirnice sistema 49E1, vgrajene v železniški tir enotirne železniške proge št. 70 Jesenice-Sežana v obdobju enega leta (t.j. od 01.06.2009 do 01.06.2010). Dolžina obravnavane proge je 129,8 km, vsebuje pa 13 medpostajnih odsekov. Konstrukcija železniškega tira odprte proge je naslednja: 65 % dolžine proge vsebuje NZT, 35 % dolžine proge pa stikovani tir. Železniški tir odprte proge na medpostajnem odseku sestavljata dve tirnici sistema 49E1.

Kritičnost zloma tirnice bomo izračunali po enačbi (1), pri čemer moramo na podlagi podatkov o delovanju tirnice v izbranem obdobju opazovanja oceniti parametre λ , α , β in t .

Pri izračunu pogostosti odpovedi tirnice predpostavimo, da je tirnica v obdobju normalnega delovanja, zato lahko uporabimo enačbo

$$\lambda = \frac{r}{T_{kum}} \quad (2)$$

kjer pomeni:

r - število vseh odpovedi tirnice v obravnavanih stanjih, ki so povzročile odpoved železniške proge,

T_{kum} - kumulativni čas delovanja tirnice v opazovanem obdobju.

V obdobju opazovanja je bilo na odsekih odprte proge, kjer so tirnice zavarjene v NZT, evidentiranih 33 zlomov tirnic in 21 drugih odpovedi tirnic (zlom zvara, počena tirnica, razpokana tirnica, odpadel del tirnice, napake v strukturi). Na odsekih, kjer je tir stikovani, je bilo v istem obdobju evidentiranih 26 zlomov tirnic in 17 drugih odpovedi tirnic (počena tirnica, razpokana tirnica, odpadel del tirnice, napake v strukturi).

Pri izračunu kumulativnega časa delovanja tirnice v opazovanem obdobju upoštevamo povprečni čas vožnje vlakov na obravnavani progi v 24 urah, ki ga izračunamo na podlagi dejanskega grafikona vožnje vlakov v obdobju opazovanja. Ugotovljeno je bilo, da so vlaki opravili na vseh medpostajnih odsekih 101,08 ur vožnje vlakov (ur vv) v 24 urah, kar pomeni povprečno 7,7 ur vv na medpostajnem odseku na dan.

V železniški tir odprte proge so vgrajene tirnice dolžine 90 m, v stikovani tir pa tirnice dolžine 44 m. Iz prej povedanega sledi, da je na obravnavani progi vgrajenih v NZT odprte proge 1863 tirnic dolžine 90 m, v stikovani tir odprte proge pa 2052 tirnic dolžine 44 m.

Kumulativni čas delovanja tirnic dolžine 90 m je torej enak:

$$T_{kum}^{NZT} = 1863 \cdot \frac{7,7}{dan} \text{ ur vv} \cdot 365 \text{ dni} \cdot 3 = 15.707.884,5 \text{ ur vv}$$

Kumulativni čas delovanja tirnic dolžine 44 m pa je:

$$T_{kum}^{STIK} = 2052 \cdot \frac{7,7}{dan} \text{ ur vv} \cdot 365 \cdot 3 = 17.301.438 \text{ ur vv}$$

Z uporabo enačbe (2) izračunamo oceno za pogostost odpovedi tirnice v opazovanem obdobju. Pri tem upoštevamo skupno število odpovedi v posameznem stanju kakor tudi število zlomov tirnic v vsakem stanju. Dobimo naslednje rezultate:

$$\lambda_{Nzt} = \frac{r_{Nzt}}{T_{kum}^{Nzt}} = \frac{54}{15.707.884,5 \text{ ur vv}} = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1}$$

$$\lambda_{Nzt}^{zlom} = \frac{r_{Nzt}^{zlom}}{T_{kum}^{Nzt}} = \frac{33}{15.707.884,5 \text{ ur vv}} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1}$$

$$\lambda_{STIK} = \frac{r_{STIK}}{T_{kum}^{STIK}} = \frac{43}{17.301.438 \text{ ur vv}} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1}$$

$$\lambda_{STIK}^{zlom} = \frac{r_{STIK}^{zlom}}{T_{kum}^{STIK}} = \frac{26}{17.301.438 \text{ ur vv}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1}$$

Za vsako stanje izračunamo delež α pogostosti zloma tirnice v celotni pogostosti odpovedi tirnice:

$$\alpha_{Nzt} = \frac{\lambda_{Nzt}^{zlom}}{\lambda_{Nzt}} = \frac{2,1 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1}}{3,4 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1}} = 0,76$$

$$\alpha_{STIK} = \frac{\lambda_{STIK}^{zlom}}{\lambda_{STIK}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1}}{2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1}} = 0,60$$

Verjetnost učinka zloma tirnice smo za posamezno stanje ocenili na podlagi podatkov o delovanju tirnice v izbranem obdobju takole:

$$\beta_{Nzt} = 0,30$$

$$\beta_{STIK} = 0,25$$

Čas delovanja tirnice t v urah vožnje vlakov v opazovanem obdobju je enak:

$$t = 7,7 \cdot 365 \cdot 3 \text{ ur vv} = 8432 \text{ ur vv}$$

Upošteva se dobljene ocene parametrov λ , α , β in t izračunano po enačbi (1) oceno za kritičnost zloma tirnice v posameznem stanju:

$$C_{101}^{Nzt} = \lambda_{Nzt} \cdot \alpha_{Nzt} \cdot \beta_{Nzt} \cdot t = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1} \cdot 0,76 \cdot 0,30 \cdot 8432 \text{ ur vv} = 0,00653$$

$$C_{101}^{STIK} = \lambda_{STIK} \cdot \alpha_{STIK} \cdot \beta_{STIK} \cdot t = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ur vv}^{-1} \cdot 0,60 \cdot 0,25 \cdot 8432 \text{ ur vv} = 0,003162$$

Dobljeni rezultati kažejo, da je kritičnost zloma tirnice, zavarjene v Nzt, večja od kritičnosti tirnice, vgrajene v stikovani tir. Slednji rezultat je glede na vrsto konstrukcije obeh tirov popolnoma logičen.

4. faza FMEA:

Rezultati izvedbe FMEA za vse prepoznane načine odpovedi elementov železniške proge omogočajo prepoznavanje pomembnosti in kritičnosti posameznih načinov odpovedi, analizo njihovih vzrokov ter primerjavo pomembnosti in kritičnosti enakih elementov na različnih železniških progah. Na ta način identificiramo tiste elemente železniške proge, ki neposredno vplivajo na razpoložljivost železniške proge. Za take elemente je potrebno opredeliti preventivne in korektivne ukrepe za odpravo vzrokov odpovedi. Take elemente je potrebno med delovanjem še posebej spremljati in zanje opredeliti ustrezno strategijo vzdrževanja.

Rezultate vseh štirih faz metode FMEA lahko strnemo v posebni tabeli, ki je za primer tirnice sistema 49E1 v stanju 2 prikazana na sliki 4.

ANALIZA NAČINOV ODPOVEDI, NJIHOVIH VZROKOV, UČINKOV IN KRITIČNOSTI

Stanje 2: Tirnica zavarjena v Nzt-železniška vozila vozijo preko tirnice

Naziv dela sistema: Železniška proga št. 70 Jesenice-Sežana

Element: Tirnica sistema 49E1 železniškega tira odprte proge

Datum: 20.08.2010

Analiziral: Miran Abram

Stran 1/4

Identifikacijski podatki o komponenti				Funkcije in stanja komponente		Potencialni načini odpovedi komponente					
Šifra komponente	Naziv komponente	Vrsta komponente	Način delovanja	Funkcije	Stanja	Odpoved v zgradbi komp.	Šif. n. odp.	Mehanska odpoved	Šif. n. odp.	Električna odpoved	Šif. n. Odp.
0103030001	Tirnica v tirničnem traku želez. tira odprte proge	Mehanska	Med vožnjo	1. Prevzem stat. in din. obremen. železniških vozil. 2. Prisilno vodenje železniških vozil v določeni smeri. 3. Prevzem obremenitev zaradi temperaturnih sprememb, def. tira in geometrije tira. 4. Sestavni element tirne rešetke	2 - Zavarjena v Nzt - med vožnjo želez. vozil preko tirnice	Zlom Zlom zvara Počenost Razpokanost Valovitost Odpadlost dela Ostale napake v strukturi mat. tir. po klasifikaciji UIC – kodex 712 E	101 102 104 127 130 129 199	Čezmerna obraba Neenakom. obraba Zbitost	106 107 125		

ANALIZA NAČINOV ODPOVEDI, NJIHOVIH VZROKOV, UČINKOV IN KRITIČNOSTI

Stanje 2: Tirnica zavarjena v NZT-železniška vozila vozijo preko tirnice

Stran 2/4

Naziv dela sistema: Železniška proga št. 70 Jesenice-Sežana

Element: Tirnica sistema 49E1 železniškega tira odprte proge

Datum: 20.08.2010

Analiziral: Miran Abram

Šifra načina odpov.	Uporabljena metoda			Potencialni vzroki načinov odpovedi				Pomembnost načina odpovedi na nivoju					
	Analiza delovanja	Testi Zanesljiv.	Predhodne analize	Znotraj sistema	Šif. vzr.	Izven sistema	Šif. vzr.	Komponente	Sklopa	Funkcionalne enote	Dela podsistema	Podsistema	Dela sistema
101 Zlom tirnice	x		x	Nepravilnosti v strukt. materiala	111	Nepravilno sproščanje napetosti po vgraj. v NZT	112	2	-	2	2	1(2)	1(2)
				Utrujenost materiala	108	Prenizke temperatura okolice	113						
				Prekoračene dopustne notranje napet. zaradi vgradnje v NZT	110	Odpoved železniških pragov	114						
				Prekoračene dopustne notranje napet. zaradi prometne obremenitve	119	Vibracije zaradi popuščanja veznega in pritrdilnega pribora	115						
				Prekoračene dopustne notranje napet. zaradi prometne obremenitve in vgradnje v NZT	120	Vertikalne in horizont. deformacije tira	116						
				Prekoračena obraba tirnice	118	Nepredpisano urejena gramozna greda želez. tira	117						

ANALIZA NAČINOV ODPOVEDI, NJIHOVIH VZROKOV, UČINKOV IN KRITIČNOSTI

Stanje 2: Tirnica zavarjena v NZT-železniška vozila vozijo preko tirnice

Stran 3/4

Naziv dela sistema: Železniška proga št. 70 Jesenice-Sežana

Element: Tirnica sistema 49E1 železniškega tira odprte proge

Datum: 20.08.2010

Analiziral: Miran Abram

Šifra načina odpov.	Uporabljena metoda			Potencialni vzroki načinov odpovedi				Kritičnost načina odpovedi na nivoju					
	Analiza delovanja	Testi Zanesljiv.	Predhodne analize	Znotraj sistema	Šif. vzr.	Izven sistema	Šif. vzr.	Komponente	Sklopa	Funkcionalne enote	Dela podsistema	Podsistema	Dela sistema
101 Zlom tirnice	x		x	Nepravilnosti v strukt. materiala	111	Nepravilno sproščanje napetosti po vgradnji v NZT	112	$C_{101}^{NZT} = 0,0065$					
				Utrujenost materiala	108	Prenizke temperatura okolice	113						
				Prekoračene dopustne notranje napet. zaradi vgradnje v NZT	110	Odpoved železniških pragov	114						
				Prekoračene dopustne notranje napet. zaradi prometne obremenitve	119	Vibracije zaradi popuščanja veznega in pritrdilnega pribora	115						
				Prekoračene dopustne notranje napet. zaradi prometne obremenitve in vgradnje v NZT	120	Vertikalne in horizont. deformacije tira	116						
				Prekoračena obraba tirnice	118	Nepredpisano urejena gramozna greda želez. tira	117						

Slika 4: FMEA tabela za primer tirnice sistema 49E1 v stanju 2

ANALIZA NAČINOV ODPOVEDI, NJIHOVIH VZROKOV, UČINKOV IN KRITIČNOSTI

Stanje 2: Tirnica zavarjena v NZT-železniška vozila vozijo preko tirnice

Stran 4/4

Naziv dela sistema: Železniška proga št. 70 Jesenice-Sežana

Element: Tirnica sistema 49E1 železniškega tira odprte proge

Datum: 20.08.2010

Analiziral: Miran Abram

Šifra vzr. nač. odpov.	Predvideni ukrepi za odpravo vzrokov odpovedi						Izvedeni ukrepi za odpravo vzrokov odpovedi					
	Preventivni			Korektivni			Preventivni			Korektivni		
	Ukrep	Odgov. oseba	Rok	Ukrep	Odgov. oseba	Rok	Ukrep	Odgov. oseba	Dat.	Ukrep	Odgov. oseba	Dat.
108												
110												
111												
112												
113												
114												
115												
116	Poostren nadzor nad stanjem tira, zamenjava dotrajanih elem. tira, sproščanje notranjih napetosti v tirnici, strojna regulacija tira	VNP TRZU	1 mesec	Poostren nadzor nad stanjem tira, zmanjšanje vzporedne hitrosti vlakov.	TRZU	Takoj						
117												
118												
119												
120												

Slika 4: nadaljevanje

4 Zaključek

Metoda FMEA omogoča sistematično analizo odpovedi elementov sistema in njihovih vzrokov. Izvedba FMEA sestoji iz štirih faz: opredelitev sistema, elementov sistema in njihovih funkcij, identifikacija načinov odpovedi elementov sistema in njihovih vzrokov, študij učinkov različnih načinov odpovedi elementov sistema na različnih nivojih v zgradbi sistema ter zaključki in priporočila.

V članku smo predstavili uporabo FMEA na primeru železniške proge, ki je pomemben segment železniškega prometnega sistema. Izvedbo posamezne faze FMEA smo prikazali na primeru tirnice sistema 49E1, ki je vgrajena v železniški tir odprte proge v Slovenskih železnicah. Pomemben rezultat predstavlja določitev kritičnosti posameznega načina odpovedi. Na podlagi dejanskih podatkov o delovanju železniške proge v obdobju enega leta smo uspeli določiti kvantitativno oceno za kritičnost izbranega načina odpovedi. Na podoben način bi lahko izračunali kritičnost načinov odpovedi za vse elemente železniške proge.

Poznavanje kritičnih elementov železniške proge je pomembno, saj predstavlja osnovo za planiranje preventivnih in korektivnih ukrepov za izboljšanje razpoložljivosti železniške proge in s tem povečanje učinkovitosti celotnega železniškega prometnega sistema.

Literatura

Braglia, M., (2000). MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 17(9), 1017-1033.

- Caror, V. & Sanz, J. (2000). Criticality and sensitivity of the components of a system. *Reliability Engineering & System Safety*. 68(2), 147-152.
- Dutuit, Y. & Rauzy, A. (2001). Efficient algorithms to assess component and Gate importance in fault tree analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 72, št.2, str. 213-222.
- Fraracci, A. (2010). *Model-based Failure-modes-and-effects Analysis and its Application to Aircraft Subsystems*, IOS Press.
- Hu, T. in Yu, J. (2009). Research on complex system FMEA method based on functional modeling, *International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, ICRMS 2009*, str. 63-66.
- Hudoklin, A. & Brezavšček, A. (1994). Študij načinov odpovedi sistemov, *Organizacija*, 27(10), 995-1006.
- Hudoklin, A. & Rozman, V. (2004). *Zanesljivost in razpoložljivost sistemov Človek- stroj*. Založba Moderna organizacija, Kranj.
- Kmenta, S., Fitch, P. & Ishii, K. (1999). Advanced failure modes and effects analysis of complex processes, *Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Las Vegas, Nevada.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance*. McGraw-Hill, New York.
- Pillay, A. in Wang, J. (2003). Modified failure and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(1), 69-85.
- Pham, H. (1998). Reliability analysis for dynamic configurations of systems with tree failure modes. *Reliability Engineering & System Safety*, 63(1), 13-23.
- Price, C.J. & Taylor, N.S. (2002). Automated multiple failure FMEA, *Reliability Engineering & System Safety*, 76(1), 1-10.
- Rosenberg, L. (1996). Algorithm for finding minimal cut sets in fault tree. *Reliability Engineering & System Safety*, 53(1), 67-71.
- Sinnamon, R. M. & Andrews, J. D. (1997). Improved efficiency in qualitative fault tree analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 13(5), 293-298.

- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*, ASQ Quality Press.
- Xu, K. idr. (2002). Fuzzy assessment of FMEA for engine systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 75(1), 17–29.
- Villemeur, A. (1992). *Reliability, Availability, and safety assessment, Volume 1, Methods and Techniques*. John Wiley & Sons, Chistester.
- Walker, M. idr. (2009). Semi-Automatic FMEA supporting complex systems with combinations and sequences of failures, *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.*, 2(1), 791-802.

Miran Abram je diplomiral na Fakulteti za organizacijske vede Univerze v Mariboru, kjer je absolvent znan-

stvenega magistrskega podiplomskega študija na področju Managementa kakovosti-smer Zanesljivost sistemov. Pri svojem strokovnem delu se ukvarja z optimizacijo metod vzdrževanja, načrtovanjem poslovnih procesov, prenovo obstoječih poslovnih procesov, načrtovanjem in gradnjo informacijskih sistemov in vodenjem strateških projektov. Zaposlen je kot koordinator strokovnega področja na Slovenskih železnica. Je vodja projekta "Optimizacija metod vzdrževanja železniške infrastrukture", vodja projekta "Uvedba informacijskega sistema za vzdrževanje železniške infrastrukture in vodenja prometa" ter član projektnega sveta projekta "Uvedba enotnega poslovno informacijskega sistema v celotni skupini SŽ".

Using FMEA method for analysing failures of railway line

In the paper, the Failure Modes and Effects Analysis-FMEA is described. Four steps of FMEA are presented. The method is applied to the railway line as an important part of the railway traffic system. Each step of FMEA is performed on the rail type 49E1, built in the railway track of open railway line in Slovenian Railways. It has been shown that field data on the railway lines enable quantitative estimation of failure mode criticality for the railway line elements.

Key words: FMEA, railway traffic system, railway line, failure mode, cause, effect, criticality