

## UTJECAJ KVALITETE SIGNALNO-SIGURNOSNIH UREĐAJA NA EFIKASNOST ŽELJEZNICE

### IMPACT OF SAFETY INTERLOCKING SYSTEM QUALITY ON RAILWAY PRODUCTIVITY

Milan Davidović, mr.sc.  
VSITE – Visoka škola za informacijske tehnologije  
Klaićeva 7, Zagreb, Hrvatska

#### REZIME

*Kvaliteta signalno-sigurnosnih uređaja ocjenjuje se na temelju kvantitativnih pokazatelja određenih normom EN 50126 (model RAMS - pouzdanost, raspoloživost, sposobnost održavanja i sigurnost) i ukupnim troškovima sistema upravljanja željezničkim prometom, te s obzirom na njihov utjecaj na efikasnost prijevoza tereta i putnika i prosječnu brzinu vlakova na željezničkoj pruzi i željezničkoj mreži u cjelini. Predloženi model je analiziran sa stanovišta njegove primjene u organizaciji i planiranju preventivnog održavanja i planiranja zamjene istrošenih željezničkih signalno-sigurnosnih uređaja, te procjene gubitaka prihoda i troškova zbog redovnog održavanja, rekonstrukcije, obnove ili zamjene signalno-sigurnosnih uređaja.*

**Ključne riječi:** kvaliteta, signalno-sigurnosni uređaji, RAMS, EN 50126, efikasnost željeznice

#### SUMMARY

*Railway safety interlocking system quality assessment is based on quantitative indicators from EN 50126 (Model RAMS – Reliability, Availability, Maintainability, Safety) and total cost of railway traffic control system, and their impact on goods and passengers freight and average speed of trains on rail and railway network. Suggested model analysed on view of railway safety interlocking system preventive maintenance and replacement organization and planning, and estimation of income loss and cost of maintenance, reconstruction, refreshment and replacement.*

**Keywords:** quality, railway interlocking system, RAMS, EN 50125, railway productivity

#### 1. UVOD

Normom EN 50126-1 [1] utvrđeni su osnovni zahtjevi i generički procesi koji se odnose na pouzdanost, raspoloživost, sposobnost održavanja i sigurnost željezničkih signalno-sigurnosnih uređaja (eng. akr. *RAMS – Reliability, Availability, Maintainability, Safety*) u svim fazama njihovog životnog ciklusa, a normom EN 50126-2 [2] metode kojima se dokazuje da uređaj zadovoljava zahtjeve norme EN 50126-1 i može se koristiti na željeznici. Dakle, kvalitetu signalno-sigurnosnih uređaja možemo definirati kao stupanj zadovoljavanja zahtjeva norme EN 50126 u svim fazama njihovog životnog ciklusa (definiranje zahtjeva i sistema, konstrukcija i proizvodnja, pogon i održavanje), a pouzdanost, raspoloživost, obnovljivost i funkcionalnu sigurnost, kao glavne karakteristike kvalitete (v. t. 2).

U ovom radu prikazan je model analize kvantitativnog utjecaja kvalitete sigurnosnih-uređaja na efikasnost željeznice u fazi eksploatacije (pogona i održavanja). Željeznica se promatra kao multiproduktna organizacija čija se efikasnost (eng. *productivity*) određuje s velikim brojem parcijalnih pokazatelja efikasnosti. Kvaliteta signalno-sigurnosnih uređaja ima izravan utjecaj na efikasnost prijevoza tereta i putnika, prosječnu brzinu vlakova i druge parcijalne pokazatelje efikasnosti na koje utječu broj i vozno vrijeme vlakova (v. t. 3). Predloženi model može se primijeniti u organizaciji i planiranju preventivnog održavanja, planiranju zamjene istrošenih željezničkih signalno-sigurnosnih uređaja i dr. (v. t. 4).

Utjecaj funkcionalne sigurnosti signalno-sigurnosnih uređaja na efikasnost željeznice ne razmatra se, jer se pretpostavlja da se smiju ugraditi i koristiti ako zadovoljavaju zahtjeve norme EN 50126 koji se odnose na funkcionalnu sigurnost, sigurnosne funkcije i sigurnosni integritet [4]. Pretpostavlja se, dakle, da kvarovi signalno-sigurnosnih uređaja ne uzrokuju sigurnosne incidente koji ugrožavaju život i zdravlje ljudi ili ugled i imovinu željeznice koji uzrokuju velike materijalne i druge štete i gubitke tj. može doći samo do usporavanja ili, u najgorem slučaju, do zaustavljanja procesa željezničkog prijevoza, zbog čega su efekti prijevoza manji, a troškovi prijevoza povećani.

## 2. KVALITETA SIGNALNO-SIGURNOSNIH UREĐAJA

### 2.1. Karakteristike kvalitete signalno sigurnosnih uređaja

**Kvaliteta signalno-sigurnosnih uređaja** (eng. *quality*) može se definirati kao stupanj zadovoljavanja zahtjeva norme EN 50126 u svim fazama životnog ciklusa uređaja. Kvantitativni pokazatelj kvalitete signalno-sigurnosnih uređaja koji obuhvaća sve pokazatelje kvalitete prema modelu RAMS, utvrđenom u normi EN 50126, je vjerojatnost  $D(t,\tau)$  da će signalno-sigurnosni uređaj u periodu  $[t,t+\tau]$  izvršiti svoju zadaću

$$D(t,\tau) = A(t) \cdot R(t,\tau) + [1-A(t)] \cdot M(\tau_r) \cdot R(t+\tau_r, \tau-\tau_r) \quad (1)$$

gdje je  $A(t)$  je raspoloživost uređaja u trenutku promatranja  $t$ ,  $0 \leq A(t) \leq 1$ ;  $R(t,\tau)$  je pouzdanost uređaja (vjerojatnost da će uređaj ispravno funkcionirati u  $[t,t+\tau]$ ),  $0 \leq R(t,\tau) \leq 1$ ;  $M(\tau_r)$  je vjerojatnost obnavljanja uređaja u vremenu  $\tau_r \leq \tau$ ,  $0 \leq M(\tau_r) \leq 1$ . Procesi kvarenja i obnavljanja uređaja su neovisni tj. obnavljanje uređaja ne uzrokuje pojavu novih (zavisnih) kvarova.  $\tau_r$  je vrijeme otklanjanja kvara (eng. *time to restoration*). Vjerojatnost neispravnog funkcioniranja uređaja u periodu  $[t,t+\tau]$  je  $F(t,\tau) = 1 - R(t,\tau)$ .

Vjerojatnost  $D(t,\tau)$ ,  $0 \leq D(t,\tau) \leq 1$ , je kvantitativni pokazatelj kvalitete signalno-sigurnosnih uređaja koji obuhvaća sve pokazatelje kvalitete prema normi EN 50126.

Ako se signalno-sigurnosni uređaj može vrlo brzo obnoviti tj.  $\tau_r \ll \tau$  i  $M(\tau_r) \approx 1$  bit će

$$D(t,\tau) \approx R(t,\tau) \quad (1a)$$

U vijeku normalnog trajanja signalno-sigurnosni uređaji imaju konstantan intenzitet kvarova  $\lambda$  (kvarova/h) i konstantan intenzitet obnavljanja uređaja  $\mu$  (obnavljanja/h), tako da će biti pouzdanost  $R(t,\tau) = e^{-\lambda\tau}$ , a vjerojatnost obnavljanja  $M(\tau_r) = e^{-\mu\tau_r}$ . Koeficijent raspoloživosti  $K_A$  jednak je

$$K_A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2)$$

gdje je  $MTBF=1/\lambda$  srednje operativno vrijeme između dva kvara (eng. *MTBF – Mean Time Between Failures*), a  $MTTR=1/\mu$  srednje vrijeme otklanjanja kvara (eng. *MTTR - Mean Time to Restoration*) [3].

Ako je u periodu  $[t, t+\tau]$  bilo  $n_k$  kvarova ukupnog trajanja  $T_k = n_k \cdot MTTR$ , ukupno vrijeme ispravnog rada uređaja je  $T_i = \tau - T_k$ , odnosno  $T_i = n_k \cdot MTBF$ . Koeffcijent raspoloživosti  $K_A$  u vremenu promatranja  $\tau$  može se izraziti i sa sljedećim izrazima:

$$K_A = \frac{T_i}{\tau} = \frac{\tau - T_k}{\tau} = 1 - \frac{T_k}{\tau} \quad (2a)$$

Pošto je  $A(t) \geq K_A$ , vjerojatnost ispravnog djelovanja signalno-sigurnosnih uređaja je

$$D(t, \tau) \geq K_A \cdot R(\tau) + (1 - K_A) \cdot M(\tau) R(\tau - \tau_r) \quad (1b)$$

## 2.2. Prikladnost konstrukcije

Signalno-sigurnosni uređaji neće se ponašati jednako na svakoj lokaciji zbog različitih vanjskih utjecaja (vrlo niske ili vrlo visoke temperature u pojedinim razdobljima godine, atmosferska pražnjenja, nekvalitetna niskonaponska mreža i sl), zbog čega će reagirati zaštita kojom se štite uređaji od oštećenja (pregaranje osigurača, izbacivanje prenaponske zaštite i sl). Time se ne smanjuje pouzdanost, ali se smanjuje vjerojatnost ispravnog rada koju treba korigirati s faktorom prikladnosti. **Faktor prikladnosti konstrukcije**  $K_p(t, \tau)$ ,  $0 \leq K_p(t, \tau) \leq 1$ , je vjerojatnost da će konstrukcija signalno-sigurnosnog uređaja biti prikladna za djelovanje na određenoj lokaciji u periodu  $[t, t+\tau]$ , te vrijedi

$$D(t, \tau) \geq K_p(t, \tau) \cdot K_A \cdot R(\tau) + (1 - K_A) \cdot M(\tau) R(\tau - \tau_r) \quad (1c)$$

Izrazi (1), (1a) i (1b) vrijede kad je  $K_p(t, \tau) = 1$ .

## 3. ANALIZA UTJECAJA NA EFIKASNOST ŽELJEZNICE

### 3.1. Parcijalni pokazatelji efikasnosti željeznice

Željeznica je multiproductna organizacija, tako da se njena efikasnost izražava velikim brojem parcijalnih pokazatelja efikasnosti (od 100 do nekoliko stotina, ovisno o metodologiji koju primjenjuju željezničke uprave). Parcijalni pokazatelj efikasnosti željeznice  $E(t, \tau)$  je odnos izlaza  $y_0$  (eng. *output*) i ulaza  $x$  (eng. *input*) koji su upotrijebljeni za njegovo stvaranje u periodu  $[t, t+\tau]$

$$E(t, \tau) = \frac{y_0(t, \tau)}{x(t, \tau)} \leq \frac{y_0(t, \tau)}{x_0(t, \tau)} = E_0(t, \tau) \quad (3)$$

$y=f(x)$  je funkcija proizvodnje izlaza koja opisuje granični trošak nekog ulaza  $x$ . U trenutku  $t+\tau$  će se za postizanje učinka  $y_0(t, \tau)$  utrošiti  $x(t, \tau) \geq x_0(t, \tau)$  ulaza,  $\tau$  je vrijeme potrebno za postizanje učinka.  $E_0(t, \tau)$  je efikasnost željeznice za postizanje učinka  $y_0(t, \tau)$  uz granični utrošak ulaza  $x_0(t, \tau)$ . Željeznica je u periodu  $[t, t+\tau]$  neefikasna tj.  $E(t, \tau) \approx 0$ , ako za proizvod  $y_0(t, \tau)$  troši previše resursa ili vremena,  $x(t, \tau) \gg x_0(t, \tau)$ . Za manji utrošak ulaza  $x(t, \tau) < x_0(t, \tau)$  potrebna je promjena tehnologije [3].

Utjecaj kvalitete signalno-sigurnosnih uređaja na efikasnost željeznice može se izraziti preko parcijalnih pokazatelja efikasnosti koji su odnos izlaza (efekata) i ulaza (utrošenih resursa za njihovo stvaranje ili vremena), koji su funkcija propusne moći pruge koja ovisi i o raspoloživosti signalno-sigurnosnih uređaja (v. t. 3.2).

### 3.2. Utjecaj raspoloživosti signalno-sigurnosnih uređaja na propusnu moć pruge

Ugradnjom pružnih signalno-sigurnosnih uređaja povećava se propusna moć željezničke pruge s vrijednosti  $c'$  (bez osiguranja željezničkog saobraćaja) na  $c''$  pari vlakova dnevno, jer se na prugama za jednosmjerni saobraćaj skraćuje interval slijeđenja uzastopnih vlakova, a na prugama za dvosmjerni saobraćaj skraćuje se mjerodavni period slijeđenja vlakova  $T_v$  [3]. Zbog kvara pružnog signalno-sigurnosnog uređaja smanjit će se propusna moć pruge s  $c''$  pari vlakova dnevno na samo  $c'$  pari vlakova dnevno tj. propusna moć pruge je

$$c = K_A \cdot c'' + (1 - K_A) \cdot c' \quad (\text{pari vlakova/dan}) \quad (4)$$

gdje je  $K_A$  raspoloživost pružnog signalno-sigurnosnog uređaja.

Izraz (4) vrijedi i za stanične signalno-sigurnosne uređaje, s tim da je  $c'$  propusna moć stanice bez osiguranja prometa u stanici (kad je stanični signalno-sigurnosni uređaj potpuno neoperativan), a  $c''$  ako se prometom u stanici upravlja pomoću promatranog staničnog signalno-sigurnosnog uređaja. Propusnu moć  $c'$  određuju karakteristike stabilnih postrojenja (donji i gornji stroj pruge i dr) i vučnih i voznih sredstava, organizacija prijevoza i dr.

Što je veća raspoloživost signalno-sigurnosnih uređaja to će biti veća propusna moć pruge. Što je veći broj kvarova uređaja, to će manji broj vlakova proći prugom u promatranom periodu. Za vrijeme trajanja kvara i obnavljanja uređaja je vozno vrijeme vlakova duže. Dakle, propusna moć, pouzdanost i obnavljanje uređaja neposredno utječu na efikasnost željezničkog prijevoza i prosječnu brzinu vlakova (v. t. 3.3).

### 3.3. Utjecaj neraspoloživosti signalno-sigurnosnih uređaja na efikasnost prijevoza

Efikasnost željezničkog prijevoza može se iskazati parcijalnim pokazateljem ostvarenog obujma prijevoza (količina prevezene robe ili broj prevezenih putnika)  $y_0(t, \tau)$  u promatranom periodu  $[t, t+\tau]$ . Utjecaj neraspoloživosti signalno-sigurnosnih uređaja na ostvarenje obujma prijevoza prati se na razini mreže i po prugama,  $1 \leq i \leq N_r$ , gdje je  $N_r$  ukupan broj pruga.

Utjecaj neraspoloživosti signalno-sigurnosnih uređaja na ostvarenje obujma prijevoza na pruzi „i“ u periodu  $[t, t+\tau]$  može se odrediti pomoću parcijalnog pokazatelja efikasnosti

$$E(t, \tau)_i = \frac{y_0(t, \tau)_i}{\tau} = \frac{N_0(t, \tau)_i \bar{y}_i}{\tau} = \frac{\bar{y}_i}{\frac{\tau}{N_0(t, \tau)_i}} = \frac{\bar{y}_i}{\tau_i} \quad (5)$$

gdje su  $y_0(t, \tau)_i$  planirani obujam prijevoza u periodu  $[t, t+\tau]$  na  $i$ -toj pruzi,  $1 \leq i \leq N_r$ ,  $N_0(t, \tau)_i$  planirani broj vlakova prosječnog kapaciteta  $\bar{y}_i$  za ostvarenje planiranog obujma prijevoza, a  $\tau_i$  prosječno vozno vrijeme vlakova na pruzi „i“.

Ako je u periodu  $[t, t+\tau]$  ukupno trajanje kvarova  $T_{k,i}$ , za to vrijeme prugom može proći svega

$$N'_i(t, \tau) = N'(t, T_{k,i}) = \frac{T_{k,i}}{T'_{v,i}} \quad (\text{pari vlakova}) \quad (6)$$

gdje je  $T'_{v,i}$  mjerodavni period slijeđenja na pruzi s dvosmjernim saobraćajem, odnosno mjerodavni interval slijeđenja na pruzi s jednosmjernim saobraćajem vlakova u slučaju kvara signalno-sigurnosnog uređaja. Kad je uređaj ispravan, period odnosno interval slijeđenja  $T''_{v,i}$  je kraći, tako da je maksimalni broj vlakova za vrijeme potpune operativnosti uređaja

$$N_i''(t, \tau) = N_i''(t, \tau - T_{k,t}) = \frac{\tau - T_{k,t}}{T_{v,t}''} \quad (\text{pari vlakova}) \quad (7)$$

Uzmemo li u obzir izraz za raspoloživost uređaja (2a) dobijemo:

$$N_i'(t, \tau) = \frac{T_{k,t}}{T_{v,t}} \cdot \frac{\tau}{\tau} = (1 - K_{A,t}) \cdot \frac{\tau}{T_{v,t}} \quad (\text{pari vlakova}) \quad (6a)$$

$$N_i'(t, \tau) = \frac{\tau - T_{k,t}}{T_{v,t}} = \frac{\tau}{T_{v,t}} \cdot K_{A,t} \quad (\text{pari vlakova}) \quad (7a)$$

Ako je  $2N'(t, \tau)_i \leq N_0(t, \tau) \leq 2[N'(t, \tau)_i + N''(t, \tau)_i]$  planirani obujam prijevoza na pruzi može biti ostvaren uz kašnjenje vlakova zbog neraspoloživosti signalno-sigurnosnih uređaja

$$T_{d,t} \leq 2[N_0(t, \tau)_i - N_i'(t, \tau)](T_{v,t}' - T_{v,t}'') \quad \text{min} \quad (8)$$

Za  $N_0(t, \tau)_i > 2[N'(t, \tau)_i + N''(t, \tau)_i]$  planirani obujam prijevoza neće biti izvršen, te će stvarna efikasnost prijevoza, zbog neraspoloživosti signalno-sigurnosnih uređaja, biti

$$E'(t, \tau)_i = \frac{2[N_i'(t, \tau) + N_i''(t, \tau)] \mathcal{F}_i}{\tau} \cdot \frac{N_0(t, \tau)_i}{N_0(t, \tau)_i} = \frac{2[N_i'(t, \tau) + N_i''(t, \tau)]}{N_0(t, \tau)_i} \cdot E(t, \tau)_i =$$

$$E'(t, \tau)_i = k \cdot E(t, \tau)_i < E(t, \tau)_i, \quad k < 1 \quad (9)$$

Ako je za planirani obujam  $y_0(t, \tau)$  potreban broj vlakova  $N_0(t, \tau) = \sum_{i=1}^{N_r} N_0(t, \tau)_i$ , gdje je potreban broj vlakova za prugu „i“,  $N_0(t, \tau)_i > 2[N'(t, \tau)_i + N''(t, \tau)_i]$ , parcijalni pokazatelj efikasnosti prijevoza za cijelu mrežu je

$$E'(t, \tau) = \frac{2 \sum_{i=1}^{N_r} [N_i'(t, \tau) + N_i''(t, \tau)] \mathcal{F}_i}{\tau} = 2 \sum_{i=1}^{N_r} \frac{[N_i'(t, \tau) + N_i''(t, \tau)] \mathcal{F}_i}{\tau} \quad (10)$$

$$E'(t, \tau) < \frac{\sum_{i=1}^{N_r} N_0(t, \tau)_i \mathcal{F}_i}{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} y_0(t, \tau)_i}{\tau} = E(t, \tau) \quad (10a)$$

Zbog neraspoloživosti signalno-sigurnosnih uređaja ostaju neiskorišteni resursi  $x_i(t, \tau)$  koji su angažirani u periodu  $[t, t+\tau]$  za ostvarivanje planiranog obujma prijevoza  $y_0(t, \tau)$ , što smanjuje efikasnost prijevoza kao što to prikazuje sljedeći parcijalni pokazatelj efikasnosti:

$$E'_1(t, \tau)_i = \frac{2[N_i'(t, \tau) + N_i''(t, \tau)] \mathcal{F}_i}{x_i(t, \tau)} \cdot \frac{N_0(t, \tau)_i}{N_0(t, \tau)_i} = k \frac{y_0(t, \tau)_i}{x_i(t, \tau)} < E_1(t, \tau)_i \quad (11)$$

**Prosječna brzina vlakova** na pruzi i na cijeloj mreži je odnos ukupno prevaljenih km i ukupnog voznog vremena. Zbog zaustavljanja i/ili usporavanja svlakova na dijelu pruge, koju osigurava signalno-sigurnosni uređaj u kvaru, povećava se prosječno vozno vrijeme i time smanjuju prosječnu brzinu vlakova i efikasnost prijevoza na pruzi i željezničkoj mreži.

#### 4. PRIMJENA MODELA

S obzirom da kvaliteta signalno-sigurnosnih uređaja neposredno utječe na obujam i troškove željezničkog prijevoza, prosječnu brzinu vlakova i iskorištavanje angažiranih resursa, potrebno je poduzimati mjere za održavanje kvalitete signalno-sigurnosnih uređaja, što podrazumijeva ne samo praćenje kvantitativnih pokazatelja kvalitete u skladu sa zahtjevima

norme EN 50126, već i praćenje svih parcijalnih pokazatelja efikasnosti prijevoza po željezničkim prugama i mreži u cjelini. U organizaciji i planiranju preventivnog održavanja i planiranja zamjene istrošenih signalno-sigurnosnih uređaja potrebno je sagledati njihov utjecaj na efikasnost prijevoza zbog gubitaka uzrokovanih kvarovima i troškova redovnog održavanja, rekonstrukcije, obnove ili zamjene, te ocijeniti njihovu rentabilnost ne dovodeći u pitanje ostvarivanje zahtjeva norme EN 50126 u pogledu njihove funkcionalne sigurnosti.

## **5. ZAKLJUČAK**

Utjecaj kvalitete signalno-sigurnosnih uređaja na efikasnost željeznice može se izraziti preko vjerojatnosti da će izvršiti sve svoje zadaće u periodu u kojem se planira ostvarenje određenog obujma željezničkog prijevoza uz angažiranje planiranih resursa, planirane troškove, prosječnu brzinu vlakova i druge parcijalne pokazatelje efikasnosti. Vjerojatnost da će signalno-sigurnosni uređaj u određenom periodu izvršiti svoju zadaću obuhvaća sve pokazatelje kvalitete prema modelu RAMS utvrđenom u normi EN 50126, te faktor prikladnosti konstrukcije. Pri tom na efikasnost željeznice izravno utječe raspoloživost signalno-sigurnosnih uređaja koja ovisi o njihovoj pouzdanosti, organizaciji održavanja i sposobnosti za brzo obnavljanje, tako da treba uspostaviti sistem praćenja pokazatelja kvalitete signalno-sigurnosnih uređaja u fazi eksploatacije prema modelu RAMS koji će obuhvatiti i pokazatelje kao što su kašnjenje vlakova ili broj otkazanih vlakova zbog kvarova signalno-sigurnosnih uređaja i kvantitativno odrediti koliki je njihov utjecaj na odgovarajuće parcijalne pokazatelje efikasnosti. To je ujedno i dobra osnova za organizaciju i planiranje preventivnog održavanja te zamjene ili rekonstrukcije istrošenih uređaja.

## **6. LITERATURA**

- [1] EN 50126-1: Railway applications – The specifications and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Basic requirements and generic process, 2002
- [2] EN 50126-2: Railway applications – The specifications and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 2: Guide to the application of EN 50126-1 for safety, 2007
- [3] Davidović, M.: Utjecaj pouzdanosti signalno-sigurnosnih uređaja na učinkovitost željeznice, KOREMA, 32. Skup o prometnim sustavima s međunarodnim sudjelovanjem »Automatizacija u prometu 2012«, 14-18 novembra, 2012, Zagreb, Hrvatska
- [4] Šimić, Z.: Funkcionalna sigurnost – Analiza integriteta, rizika i usklađenost uređaja (prema CENELEC standardima), FER Zagreb, 2009.