

Česká společnost pro jakost, Novotného lávka 5, 110 00 Praha 1



Prokazování splnění požadavků na RAMS

**Materiály z 85. semináře Odborného centra Spolehlivost
konaného dne 13. 6. 2023 na Univerzitě obrany v Brně**

**Odborní garanti semináře:
prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c.
Ing. Michal VINTR, Ph.D.**

Obsah

Prokazování očekávané úrovně RAMS systému analýzami a dokumentací	3
--	----------

Ing. Michal VINTR, Ph.D.

Nezávislý expert na spolehlivost, bezpečnost a RAMS/LCC

Prokazování dosažené úrovně bezporuchovosti zkouškami a vyhodnocením dat z provozu	14
---	-----------

prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c.

Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany

Praktické zkušenosti s prokazováním splnění požadavků na RAMS a LCC	29
--	-----------

Ing. Lenka VINTROVÁ

IFE-CR, a.s., Modřice

Prokazování očekávané úrovně RAMS systému analýzami a dokumentací

Ing. Michal Vintr, Ph.D.

Nezávislý expert na spolehlivost, bezpečnost a RAMS/LCC

mvintr@mvintr.cz – www.mvintr.cz

1 Úvod

Cílem článku je seznámit s možnostmi prokázání splnění požadavků na RAMS během životního cyklu systému, zvláště v předvýrobních etapách. Autor článku vychází z normativních doporučení a zejména ze svých dosavadních zkušeností s prokazováním splnění požadavků u nejrůznějších dodavatelů v oblasti železničního průmyslu. Článek je zaměřen zejména na prokazování splnění požadavků na systém, resp. prokazování očekávané úrovně RAMS systému.

V článku jsou stručně popsány možné způsoby prokázání splnění požadavků na RAMS během jednotlivých etap životního cyklu systému. V článku jsou uvedeny nejčastější koncepce prokázání očekávané úrovně RAMS systému v předvýrobních etapách. Na závěr článku jsou ukázány praktické příklady požadavků a způsoby prokázání jejich splnění prostřednictvím analýz nebo dokumentace.

Důležitost požadavků na RAMS a prokazování jejich splnění dokládá, mimo jiné, úvod normy ČSN EN 50126-1 [14], kde je zmíněno: „Procesy specifikace a prokázání požadavků RAMS jsou základními kameny této normy“. Pojem prokázání je uveden i v samotném názvu normy: „Drážní zařízení – Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a bezpečnosti (RAMS) ...“.

Požadavkům na spolehlivost a bezpečnost (nebo RAMS), případně jejich prokazování, byly dosud věnovány tři semináře Odborného centra Spolehlivost (OCS) (dříve Odborné skupiny pro spolehlivost):

- 35. seminář (v roce 2009): Analýzy spolehlivosti a bezpečnosti v praxi (aneb jak přesvědčit zákazníka, že požadavky na spolehlivost a bezpečnost výrobku budou splněny);
- 47. seminář (v roce 2012): Specifikace, alokace a optimalizace požadavků na spolehlivost;
- 81. seminář (v roce 2022): Požadavky na RAMS – Past nebo výzva pro dodavatele?

Tématem požadavků v železničním průmyslu (požadavků na RAMS) se také zabývalo několik jednotlivých příspěvků na seminářích OCS:

- Aktuální požadavky zákazníků v oblasti RAMS/LCC a jejich plnění [3] (56. seminář);
- Požadavky standardů na RAMS [8] (71. seminář);
- RAMS/LCC v dodavatelsko-odběratelských vztazích [2] (74. seminář);
- Specifikace zákazníka a požadavky na bezpečnost drážního zařízení [4] (77. seminář);
- Práce s dodavateli ve ŠKODA TRANSPORTATION a.s. [5] (84. seminář).

2 Zkratky

V článku jsou často používány zkratky, proto je dále uveden jejich význam.

A	Availability
CbC	Clause-by-Clause
CSM	Common Safety Method
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
FIT	Failures in Time (10^9 h)
LCC	Life Cycle Costs
LRU	Line Replaceable Unit
MTBF	Mean Time between Failures
MTTR	Mean Time to Restoration
OCS	Odborné centrum Spolehlivost
O&SHA	Operation and Support Hazard Analysis
PHA	Preliminary Hazard Analysis
RAM	Reliability, Availability and Maintainability
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety
RBD	Reliability Block Diagram

3 Požadavky na RAMS a prokazování jejich splnění

3.1 Požadavky na RAMS

Požadavek je dle norem [11] a [17] definován jako „potřeba nebo očekávání, které jsou stanoveny, obvykle se předpokládají nebo jsou závazné“. Přičemž specifikovaný požadavek je požadavek, který je stanoven (například v dokumentu).

Požadavky na RAMS se dají obecně rozdělit do tří kategorií [7]:

- požadavky legislativních předpisů – zejména směrnic Evropského parlamentu a Rady (např. *Směrnice 2016/798 – „Bezpečnost železnic“*) a nařízení a rozhodnutí Komise EU (např. *Prováděcí nařízení č. 2015/1136 – „Společná bezpečnostní metoda – CSM“*);
- požadavky standardů (zejména ISO 22163, EN 50126-1 a EN 50126-2);
- požadavky zákazníků (např. dodavatele komponenty; dodavatele kolejového vozidla nebo pevného trakčního zařízení nebo zabezpečovacího zařízení; provozovatele drážní aplikace).

Požadavky na RAMS lze rozdělit na [7]:

- požadavky obecné se vztahem k RAMS – nestanovují přímo požadavky na RAMS, ale úzce souvisí s RAMS (např. provozní podmínky a kategorizace poruch);

- požadavky na zabezpečování RAMS – např. požadavky na plán RAMS, požadavky na systém managementu, požadavky na dokumentaci, požadavky na analýzy a výpočty;
- požadavky na RAMS systému – kvalitativní a kvantitativní.

Ve specifikacích se také často objevuje rozdělování požadavků na RAMS na separátní požadavky na RAM (spolehlivost) a požadavky na S (bezpečnost). Případně se objevuje rozdělování po jednotlivých „vlastnostech“ – R, A, M, S [7].

3.2 Prokazování splnění požadavků na RAMS

Prokazovat je dle [18] definováno jako „*dát důkaz*“, „*dokázat*“.

Prokazování splnění požadavků na RAMS lze chápat (v kontextu norem, viz kapitoly 3.3 a 3.4) jako předkládání důkazů, že systém splňuje a/nebo splní požadavky na RAMS.

Nicméně prokazovat je třeba splnění požadavků všech tří kategorií (požadavků obecných, požadavků na zabezpečování RAMS, požadavků na RAMS systému).

Splnění požadavků obecných se vztahem k RAMS se obvykle prokazuje schválením v procesu CbC, výslovným uvedením v plánu RAMS a uvedením a respektováním v jednotlivých analýzách a dokumentaci RAMS.

Splnění požadavků na zabezpečování RAMS se obvykle prokazuje plánem RAMS, důslednou dokumentací dokazující realizaci požadovaných činností a případně verifikací, validací a nezávislým posouzením.

Splnění požadavků na RAMS systému se prokazuje různými způsoby, v závislosti na dané etapě životního cyklu systému (podrobnosti viz kapitola 3.5).

3.3 Prokazování požadavků v kontextu ČSN EN 62741

Norma ČSN EN 62741 (Prokazování požadavků na spolehlivost – Průkaz spolehlivosti) [16] definuje „*průkaz spolehlivosti*“ (dependability case): na důkazech založený, zdůvodněný a sledovatelný argument vytvořený k podpoře tvrzení, že stanovený systém splňuje a/nebo splní požadavky na spolehlivost.

Průkaz spolehlivosti má obvykle formu zprávy. Přičemž její stěžejní částí je tabulka důkazů, která zahrnuje zejména požadavky na spolehlivost, prohlášení o splnění požadavku, způsob prokázání splnění požadavku a důkaz splnění požadavku (nebo odkaz na něj). Průkaz spolehlivosti má být zaveden na začátku životního cyklu a má být postupně revidován.

Norma ČSN EN 62741 [16] uvažuje dva typy důkazů:

- přímý důkaz, že byly požadavky na spolehlivost prokázány;
- důkaz, že činnosti navržené k ošetření rizik, že požadavky na spolehlivost nejsou splněny nebo prokázány, byly úspěšné.

Norma ČSN EN 62741 [16] připouští následující zdroje důkazů:

- funkčnost (výkonnost) při předchozím používání/provozu;
- výpočty při návrhu a jiné výpočty;
- datové výsledky ze zkoušek a pokusů;
- výsledky simulací (např. MKP nebo Monte Carlo);
- výsledky z analýz (např. FMECA a FTA) včetně předpovědí a modelování;

- názor odborníka, včetně dříve zaznamenaného úspěchu dodavatele;
- procesy managementu a vývoje včetně:
 - správné implementace nejlepší praxe;
 - dodržování činností managementu a procesů systému;
- data z provozu a údržby;
- průkazu spolehlivosti součástí/subsystémů poskytované dodavateli.

3.4 Prokazování požadavků v kontextu ČSN EN 50126-1 a 50126-2

Norma ČSN EN 50126-1 [14] uvádí, že obecný proces RAMS se skládá ze 3 hlavních částí:

- posuzování rizik, včetně specifikace požadavků RAMS;
- implementace a prokázání, že systém plní specifikované požadavky na RAMS;
- provoz, údržba a vyřazení z provozu.

Pojem prokazování je uveden v názvu normy a na mnoha místech v textu normy. Prokazování je také jedním z cílů Etapy 6 životního cyklu (Návrh a implementace). Výslovně je cílem:

- prokázat, že subsystémy a komponenty odpovídají požadavkům na RAMS.

Nicméně norma nedefinuje přesné postupy a způsoby prokazování požadavků na RAMS.

Norma ČSN EN 50126-1 [14] definuje „*důkaz bezpečnosti*“ (safety case): dokumentovaný důkaz, že produkt (např. systém, subsystém nebo zařízení) plní specifikované požadavky na bezpečnost. Norma ČSN EN 50126-2 [15] uvádí, že prokázání bezpečnosti je založeno na důkazu bezpečnosti.

Dle normy ČSN EN 50126-1 [14] se důkaz bezpečnosti skládá z dokumentovaného strukturovaného zdůvodnění bezpečnosti, které poskytuje důkaz o tom, jak uvažovaný systém plní specifikované požadavky na bezpečnost v rámci definovaného rozsahu navrhovaného použití. Přičemž důkaz bezpečnosti, mimo jiné [14]:

- umožňuje těm, kteří mají systém využívat, mít důvěru v to, že systém plní specifikované požadavky na bezpečnost.

3.5 Prokazování splnění požadavků na systém v jednotlivých etapách životního cyklu systému

Norma ČSN EN 50126-1 [14] rozděluje životní cyklus systému na 12 etap, od konceptu po vyřazení z provozu. Pro další popis je toto dělení příliš podrobné, proto bude použito následující dělení etap životního cyklu systému (používané v normách z oblasti spolehlivosti [12]):

- koncepce a stanovení požadavků;
- návrh a vývoj;
- výroba a instalace;
- provoz a údržba;
- vylepšení uprostřed technického života nebo prodloužení života;
- vyřazení z provozu a likvidace.

V etapě koncepce a stanovení požadavků se splnění požadavků na RAMS systému prokazuje zejména:

- důkazy založenými na předchozích zkušenostech (viz např. podobné referenční systémy v kontextu CSM);
- předběžnými výpočty, modely, analýzami a dokumentací RAMS;
- expertními odhady (názory) odborníka na RAMS.

V etapě návrhu a vývoje se splnění požadavků na RAMS systému prokazuje zejména:

- důkazy založenými na předchozích zkušenostech;
- důkazy implementace správné praxe (viz např. kodexy správné praxe v kontextu CSM);
- důkazy dodržování činností managementu a procesů;
- výpočty, modely, analýzami a dokumentací RAMS.

V etapě výroby a instalace se splnění požadavků na RAMS systému prokazuje zejména:

- demonstracemi a zkouškami.

V etapě provozu a údržby se splnění požadavků na RAMS systému prokazuje zejména:

- vyhodnocením dat z provozu.

V etapě vylepšení uprostřed technického života nebo prodloužení života se splnění požadavků na RAMS systému prokazuje obdobně jako v prvních dvou etapách.

V etapě vyřazení z provozu a likvidace se obvykle prokázání splnění požadavků na RAMS systému neprovádí.

3.6 Prokazování splnění požadavků na bezporuchovost systému

Požadavky na bezporuchovost systému a prokazování jejich splnění patří mezi náročnější činnosti při zabezpečování RAMS. Požadavky na bezporuchovost mají obvykle formu definované maximální nebo minimální hodnoty ukazatele bezporuchovosti (např. intenzity poruch, FIT, MTBF). Hlavní problém s ukazateli bezporuchovosti tkví v tom, že jde o ukazatele charakterizující náhodné proměnné (dobu mezi poruchami nebo dobu do poruchy). Ze své podstaty je bezporuchovost jako taková v daném okamžiku neměřitelná – ani na existujícím systému nelze jednoduše „změřit“ MTBF. V případě existujícího systému potřebujeme „jen“ čas, abychom mohli danou veličinu (dobu) „pozorovat“ a prokázat splnění požadavku na bezporuchovost. Avšak v praxi je velmi často nezbytné prokázat splnění požadavku na bezporuchovost ještě před jeho vyrobením, tj. ještě před tím, než můžeme danou veličinu „pozorovat“.

Prokázat splnění požadavku na bezporuchovost lze s využitím (řazeno podle úrovně věrohodnosti):

- informací o bezporuchovosti garantovanými výrobcem;
- průkazných výsledků zkoušek (sledování) bezporuchovosti stejného (srovnatelného) systému;
- informací o bezporuchovosti získanými s využitím přístupu „Physics-of-Failure“;
- standardizovanými výpočty bezporuchovosti (metodiky predikce bezporuchovosti);
- specializovanými databázemi informací o bezporuchovosti (databáze bezporuchovosti);

- obecných databází informací o bezporuchovosti;
- expertních odhadů.

V železničním průmyslu – v etapě koncepce a stanovení požadavků a v etapě návrhu a vývoje – se splnění požadavku na bezporuchovost prokazuje především:

- tvrzeními (důkazy) založenými na sledování spolehlivosti srovnatelného systému;
- odhady založenými na databázích a metodikách predikce bezporuchovosti;
- expertními odhady.

V etapě výroby a instalace se splnění požadavku na bezporuchovost prokazuje především:

- zkouškami bezporuchovosti systému.

V etapě provozu a údržby se splnění požadavku na bezporuchovost prokazuje především:

- sledováním a vyhodnocováním bezporuchovosti systému v provozu.

4 Prokázání očekávané úrovně RAMS systému v předvýrobních etapách

V současné době, nejen v železničním průmyslu, je běžný požadavek na to, aby očekávaná (nebo požadovaná) úroveň RAMS systému byla prokázána ještě předtím než, dojde k výrobě systému nebo „alespoň“ jeho prototypu. Velmi často se v praxi můžeme setkat s tím, že u systémů vyvíjených na zakázku zákazník požaduje, aby mu již v počátečních etapách životního cyklu systému byl předložen důkaz o tom, že vyvíjený systém bude splňovat jeho požadavky na RAMS.

Prokazovat RAMS (a zejména bezporuchovost a bezpečnost) lze v zásadě třemi přístupy:

- deterministicky – používá se především u mechanicky namáhaných součástí; splnění požadavků se prokazuje pevnostními výpočty a statickými a únavovými zkouškami;
- stochasticky – používá se u „složitějších“ systémů (mechanických, elektrických, hydraulických, pneumatických, ...); splnění požadavků se prokazuje analýzou systému;
- dle stupně zajištění vývoje – používá se u elektronických systémů a software; splnění požadavků se prokazuje především dodržáním definovaných postupů, technik, opatření a organizačního uspořádání (viz problematika funkční bezpečnosti).

Následující podkapitoly jsou zaměřeny na systémy (stochastický přístup), kdy je běžně akceptováno, že jsou jako důkazy využity analýzy a dokumentace RAMS.

4.1 Důkazy – analýzy a dokumentace RAMS

Mezi nejčastěji využívané analýzy prokazující očekávanou úroveň RAMS systému se řadí:

- předběžná analýza nebezpečí – Preliminary Hazard Analysis (PHA);
- analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch – Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA);
- analýza blokového diagramu bezporuchovosti – Reliability Block Diagram Analysis (RBD);
- analýza stromu poruchových stavů – Fault Tree Analysis (FTA);

- analýza nebezpečí v provozu a při podpoře – Operation and Support Hazard Analysis (O&SHA);
- analýza nákladů životního cyklu – Life Cycle Costs Analysis (LCC).

Mezi nejčastěji využívanou dokumentací prokazující očekávanou úroveň RAMS systému se řadí dokumenty obsahující:

- plán RAM a plán bezpečnosti;
- predikci bezporuchovosti;
- výpočet ukazatelů (FIT, MTBF, MTTR, ...);
- záznamy o nebezpečí – Hazard Log;
- důkaz bezpečnosti – Safety Case.

4.2 Důkazy – analýzy a dokumentace RAMS – v předvýrobních etapách

Vzhledem k obvyklému charakteru a odlišnostem požadavků, jsou v praxi časté rozdíly při prokazování očekávané úrovně RAM, bezpečnosti a LCC v předvýrobních etapách.

Očekávaná úroveň RAM systému se obvykle prokazuje s využitím:

- analýz RAM (FMECA, RBD, FTA);
- dokumentace RAM (plán RAM, predikce bezporuchovosti, zpráva s výpočtem ukazatelů).

Očekávaná úroveň bezpečnosti systému se obvykle prokazuje s využitím:

- analýz bezpečnosti (PHA, FMECA, FTA, O&SHA);
- dokumentace bezpečnosti (plán bezpečnosti, záznamy o nebezpečí, důkaz bezpečnosti).

Očekávaná úroveň LCC se obvykle prokazuje s využitím:

- analýzy nákladů životního cyklu (LCC).

4.3 Koncepte prokázání očekávané úrovně RAMS (nejen v předvýrobních etapách)

Normy EN 50126-1 a EN 50126-2 rozlišují tři oblasti v železničním průmyslu:

- řídicí a zabezpečovací systémy;
- kolejová vozidla;
- pevné instalace.

Obvyklé postupy prokazování očekávané úrovně RAMS systému se v jednotlivých uvedených oblastech odlišují. Dále jsou uvedeny příklady prokazování očekávané úrovně RAMS systému, se kterými se autor opakovaně setkává.

Stěžejní body prokázání očekávané úrovně RAM systému (výrobce kolejového vozidla):

- akceptace požadavků (na základě dat dřívějších projektů, předběžných analýz a predikcí);
- zpracování předběžné analýzy LCC (v etapě koncepce a stanovení požadavků);
- zpracování plánu RAM;
- zpracování analýz RAM (v etapě návrhu a vývoje);

- zpracování analýzy LCC (v etapě návrhu a vývoje);
- aktualizace analýz RAM a analýzy LCC (v etapě výroby);
- sběr a vyhodnocení dat z provozu.

Stěžejní body prokázání očekávané úrovně RAMS systému (dodavatel komponent pro kolejové vozidlo):

- akceptace požadavků (CbC proces);
- zpracování plánu RAMS;
- zpracování předběžné analýzy LCC;
- zpracování analýz a dokumentace RAMS a LCC (jednorázově, případně předběžně a finálně);
- demonstrace udržitelnosti (na fyzickém systému nebo 3D modelu);
- zkoušky bezporuchovosti;
- vyhodnocení dat v počátečních fázích provozu (bezporuchovost, udržitelnost, LCC).

Stěžejní body prokázání očekávané úrovně bezpečnosti systému (dodavatel řídicích a zabezpečovacích systémů):

- akceptace požadavků;
- zpracování plánu bezpečnosti;
- zpracování analýz a dokumentace bezpečnosti (průběžně v jednotlivých etapách projektu);
- zpracování důkazu bezpečnosti;
- verifikace, validace a nezávislé posuzování bezpečnosti (průběžně v jednotlivých etapách projektu);
- přejímky a testy.

5 Příklady požadavků a způsobů prokázání jejich splnění

V této kapitole autor článku uvádí příklady požadavků na RAMS a LCC a možné způsoby prokázání jejich splnění v předvýrobních etapách – prostřednictvím analýz a/nebo dokumentace.

Příklad 1:

Požadavek: Činnosti RAMS mají být systematicky řízeny v souladu se standardem EN 50126.

Způsob prokázání v předvýrobních etapách: Zpracování plánu RAMS.

Příklad 2:

Požadavek: Je definována požadovaná hodnota MTBF.

Způsob prokázání v předvýrobních etapách: Provedení predikce bezporuchovosti a zpracování zprávy o predikci bezporuchovosti (s výpočtem MTBF).

Příklad 3:

Požadavek: Je definována požadovaná hodnota MTBF pro určitou kategorii poruch (např. pro poruchy ovlivňující provoz).

Způsob prokázání v předvýrobních etapách – varianta 1: Provedení analýzy FMECA, provedení analýzy RBD a zpracování zprávy o analýze RBD (s výpočtem MTBF pro určitou kategorii poruch).

Způsob prokázání v předvýrobních etapách – varianta 2: Provedení analýzy FMECA, provedení FTA a zpracování zprávy o FTA (s výpočtem MTBF pro určitou kategorii poruch).

Příklad 4:

Požadavek: Je definována matice rizik, včetně kritérií akceptovatelnosti rizik.

Způsob prokázání v předvýrobních etapách: Provedení analýz bezpečnosti (PHA, O&SHA) pro prokázání, že všechna rizika jsou nebo po ošetření budou akceptovatelná.

Příklad 5:

Požadavek: Jsou definovány nebezpečné události a přípustné pravděpodobnosti jejich výskytu (např. zaseknutí páky kontroléru v poloze trakce).

Způsob prokázání v předvýrobních etapách: Provedení analýz FMECA a FTA (pro definované nebezpečné události) a zpracování zprávy o FTA.

Příklad 6:

Požadavek: Je požadováno identifikovat nebezpečí související s provozem systému a prokázat, že všechna rizika s nimi související jsou akceptovatelná.

Způsob prokázání v předvýrobních etapách: Provedení analýz bezpečnosti (PHA, FMECA a FTA) a zpracování zprávy o FTA (pro identifikované nebezpečné události, u kterých je nezbytné kvantitativní prokázání).

Příklad 7:

Požadavek: Je požadováno mít pod kontrolou všechna nebezpečí související s provozem a podporou systému.

Způsob prokázání v předvýrobních etapách: Zpracování a průběžné vedení záznamů o nebezpečí.

Příklad 8:

Požadavek: Je definována požadovaná hodnota MTTR.

Způsob prokázání v předvýrobních etapách – varianta 1: Provedení analýzy LCC (s výpočtem MTTR).

Způsob prokázání v předvýrobních etapách – varianta 2: Provedení analýzy FMECA (rozšířené o ukazatele udržovatelnosti a doplněné o výpočet MTTR).

Příklad 9:

Požadavek: Je definována minimální povolená hodnota asymptotické pohotovosti (A).

Způsob prokázání v předvýrobních etapách – varianta 1: Provedení analýzy LCC (s výpočtem pohotovosti).

Způsob prokázání v předvýrobních etapách – varianta 2: Provedení analýzy FMECA (rozšířené o ukazatele udržovatelnosti) a provedení výpočtu pohotovosti.

Příklad 10:

Požadavek: Je definována maximální povolená hodnota nákladů na údržbu na 1 km.

Způsob prokázání v předvýrobních etapách: Provedení analýzy LCC (včetně nezbytných výpočtů nákladů).

6 Závěr

Prokázat očekávanou úroveň RAMS systému lze různými způsoby, v závislosti na typu systému a etapě životního cyklu systému. Analýzy a dokumentace RAMS jsou jedním z nejčastěji používaných způsobů prokázání u „složitých“ systémů v předvýrobních etapách.

Splnění každého požadavku na RAMS je nezbytné prokázat. Nicméně je třeba mít na paměti, že nejprve je třeba požadavky identifikovat a analyzovat a poté je třeba realizovat činnosti pro splnění požadavků. Až „na konec“ je třeba prokázat, že požadavky byly a jsou splněny.

Použité zdroje

- [1] HOLUB, Rudolf a Zdeněk VINTR. *Aplikované techniky spolehlivosti. Část 1. – Specifikace požadavků na spolehlivost*. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2002.
- [2] KRAUS, Jan. RAMS/LCC v dodavatelsko-odběratelských vztazích. In *Současný stav RAMS/LCC ve ŠKODA ELECTRIC a.s.* Praha: Česká společnost pro jakost, 2019, s. 34–45. ISBN 978-80-02-02852-9.
- [3] KRAUS, Jan. Aktuální požadavky zákazníků v oblasti RAMS/LCC a jejich plnění. In *Management spolehlivosti ve ŠKODA ELECTRIC a.s.* Praha: Česká společnost pro jakost, 2014, s. 10–16. ISBN 978-80-02-02565-8.
- [4] TOMÁŠEK, Martin. Specifikace zákazníka a požadavky na bezpečnost drážního zařízení. In *Zkušenosti s aplikací RAMS podle normy ČSN EN 50126-x*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2019, s. 21–28.
- [5] SUDA, Pavel. Práce s dodavateli ve ŠKODA TRANSPORTATION a.s. In *Řešení problematiky spolehlivosti (RAM/LCC) ve společnosti Škoda Transportation (součást Škoda Group) a ukázka dílčích témat/procesů*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2023, s. 9–15. ISBN 978-80-02-03010-2.
- [6] VINTR, Zdeněk, David VALIŠ a Michal VINTR. *Základy spolehlivosti technických systémů*. Brno: Univerzita obrany v Brně, 2020. ISBN 978-80-7582-303-8.
- [7] VINTR, Michal. Analýza požadavků na RAMS prakticky. In *Požadavky na RAMS – Past nebo výzva pro dodavatele?* Univerzita Obrany v Brně, 2022, s. 15–29. ISBN 978-80-7231-457-8.

- [8] VINTR, Michal. Požadavky standardů na RAMS. In *RAMS drážních aplikací – současné přístupy, novinky a zkušenosti*. Univerzita Obrany v Brně, 2018, s. 10–20. ISBN 978-80-7231-410-2.
- [9] VINTR, Zdeněk. Společná bezpečnostní metoda pro hodnocení a posuzování rizik u železničních systémů. In *RAMS drážních aplikací – Vybraná témata*. Univerzita Obrany v Brně, 2021, s. 3–11. ISBN 978-80-7582-396-0.
- [10] VINTR, Zdeněk. Základní filozofie průkazu spolehlivosti a bezpečnosti technického systému v počátečních etapách životního cyklu. In *Analýzy spolehlivosti a bezpečnosti v praxi*. Univerzita Obrany v Brně, 2009, s. 1–8. ISBN 978-80-02-02156-8.
- [11] ČSN IEC 60050-192. *Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [12] ČSN EN 60300-1 ed 2. *Management spolehlivosti – Část 1: Návod pro management a použití*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [13] ČSN EN 61703 ed. 2. *Matematické výrazy pro ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a zajištění údržby*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [14] ČSN EN 50126-1 ed. 2. *Drážní zařízení – Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a bezpečnosti (RAMS) – Část 1: Generický proces RAMS*. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [15] ČSN EN 50126-2. *Drážní zařízení – Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a bezpečnosti (RAMS) – Část 2: Systémový přístup k bezpečnosti*. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [16] ČSN EN 62741. *Prokazování požadavků na spolehlivost – Průkaz spolehlivosti*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [17] ČSN EN ISO 9000. *Systémy managementu kvality – Základní principy a slovník*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [18] *Internetová jazyková příručka* [online] (2008–2023). Praha: Ústav pro jazyk český AV ČR, v. v. i. Cit. 2. 6. 2023. <<https://prirucka.ujc.cas.cz/>>

Prokazování dosažené úrovně bezporuchovosti zkouškami a vyhodnocením dat z provozu

prof. Ing. Zdeněk Vintr, CSc., dr.h.c.

Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany

zdenek.vintr@unob.cz

1 Úvod

Jestliže na počátku životního cyklu jakéhokoliv technického objektu byly specifikovány požadavky na jeho bezporuchovost, je vhodné v průběhu následujících etap životního cyklu objektu vhodnými způsoby ověřovat, zda aktivity realizované v rámci vývoje, návrhu, výroby, instalace a použití objektu vytváří předpoklady pro splnění těchto požadavků [3]. V komerčních vztazích je tak zcela běžné, že odběratelé od svých dodavatelů požadují, aby věrohodně prokázali, že jejich produkt dosahuje odběratelem specifikovanou, či dodavatelem deklarovanou úroveň bezporuchovosti. Jaký význam je přikládán takovému průkazu splnění požadavků v oblasti drážních zařízení, jasně vyplývá i z názvu jedné ze základních norem ČSN EN 5012 Drážní zařízení – Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a bezpečnosti (RAMS) [1]. Tato norma, velmi zjednodušeně řečeno, vychází z teze, že základním předpokladem efektivního používání drážních zařízení je racionální specifikování požadavku na RAMS a následné prokázání (ověření) toho, že tyto požadavky byly splněny.

Uvedená norma [1] doporučuje, aby takové ověřování splnění požadavků, nebylo realizováno pouze jako jednorázový akt, ale aby jako proces prolínalo celým životním cyklem objektu. Vhodné je tak v průběhu předvýrobních etap životního cyklu ověřovat, že kroky učiněné v rámci vývoje a návrhu objektu vytváří nezbytné předpoklady pro splnění požadavků. Protože v této etapě objekt ještě fyzicky neexistuje, využívají se k tomu různé prediktivní analýzy RAMS. Jakmile je objekt fyzicky k dispozici a je možné reálně zkoumat jeho vlastnosti, je žádoucí systematicky sledovat a vyhodnocovat jeho chování i v oblasti RAMS. Cílem je posouzení toho, zda daný objekt splňuje požadavky stanovené v oblasti RAMS. Na samém počátku fyzické existence objektu tyto aktivity probíhají zejména v rámci nejrozličnějších zkoušek objektu (zkoušky prototypů, typové zkoušky, přejímací zkoušky apod.) a později v rámci běžného provozu objektu.

Tento článek se výhradně zaměřuje na možnosti průkazu dosažené úrovně bezporuchovosti z hlediska zpracování informací získaných v průběhu zkoušek a běžného provozu objektu. Z hlediska matematických metod a postupů pro vyhodnocení ukazatelů bezporuchovosti není podstatné, zda zpracovávané údaje pochází ze zkoušek nebo z běžného provozu a jsou plně využitelné pro zpracování dat v obou případech. Nicméně je třeba zdůraznit, že pokud mají být k průkazu dosažené úrovně bezporuchovosti využity informace získané ze zkoušek, je nezbytné zkoušky realizovat za podmínek provozu a prostředí, které odpovídají předpokládaným podmínkám reálného provozu objektu [6]. Pokud tato podmínka není z různých důvodů splněna (např. v případě laboratorních nebo stendových zkoušek) může to vést ke snížení věrohodnosti takového průkazu.

Důležité také je, aby sběr informací, které následně budou využity pro průkaz dosažené úrovně bezporuchovosti, probíhal podle jasně stanovených pravidel a pro vyhodnocení byly využity pouze relevantní informace. Doporučení k tomu, jak sledování informací o bezporuchovosti

organizovat a získané informace třídit, lze nalézt jak v odborné literatuře [8], tak i platných normách [6], [12].

Tento článek přináší přehled základních metod zpracování informací o bezporuchovosti získaných během zkoušek objektu, nebo v průběhu jeho běžného provozu s důrazem na ty metody, které jsou nejčastěji využívány k průkazu dosažené úrovně bezporuchovosti v oblasti drážních zařízení.

2 Bezporuchovost a její ukazatele

Bezporuchovostí objektu rozumíme jeho schopnost fungovat v daných podmínkách během daného časového intervalu bez poruchy tak, jak je požadováno [2]. Doba trvání časového intervalu může být vyjádřena v jednotkách vhodných pro dotyčný objekt, jako je např. kalendářní doba, provozní cykly, ujetá vzdálenost atd., a jednotky mají být vždy jasně stanoveny. Mezi dané podmínky se zahrnují hlediska, která ovlivňují bezporuchovost, jako jsou: režim provozu, úrovně namáhání, podmínky prostředí a údržba [2]. Obecně se předpokládá, že na začátku časového intervalu je objekt ve stavu schopném plnit požadované funkce. Kritériem pro ukončení schopnosti plnit požadovanou funkci je nastoupení jevu zvaného porucha.

Ke kvantitativnímu popisu bezporuchovosti používáme ukazatele bezporuchovosti. Platná terminologická norma [2] definuje ukazatel jako veličinu nebo matematickou funkci používanou k popisu náhodné proměnné nebo náhodného procesu. Z definice je zřejmé, že ukazatele jsou ve spolehlivosti obecně chápány jako nástroje umožňující popis stochastických jevů a procesů, které charakterizují spolehlivost objektu. S každou náhodnou proměnnou je spojeno jisté pravidlo, které určuje, s jakou pravděpodobností lze při realizaci příslušného náhodného pokusu očekávat nastoupení daného jevu. Například s jakou pravděpodobností můžeme očekávat, že u sledovaného objektu během určité doby provozu nastane porucha. Toto pravidlo nazýváme zákonem rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné, který může být u spojité náhodné proměnné vyjádřen například [4] distribuční funkcí, hustotou pravděpodobnosti, nebo intenzitou náhodného jevu. U diskrétní náhodné proměnné zákon rozdělení pravděpodobnosti může být vyjádřen například [4] distribuční funkcí nebo pravděpodobnostní funkcí.

Zákon rozdělení pravděpodobnosti podává o náhodné proměnné obraz sice úplný, ale často dosti nepřehledný, komplikovaný a někdy i nepraktický. Proto při praktické aplikaci často shrnujeme informaci o náhodné proměnné do jednoho nebo několika čísel, která proměnnou dobře charakterizují a jejichž způsob výpočtu je jednoznačně definován. Tato čísla nazýváme *číselnými charakteristikami* nebo *statistikami*. Z velkého množství charakteristik jsou zde uvedeny pouze ty nejdůležitější, v praxi často používané, které popisují hlavní vlastnosti každého rozdělení, totiž polohu a variabilitu náhodné proměnné [4]:

- střední hodnota;
- rozptyl;
- směrodatná odchylka.

S ohledem na výše uvedené, tedy *ukazatelem bezporuchovosti* obecně může být:

- funkce charakterizující zákon rozdělení pravděpodobnosti sledované náhodné proměnné;
- číselná charakteristika rozdělení pravděpodobnosti sledované náhodné proměnné.

V oblasti bezporuchovosti k nejčastěji sledovaným náhodným proměnným patří doba do poruchy, doba mezi poruchami, intenzita poruch či parametr proudu poruch. Pro věcně správný popis těchto náhodných proměnných je nutná znalost zákona, kterým se řídí rozdělení

pravděpodobnosti dané náhodné proměnné. V oblasti náhodných proměnných charakterizujících bezporuchovost objektu se můžeme setkat s řadou typů rozdělení [8], nicméně v praxi jsou v oblasti drážních zařízení využívány zejména dva typy rozdělení.

Prvním je Weibullovo rozdělení, které se využívá v těch případech, kdy nelze přijmout předpoklad o konstantní intenzitě výskytu poruch. Jedná se zejména o popis bezporuchovosti objektů, u kterých se výrazně projevuje vliv opotřebení, únavy, koroze a dalších degradačních procesů a kde s časem roste intenzita poruch daného objektu. Toto rozdělení se také někdy používá pro popis bezporuchovosti v počátečních fázích provozu, kdy se projevují výrobní vady [4]. U drážních zařízení se toto rozdělení využívá zejména pro popis bezporuchovosti jednotlivých součástí nebo konstrukčně velmi jednoduchých, především mechanických systémů, kde se výrazně projevují degradační procesy. Metody a postupy umožňující zpracování informací o bezporuchovosti a odhad ukazatelů bezporuchovosti za předpokladu Weibullova rozdělení jsou dostatečně popsány jak v odborné literatuře [8], tak i platných normách [13], [7].

Druhým je exponenciální rozdělení, které je založeno na předpokladu konstantní intenzity vzniku poruch. Využívá se zejména pro popis bezporuchovosti těch objektů, kde se neprojevuje vliv postupné degradace. Konstantní intenzita poruch se například běžně předpokládá u vysoce spolehlivých, složitých technických objektů, s jakými se obvykle v oblasti drážních zařízení setkáváme. Jde o systémy, které mají často charakter složitých mechatronických systémů představujících kombinaci mechanických, elektrických, elektronických, hydraulických či pneumatických subsystémů. U takových systémů se degradační procesy během předpokládaného technického života projevují jen ve velmi omezeném rozsahu a předpoklad konstantní intenzity poruch je tak vcelku oprávněný.

Důležité je také praktické hledisko, protože předpoklad exponenciálního rozdělení podstatným způsobem usnadňuje zpracování informací o bezporuchovosti a interpretaci jednotlivých ukazatelů bezporuchovosti. Bez zajímavosti jistě není skutečnost, že v dokumentech RAMS u drážních zařízení zpravidla žádné informace o předpokládaných typech rozdělení náhodné proměnné nenalezneme, ale implicitně se předpokládá aplikace právě exponenciálního rozdělení.

Vzhledem k tomu, že průkaz bezporuchovosti je zpravidla požadován u finálních produktů – drážních vozidel, jejich hlavních subsystémů či dalších komplexních drážních zařízení, dále prezentované metody a postupy vycházejí z předpokladu exponenciálního rozdělení příslušné náhodné proměnné. Na tomto místě je však třeba zdůraznit, že je vhodné v každém konkrétním případě oprávněnost předpokladu konstantní intenzity poruch vhodným způsobem ověřit. Návody k tomu, jak si platnost předpokladu konstantní intenzity poruch ověřit lze nalézt jak v odborné literatuře [8], tak různých standardech [7], [10].

V oblasti drážních zařízení jsou nejčastěji na úrovni finálních produktů využívány následující ukazatele bezporuchovosti charakterizující chování opravovaných objektů.

Střední doba provozu mezi poruchami

Očekávaná hodnota doby provozu mezi poruchami. Označení: *MTBF* (Mean operating time between failures).

Tento ukazatel je nejčastěji používaným ukazatelem bezporuchovosti, protože má relativně jednoduchou interpretaci a je všeobecně srozumitelný. V oblasti drážních aplikací se také často setkáváme s ukazatelem „střední ujetá vzdálenost mezi poruchami“ (*MDBF* – Mean distance between failures).

Parametr proudu poruch

Limita, existuje-li, podílu středního počtu poruch opravitelného objektu v časovém intervalu $(t, t+\Delta t)$ a Δt , když se Δt blíží nule:

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{E[N(t+\Delta t) - N(t)]}{\Delta t}, \quad (1)$$

kde $N(t)$ je počet poruch v časovém intervalu $(0, t)$ a E označuje očekávanou hodnotu [2].

Tento parametr také bývá označován jako intenzita výskytu poruch či četnost poruch. V praxi se však často můžeme setkat s tím, že parametr proudu poruch je nesprávně označován jako intenzita poruch, což souvisí s nejednoznačným překladem anglického názvu ukazatele (failure intensity). V případě exponenciálního rozdělení dob provozu mezi poruchami, kdy je parametr proudu poruch konstantní, lze označení parametru proudu poruch jako intenzity poruch vcelku akceptovat $z(t) = \lambda$ a v dokumentech RAMS je toto zjednodušení běžně používáno. Za předpokladu konstantní intenzity poruch potom platí:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}. \quad (2)$$

V oblasti drážních zařízení se také často využívají další specifické ukazatele bezporuchovosti, které charakterizují intenzitu vzniku poruch (očekávaný počet poruch během jisté doby provozu) a které jsou vztaženy k různým jednotkám charakterizujícím dobu provozu, například:

- *FIT* - Poruchy v čase (Failures In Time) – očekávaný počet poruch během 10^9 hodin;
- *FPMK* - Poruchy na milion ujetých kilometrů (Failures per Million Kilometers);
- *FPMM* - Poruchy na milion ujetých mílí (Failures per Million Miles);
- *FPMH* - Poruchy na milion hodin provozu (Failures Per Million Hours);
- *FPMC* - Poruchy na milion cyklů (Failures Per Million Cycles).

Pro zjednodušení zápisů dále uváděných rovnic bude střední doba provozu mezi poruchami označována v těchto rovnicích symbolem $m = MTBF$.

3 Informace ze zkoušek a provozu objektu pro vyhodnocení bezporuchovosti

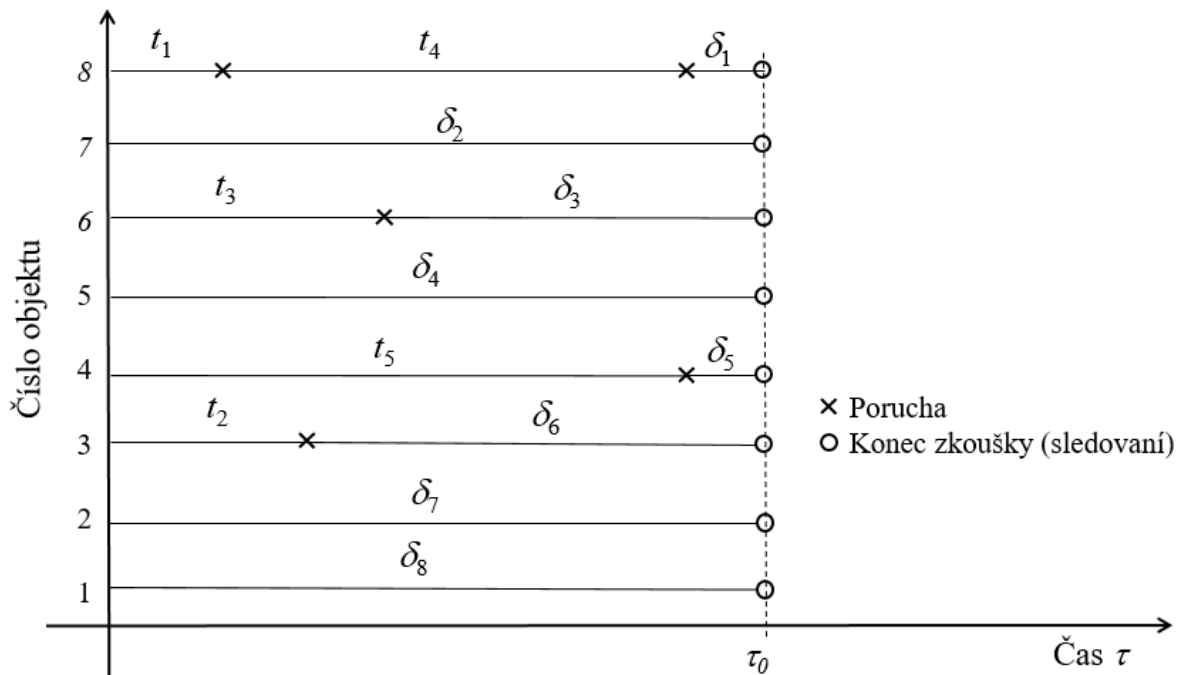
Základními informacemi, které jsou nezbytné pro vyhodnocení bezporuchovosti nějakého objektu, jsou doba provozu objektu v hodnoceném období a počet zaznamenaných poruch.

Rozsah provozu objektu charakterizujeme s využitím takzvané kumulované doby zkoušky T^* . Kumulovaná doba zkoušky představuje součet všech dob provozu všech sledovaných objektů daného typu ve sledovaném období. Přestože je v názvu veličiny uveden pojem „zkouška“ využívá se i při zpracování informací z běžného provozu objektu, protože i vlastní provoz lze považovat za jistý typ provozní zkoušky.

Obecně tedy kumulovaná doba zkoušky závisí na době pozorování, během které objekt nutně nemusí být po celou dobu v provozu, a na počtu sledovaných objektů. Na Obr. 1 je uveden příklad průběhu sledování 8 opravovaných objektů, které byly současně uvedeny do provozu. Po poruše objektu vždy dojde k opravě, která trvá jen velmi krátkou (zanedbatelnou) dobu a objekt je vrácen zpět do provozu. V takovém případě jsou všechny objekty po celou dobu zkoušky (sledování) v provozu až do časového okamžiku τ_0 . V takovém případě lze kumulovanou dobu zkoušky určit ze vztahu:

$$T^* = n \tau_0, \quad (3)$$

kde: n – počet sledovaných objektů,
 τ_0 – doba trvání zkoušky.



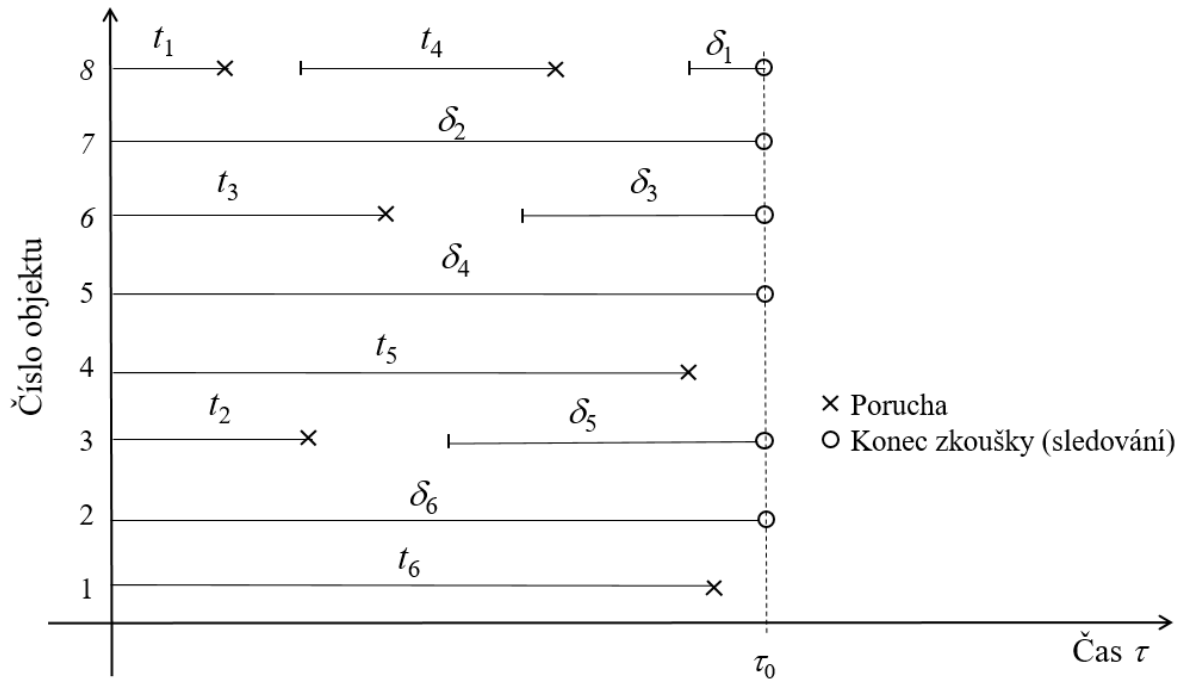
Obr. 1 Příklad průběhu zkoušky 1

Na Obr. 2 je uveden příklad průběhu sledování 8 opravovaných objektů, které byly současně uvedeny do provozu. Po poruše objektu vždy dojde k jeho vyřazení z provozu a provedení opravy a po ukončení opravy je objekt vrácen zpět do provozu. V takovém případě lze kumulovanou dobu zkoušky určit ze vztahu:

$$T^* = \sum_{i=1}^{i=r} t_i + \sum_{j=1}^{j=k} \delta_j, \quad (4)$$

kde: t_i – i -tá zaznamenaná doba provozu do poruchy,
 δ_j – j -tá zaznamenaná doba bezporuchového provozu (do ukončení zkoušky),
 r – počet zaznamenaných poruch,
 k – počet zaznamenaných dob bezporuchového provozu.

Do vyhodnocení bezporuchovosti se vždy zahrnují pouze tzv. započitatelné poruchy. Před zahájením pozorování vždy musí být jasně a jednoznačně vymezeno, jaké poruchy nebudou do vyhodnocení bezporuchovosti zahrnuty. Typicky se jedná o poruchy způsobené nesprávnou obsluhou či údržbou objektu, poruchy závislé (vyvolané jinou poruchou objektu) a podobně. V některých specifických případech do vyhodnocení mohou být zahrnuty jen poruchy specifikovaného druhu, kdy jako kritérium třídění poruch může sloužit například závažnost důsledku poruchy.



Obr. 2 Příklad průběhu zkoušky 2

4 Bodové odhady ukazatelů bezporuchovosti

Svojí podstatou jsou bodové odhady ukazatelů bezporuchovosti nejjednodušší možností, jak výsledky zkoušky (sledování v provozu) vyhodnotit. Bodový odhad střední doby provozu mezi poruchami se určí dle vztahu:

$$m = \frac{T^*}{r} . \quad (5)$$

Analogicky lze provést bodový odhad intenzity poruch ze vztahu:

$$\lambda = \frac{r}{T^*} . \quad (6)$$

Bodové odhady provedené dle těchto vztahů jsou svojí podstatou vychýlené a při menším počtu pozorovaných poruch $r < 10$ může být vliv tohoto vychýlení částečně eliminován tak, že se na místo počtu poruch r do výpočtu dosadí hodnota $r + 1$ [5].

Obecně však platí, že se snižujícím se počtem zaznamenaných poruch se snižuje také věrohodnost provedeného odhadu. V případě, že by nebyla v rámci zkoušky pozorována žádná porucha, bodový odhad nelze provést. Další nevýhodou bodových odhadů je skutečnost, že v rámci prokazování bezporuchovosti vytváří podmínky pouze pro binární rozhodování (požadovaná úroveň bezporuchovosti byla/nebyla dosažena) a tomuto rozhodnutí nelze přidělit žádnou úroveň konfidence.

Z uvedených důvodů nelze bodové odhady ukazatelů bezporuchovosti doporučit jako vhodný způsob prokazování dosažené úrovně bezporuchovosti, mohou však sloužit jako velmi snadno použitelný nástroj pro orientační posuzování dosažené úrovně bezporuchovosti v průběhu zkoušky či provozu.

5 Intervalové odhady ukazatelů bezporuchovosti

Podstatou intervalových odhadů je určení intervalu (rozsahu hodnot) daného ukazatele ve kterém se nachází skutečná (pro nás neznámá hodnota) s jistou, dopředu zvolenou, pravděpodobností. V praxi se zpravidla pracuje s jednostrannými intervaly, kdy nás zajímá hodnota, kterou daný ukazatel s danou pravděpodobností dosahuje minimálně (např. v případě MTBF), nebo kterou daný ukazatel dosahuje maximálně (např. v případě intenzity poruch).

K provedení intervalového odhadu je, kromě znalosti kumulované doby zkoušky a počtu poruch, nutná také znalost toho, co se u sledovaného objektu děje po vzniku poruchy a musí být zvolena úroveň konfidence, s jakou odhad bude proveden. Z hlediska činnosti realizované po vzniku poruchy rozeznáváme dvě situace.

Bez nahrazování – po poruše je daný objekt ze zkoušky (sledování vyřazen). Tento postup se aplikuje zejména u neopravovaných objektů, kdy vznikem poruchy končí technický život objektu. S uvedenou situací se typicky můžeme setkat při specializovaných zkouškách bezporuchovosti jednotlivých prvků drážních zařízení.

S nahrazováním – po poruše je objekt nahrazen jiným objektem. Tento postup se aplikuje u neopravovaných objektů tak, že po poruše je tento objekt nahrazen novým objektem. V případě opravovaných objektů, k žádné náhradě nedochází, ale do zkoušky se vždy po opravě vrací tentýž objekt. Protože v rámci tohoto příspěvku se zajímáme výhradně o možnosti prokazování bezporuchovosti u opravovaných objektů, předpokládá se dále jen realizace zkoušek „s nahrazováním“.

Dolní mez jednostranného konfidenčního intervalu střední doby provozu mezi poruchami se určí ze vztahu:

$$m_L \geq \frac{2T^*}{\chi_c^2(\nu)} \quad (7)$$

Horní mez jednostranného konfidenčního intervalu intenzity poruch se určí ze vztahu:

$$\lambda_U \leq \frac{\chi_c^2(\nu)}{2T^*}, \quad (8)$$

kde $\chi_c^2(\nu)$ je kvantil rozdělení χ^2 pro ν stupňů volnosti na úrovni konfidence c . Počet stupňů volnosti se v tomto případě (s nahrazováním) určí ze vztahu:

$$\nu = 2r + 2. \quad (9)$$

Hodnotu kvantilu rozdělení χ^2 lze určit s využitím statistických tabulek, nebo vhodného software. Hodnotu kvantilu lze například určit v software Excel s využitím funkce CHISQ.INV($c; \nu$). V tabulce 1 je příklad hodnot kvantilu rozdělení χ^2 pro úroveň konfidence 90 %.

Tabulka 1. Hodnoty rozdělení χ^2 pro úroveň konfidence $c = 0,9$

Stupně volnosti ν	2	4	6	8	10
$\chi_{0,9}^2(\nu)$	4,61	7,78	10,65	13,36	15,98

Výsledek intervalového odhadu střední doby provozu mezi poruchami (intenzity poruch) lze interpretovat tak, že skutečná hodnota m (λ) daného objektu je s pravděpodobností c rovna, nebo je větší (menší) jak vypočítaná m_L (λ_L).

Výhodou intervalových odhadů ukazatelů bezporuchovosti je to, že umožňují poměrně jasnou interpretaci výsledků odhadu a to, že tyto odhady lze provádět s předem zvolenou úrovní konfidence. Jistý problém představuje to, že podmínky, za kterých bude zkouška provedena a vyhodnocena, nelze nastavovat libovolně a vždy je třeba respektovat vzájemnou vazbu mezi základními údaji, které průběh zkoušky charakterizují. Velice názorně lze vyjádřit vztahy mezi základními veličinami ovlivňujícími průběh zkoušky s využitím tzv. „regulačního diagramu zkoušky“, který je sestrojen na základě vztahu (7).

Na vodorovnou osu diagramu (viz Obr. 3) se vynáší kumulovaná doba zkoušky a na svislou osu prokázaná hodnota m , respektive dolní konfidenční mez tohoto ukazatele. Do diagramu se postupně vynesou přímky vyjadřující závislost prokázané hodnoty m na ekvivalentní době zkoušky T^* a to pro jednotlivé hodnoty parametru r (počet poruch). Diagram je sestrojen pro jednu zvolenou konfidenční úroveň c . Průběh zkoušky je v daném případě vymezen těmito okrajovými veličinami:

- maximální disponibilní dobou pro zkoušku T^*_{\max} (na vodorovné ose);
- velikostí požadované hodnoty m_0 (na svislé ose).

Skutečná zkouška pak probíhá za podmínek, které vyplývají z Obr. 3 a jsou popsány dále. Zkouška je zahájena v čase $T^* = 0$ a od tohoto okamžiku se postupně vynáší údaje o vzniklých poruchách do připraveného diagramu. Okamžitá hodnota kumulované doby T^* na vodorovné ose v diagramu a její průsečík s přímkou, odpovídající počtu dosud vzniklých poruch $r = 0, 1, 2, \dots$, udává bod P_i , který definuje hodnotu právě prokázané úrovně ukazatele spolehlivosti m_i . Zkouška končí dosažením některého z bodů E_i , případně dosažením bodu C.

Přímka znázorňující zkoušku, která probíhá bez poruchy ($r = 0$), musí protínat úsečku DC v bodě E_0 ležícím nalevo od bodu C. Jinak by podmínky zkoušky neměly smysl, protože by nedošlo v rámci zadaného rozsahu zkoušky T^*_{\max} k ověření požadovaného ukazatele m_0 ani při bezporuchové zkoušce.

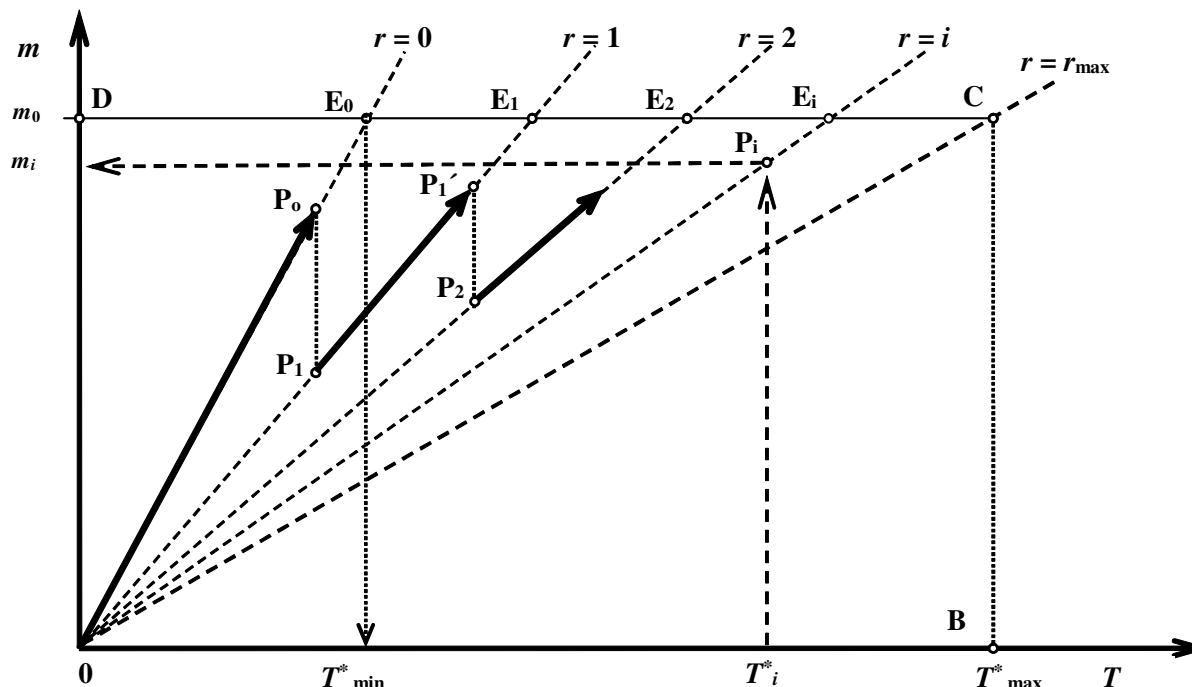
Pokud zkouška probíhá bez poruchy, může být ukončena již v bodě E_0 protože v bodě E_0 došlo k prokázání požadované hodnoty m_0 . Pokud v průběhu zkoušky nastanou poruchy, přechází se postupně z přímky $r = 0$ na přímku $r = 1$ při první poruše (body $P_0 - P_1$), z $r = 1$ na $r = 2$ při druhé poruše atd., až nejvýše na přímku procházející bodem C a reprezentující maximální přípustný počet poruch v rámci vymezených podmínek zkoušky. Do té doby je buď:

- protnuta úsečka CD v bodě E_j ($j = 1, 2, \dots, r = r_{\max}$) a zadaný parametr je ověřen a zkouška může být ukončena v plánovaném čase, nebo
- je překročen maximální přípustný počet poruch a je nutné buď prodloužit dobu trvání zkoušky, nebo snížit konfidenční úroveň stanovenou k prokázání příslušného ukazatele.

Na tomto místě je nutné zdůraznit, že kumulovaná doba zkoušky T^* ve výrazu (7) nepředstavuje dobu trvání zkoušky měřenou na „hodinkách“, ale představuje celkový součet dob provozu všech zkoušených objektů, který je závislý na době trvání zkoušky, počtu zkoušených objektů a také na tom, co se s objekty děje po poruše.

V praxi se intervalové odhady zpravidla uplatňují u vyhodnocení výsledků zkoušek s předem stanoveným plánem zkoušek, kdy okamžik ukončení zkoušky může být vymezen dvojím způsobem:

- Dosažením maximální kumulované doby zkoušky, ze které lze odhadnout i reálnou dobu trvání zkoušky. V takovém případě je pro nás dopředu neznámou (náhodnou) veličinou počet poruch, který bude během zkoušky zaznamenán.
- Dosažením stanoveného počtu poruch. V takovém případě je pro nás dopředu neznámou (náhodnou) veličinou kumulovaná doba zkoušky (doba trvání zkoušky).



Obr. 3 Regulační diagram zkoušky

Z popisu regulačního diagramu zkoušky je zřejmé, že cíle zkoušky, tj. prokázání dosažení požadované úrovně bezporuchovosti lze za jistých okolností dosáhnout i dříve než dle zvoleného plánu zkoušky. Pokud je této možnosti využito, vždy hrozí nebezpečí, že pokud by zkouška nebyla v tomto okamžiku ukončena, další průběh zkoušky by mohl ukázat, že požadavek ve skutečnosti splněn nebyl.

Na druhé straně však intervalové odhady neumožňují prokázat, že objekt případně nesplňuje stanovený požadavek na bezporuchovost dříve než po plánovaném ukončení zkoušky (dosažení maximálního akceptovatelného počtu poruch r_{\max}).

Princip intervalového odhadu parametrů také umožňuje modifikovat podmínky pro průkaz splnění požadavků na bezporuchovost objektu tak, že se stanoví maximální akceptovatelný počet poruch, které se mohou vyskytnout během určité kumulované doby zkoušky. V takovém případě se určí kumulovaná doba zkoušky odpovídající hodnotě kvantilu χ^2 pro zvolený počet porucha a zadanou úroveň konfidence. Vztah pro výpočet odpovídající kumulované doby zkoušky lze získat úpravou vztahu (7):

$$T^* \geq 2m_0 \chi_c^2(\nu), \quad (10)$$

kde: m_0 – hodnota *MTBF*, jejíž dosažení má být prokázáno s konfidencí c .

V tabulce 2 jsou uvedeny příklady hodnot kumulované doby zkoušky pro dané akceptovatelné počty poruch. Prakticky se pak průkaz dosažení požadované úrovně bezporuchovosti provede tak, že daný objekt je zkoušen (provozován) po dobu odpovídající vypočítané kumulované době

provozu a pokud je během této doby zaznamenán počet poruch stejný anebo nižší, než je akceptovatelný počet poruch, je to interpretováno tak, že objekt na dané úrovni konfidence prokázal splnění požadavku.

Tabulka 2. Kumulovaná doba zkoušky pro stanovené počty poruch

Akceptovatelný počet poruch	0	1	2	3
Stupně volnosti ν	2	4	6	8
$\chi_{0,9}^2(\nu)$	4,61	7,78	10,65	13,36
Kumulovaná doba zkoušky T^*	$9,22 \times m_0$	$15,56 \times m_0$	$21,30 \times m_0$	$26,72 \times m_0$

6 Přejímací zkoušky bezporuchovosti

Přejímací zkoušky jsou založeny na specifických grafických zkušebních plánech, ve kterých je průběžně sledována kumulovaná doba zkoušky a počet zaznamenaných poruch a v grafu jsou vyznačeny hranice, jejichž překročení je specifikováno jako důkaz splnění či nesplnění hodnoceného požadavku. Při použití tohoto principu hodnocení vždy může existovat riziko, že kdyby zkouška v daném okamžiku nebyla ukončena, mohl by následující průběh zkoušky prokázat, že původní rozhodnutí přijmout či zamítnout objekt nebylo správné. V rámci přejímacích zkoušek je však možné tato rizika předem stanovit a plán zkoušky jim přizpůsobit. Zpravidla se pracuje se dvěma typy rizik [9]:

- α - riziko dodavatele (riziko, že objekt bude na základě průběhu zkoušky zamítnut s tím, že nesplňuje stanovený požadavek a ve skutečnosti tento požadavek plní),
- β - riziko odběratele (riziko, že objekt bude na základě zkoušky přijat s tím, že splňuje stanovený požadavek a ve skutečnosti tento požadavek splněn není).

Podstata přejímacích zkoušek je založena teorií testování hypotéz, kdy jsou specifikovány dvě hypotézy:

- nulová hypotéza spočívá v předpokladu, že úroveň bezporuchovosti objektu odpovídá specifikované (cílové) hodnotě střední doby provozu mezi poruchami m_0 ,
- alternativní hypotéza spočívá v předpokladu, že zkoušený objekt nedosahuje požadované úrovně bezporuchovosti a střední doba provozu mezi poruchami dosahuje hodnoty m_1 , která je nižší než hodnota požadovaná $m_1 < m_0$.

Výsledkem celého postupu je potom přijetí objektu (objekt splňuje požadavek), nebo jeho zamítnutí (objekt nesplňuje požadavek).

V praxi se přitom alternativní hypotéza nevymezuje stanovením hodnoty m_1 , ale s využitím tak zvaného diskriminačního poměru:

$$D = \frac{m_0}{m_1}. \quad (11)$$

Velikost rizik α a β a diskriminační poměr D jsou charakteristiky zkoušky, které je nezbytné dopředu zvolit a neexistují žádná obecně platná doporučení týkající se jejich volby. Do úvahy je však vždy třeba vzít to, že volba malých hodnot těchto parametrů zvyšuje statistickou sílu výsledků zkoušky (jejich věrohodnost), ale na druhé straně vyžaduje delší čas k provedení zkoušky, nebo použití více objektů ve zkoušce. V praxi se především využívají plány zkoušek

doporučované v různých normách [9], [7], [11]. Nejčastěji jsou využívány následující tři typy plánů.

Plán zkrácené postupné zkoušky

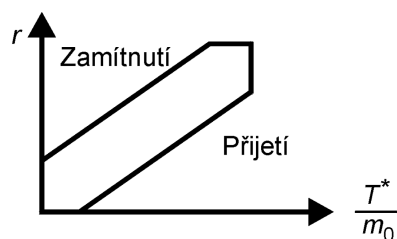
Je velmi efektivní, protože zajišťuje nejkratší dobu zkoušky. V případě mezních hodnot ukazatelů bezporuchovosti (reálná úroveň bezporuchovosti objektu je velmi blízká úrovni požadované) však může být doba zkoušky delší než v případě jiných plánů zkoušek. Řízení zkoušky (určení hranic v diagramu zkoušky) není zcela triviální a v některých případech může být výpočtově náročné. Typický diagram zkrácené postupné zkoušky je uveden na Obr. 4.

Plán zkoušky ukončené uplynutím doby / poruchou

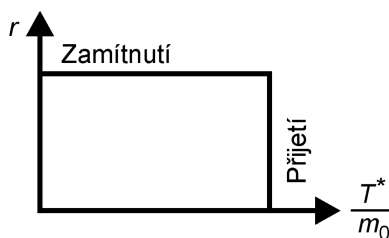
Zkouška je koncipována tak, že objekt je zamítnut, pokud během stanovené kumulované doby zkoušky dojde k více jak specifikovanému počtu poruch. V okamžiku dosažení specifikovaného počtu poruch dojde k ukončení zkoušky. Přijat je objekt, pokud uplyne stanovená kumulovaná doba zkoušky a specifikovaný počet poruch není překročen. Plán zkoušky je snadno pochopitelný a řízení zkoušky (stanovení hranic) jednoduché. Plán je vhodný především u objektů s požadovanou nízkou úrovní bezporuchovosti, protože při vysokých hodnotách cílové úrovně m_0 je doba zkoušky podstatně delší než v případě plánu zkrácené postupné zkoušky. Typický diagram zkoušky ukončené uplynutím doby / poruchou je naznačen na Obr. 5.

Kombinovaný plán zkoušky

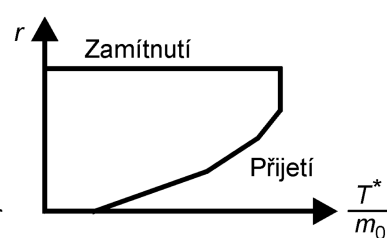
Tento plán kombinuje výhody plánů zkoušky ukončené uplynutím doby / poruchou a plánů postupné zkoušky. Objekty s vysokou úrovní bezporuchovosti budou rychle přijaty, zatímco objekty s hraniční úrovní bezporuchovosti nebudou předčasně zamítnuty. Řízení zkoušky (určení hranic v diagramu zkoušky) je složitější a plány se vytváří s použitím iteračního postupu. Typický diagram pro kombinovaný plán zkoušky je uveden na Obr. 6.



Obr. 4 Plán zkrácené postupné zkoušky [9]



Obr. 5 Plán zkoušky ukončené uplynutím doby / poruchou [9]

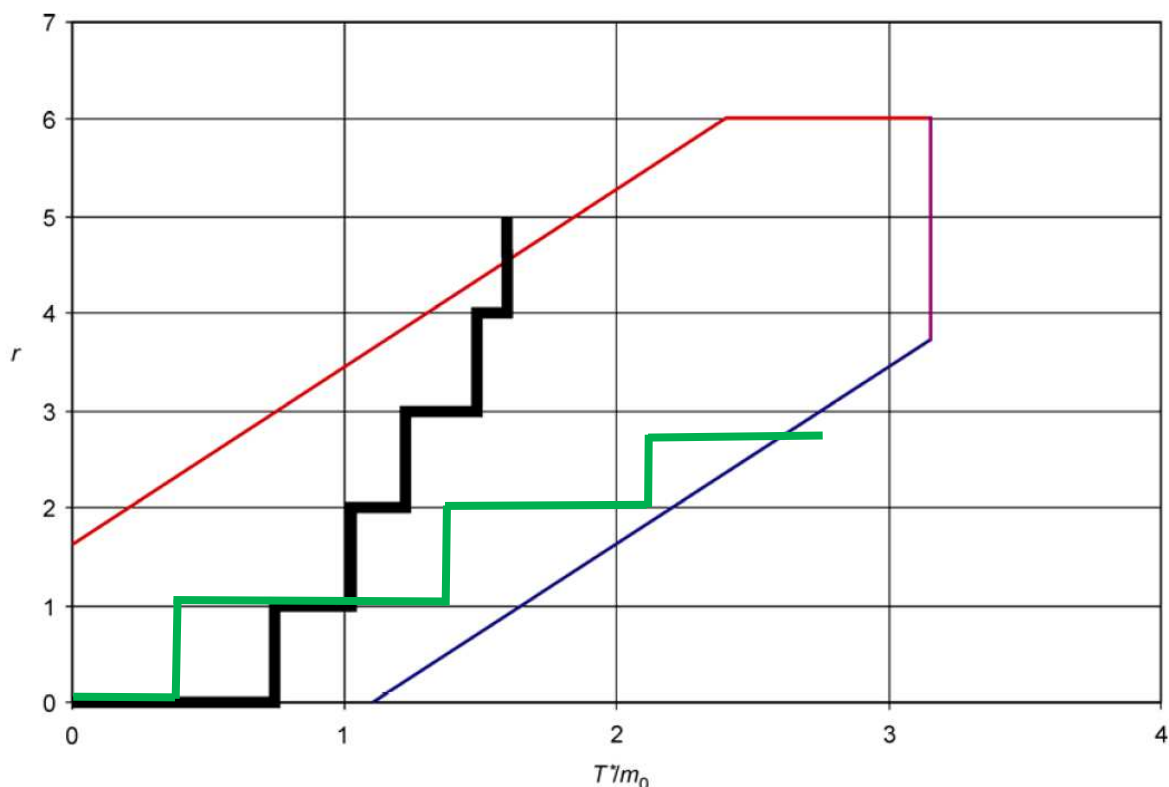


Obr. 6 Kombinovaný plán zkoušky [9]

Vzhledem k omezenému rozsahu tohoto článku, je dále podrobněji popsán jen plán zkrácené postupné zkoušky, přičemž ostatní plány se aplikují analogickým postupem. Příprava a průběh zkrácené postupné zkoušky zahrnuje následující kroky:

- stanoví se vhodné zkušební podmínky,
- specifikuje se cílová hodnota střední doby mezi poruchami m_0 ,
- zvolí se rizika α a β a diskriminační poměr D (zpravidla výběrem vhodného zkušebního plánu z aplikovatelné normy, např. [9]), je doporučeno volit rizika α a β stejně vysoká,
- vytvoří se diagram plánu zkoušky,
- do diagramu zkoušky se průběžně vynáší informace o průběhu zkoušky a v okamžiku, kdy je dosaženo hranice pro přijetí či zamítnutí, je zkouška ukončena.

Na Obr. 7 je znázorněn příklad průběhu postupné zkoušky. Do připraveného diagramu se průběžně zaznamenává aktuálně dosažená hodnota kumulované doby zkoušky. Z počátku se kumulovaná doba zkoušky zaznamenává přímo na vodorovné ose diagramu (odpovídá $r = 0$) a po každé poruše se záznam přesune na vodorovnou pořadnici odpovídající aktuálně evidovanému počtu poruch. V uvedeném příkladu je černou čarou vyznačen průběh zkoušky, která skončila zamítnutím objektu a zelenou čarou průběh zkoušky, která skončila přijetím objektu.

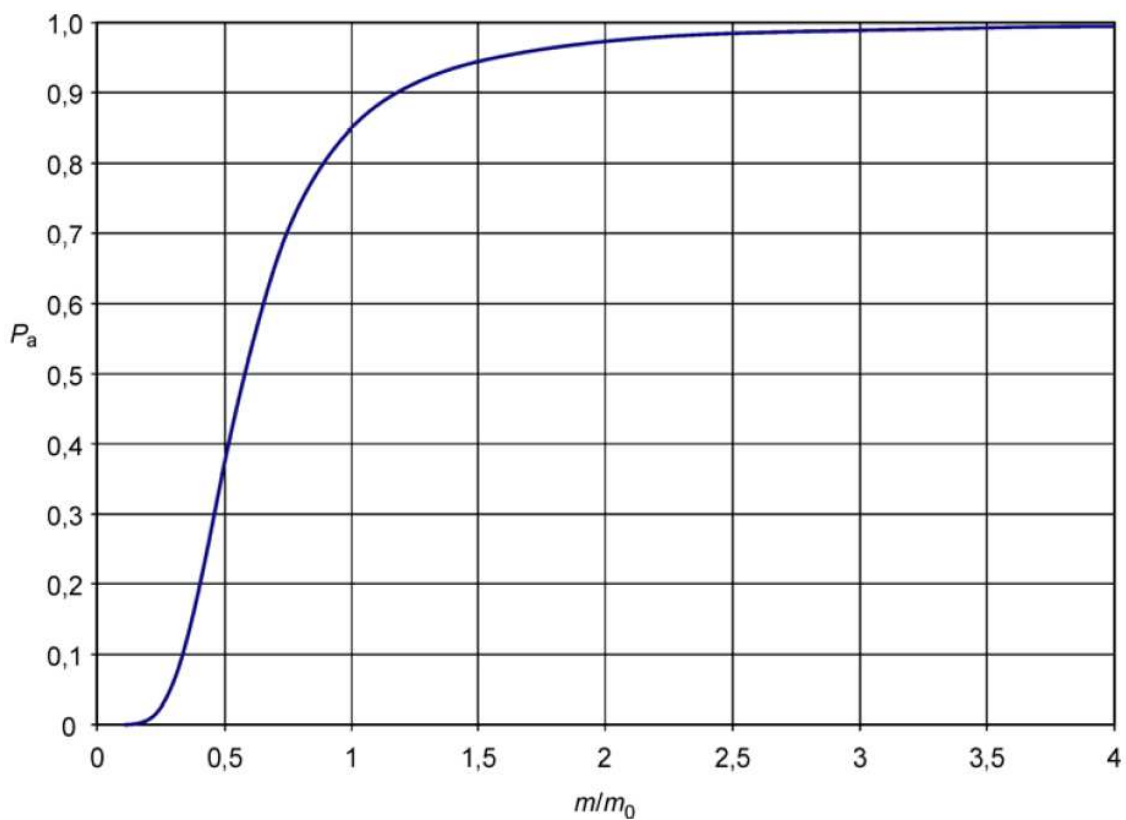


Obr. 7 Příklad průběhu postupné zkoušky ($\alpha = \beta = 10\%$, $D = 3$) [9].

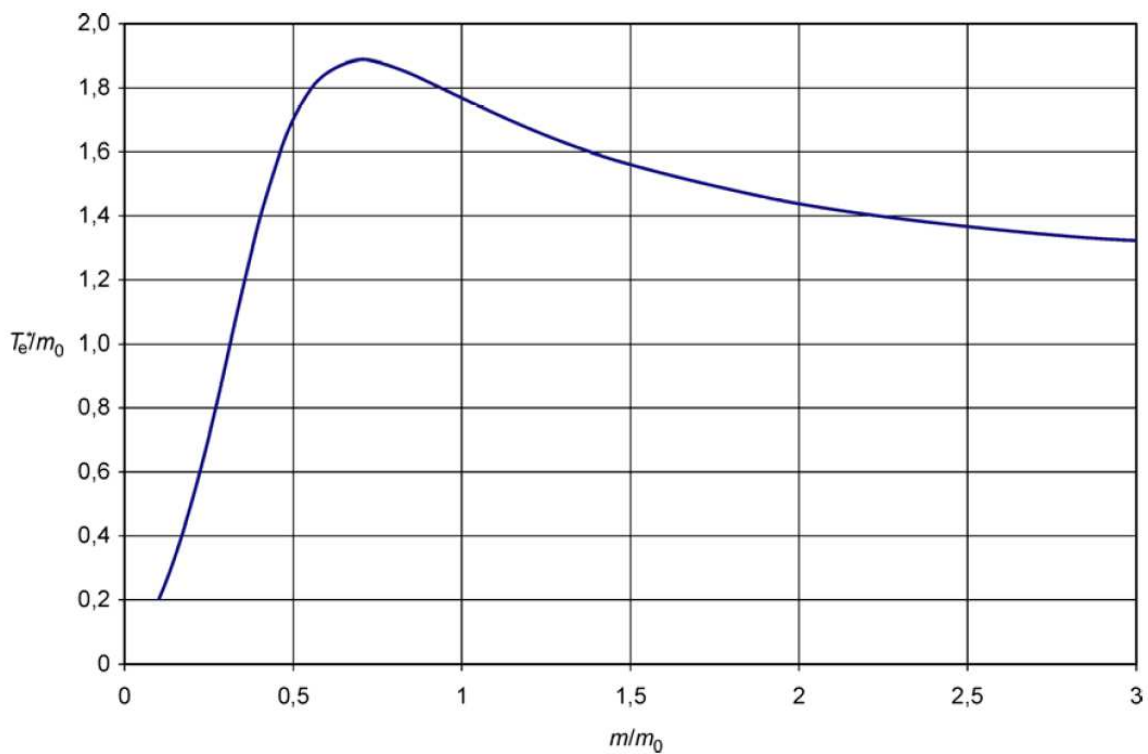
Při realizaci postupné zkoušky je třeba mít na mysli, že rozhodnutí o tom, jestli je objekt přijat či zamítnut, je vždy zatíženo určitou mírou nejistoty. Dobře lze popsat uvedenou nejistotu ve vztahu k pravděpodobnosti přijetí objektu, který reálně stanovený požadavek naplňuje s využitím tzv. operativní charakteristiky zkoušky. Tato charakteristika nám poskytuje informace o tom, jak pravděpodobnost přijetí objektu P_a v rámci zvoleného zkušebního plánu závisí na poměru skutečné hodnoty střední doby mezi poruchami m a cílové (požadované) hodnotě m_0 . Příklad takové operativní charakteristiky je znázorněn na Obr. 8. Z charakteristiky je parné, že i když skutečná hodnota střední doby mezi poruchami bude např. 2krát větší než hodnota požadovaná, stále existuje nezanedbatelná pravděpodobnost, že daný objekt bude v rámci zkoušky zamítnut. Z uvedeného je zřejmé, že je nanejvýš vhodné nasazovat do postupných zkoušek pouze objekty, které splňují stanovené požadavky na bezporuchovost s dostačenou rezervou.

Z podstaty postupných zkoušek je zřejmé, že kumulovaná doba zkoušky, ve které dojde k rozhodnutí, má ve své podstatě charakter náhodné proměnné. Očekávaná kumulovaná doba zkoušky do rozhodnutí T_e^* , je přitom zásadním způsobem ovlivňována reálnou úrovní bezporuchovosti objektu m . Graf na Obr. 9 ukazuje příklad závislosti očekávané kumulované doby zkoušky do rozhodnutí T_e^* na poměru skutečné hodnoty střední doby mezi poruchami m

a cílové (požadované) hodnoty m_0 . Z grafu je zřejmé, že nejdelší kumulovanou dobu zkoušky lze očekávat v těch případech, kdy je reálná úroveň bezporuchovosti zkoušeného objektu blízká úrovni požadované.



Obr. 8 Příklad operativní charakteristiky postupné zkoušky ($\alpha = \beta = 10\%$, $D = 3$) [9]



Obr. 9 Očekávaná kumulovaná doba zkoušky do rozhodnutí ($\alpha = \beta = 10\%$, $D = 3$) [9]

Z uvedeného je patrné, že postupné zkoušky mohou být využity jako efektivní nástroj k prokazování dosažené úrovně bezporuchovosti. Na druhé straně je však třeba konstatovat, že jejich praktická implementace může být poměrně komplikovaná. Základním předpokladem pro jejich použití, je to, že obě strany (dodavatel a odběratel) jsou dobře obeznámeny se základními principy postupných zkoušek a shodnou se na použití určitého zkušebního plánu. Zásadním problémem je shoda na použitých parametrech zkoušky, zejména na výši rizik α a β a hodnotě diskriminačního poměru D .

Snaha o zvýšení statistické síly realizované zkoušky (např. snížením rizik α a β a diskriminačního poměru) vždy vede k prodloužení očekávané kumulované doby zkoušky. Na druhé straně významně zkrátit čas potřebný pro realizaci zkoušky lze jen při akceptování podstatného zvýšení rizik α a β či diskriminačního poměru D . Z charakteru postupných zkoušek také vyplývá, že dodavatel by vždy měl do zkoušky nasazovat jen takové objekty, u který si je jistý, že cílovou úroveň splňují s dostatečnou rezervou.

Obecně lze konstatovat, že postupné zkoušky jsou dobře využitelné především tam, kde se jedná o ověření dosažené úrovně bezporuchovosti u hromadně či ve velkých sériích vyráběných objektů a kde již existují zkušenosti s aplikací postupných zkoušek a zejména s jejich řízením.

7 Závěr

Prokázání dosažené úrovně bezporuchovosti objektu v rámci zkoušek bezporuchovosti, či sledování a vyhodnocení provozní spolehlivosti objektu, je nejméně spolehlivým způsobem průkazu, který je v oblasti RAMS k dispozici. Vyhodnocení výsledků zkoušek či sledování v provozu, či jejich interpretace, však může být, přes zdánlivou jednoduchost, poměrně složitá. K dispozici je však řada standardizovaných metod a postupů, jejichž využití může praktickou aplikaci podstatně zjednodušit. V tomto článku byly prezentovány tři přístupy ke zpracování dat ze zkoušek. Použití bodových odhadů bezporuchovosti je sice velmi jednoduché, ale jejich využití k prokazování dosažené úrovně bezporuchovosti nelze doporučit.

Intervalové odhady umožňují systematicky pracovat s předem zvolenou konfidencí a umožňují tak přiměřené řízení rizik, která jsou se zkoušením bezporuchovosti spojena. Jejich aplikace je poměrně jednoduchá a interpretace výsledků všeobecně srozumitelná. Jejich aplikace při prokazování dosažené úrovně bezporuchovosti v oblasti drážních zařízení lze doporučit.

Přejímací zkoušky jsou velmi sofistikovaný a efektivní nástroj prokazování dosažené úrovně bezporuchovosti, ale vyžadují jak od dodavatele, tak i odběratele hluboké porozumění jejich principům a úzkou spolupráci a shodu při návrhu zkušebního plánu. U drážních zařízení lze doporučit tento typ zkoušek jen ve specifických případech, zejména při přejímce hromadně či ve velkých sériích vyráběných objektů.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Projektu pro rozvoj organizace „DZRO Vojenské autonomní a robotické systémy VAROPS“.

Použité zdroje

- [1] ČSN EN 50126-1 ed. 2. *Drážní zařízení – Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a bezpečnosti (RAMS) – Část 1: Generický proces RAMS*. Praha: ÚNMZ, 2019.

- [2] ČSN IEC 60050-192. *Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [3] VINTR, Z. Současné přístupy k zabezpečování RAMS. In *RAMS drážních aplikací – současné přístupy, novinky a zkušenosti*. Brno: Univerzita Obrany v Brně, 2018, s. 3–9. ISBN 978-80-7231-410-2.
- [4] VINTR, Z., D. VALIŠ a M. VINTR. *Základy spolehlivosti technických systémů*. Brno: Univerzita obrany v Brně, 2020. ISBN 978-80-7582-303-8.
- [5] ČSN IEC 60605-4. *Zkoušení bezporuchovosti zařízení – Část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení – Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní intervaly a toleranční intervaly*. Praha: ČNI, 2002.
- [6] ČSN IEC 60300-3-5. *Management spolehlivosti – Část 3-5: Návod na použití – Podmínky při zkouškách bezporuchovosti a principy statistických testů*. Praha: ČNI, 2002.
- [7] MIL-HDBK-781A – *Reliability Test Methods, Plans and Environments for Engineering Development, Qualification and Production*. Washington: Department of Defense, 1996.
- [8] Kececioglu, D.: *Reliability and Life Testing Handbook*. Tuscon: University of Arizona, 1999.
- [9] ČSN EN 61124 ed. 2. *Zkoušení bezporuchovosti – Ověřovací zkoušky pro konstantní intenzitu poruch a konstantní parametr proudu poruch*. ÚNMZ, 2013.
- [10] ČSN IEC 60605-6. *Zkoušení bezporuchovosti zařízení – Část 6: Testy platnosti a odhad konstantní intenzity poruch a konstantního parametru proudu poruch*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [11] ČSN EN IEC 61123. *Zkoušky bezporuchovosti – Plány ověřovacích zkoušek pro podíl úspěšných pokusů*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [12] ČSN EN 60300-3-2. *Management spolehlivosti – Část 3-2: Pokyn k použití – Sběr dat o spolehlivosti z provozu*. Praha: ČNI, 2005.
- [13] ČSN EN 61649. *Weibullova analýza*. Praha: ÚNMZ, 2009.

Praktické zkušenosti s prokazováním splnění požadavků na RAMS a LCC

Ing. Lenka Vintrová

IFE-CR, a.s., Evropská 839, 664 42 Modřice

Lenka.Vintrova@knorr-bremse.com

1 Úvod

Společnost IFE se zabývá vývojem a výrobou automatických nástupních systémů pro kolejová vozidla, což zahrnuje dveře a jejich pohon s řídicí jednotkou, případně i schod nebo schody a jeho/jejich pohon a zařízení k nouzovému otevření dveří.

V České republice působí společnost IFE od roku 1996, jako IFE-CR, a.s. V roce 1997 se IFE-CR, a.s. stala divizí společnosti Knorr-Bremse GmbH. Z důvodů rozšíření IFE-CR, a.s. vybudovala výrobní závod „na zelené louce“ v průmyslové zóně v Modřicích (v blízkosti Brna), do kterého se v roce 2002 přestěhovala.

Zabezpečování RAMS se IFE cíleně a systematicky věnuje již od roku 2002. Do roku 2012 byly veškeré záležitosti týkající se RAMS řešeny pracovníky v mateřském závodě v rakouském Waidhofenu a posléze v Kematenu. V roce 2012 bylo založeno oddělení RAMS i v závodě v Modřicích. V současné době v Modřicích působí početný tým RAMS inženýrů, který úzce spolupracuje s kolegy z Rakouska.

2 Praktické zkušenosti s prokazováním splnění požadavků

Pracovníci IFE-CR, a.s. dosud prezentovali zkušenosti se zabezpečováním RAMS ve dvou příspěvcích na seminářích Odborného centra Spolehlivost:

- Softwarové modelování bezporuchovosti systémů [1] (67. seminář);
- Praktická realizace managementu RAMS v IFE-CR, a.s. [2] (71. seminář).

Aktuální příspěvek je zaměřen na způsob prokazování splnění požadavků na RAMS a LCC používaný ve společnosti IFE při projektech návrhu a vývoje automatických nástupních systémů pro kolejová vozidla.

Příspěvek byl v plném rozsahu prezentován účastníkům semináře. Vzhledem k tomu, že obsahoval řadu neveřejných informací vztahujících se k systému zabezpečování RAMS ve společnosti IFE, nemohl být příspěvek do sborníku zařazen a zveřejněn.

Reference

- [1] VINTROVÁ, Lenka a Jan NEČAS. Softwarové modelování bezporuchovosti systémů. In *Softwarová podpora pro spolehlivost*. Brno: Univerzita Obrany v Brně, 2017, s. 33–41. ISBN 978-80-7231-410-2
- [2] VINTROVÁ, Lenka a Jan NEČAS. Praktická realizace managementu RAMS v IFE-CR, a.s. In *RAMS drážních aplikací – současné přístupy, novinky a zkušenosti*. Univerzita Obrany v Brně, 2018, s. 21–25. ISBN 978-80-7231-410-2.

Název: Prokazování splnění požadavků na RAMS
Autoři: Zdeněk VINTR
Michal VINTR
Lenka VINTROVÁ
Vydavatel: Univerzita Obrany, Brno
Tisk: Univerzita Obrany, Brno
Položka EP: 57/2023/FVT
Číslo zakázky: 104/2023
Náklad: 40 ks
Počet stran: 30
Rok vydání: 2023
Vydání: první

Publikace neprošla jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-7582-254-3