

## **ŽIVOTNÍ CYKLUS TECHNOLOGIÍ V TUNELECH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

### **LIFE CYCLE OF TECHNOLOGICAL SYSTEM IN ROAD TUNNELS**

**Pavel Příbyl<sup>1</sup>  
Juraj Spalek<sup>2</sup>  
Ondřej Příbyl<sup>3</sup>**

#### **ABSTRAKT**

V posledních letech hrají aspekty životního cyklu (LC – Life Cycle) technologických systémů a zařízení v tunelech pozemních komunikací stále významnější roli, protože jejich znalost umožní optimalizovat investiční náklady již ve stádiu návrhu tunelu a tím následně minimalizovat provozní náklady. Požadavky na tuto optimalizaci souvisí úzce i se stále se zvyšujícími investicemi do bezpečnostních a dalších technologií. Podrobná znalost stavu zařízení umožní lépe organizovat preventivní i pravidelnou údržbu tunelů a tím minimalizovat škody vznikající údržbou nesystémovou. Příspěvek popisuje metodiku vydanou jako oficiální dokument Ministerstva dopravy České republiky. Metodika byla zpracována v rámci Společné laboratoře tunelových systémů tvořené Fakultou dopravní ČVUT, Elektrotechnickou fakultou Žilinské univerzity v Žilině a společností Eltodo, a. s. Praktický příklad ukáže možnost získávání provozních informací o poruchách zařízení z řídicího systému tunelu na Silničním okruhu okolo Prahy, jako základu pro plánování údržby zařízení a sledování životního cyklu.

#### **ABSTRACT**

The aspect of Life Cycle (LC) of technological systems and equipment in road tunnels plays increasingly important role at present. A knowledge of LC enables to optimize a cost already in stage of design and consequently to minimize operational cost. These requirements are related to still growing investment into safety technologies. Detailed knowledge of the state of facilities enables to better organize preventive and periodic maintenance and thus minimize failures caused by unsystematic maintenance. The article describes a methodology issued as the official document of the Ministry of Transport of the Czech Republic. The methodology was developed in the framework of the Joint laboratory of Tunnel Systems consisting of Faculty of transportation sciences CTU, Faculty of electrical engineering University of Žilina and Eltodo, a. s. A practical example shows the possibility of obtaining the operational information about equipment malfunctions from two tunnels on the ring road around Prague as a basis for monitoring and planning equipment's lifecycle.

---

<sup>1</sup> prof. Ing. Pavel Příbyl, CSc., Ústav Dopravní systémy, Fakulta dopravní ČVUT v Praze, Horská 3, 128 03 Praha 2, host. profesor na FEL Žilinskej univerzity v Žiline, pribyl@fd.cvut.cz

<sup>2</sup> prof. Ing. Juraj Spalek, Ph.D., Katedra KRIS, Elektrotechnická fakulta Žilinské univerzity v Žiline, juraj.spalek@fel.uniza.sk

<sup>3</sup> doc. Ing. Ondřej Příbyl, PhD, Ústav aplikované matematiky Fakulta dopravní ČVUT v Praze, Na Florenci 25, 110 00 Praha 1, pribylo@fd.cvut.cz

## 1 Úvod

Projekt vědy a výzkumu TA01030020 „Zelený tunel“ (dále ZET) řešený v rámci výzvy ALFA Technologické agentury ČR Fakultou dopravní ČVUT a společností ELTODO a. s. se v jedné oblasti zabýval životností zařízení instalovaných v tunelu. Výstupem byl dokument „Životní cyklus technologií v tunelech pozemních komunikací“ schválený Ministerstvem dopravy jako metodický pokyn, [1]. Ten představuje holistický přístup v zavádění kontrolovaných procesů do systému údržby tunelů pozemních komunikací vedoucí k její optimalizaci, ve smyslu doporučení mezinárodní silniční asociace PIARC, výboru C3.3 „Road Tunnel Operation“, který se otázkou efektivního využívání technologií instalovaných v tunelu zabývá systematicky. Metodický pokyn pro sledování životnosti zařízení a systémů technologií tunelu nemá předchůdce v jiném národním dokumentu.

Metodický pokyn poskytuje provozovatelům, správcům, pověřeným osobám, silničním správním orgánům a subjektům zodpovědným za provozování a bezpečnost tunelů pozemních komunikací základní ideu, jak kontrolovat technologické systémy a systémově zvyšovat jejich životnost. Požadavky na zachování plánované bezpečnosti po celou dobu provozování tunelu jsou zakotveny v evropské direktivě 54/2004/ES, [2].

## 2 Faktory ovlivňující bezpečnost procesů

Bezpečnost (*Safety*) je v praxi hodnocení technických systémů chápána jako jeden z atributů vyjadřující, do jaké míry se uživatel může spolehnout, že systém funguje v daných podmínkách a v daném čase tak, jak bylo požadováno. Podrobnější teoretický výklad ke „4

Vyhodnocování životnosti zařízení“ lze nalézt v lit. [3] a [4]. Existuje mnoho definic kritických procesů, v závislosti na technologiích, které zkoumají. Pro tunely lze definice modifikovat:

**Bezpečnostně kritický proces:** je proces, jehož dysfunkce znamená přímé ohrožení zdraví, životů lidí, životního prostředí nebo materiální škody. Typickým příkladem je nemožnost zastavit dopravu v tunelu, resp. před portály v případě požáru v tunelu. Od bezpečně kritických systémů se očekává realizace specifické funkce zajišťující omezení rizik na předem danou minimální úroveň.

**Kritický proces:** je proces, jehož dysfunkce může znamenat ohrožení zdraví, životů lidí, životního prostředí nebo materiální škody, přičemž výsledek ale může ovlivnit přímo uživatel tunelu. Typickým příkladem je výpadek osvětlení v tunelu, kdy lze bez problémů z tunelu vyjet, protože vozidla mají rozsvícené reflektory a situace se podobá jízdě po neosvětlené komunikaci.

Pokud se dále mluví o bezpečnosti procesů, neuvažuje se selhání lidského faktoru, tedy uživatele tunelu, ale jen bezporuchovost technických zařízení a to nejenom jednotlivě, ale na to, jak jejich porucha může ovlivnit celý proces. **Bezporuchovost** (*reliability*): je chápána jako schopnost systému plnit požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu. Ukazateli bezporuchovosti jsou:

- Pravděpodobnost bezporuchového provozu  $R(t_1, t_2)$ : pravděpodobnost, že systém může plnit požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu.
- Střední čas do poruchy *MTTF* (*Mean time to failure*): střední doba do výskytu poruchy systému.
- Střední doba provozu mezi poruchami *MTBF* (*Mean time between failures*): střední doba provozu mezi poruchami

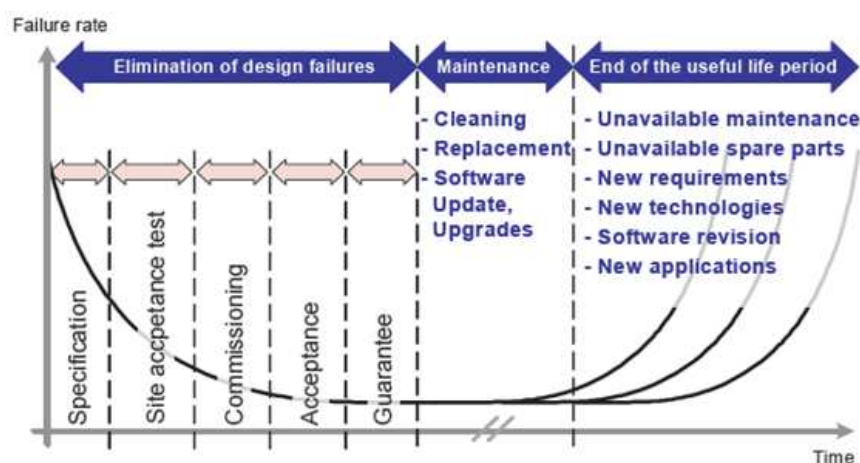
- Intenzita poruch  $\lambda(t)$ : limita poměru podmíněné pravděpodobnosti, že časový okamžik vzniku poruchy objektu  $T$  padne do časové podmínky intervalu  $(t, t + \Delta t)$  v délce časového intervalu, kde  $\Delta t \rightarrow 0$ .

Intenzita poruch je časově závislá a má tvar vanové křivky, Obr. 1. Sledování intenzity poruch  $\lambda$  v závislosti na čase dokáže odhalit přiblížování se konci životnosti nebo poskytne informace pro preventivní údržbu či obnovu dílčích částí zařízení či systémů. K tomu účelu se používá několik technologií diagnostik systémů: funkční, testovací, periodická nebo průběžná diagnostika, více [1].

### 3 Obnova systému

Vliv údržby zařízení na prodloužení doby života zařízení je zcela zásadní, jak dokládá i výzkum v rámci PIARC, [10]. Na Obr. 1 je ukázána typická vanová křivka i s parametry charakterizujícími tři stádia doby života dle PIARC:

- I. Počáteční zvětšený výskyt poruch (Elimination of design failure), kdy lze částečné eliminace docílit:
  - precizní specifikací systému a zařízení (Specification),
  - přijímacími zkouškami, testy ve výrobních zařízeních (Site acceptance test),
  - komplexními zkouškami a detailním převzetím systému (Commissioning, Acceptance),
  - systémem záruk (Guarantee).
- II. Následuje střední část, na jejíž maximální rozšíření má vliv údržba, náhrady dílčích částí, SW aktualizace a úpravy, modernizace, čištění zařízení apod. (Maintenance)
- III. Konec životnosti je charakterizován vysokým poměrem výskytu poruch, kdy už nepomáhá běžná údržba a zařízení je nutné vyměnit, či zásadně repasovat (End of the useful life period). Důvodem je ale také:
  - projevuje se nedostatek náhradních dílů (Unavailable spare parts)
  - vznikají nové požadavky a předpisy (New requirements)
  - objevují se moderní technologie (New technologies)
  - vznikají nové SW produkty apod. (Software revision; New applications)



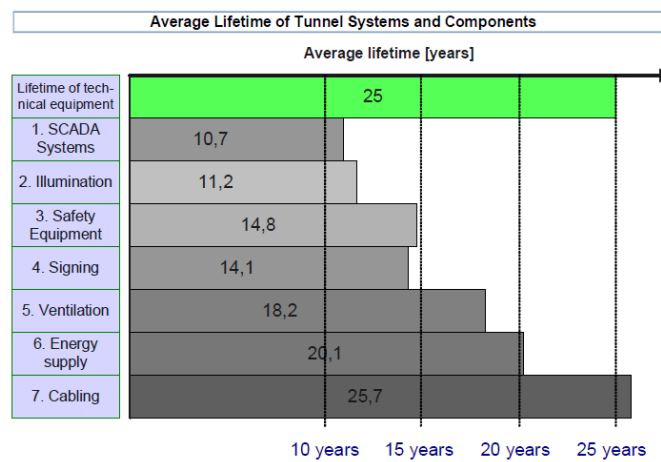
Obr. 1 Vanová křivka technického života rozpracovaná pro tunely (zdroj: PIARC 2011)

Fig. 1 Life cycle curve focused on road tunnels (source: PIARC 2011)

Detailnější rozbor týkající se modelů životního cyklu lze najít v normě CSN/EN 61 508, [5] a DIN V 19 250, [7]. Norma IEC 61 511 „Functional Safety; Safety Instrumented Systems for

the Process Industry Sector” specifikuje požadavky na architekturu systému, popisuje funkce bezpečnostního managementu a pojednává o testech, [6].

Životní cyklus technologických zařízení v tunelu jednoznačně souvisí s úrovní a organizací údržby, tedy střední částí grafu „Maintenance“. Je prokázáno, že preventivní výměnou dílčí opotřebované části se dá prodloužit životnost zařízení jako celku, bez nutnosti ho hned vyměnit. Průměrné životnosti technologických tunelových systémů řady zemí zpracoval na základě dotazníkového průzkumu výbor C3.3 PIARC, lit. [8]. Obr. 2 ukazuje několik zajímavých výstupů, které je vhodné dát do vztahu s našimi zkušenostmi z provozování tunelů. Problematika stárnutí a obnovy zařízení je již zcela aktuální, protože od otevření prvního, moderně vybaveného tunelu v ČR již uplynulo 15 let (Strahovský tunel, 1997), krátce poté (1999) následoval tunel Branisko (SR) a v dalších letech byly uváděny do života další tunely v intravilánu i extravilánu.



Obr. 2 Ilustrace průměrných dob života technologického vybavení tunelu (lit. [8])

Fig. 2 Illustration of average lifetime for different technological systems in tunnel (ref. [8])

Z výše uvedeného ilustrativního obrázku je patrné, že nejnižší dobu života vykazuje řídicí SCADA systém a hned po něm osvětlení. Ze zkušeností je zřejmé, že potřebu výměny řídicího systému po cca 11 letech si uvědomuje málokdo. Pro dopravní značení a tedy i proměnné dopravní značky vychází doba života 14 let, ventilátory „se dožívají“ ještě o čtyři roky více a samozřejmě nejvíce by měla vydržet kabeláž. Ovšem jen v případě, že se jedná o kabely nevystavené vodě, vlhku, tepelnému nebo mechanickému namáhání. Pokud nejsou dodrženy tyto podmínky je doba života násobně kratší.

Současné SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) řídicí systémy zaznamenávají velké množství nejrůznějších dat. Metodický pokyn detailně popisuje systém pro správu údržby zařízení vycházející ze zpracovávání dat o poruchách. Ve výsledku by z těchto hodnot měly být odhadovány doby života jednotlivých zařízení. Na tomto základě by se měla plánovat nejenom údržba, ale lze i predikovat finanční nároky na obnovu zařízení.

#### 4 Vyhodnocování životnosti zařízení – vzorový příklad

V dalším textu je zkráceně uveden postup vedoucí k vytvoření systému pro sledování poruchovosti zařízení v tunelech a s tím spojené optimalizace údržby založené na hodnocení životnosti zařízení. Takovýto systém se stává základem pro řízení údržby na profesionální bázi. Preventivními zásahy či dílčími obměnami vadných dílů může významně přispět k prodloužení života zařízení a tím i ke zvýšení ekonomiky provozu. Postup lze shrnout do následujících kroků, které budou dále komentovány, detailněji v [1]:

1. Extrakce událostních a poruchových dat v otevřeném formátu do specifické databáze;

2. Zavedení elektronických hlášení poruch a jejich ukládání do databáze;
3. Expertní vytipování bezpečnostně-kritických a kritických zařízení;
4. Matematická úprava a transformace měřených dat;
5. Analýza a vizualizace poruchových stavů;
6. Výpočty intenzity poruch a predikce zvýšení četnosti poruch nad stanovenou mez a odvození vanové křivky;
7. Expertní posouzení nutnosti preventivního zásahu údržby, či obnovu nebo výměnu tohoto zařízení.

sub 1) Základním předpokladem pro realizaci této koncepce je, že tunel obsahuje SCADA systém ve smyslu TP98, kap. 1.2 „Tunel jako telematický systém“, [9]. SCADA systémy pro řízení tunelů mají různé formy tzv. poruchových deníků, ve kterých jsou zobrazovány poruchy či stavy vybraných technologií, které vybočují z normálu. Tyto stavy se automaticky ukládají do databáze řídicího systému. Poruchové deníky musí být součástí každého řídicího systému. Řídicí systém musí umožňovat export poruchových deníků do databázového systému mimo SCADA.

sub 2) Jak již bylo uvedeno, systém SCADA je schopen zachytit veškeré poruchy zařízení, která jsou na systém připojena a obsahují diagnostiku. Na druhé straně existuje dosti velká kategorie poruch, které naopak nemůže zaznamenat řídicí systém, protože výstupy zařízení nejsou do řídicího systému zavedeny. V tomto případě se může jednat o znečištěnou značku, poškozený kryt závory, ale mohou to být i mnohem závažnější poruchy. V tomto kroku řešení je nutné zavést elektronické hlášení, jejichž vzor je v [1]. Ty se stávají součástí programového balíčku, kdy dispečer zapíše závadu do elektronického formuláře a jeho vybraná políčka jsou propojena do databáze analytického modulu, takže se hlášenka ukládá jako databázový soubor.

sub 3) Některé procesy spojené s výpadkem technologie, jako například osvětlení, lze řadit mezi kritické procesy, které ale přímo neovlivňují životy účastníků ani personálu. Bezpečnostně kritickou situací je typicky požár nebo nehoda. Tuto situaci je nutné bezprostředně identifikovat a učinit nezbytná opatření. Zde již hraje technologie klíčovou roli a to nejenom z hlediska obecné funkčnosti, ale i z hlediska spolehlivosti, že vykoná akci, na kterou je projektována. Proto je v tomto kroku zpracována matice událostí, Tabulka 1, ukazující přehled událostí a nezbytnou reakci systému, se zaměřením na význam aktorů a senzorů v bezpečnostním řetězci.

Tabulka 1 Příklad matice zařízení, jejichž výpadek pro různé události může způsobovat kritické (K) a bezpečnostně kritické (BK) situace pro účastníky provozu

Table 1 Example of matrix of equipment's which malfunction could case critical (K) or safety critical (BK) situations for tunnel users

Událost	Reakce systému	Senzory	K/BK	Aktory	K/BK
Požár	<ul style="list-style-type: none"> <li>- automatická identifikace v krátkém čase</li> <li>- bezprostřední zastavení dopravy</li> <li>- informování účastníků</li> </ul>	videodetekce kouře	BK	ventilace	K
		liniový hlásič	BK	světelná návěstidla,	BK
		požární tlačítka	-	PDZ B1	BK
		SOS boxy	-	závory	K
				Nouzový zvukový systém	BK

sub 4) Úprava a transformace měřených dat - architektura SCADA systému umožňuje, zaznamenávat veškeré poruchy a archivovat je v deníku poruch ve formě specifické databáze. Takovýto soubor měl například za tři měsíce zkušebního provozu pro stavbu 514 (tunel Lochkov) 133 492 hodnot. Obvykle ale platí, že data přímo poskytovaná senzory nejsou

vhodná pro přímou analýzu. Cílem předzpracování dat je připravit data tak, aby mohla být použita v automatických vyhodnocovacích algoritmech na vyšších úrovních hierarchie řídicího systému.

sub 5) Analýza a vizualizace poruchových stavů: Metodický pokyn dává návod, jak vytvořit systém pro sledování životnosti technologických systémů a zařízení v tunelu a to na obecné úrovni, neboť neexistuje univerzální návod, protože neexistuje univerzální tunel. Návod jak postupovat ale poskytuje poměrně detailní příklad realizace toho systému na SOKP (Silničním okruhu okolo Prahy).

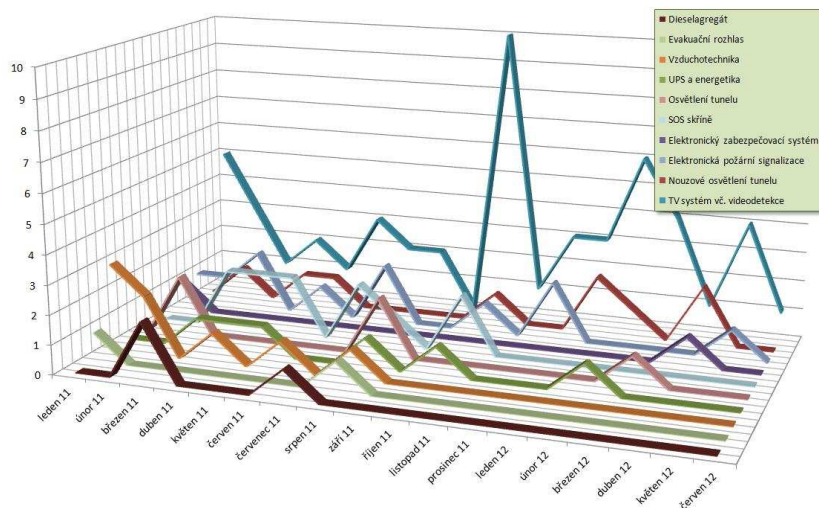
Datové soubory ze SCADA systému byly exportovány do programového prostředí nazvaného FAILURE, které je naprogramováno v prostředí EXCEL a to proto, aby bylo dostupné pro každého uživatele, který potřebuje analyzovat závady v konkrétním tunelu. Naprogramovaná aplikace pracuje s tzv. kontingenčními tabulkami, které významně usnadňují uživateli práci. Vytvořený analytický program<sup>2</sup> byl testován a je využíván pro analýzu poruch na SOKP, přičemž mu data poskytuje řídicí centrum v Rudné u Prahy. Na Obr. 3 je vidět hlavní okno. V prvním sloupci si uživatel volí měsíc/měsíce ve kterých chce analýzu provádět. Následuje polohopis zařízení, což byl specifický požadavek ŘSD pro SOKP. V dalším sloupci je kompletní seznam zařízení, která mohou být podrobena analýze. Ve sloupci „Chyba“ jsou typy poruch, které se mohou vyskytovat a poslední sloupec uvádí vlastní popis závady a množství, kolikrát se vyskytla.

Měsíc	Sloupec15	Zařízení	Chyba	Sloupec11
1	095	MUK10-D-156c57200...	chyba komunikace se zařízením	
2	096	MUK10-D-156e5740...	chybné lamely v aktivním symbolu	
3	097	MUK10-D-156f5730000	otevřen kryt zařízení	
4	098	MUK10-D-156f5730004	podpěti napájecího zdroje - nebezpečí výpadku	
5	099	MUK10-D-156f5730005	porucha červené žárovky	
6	100	MUK10-D-156g5720...	porucha detektoru	

Obr. 3 Náhled SW FAILURE s kontingenční tabulkou (zdroj Eltodo, a.s.)  
 Fig. 3 Screen of SW FAILURE with relation tables (source Eltodo, a.s.)

Dle kódu zařízení je možné vyhodnocovat počty chyb, které byly u těchto zařízení v daném měsíci evidovány a uloženy. K tomu je vyhodnocován a v přehledu uveden celkový čas trvání detekovaných chyb. Tento čas je z praktického pohledu vyhodnocení velmi důležitý. Jsou případy, kdy jsou detekovány chyby komunikace, které ale mají dobu trvání v řádu milisekund. Jedná se o mžikový výpadek, daný například rušením, který ale nemá vliv na řízení a funkci SCADA. Oproti tomu jsou detekovány případy chyb, které mají trvání v řádu minut až desítek minut. Takové výpadky již mohou mít významný vliv na správnou činnost a plnou funkcionalitu systému v dané oblasti.

<sup>2</sup> společností Eltodo, a.s.



Obr. 4 Příklad analýzy elektronických formulářů  
 Fig. 4 Example of analysis from electronic forms

Na Obr. 4 je příklad analýzy elektronických formulářů: počty zaznamenaných poruch prvních 10 technologií z celkově 20 (Dieselagregát, Evakuační rozhlas, Vzduchotechnika, UPS a energetika, Osvětlení, SOS skříně, EZS, EPS, Nouzové osvětlení a CCTV).

Pomocí stejného programového nástroje je možné generovat a vizualizovat sestavy elektronických hlášenek, viz bod sub 2), pro různé provozní soubory a tím usuzovat na tendence spolehlivosti jejich provozu. Na obrázku níže jsou zpracovány hlášenky tunelových staveb Cholutice a Lochkov. Hlášenky byly pro přehlednost tříděny do 20 kategorií, dle jednotlivých technologií.

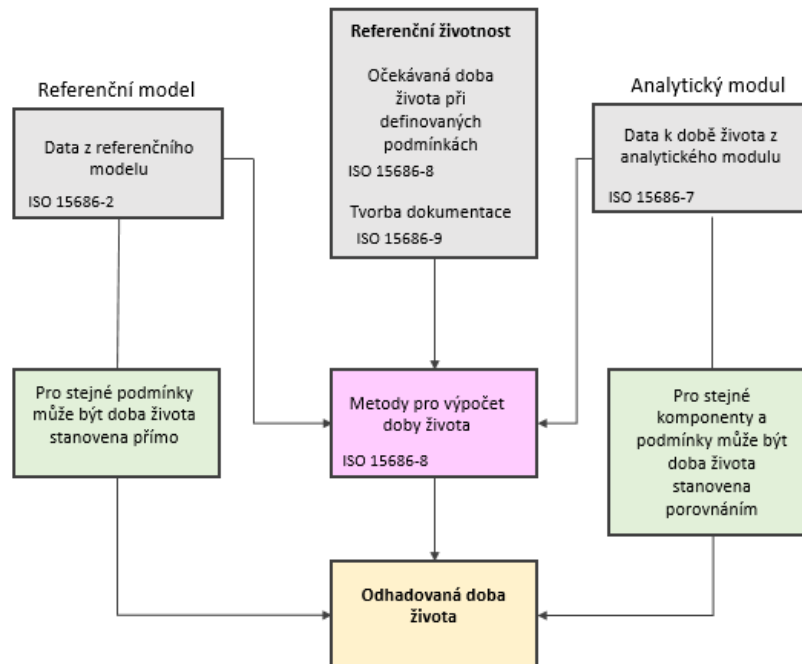
sub 6) Výpočty intenzity poruch a predikce zvýšení četnosti poruch nad stanovenou mez a odvození vanové křivky: v tomto kroku zahajuje činnost analytik počítající základní parametry zařízení na kritické a bezpečnostně kritické cestě. Vstupem jsou předzpracovaná data z analytického modulu udávající frekvenci poruch a jejich délku. Výpočty a analýzu provádí analytik poruch dle vztahů v kap. 2. Kromě základních veličin, jako je *MTTF* nebo *MTBF*, se sleduje intenzita poruch a predikuje se její vývoj. Právě sledování intenzity poruch  $\lambda$  v závislosti na čase dokáže odhalit konec životnosti nebo poskytne informace pro preventivní údržbu či obnovu dílčích částí zařízení či systémů.

sub 7) Expertní posouzení nutnosti preventivního zásahu údržby, obnovy či výměny tohoto zařízení: analytický softwarový nástroj poskytuje veškerá možná data pro vyhodnocování vývoje poruch a jejich závažnosti. V předchozí kapitole byl vznesen požadavek na kvalitativní ohodnocování nutnosti údržby. V uvedené verzi software FAILURE ještě není implementován nástroj, který by automaticky upozorňoval či dokonce doporučoval, kdy a jaké zařízení preventivně udržovat či vyměnit jeho dílčí části. Tento proces zatím musí provádět skupina expertů, kterou tvoří minimálně analytik a zástupci provozovatele a správce.

## 5 Závěry a další práce

Článek popisuje holistický přístup k monitorování doby života technologických zařízení tunelu. Popsaný nástroj FAILURE poskytuje mohutný nástroj pro analýzu dat, souvisejících s poruchami zařízení a pro odhadování doby života daného zařízení. Vlastní rozhodování o preventivní údržbě je dáno expertním úsudkem, který může být zatížen subjektivními i objektivními chybami.

V budoucnosti je nutné se zaměřit na software na podporu rozhodování DSS (Decision Support System). Příklad blokového schéma takového systému, který má podporu i v normách je na Obr. 5. DSS by generoval požadavek na údržbu na základě zadaných parametrů, buď jenom dob provozu zařízení při definovaných podmínkách (blok „Referenční životnost“). Kromě těchto předem známých požadavků je zde analytický modul, poskytující aktuální data o poruchách a referenční model, který má off-line data z jiného/podobného tunelu či tunelů (šedivé bloky). Kromě vypočítané doby života (červený blok) pro který poskytují data všechny tři vstupní moduly, lze pro hledání doby života používat metodu komparace (zelené bloky). Výsledkem je kvalifikovaný odhad doby života dané komponenty, či zařízení.



Obr. 5 Blokové schéma pro návrh DSS systému (lit. [8])

Fig. 5 Block scheme for DSS design (ref. [8])

## 6 Seznam použité literatury

- [1] Příbyl P., Spalek J.: „ŽIVOTNÍ CYKLUS TECHNOLOGIÍ V TUNELECH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ“, Metodický pokyn, ELTODO, a.s., Praha, 2013, str. 45
- [2] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2004/54/ES ze dne 29. dubna 2004 o minimálních bezpečnostních požadavcích na tunely transevropské silniční sítě; <http://eur-lex.europa.eu>
- [3] Příbyl P., Janota A., Spalek J.: „ANALÝZA A ŘÍZENÍ RIZIK V DOPRAVĚ – TUNELY NA POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH A ŽELEZNICÍCH“, BEN, Praha, 2008, ISBN 978-80-7300-2140-0, str. 527
- [4] Příbyl P., Spalek J., Krajčír D., Příkryl J.: „VÝZKUM BEZPEČNOSTNĚ KRITICKÝCH PROCESŮ A ŽIVOTNOSTI ZAŘÍZENÍ V TUNELU“, VZ351, Projekt ZET TA01030020, Eltodo EG, 2012, str. 48
- [5] CSN/EN 61 508: „FUNCTIONAL SAFETY OF ELECTRICAL/ELECTRONIC/PROGRAMMABLE ELECTRONIC SAFETY-RELATED SYSTEMS (E/E/PES)“, IEC, 2002
- [6] IEC 61 511 „FUNCTIONAL SAFETY; SAFETY INSTRUMENTED SYSTEMS FOR THE PROCESS INDUSTRY SECTOR“, oborová implementace normy IEC 61508, CENELEC, 2000



- [7] DIN V 19 250: „GRUNDLEGENDE SICHERHEITSBETRACHTUNGEN FUR MSR, SCHUTZEINRICHTUNGEN, CONTROL TECHNOLOGY“, Berlín, 1994
- [8] „LIFE CYCLE ASPECTS OF TUNNEL EQUIPMENT“, PIARC WG1 „Improve tunnel operation and maintenance“, July 2010, pp. 31
- [9] TP98 „TECHNOLOGICKÉ VYBAVENÍ TUNELŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ“, Eltodo EG, Praha, 2004, ISBN 80-239-0110-9, str. 106
- [10] “RECOMMENDATIONS ON MANAGEMENT OF MAINTENANCE AND TECHNICAL INSPECTION OF ROAD TUNNELS”, 2011; “Life Cycle Aspects of Tunnel Equipment”, 2011