



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Malvína Benešová

**UPLATNĚNÍ PREDIKTIVNÍ DIAGNOSTIKY
V TUNELECH**

Bakalářská práce

2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K620..... Ústav dopravní telematiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Malvína Benešová

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – ITS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Uplatnění prediktivní diagnostiky v tunelech**

Název tématu (anglicky): Application of Predictive Diagnostics in Tunnels

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Analýza současného stavu uplatnění diagnostiky a predikce pro technologie v tunelech
- Analýza a přístupy ke spolehlivostním modelům pro technologie v tunelech
- Doporučení vhodných metod diagnostiky a spolehlivosti pro predikci stavu subsystémů technologií v tunelech
- Strukturální návrh uplatnitelnosti spolehlivostních a diagnostických přístupů v tunelech

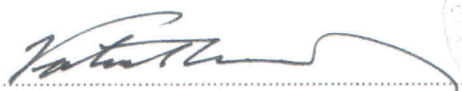



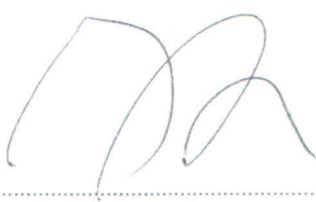
- Rozsah grafických prací: dle požadavků vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: TP 98 - Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací, MD ČR 2010
Příbyl P., Barták J.: Tunely na pozemních komunikacích, ČVUT, Praha 2011, pp 384, ISBN 978-80-01-04723-1

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Tomáš Tichý, Ph.D., MBA**
Ing. Jiří Brož

Datum zadání bakalářské práce: **1. října 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **1. prosince 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


prof. Ing. Zdeněk Votruba, CSc.
vedoucí
Ústavu dopravní telematiky



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.



Malvína Benešová
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....10. srpna 2020

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce panu docentu Ing. Tomášovi Tichému, Ph.D., MBA a také Ing. Jiřímu Broži MSc. za jejich odborné vedení, podporu, pomoc, podnětné rady a trpělivost v průběhu vypracování bakalářské práce.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto písemnou studii bakalářské práce vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucích práce doc. Ing. Tomáše Tichého, Ph.D., MBA a Ing. Jiřího Brože MSc. Dále prohlašuji, že veškeré podklady a zdroje, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne podpis

Malvína Benešová

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Uplatnění prediktivní diagnostiky v tunelech

Bakalářská práce

Prosinec 2020

Malvína Benešová

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou současného stavu uplatnění diagnostiky a predikce a přístupů ke spolehlivostním modelům pro technologie v tunelech. Práce definuje tunel jako systém, vysvětluje pojmy spojené s analýzou rizik a její metody. Dále vysvětluje spolehlivost systému a pojmy jako spolehlivostní ukazatele a spolehlivostní zkoušky. Na konci práce se zabýváme návrhem a popisem vhodných metod diagnostiky a spolehlivosti pro predikci stavu subsystémů technologií v tunelech.

Abstract

This bachelor thesis analyses the current state of application of diagnostics and predictions and approaches to reliability models for tunnel technologies. The thesis defines tunnel as a system, describes the terms associated with risk analysis and methods. It also explains reliability of systems and terms like system reliability and reliability models. At the end of the thesis we work with the design and description of appropriate methods of diagnosis and reliability for predicting the state of technology of the subsystems in tunnels.

Klíčová slova: predikce, prediktivní diagnostika, rizika, analýza rizik, spolehlivost, spolehlivostní modely

Key words: prediction, predictive diagnosis, risks, hazards, risk management, reliability, system reliability, reliability models

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	8
1 ÚVOD	10
2 TUNEL	11
2.1 TECHNOLOGIE V TUNELECH	11
2.2. TECHNOLOGICKÉ CELKY V TUNELU	13
2.3 VYBAVENÍ TUNELŮ	16
3 PIARC	17
3.1 OBECNÉ ASPEKTY	17
3.1.1 Strategické otázky	17
3.1.2 Bezpečnost	18
3.1.3 Lidský faktor a bezpečnost v tunelech	19
3.1.4 Provoz a údržba	19
3.1.5 Provoz a otázky životního prostředí	20
3.2 PROVOZNÍ A BEZPEČNOSTNÍ DOPORUČENÍ	20
3.2.1 Geometrie	20
3.2.2 Stavební zařízení pro provoz a bezpečnost	21
3.2.3 Zařízení a systémy	21
3.2.4 Reakce tunelu během požáru	21
3.4 GLOSÁŘ	21
4 ANALÝZA RIZIK	22
4.1 KRITÉRIUM PŘIJATELNOSTI	23
4.2 KLASIFIKACE A IDENTIFIKACE RIZIK	24
4.3 HODNOCENÍ RIZIK	24
4.4 ANALÝZA NÁSLEDKŮ	26
4.5 ŘÍZENÍ RIZIK	27
4.6 KVALITATIVNÍ METODY	28
4.6.1 Expertní hodnocení	29
4.6.2 Kontrolní seznam	30
4.6.3 “Co-když” analýza	30
4.6.4 Analýza statistických dat	31
4.6.5 Analýza možných poruch a jejich následků	31
4.7 DETERMINISTICKÉ ANALÝZY RIZIK	34
4.7.1 Analýza scénářů	34
4.7.2 Simulace Monte Carlo	36
4.8 KVANTITATIVNÍ METODY	37
4.8.1 TECHNIKY ZALOŽENÉ NA POUŽITÍ STROMOVÝCH DIAGRAMŮ	37

4.9 OSTATNÍ METODY	39
4.9.1 Analýza nákladů a přínosů.....	39
5 SPOLEHLIVOSTNÍ MODELÝ	40
5.1 SPOLEHLIVOSTNÍ UKAZATELE	42
5.2 PŘÍSTUPY KE SPOLEHLIVOSTNÍM MODELŮM	45
5.2.1 Deduktivní přístup.....	45
5.2.2 Induktivní přístup.....	46
5.3 DRUHY SPOLEHLIVOSTNÍCH MODELŮ.....	46
5.3.1 Blokový spolehlivostní model	46
5.4 ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI	51
5.5 VLIVY LIDSKÉHO FAKTORU NA BEZPEČNOST A SPOLEHLIVOST SOUSTAV	52
6 PREDIKTIVNÍ DIAGNOSTIKA	54
6.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	54
6.2 TECHNICKÁ PROGNOSTIKA.....	55
6.2.1 Prognostika na základě údajů	55
6.2.2 Prognostika s použitím modelu	55
6.2.3 Prognostika založená na pravděpodobnosti.....	56
6.2.4 Přístup k prognóze technického stavu pomocí neuronových sítí	56
7 ZAHRANIČNÍ VÝZKUMY	58
7.1 Sledování stavu dieselového motoru	58
7.2 Distribuovaný přístup prediktivního modelování pro predikci a diagnostiku klíčového indexu výkonnosti v rámci celého závodu.....	59
7.3 Sledování stavu a diagnostika závad indukčních motorů.....	60
7.4 Systém pro prediktivní údržbu v leteckém průmyslu	61
7.5 Flexibilní nelineární prediktivní modely pro diagnostiku větrných turbín.....	62
7.6 Vývoj diagnostického a prognostického nástroje pro prediktivní údržbu v železničním průmyslu	63
8 NÁVRH UPLATNITELNOSTI SPOLEHLIVOSTNÍCH A DIAGNOSTICKÝCH PŘÍSTUPŮ. 64	
8.1 Příprava a ladění	64
8.2 Realizace prediktivního diagnostického systému.....	69
9 DOPORUČENÍ PŘI NAVRHOVÁNÍ SYSTÉMU	72
9.1 Konkrétní doporučující body	72
10 ZÁVĚR.....	76
11 ZDROJE	77
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	83
SEZNAM TABULEK.....	83

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

SCADA	dispečerské řízení a sběr dat (z anglického S upervisory C ontrol A nd D ata A cquisition)
GG	Dispečink dopravního řízení-úroveň útvaru
GT	Dispečink dopravního řízení tunelů-úroveň oblasti
GA	Dispečink technologického řízení tunelů-úroveň oblasti
ALARP	riziko tak nízké, jak je rozumně proveditelné (z anglického A s L ow A s R easonably P ossible)
IRR	vnitřní výnosové procento (z anglického I nternal R ate of R eturn)
ARR	účetní návratnost investic (z anglického A nnual R ecurring R evenue)
NPV	čistá současná hodnota investice (z anglického N et P resent V alue)
EU	E vropská U nie
FMEA	analýza příčin a následků poruch (z anglického F ailure M odes and E ffect A nalysis)
SAFMEA	Statistické analýzy způsobů a následků poruch (z anglického S tatistical F ailure M odes and E ffect A nalysis)
RPN	Rizikové číslo (z anglického R isk P riority N umber)
FTA	Analýza stromu poruch (z anglického F ault T ree A nalysis)
ETA	Analýza stromu událostí (z anglického E vent T ree A nalysis)
IZS	Integrovaný Z ásahový S ystém
UNECE	Evropská hospodářská komise OSN (z anglického U nited N ations E conomic C ommission for E urope)
CBM	preventivní údržba podle technického stavu zařízení (z anglického C ondition B ased M aintenance)
RUL	zbytková doba provozního života (z anglického R emaining U seful L ife)
TTF	doba do poruchy (z anglického T ime T o F ailure)
MLP	vícevrstvý perceptron (M ultilayered P erceptron)
PCA	analýza hlavních komponent (z anglického P rincipal C omponent A nalysis)
PLS	parciální nejmenší čtverce (z anglického P artial L east S quares)

ANN	umělé neuronové sítě (z anglického A rtificial N eural N etworks)
MCSA	M otor C urrent S ignature A nalysis
HDP	H rubý D omácí P rodukt
LQI	index kvality života (z anglického L ife Q uality I ndex)
HMI	interakce člověk-stroj (z anglického H uman M achine I nteraction)
PLC	P rogrammable L ogic C ontroller
IoT	internet věcí (z anglického I nternet o f T hings)

1 ÚVOD

Po druhé světové válce začal obrovský vývoj automobilového průmyslu, bylo tedy nutné pro rychlé a bezpečné spojení vybudovat tunelové systémy pro překonání přírodních překážek.

S neustále rozvíjející se infrastrukturou a se stále vyšší intenzitou na silnicích a dálnicích je nutné poskytnout maximální bezpečnost a spolehlivost těchto systémů. Tunely řadíme k systémům, které jsou v neustálém provozu a je nutné zajistit hodnoty bezpečnosti a spolehlivosti v určitých mezích.

Požadavky na jednotnou bezpečnost dopravy na pozemních komunikacích se společně s technickým pokrokem stále vyvíjí na základě nově získaných praktických zkušeností. V celé Evropě jsou dnes už harmonizované přístupy a směrnice k tunelům, ty vznikaly v 90. letech 20. století, kde velice významnou roli hrál výbor pro silniční tunely PIARC.

Dnes již můžeme pracovat s pokročilými metodami analýzy rizik, které nám pomohou navrhnout vhodná opatření již ve fázi návrhu systému a stanovit společenská a ekonomická rizika pro jednotlivce, společnost, majetek nebo životní prostředí s ohledem na daná nebezpečí.

Bakalářskou práci na téma „Uplatnění prediktivní diagnostiky v tunelech“ jsem si vybrala z důvodu, že mě téma oslovilo a chtěla jsem se o dané problematice dozvědět více a tím i prohloubit své znalosti.

Práce popisuje analýzu rizik a s tím spojené různé metody přístupu, seznamuje čtenáře se základním popisem manuálu k silničním tunelům PIARC, vysvětluje pojmy v rámci prediktivní diagnostiky a věnuje se problematice okolo spolehlivosti systémů.

V poslední části dochází k návrhu vhodných postupů a metod a k samotným strukturálním návrhům, které vychází z teoretického základu bakalářské práce.

2 TUNEL

2.1 TECHNOLOGIE V TUNELECH

Technologie v tunelech dělíme na tři hlavní celky:

- dopravní systém
- bezpečnostní systém
- technická zařízení zabezpečující funkčnost tunelu

Mezi technická zařízení tunelu zabezpečující funkčnost tunelu patří například osvětlení, větrání, spojovací a dorozumívací zařízení, protipožární zabezpečení, systém videodetekce, řídicí systém, zásobování elektrickou energií. Technologie tunelu je dále dělena dle funkčních parametrů. Mezi jednotlivými systémy existují vzájemné úzké vazby. Všechny funkční bloky tunelu jsou navzájem integrovány prostřednictvím SCADA (dispečerské řízení a sběr dat) řídicího systému. Veškeré vstupní a výstupní proměnné jsou k dispozici v libovolném čase a v libovolném řezu řídicího systému. Dále také existuje jednotné telekomunikační prostředí pro komunikaci se všemi subsystémy. Dochází zde k velké snaze vytvořit maximálně automatický systém. [43]

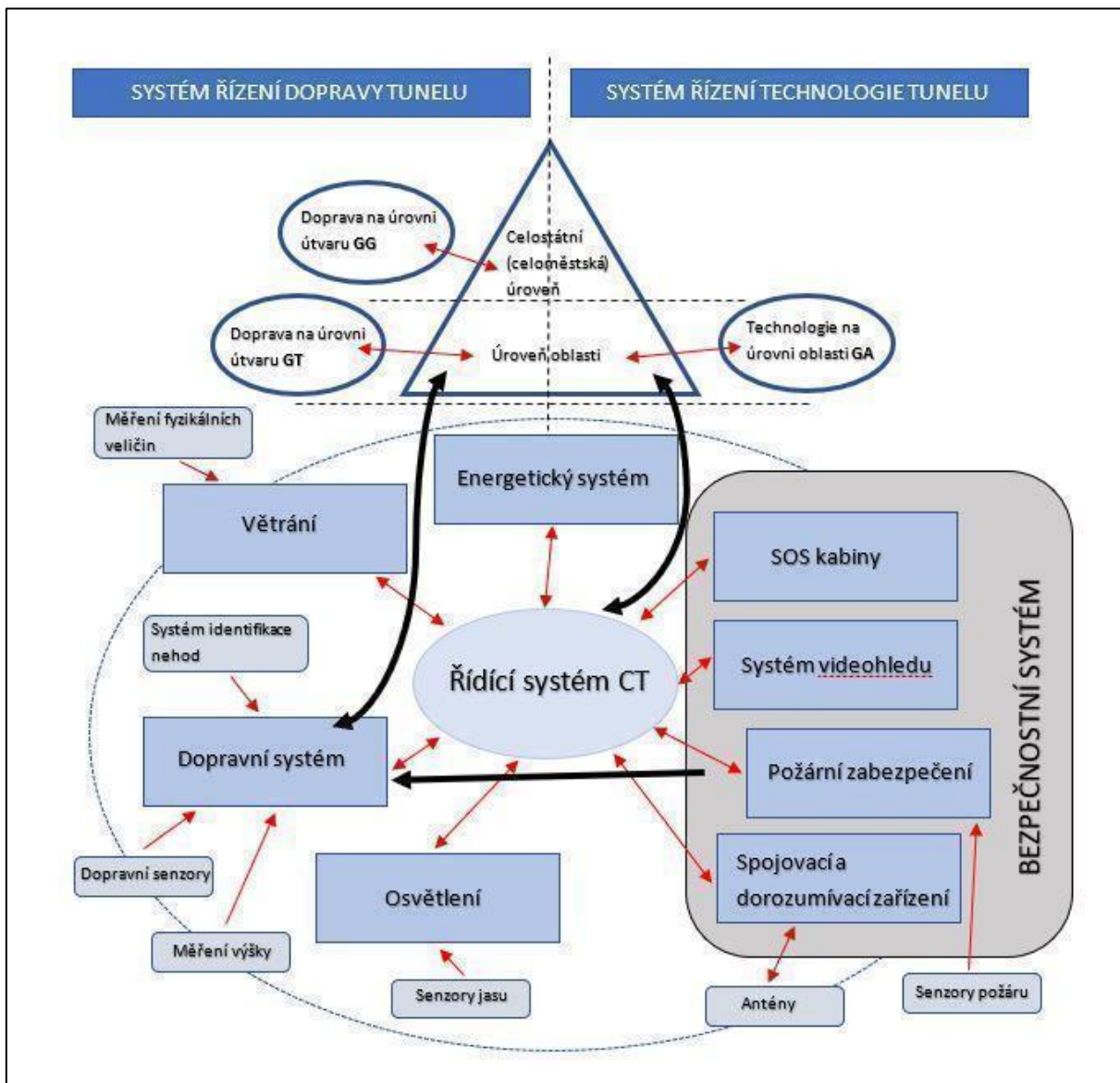
Oblasti dělíme z hlediska topologie na:

- plošně uspořádané (městské aglomerace)
- liniově uspořádané (tunely na dálnicích a silnicích)

Rozlišujeme i úrovně oblastí:

- velín řízení dopravy v tunelech
 - zahrnuje řízení dopravy ve více tunelech
 - musí být začleněn do systému pro řízení dopravy v rámci celé oblasti
- velín řízení technologie tunelu
 - zajišťuje dohled nad technickými zařízeními tunelu
 - zabezpečuje bezchybnou funkci všech technologií v tunelu (včetně dopravních zařízení)

Na obrázku 1 můžete vidět subsystémy tunelu a jejich vazby.



Obrázek 1: Subsystémy tunelu, jejich vazby a začlenění tunelu do dopravního systému oblasti a útvaru z hlediska telematického přístupu, zdroj: vlastní zpracování z TP98 [43]

Dopravní útvar je nejvyšším stupněm hierarchického řízení. V rámci své působnosti obsluhuje více oblastí. Jedná se například o soubor oblastí v městské aglomeraci, o systém řízení dálnice nebo třeba o systém přepravy nebezpečného nákladu na nadnárodní úrovni.

Všechny údaje rozhodujícího tunelu z oblastního velínu by měly být přenášeny do centra řízení dálnic. [43]

2.2. TECHNOLOGICKÉ CELKY V TUNELU

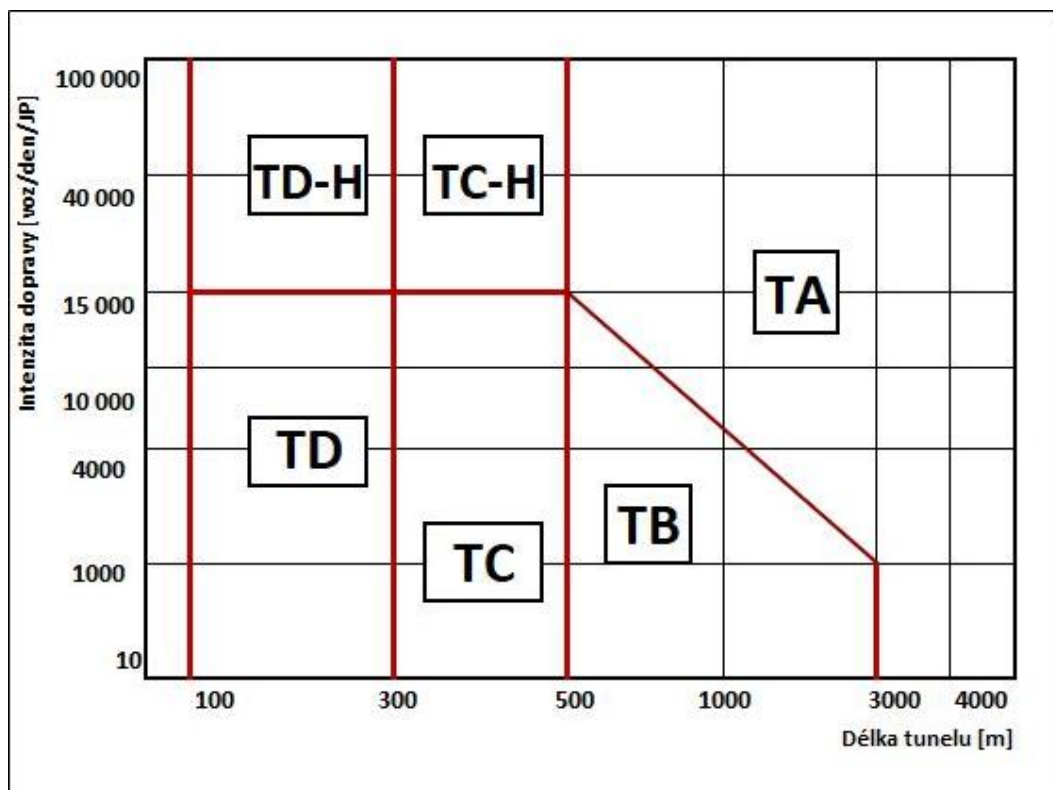
Dělíme je na dva soubory.

1. Soubor lze navrhnout exaktně tzn. naprosto přesně. Při metodě exaktního návrhu využíváme výpočty dle empirických vztahů, simulace systému, matematické nebo fyzikální modelování nebo komparační metodu, kdy porovnááme naši metodu s již známým řešením. Při metodě exaktního návrhu by se měla využít kombinace minimálně dvou těchto řešení. Výsledek dále musí zahrnovat i mezní stavy vyvolané jinými technologickými soubory, časové odezvy a všechny podmínky stability.

Exaktní metodou můžeme v rámci tunelu navrhovat osvětlení uvnitř tunelu, větrání, řídicí systém nebo zásobování elektrickou energií.

2. Soubor nelze navrhnout žádným modelováním nebo výpočtem. Vychází pouze ze zkušeností expertů, kteří s touto problematikou již mají zkušenosti. Zabývá se převážně soubory, které slouží k zajištění bezpečnosti účastníků silničního provozu. Funkce určené expertní metodou jsou nejčastěji spojené s mimořádnými situacemi (požár, dopravní nehoda). Četnosti těchto událostí lze určit metodami oceňování rizik a využitím statistických metod analýzy historických událostí. Ve všech "tunelově" vyspělých zemích se dlouhodobě sleduje a zaznamenává výskyt nehod v přepočtu na počet vozidel a počet ujetých kilometrů. [43]

Při plánování bezpečnostního zařízení vycházíme z obrázku (viz. Obrázek 2), který určuje kategorizaci tunelu z hlediska bezpečnostního vybavení. [43]



Obrázek 2: Kategorizace tunelů, zdroj: vlastní zpracování dle knihy Tunely na pozemních komunikacích Přebyl, Barták [1]

Pokud se intenzity vozidel pohybují pod 1000 voz/den kategorizujeme tunely podle jeho délky. Rozdělení můžete vidět níže v tabulce 1.

Tabulka 1: Kategorizace tunelu

Kategorie	TD	TC	TB	TA
Délka [m]	100 - 300	300 - 500	500 - 3000	3000 - 10 000

Zdroj: Tunely na pozemních komunikacích Přebyl, Barták [1]

Pokud se intenzity dopravy pohybují mezi 1000 - 15 000 voz/den volíme kategorii tunelu podle následujícího vzorce:

$$q = A \times I^{-B}$$

kde q je intenzita dopravy [voz/den], I je délka tunelu [m], A a B jsou regresní koeficienty mocninné řady.

Pro intenzity dopravy vyšší než 15 000 voz/den a jízdní pruh kategorizujeme podle délky v tabulce 2.

Tabulka 2: Kategorizace tunelu

Kategorie	TD-H	TC-H	TA
Délka [m]	100 - 300	300 - 500	500 - 10 000

Zdroj: Tunely na pozemních komunikacích Příbyl, Barták [1]

Kategorie tunelů se dělí na TA, TB, TC a TD. Jsou dány přibližně stejnou mírou bezpečnosti danou podílem počtu nehod na počet vozidel a ujetou vzdálenost. To vše vychází z dlouhodobého statistického měření. Intenzity jsou dané ročním průměrem denní intenzity ekvivalentních vozidel. Pro obousměrný nebo kombinovaný režim se intenzity dopravy všech dopravních proudů sčítají. Hodnoty intenzity musí respektovat dopravní skladbu a vychází z ročního průměru denní intenzity (RPDI) ekvivalentních vozidel vztažené na jeden jízdní pruh. Každý dopravní prostředek má převodní koeficient (např. osobní vozidlo = 1.0; motocykl = 0.5; nákladní vozidlo nebo autobus = 1.7; přívěs/návěs = 2.5). Tunel, který má 3 a více pruhů v jednom dopravním pásu se automaticky řadí do kategorie TA. Jednoznačným trendem dnešní doby je brát při návrhu do úvahy všechny možné okolnosti vzhledem k vlivu na bezpečnost. Speciální kategorií jsou TC-H a TD-H, ty jsou zavedeny pro krátké tunely s vysokou intenzitou.

Tunely do 100 metrů nejsou vybaveny řídicími nebo bezpečnostními systémy, pokud dopravní řešení neříká jinak. [1][43]

Dopravní systém

Řízení dopravy je realizováno senzory, aktory a samotným řídicím systémem. Senzory slouží jako zařízení měřící dopravní a fyzikální veličiny. Aktory jsou zařízení, která jsou umístěna v zorném poli řidiče a nějakým způsobem ovlivňují způsob jízdy. Mezi aktory může patřit například světelně signalizační zařízení nebo proměnné dopravní značení. [43]

Dopravní stavy tunelu

Všechny dopravní stavy v tunelu se dají detailně zpracovat s využitím stavových a časových diagramů. Jestliže všechna zařízení v tunelu řádně pracují a dopravní tok je plynulý, pak se tunelový dopravní systém nachází v tzv. řádném stavu.

V řádném stavu také bezproblémově funguje všechna technologie, v tunelu se nevyskytuje žádný dopravní problém, a také neprobíhá žádná oprava nebo údržba. [43]

Dále mohou nastat zvláštní, mimořádné a havarijní dopravní stavy. Tyto stavy jsou ovlivněné výpadkem nějaké technologie (dopravní značení, větrání, osvětlení, dopravní nehodou, odstaveným vozidlem, ztrátou nákladu, požárem, zaplavením vozovky, únikem nebezpečné látky apod.). Dopravní systém se dostává do přechodového režimu a doprava přechází do jiného statického stavu. V těchto případech je velice důležitým aspektem bezpečnosti videodetekce. [43]

Pro stavy všech dopravních systému existují grafy, které exaktně určují jejich činnost. Je nutné sledovat i časové diagramy, aby bylo jasné, jaké jsou časové závislosti stavových přechodů. Pokud se jedná o normální průběh je bezpečnost a plynulost dopravy udržována regulací dopravního toku. K tomu se využívají světelná signalizační zařízení a jiná dopravní značení (proměnné). Při plánovaných údržbách v tunelu je nutné předem zajistit organizaci dopravy pomocí zařízení nacházejících se v tunelu nebo použít přenosná či mobilní dopravní značení a zařízení. Postupy při dalších stavech musí být popsány v dokumentaci (i s případnými objízdovými trasami). Druhy a rozsahy dopravního značení a zařízení se řídí podle stavebních a dopravně technických podmínek. [43]

Musí se brát v úvahu kategorie a délka tunelu, příčné uspořádání uvnitř a vně tunelu, navrhovaná rychlost, možnosti výstavby nouzových pruhů, druh provozu (jednosměrný nebo obousměrný), celková organizace dopravy, intenzita a skladba dopravního toku, dopravní struktura. [43]

2.3 VYBAVENÍ TUNELŮ

Tunel je vybaven v kategoriích:

- minimální vybavení krátkých tunelů
- minimální vybavení
- základní vybavení
- rozšířené vybavení

Vybavení tunelu závisí na celkovém dopravním řešení v oblasti nebo linii.

Jako kritéria zde uvádíme délku tunelu, intenzitu dopravy, přípustné nejvyšší rychlosti, nehodovost, složení dopravního proudu a také silnice před a za tunelem. [43]

3 PIARC

PIARC je mezinárodní organizace, která má v rámci silnic a silniční dopravy sbírat a sdílet znalosti. Cílem je také usnadnit globální diskusi a shromáždit data a zkušenosti v oblasti provozu v silničních tunelech. V roce 1957 vznikl „Výbor pro tunely“, ten řeší například vybavení, provoz, bezpečnost, údržbu nebo životní prostředí. Existuje velká řada technických doporučení nejčastěji ve formě technických zpráv nebo článků. Ve většině zemích jsou tato doporučení využita do smluvních specifikací. PIARC vytvořil Manuál silničních tunelů, který se skládá z několika částí – Obecné aspekty, Provozní a bezpečnostní doporučení a z Glosáře. [24]

3.1 OBECNÉ ASPEKTY

První část manuálu řeší obecné aspekty silničních tunelů a dělí se na 5 podkapitol. Jednotlivé kapitoly jsou popsány v následujících kapitolách. [24]

3.1.1 Strategické otázky

Tato kapitola má za úkol usnadnit pochopení tohoto komplexního oboru. Dílčí oddíly první kapitoly se zabývají například **komplexností systému**. Máme zde souhrn proměnných parametrů, které jsou vzájemně propojeny. Parametry mají různý charakter a různé relativní váhy, to se odvíjí od charakteru konkrétního tunelu. Od samého začátku projektu se musí brát v úvahu všechny relevantní parametry, které mohou záviset na umístění tunelu, délce, skladbě dopravního toku nebo stáří tunelu. Vždy je nutné provést analýzu propojení jednotlivých relevantních parametrů. Cílem je předejít problémům již v průběhu realizace stavby nebo rekonstrukce tunelu. Včasná a kvalitní optimalizace může vést k relativně vysokým úsporám. Kapitola dále například řeší problematiku větrání, bezpečnosti a provozního vybavení (rozvody elektřiny, ochrana před ohněm, odolnost vybavení, náklady na provoz a údržbu, krizové reakční plány). Oddíl **obecný návrh tunelu** je určen pro výstavbu nových tunelů. Je zde popsáno, jak navrhovat horizontální a vertikální uspořádání komunikace s tunelem, příčný profil, bezpečnost a provoz (intenzity dopravy, větrání, evakuace, dohledový systém) a mimořádné problémy, které souvisí s provozním vybavením tunelu. Další oddíl **renovace a vylepšování stávajících tunelů** je určen pro modernizaci a přestavbu již fungujícího tunelu. Nejdůležitější částí je diagnóza (stav konstrukce, kompletní seznam vybavení, posouzení životnosti zařízení, prostudování zpráv o všech údržbách/inspekcích nebo poruchách).

Následuje již konkrétní program renovace nebo modernizace. Nejprve se program vyvíjí a poté ověřuje. V poslední fázi se projekt realizuje a začíná se s výstavbou. Oddíl **životní cyklus tunelu** se zabývá náklady, bezpečností a řízením technických a ekonomických rizik, výstavbou z hlediska stavebního inženýrství, uvedení do provozu (to zahrnuje veškeré přípravy, nábor a výcvik zaměstnanců a složek Integrovaného Zásahového Systému (IZS), zkušební provoz, údržbu) a samotný provoz. Oddíl s názvem **Ekonomické aspekty** řeší stavební náklady, provozní náklady, náklady nutné na renovace a aspekty financování. **Podzemní struktury** – oddíl, který se skládá ze seznamu doporučení, pokynů a předpisů. **Komplexní podzemní silniční síť** je posledním oddílem této části. Skládá se ze shrnutí zprávy vydané na kongresu z roku 2015 v Soulu a z analýzy dílčích strategických výzev. [24]

3.1.2 Bezpečnost

Na tuto problematiku je kladen stále větší a větší důraz, protože následky nehod v uzavřeném tunelu mohou být fatální. Informace se neustále rozšiřují o poučení z již vzniklých nehod. UNECE (United Nations Economics Commission for Europe) má expertní skupinu, která vytvořila doporučení pro aspekty bezpečnosti. Důležitým aspektem této části je právě sběr a analýza dat o událostech v silničním tunelu a bezpečnostní dokumentace. Cílem je neustále sledovat a zlepšovat bezpečnost nových a již existujících tunelů. Kapitola se dále zabývá prvky bezpečnosti a integrovaným přístupem. Ta vychází z faktu, že bezpečnost je rovnováha mezi předpokládanými faktory rizik a bezpečnostními opatřeními. Důležitou částí je také posuzování rizik, kdy se musí brát v potaz specifikace jednotlivých tunelových systémů a jejich vliv na bezpečnost. Posuzování rizik je proces, který se skládá ze tří částí: analýza, hodnocení a plánování bezpečnostních opatření. Dále se jako samostatná kapitola řeší požární bezpečnost. Tento oddíl řeší detekci požáru (kouře), větrání, umístění a typ hasících přístrojů, pevný hasící systém a možné chování ohně v tunelu. V neposlední řadě jsou v této kapitole popsány možné problémy způsobené přepravou nebezpečného nákladu. Jsou jasně stanovené regulace přepravy a také jsou zde zpracovány opatření pro snížení rizik. [24]

3.1.3 Lidský faktor a bezpečnost v tunelech

Cílem této kapitoly je nastudovat a pochopit chování člověka v tunelu v jakýchkoliv situacích. Z těchto studií vychází doporučení pro provoz tunelu. Je zde snaha optimalizovat chování lidí při evakuaci s předem stanovenou koordinací IZS. Kapitola nám v rámci uživatelů komunikace v tunelu modeluje proces lidského rozhodování a tím nám nastiňuje jeho možné chování. Další velice důležitý lidský faktor je provozovatel a zaměstnanci, jejichž práce je řídit dopravu v tunelu a udržovat vybavení tunelu. IZS musí před zahájením provozu v tunelu podstoupit všestranný výcvik. Všeobecná doporučení nám říkají, že by se již od začátku projektování měly vzít v potaz faktory, které v tunelu ovlivňují chování lidí např. skladba dopravního proudu, okolní infrastruktura, tunely v okolí. [24]

3.1.4 Provoz a údržba

Skládá se ze tří činností: každodenní správa, výcvik personálu a průběžné zvyšování bezpečnosti. Dílčí část kapitoly nám říká, že je nutné v tunelu zajistit vyšší bezpečnost než na "obyčejné" silniční síti. Personál tunelu má za úkol například sledovat dopravu a provoz zařízení, řízení stavebních prací, správu vybavení, řízení mimořádných krizových situací. Personál můžeme dělit na provozní, technický a administrativní. Nábor nových zaměstnanců by měl probíhat prostřednictvím náborového procesu, měli by být řádně proškoleni a během povolání podstupovat opakovací kurzy a zkoušky. Je doporučena i účast na výcviku IZS před začátkem provozu v tunelu. Díky sběru dat z mimořádných situací je možné velké množství situací simulovat, a tak lépe připravit personál tunelu. Ke každému tunelu musí být zpracovány provozní pokyny s postupy a krizové plány (poškození vybavení tunelu, dopravní nehoda, výpadek elektrické energie). Na tunelu se provádí údržbářské úkony, a to preventivní v pravidelných intervalech, aby se vybavení udržovalo v dobrém stavu a předcházelo se poruchám a dále úkony nápravné, a to při nefunkčnosti systému, ty nelze plánovat dopředu a náklady na opravu bývají relativně vysoké. V této kapitole je také popsáno, jak je možné postupovat při údržbě za provozu. [24]

3.1.5 Provoz a otázky životního prostředí

Kapitola naráží na problematiku vozidlových emisí a uzavřených prostor v tunelu, hluk, vliv vody a udržitelný provoz tunelu na mezinárodní úrovni. V tunelu se musí provádět měření a zjišťovat koncentraci škodlivin, a poté to zohlednit při výstavbě ventilace. Zdroje hluku vzhledem k tunelu se nejvíce řeší v bezprostřední blízkosti portálu, ten je způsobený dopravním proudem, dále je zde i hluk způsobený příčným ventilačním systémem. Tedy už v rámci projektování tunelu by se nasávací a výdechové šachty měly navrhovat tak, aby byly, co nejdále od zástavby. Podélná ventilace se ve většině případů "ztratí" v hluku způsobeném dopravním proudem. Tunel musí být vybaven odvodňovacím systémem a brát v úvahu nutnost jeho pravidelného čištění. Tunely dělíme na nepropustné, polopropustné a propustné. Většina tunelů je polopropustných. [24]

3.2 PROVOZNÍ A BEZPEČNOSTNÍ DOPORUČENÍ

Druhá část manuálu se zabývá provozními a bezpečnostními požadavky v rámci jednotlivých prvků. Skládá se ze 4 kapitol. [24]

3.2.1 Geometrie

Geometrické parametry tunelu se musí určovat již v rané fázi návrhu tunelu. Parametry dělíme do následujících skupin: vztah mezi metodou stavby a příčným uspořádáním, teoretický koncept z hlediska dopravní kapacity, základní uspořádání silnice, konkrétní geometrické parametry, vliv geometrických parametrů na bezpečnost. První podkapitola se zabývá **metodami stavby a průřezem**, závisejících například na dopravních intenzitách, návrhových rychlostí, standardu bezpečnosti, systému řízení dopravy nebo na místních normách a finančních možnostech. Podkapitola **dopravní kapacita** nám definuje teoretickou a praktickou kapacitu úseku silnice. **Národní příklady** nám udávají hlavní kritéria ohledně správného uspořádání silnic a příkladů ze zahraničí. Nalezneme zde informace o směrovém vedení, podélném profilu, příčném uspořádání, výškových poměrech, jednosměrných a obousměrných tunelech a křižovatkách. Podkapitolu věnující se konkrétně příčnému řezu v tunelu pro jednosměrné i obousměrné tunely nalezneme pod názvem **průjezdny profil**. **Podjezdná výška** nám stanovuje velikost minimální a maximální výšky prostoru nad vozovkou. Poslední podkapitola **speciální prvky** nám definuje odstavné pruhy, přidružený prostor a jiné zvláštní prvky. [24]

3.2.2 Stavební zařízení pro provoz a bezpečnost

Zabývá se speciálními prvky tunelu, které splňují provozní a bezpečnostní potřeby v tunelu. Řadíme mezi ně například **bezpečnostní východy** (průchody mezi tubusy a průchody na povrch), aby bylo možné se dostat pěšky do bezpečí či **zálivy**, které se zabývají úkryty pro minimalizování rizika srážky vozidla s člověkem. Dále řeší z hlediska **opatření pro vozidla** výstavbu nouzových stání, spojek oddělených tubusů pro speciální vozidla nebo obratiště. Popisuje **odvodňovací systémy tunelu** (únik tekutin, požár) a **ostatní zařízení** (nouzová stanoviště, technické místnosti, dělící zdi). [24]

3.2.3 Zařízení a systémy

Kapitola popisuje v několika oddílech široké spektrum zařízení zajišťující správný provoz tunelu. Patří mezi ně **napájecí soustava, komunikační zařízení, dopravní systém, osvětlení, ventilace, dopravní značení, požární zabezpečení včetně hasících zařízení a zábrany**. [24]

3.2.4 Reakce tunelu během požáru

Z hlediska bezpečnosti by v tunelu neměly být používány hořlavé materiály a materiály, které vytváří příliš toxického kouře. **Materiál** by měl být odolný minimálně do doby evakuace či zásahu. Kapitola se zabývá **odolností konstrukce a zařízení**. [24]

3.4 GLOSÁŘ

Obsahuje všechny termíny a definice, které v rámci silničních tunelů existují. [24]

4 ANALÝZA RIZIK

Riziko a jeho analýza je základním kamenem v rámci vytváření nových produktů, zavádění nových technologií, projektů apod. Kvalitní analýza rizik stojí na kvalitních vstupních hodnotách (rozsáhlé soubory dat). To je důležité při následné volbě vhodné varianty analýzy. Pokud se zvolí nevhodná, je možné, že některé nedostatky v rámci realizace projektu již budou nevratné – půjde jen zmírnit jejich následky. Druhým faktorem ovlivňujícím výsledek projektu je kvalitní realizace projektu a posledním jsou rizika a nejistoty, které do jisté míry nedokážeme ovlivnit. Klíčová je identifikovat riziko nejistoty, stanovit dopady a výsledky a zvážit nutná opatření pro zmírnění identifikovaných rizik. [2] [19]

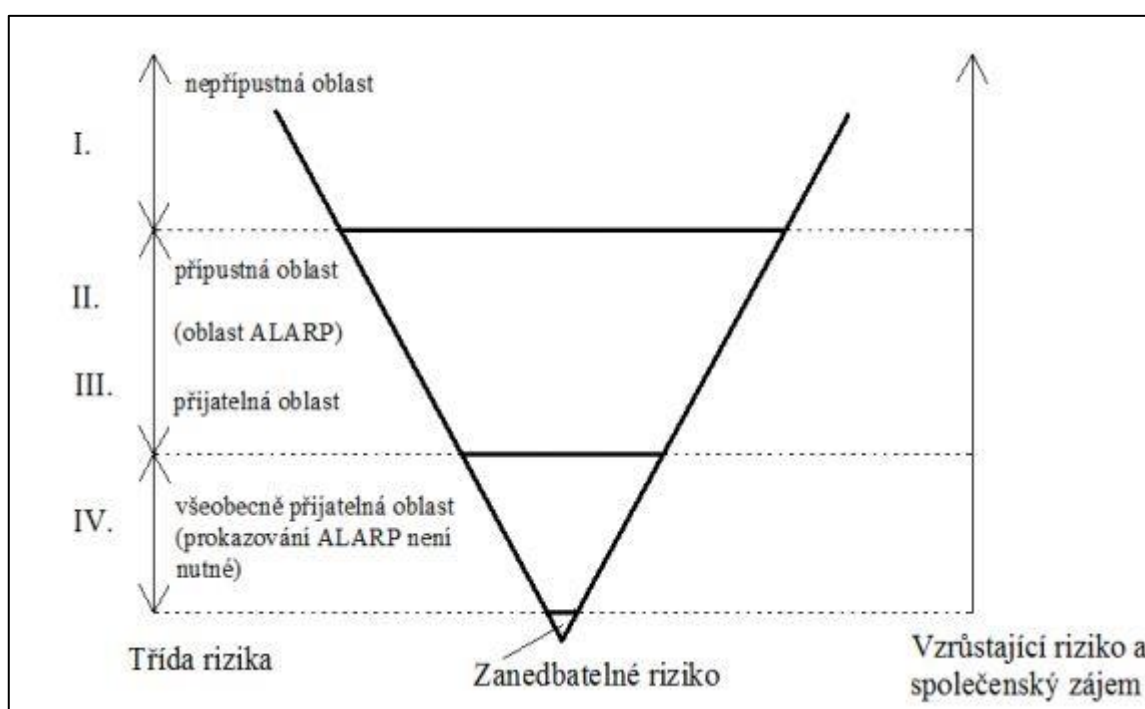
Po analýze rizik se přechází k hodnocení rizik, kdy řešíme kritéria přijatelnosti a nepřijatelnosti rizika. V tomto kroku dochází k rozhodnutí, zda se projekt vůbec dá realizovat a případně se navrhnou opatření s cílem snížit rizika. Výše zmíněné postupy pak představují důležité fáze v rámci managementu rizik. [2]

Analýza rizik nám pomáhá určit pravděpodobnost konkrétních situací a jejich případné důsledky. Využívá se téměř ve všech oborech, které jsou spojeny s lidskou činností. [1]

Riziko obecně můžeme chápat jako možnost vzniku ztráty, výskytu události, které zabrání či ohrozí dosažení cílů nebo nebezpečí negativních odchylek od stanovených úrovní cílů. Riziko je vždy spojeno s konkrétní akcí nebo projektem, kdy neúspěch projektu může vést k hospodářským ztrátám nebo naopak zlepšit jeho hospodářské výsledky. Nejistotu můžeme chápat jako neschopnost spolehlivého odhadu faktorů, které mohou náš projekt ovlivnit. Je nutné zajistit dostatek informací z kvalitních zdrojů a zvolit vhodnou metodu odhadu budoucího vývoje. Nejistotu je možné snížit, ale nelze úplně odstranit. [2]

4.1 KRITÉRIUM PŘIJATELNOSTI

Kritérium přijatelnosti je součástí hodnocení rizik. Hodnotí se, kdy je hodnota kritéria ještě přijatelná. Pokud se dostaneme do hodnot, které již nejsou přijatelné, je nutné se riziku vyhnout nebo navrhnout opatření a strategie s cílem zmírnění tohoto rizika. Vyhnout se riziku můžeme chápat jako úplné ukončení návrhu a realizace projektu, je však nutné si uvědomit, že některým rizikům se vyhnout nedá. Pokud se zvolí druhá možnost, a to zmírnění rizika, je více způsobů, jak toho dosáhnout. Je možné riziko eliminovat oslabením jeho příčin, snížením negativních dopadů nebo přesunem rizika na jiné subjekty (zadavatel, technik apod.). Při snižování rizika je nutné zahrnout do návrhu i nutné náklady na realizaci zmírnění rizika. V rámci dopravy může být cílem snížit počet nehod, které by mohly ohrozit lidské životy. [1][2]



Obrázek 3: Třípásmová metoda, zdroj: Použití principů funkční bezpečnosti u kolejových vozidel, Rýzmar [51]

Diagram na obrázku 3 nám ukazuje hodnoty, které definují hodnoty rizik. Dělíme rizika na zanedbatelná, přijatelná a nepřijímatelná. Zanedbatelná jsou bezvýznamná jen v případě, že jsme schopni jejich hodnoty udržet na tomto minimu. Na přijímatelná není potřeba vydávat opatření ke snížení. Pokud máme nepřijímatelná rizika a princip ALARP (As Low As Reasonably Possible) ho nedokáže snížit do přijímatelné oblasti je nutné riziko úplně odstranit. Při úspěšném snížení se riziko bude pohybovat pod přípustnou hodnotou a samotné riziko považujeme za přípustné.

4.2 KLASIFIKACE A IDENTIFIKACE RIZIK

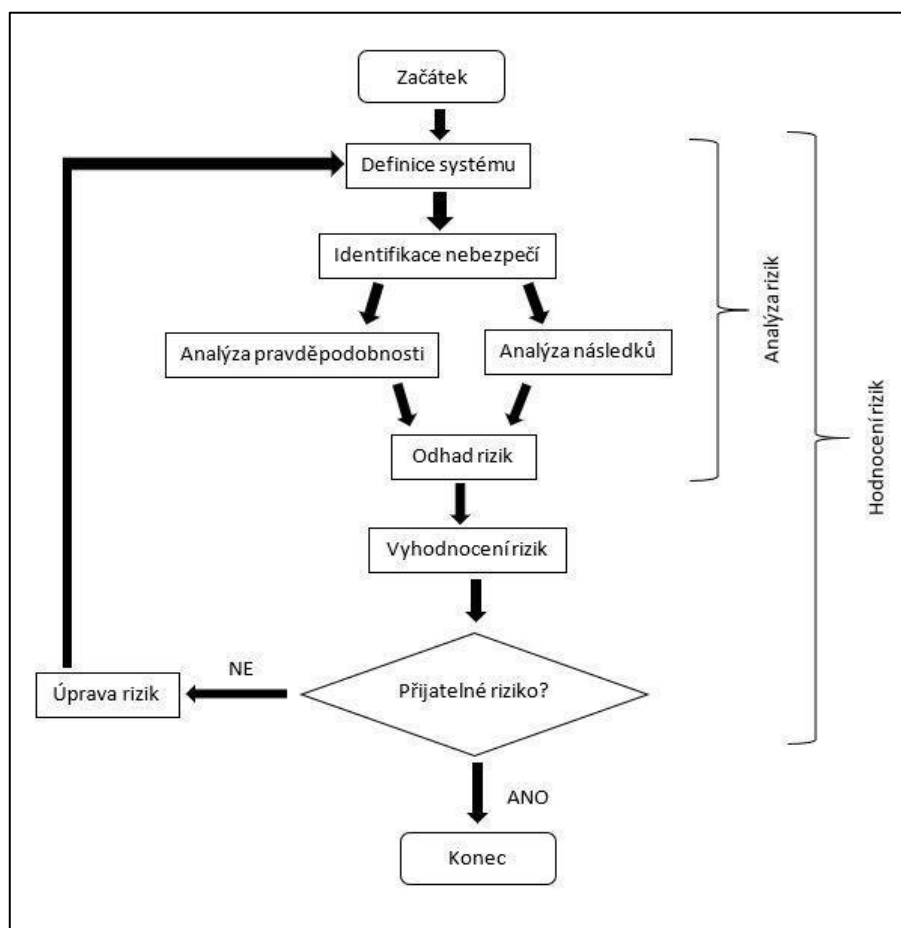
Můžeme rozlišovat rizika podle fáze, ve které vznikly: rizika ve fázi přípravy a realizace rizika, ve fázi provozu nebo podle jejich věcné náplně (např. výrobní, ekonomická, politická, enviromentální nebo spojená s lidskou činností). Fáze identifikace rizika patří k jedné z nejdůležitějších fází při analýze rizik. Při identifikaci je nutné zjistit co nejvíce rizikových faktorů, které by mohly mít jakýkoliv vliv na zkoumaný projekt. Před započítím identifikace jednotlivých faktorů je zapotřebí kvalitní dekompozice zkoumaných objektů. Je nutné si objekt rozdělit na několik menších objektů a nahlížet na ně postupně. Rozdělení nám umožní řešit možná rizika více do hloubky a díky tomu poskytnout kvalitní analýzu rizik. Při správné identifikaci je nutné si pokládat otázky ohledně faktorů (jaké by mohly ohrozit cíle projektu, jaké problémy mohou vzniknout, kdy, kde a jak rizika vzniknou, jak je možné je snížit apod.). Můžeme využít metodu kontrolního seznamu, pohovory s experty a jiné níže popsání metody. Při identifikaci je nutné sledovat výsledky pravidelně pro stanovení závažnosti rizika a při testování opatření. Monitorování stavu systému a včasná varování před selháním systému napomáhají k podpoře průběžné činnosti. Tato fáze patří k časově nejnáročnějším. [1][2]

4.3 HODNOCENÍ RIZIK

K hodnocení rizik dochází již v samém počátku systému, při jeho definici. Po analýze rizik vyhodnocujeme zjištěná rizika a porovnáváme je s kritériem přijatelnosti. Kontrolujeme, zda riziko nepřekračuje maximum přijatelné hodnoty očekávaného rizika.

Velké množství odhadů se vytváří na základě zkušeností nebo odborným odhadem. Musíme tedy počítat s tím, že se jedná pouze o odhady a zvážit porovnání dalších variant řešení a rizika v podobných systémech. Za podobný systém můžeme považovat systém s podobnými vstupy a modely. [1]

Obecný postup pro hodnocení rizik můžeme vidět na Obrázku 4.



Obrázek 4: Obecný postup hodnocení rizik, Zdroj: Hodnocení bezpečnosti a rizik silničních mostů a tunelů [3]

Pokud chceme stanovit významnost rizika, můžeme jako další možnost využít analýzu citlivosti. Tu můžeme využít, pokud lze modelovat závislost kritérií. Cílem této analýzy je zjistit, jak změny faktorů ovlivňují konkrétní kritéria. Faktory poté dělíme na méně důležité a na významné. Méně důležité vyvolávají pouze nepatrné změny, naopak významné vyvolávají značné změny. Analýzou citlivosti můžeme odkrýt jak pesimistické, tak optimistické hodnoty faktoru. K této analýze můžeme využívat scénáře, které do jisté míry respektují odlišnou výši nejistoty faktoru. Další možností hodnocení je matice hodnocení rizik, ta vychází z expertního hodnocení. Významnost rizik se zde popisuje pomocí dvou parametrů: pravděpodobnost výskytu rizika a intenzita negativního dopadu. Expertní hodnocení rizik patří ke kvalitativním hodnocením. [2][6]

Ověřuje se i maximálně přijatelná hodnota očekávaného ročního rizika a přijatelné rozmezí pro kumulativní pravděpodobnost sociálního rizika. U hodnocení rizik je doporučeno porovnávat různé varianty řešení nebo porovnat výsledky s jiným podobným systémem. U komparativních studií je ale nutné, aby se modely opíraly o stejné zjednodušující modely a obsahovaly podobné vstupní údaje. [3]

4.4 ANALÝZA NÁSLEDKŮ

Analýza následků je nedílnou součástí analýzy rizik. U tunelových staveb dělíme následky na: sociální, ekonomické a ekologické. Mezi sociální následky patří druhy obětí, které vznikly v rámci určité mimořádné situace (např. dopravní nehoda). Máme přímé oběti nehody, osoby vážně zraněné a osoby, které nejsou schopné včas uniknout. Ekonomické následky dělíme na rizika způsobená nepříznivými jevy a na následky rozhodnutí o úpravách tunelu s cílem zlepšit podmínky. Ekonomická rizika jsou nechtěné následky, zatímco druhý typ ekonomických nákladů je chtěný. Při analýze následků je potřeba všechny 3 podkategorie analyzovat v rámci stejné jednotky. Bývá to jeden z nejtěžších úkolů vzhledem k porovnávání ceny lidských životů, dopadů na životní prostředí a ekonomických ztrát. Pro zodpovědné činitele a širší veřejnost, v případě hodnocení stavby, může být takový postup nepřijatelný. Tato problematika je tedy velice složitá vzhledem k nutnosti stanovení přiměřené ceny, kterou je společnost připravena poskytnout na záchranu jednoho života. Za všeobecně akceptovatelnou metodiku lze považovat princip LQI (Life Quality Index), jehož cílem je usnadnit hodnocení a rozhodování o investicích na ochranu lidských životů v souladu se sociálními prioritami. Princip LQI vychází z délky života, výši HDP (Hrubý Domácí Produkt) a poměrem mezi pracovní dobou a volným časem. Hodnotu LQI pak spočítáme jako:

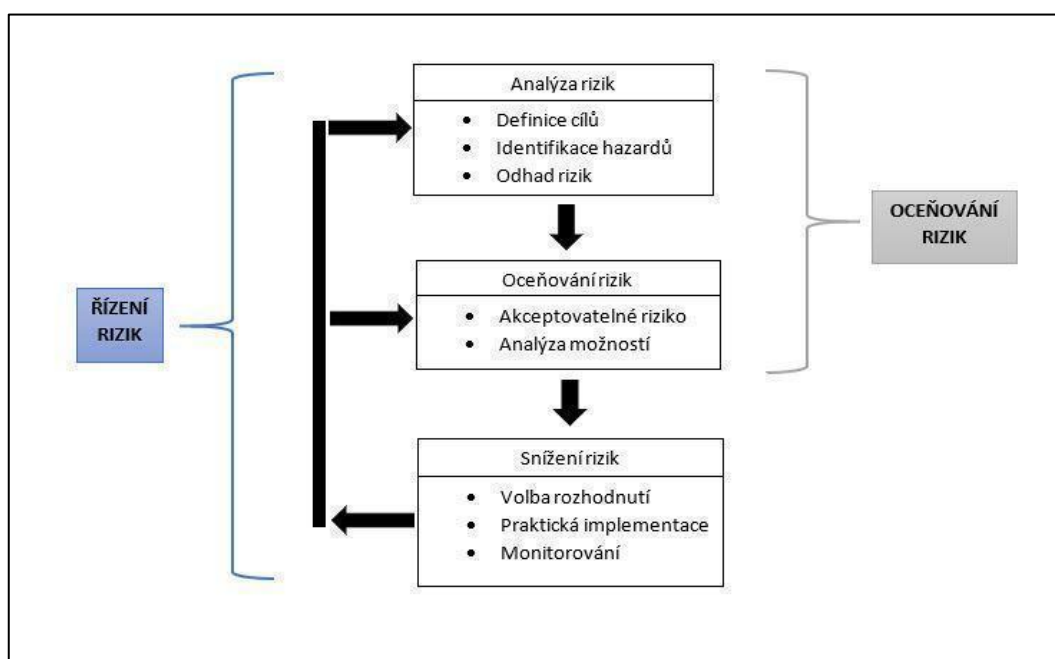
$$L(g, l) = g^q l$$

, kde g je podíl HDP pro snížení rizika, l je očekávaná délka života a q je podíl mezi prostředky na spotřebu a cenou zdravého života.

Pro kvalitní ohodnocení a optimalizaci rizik musíme vyčíslit následky poruch tunelu na základě pravděpodobnosti sociálních, ekonomických a ekologických ztrát a rozsahem závažnosti. Je nutné spočítat náklady na poruchu, ty zahrnují např. náklady na opravu, ekonomické ztráty (myšleno v širším měřítku od škod na vozidlech přes zpoždění a poruchy na objízdných trasách až po ekonomické ztráty podnikatelských subjektů), sociální následky a dopady na životní prostředí. Analýza pracuje i s možnostmi nepřímých následků, které vznikly důsledkem poruchy v jiné části systému. V rámci nákladů na poruchu umí počítat i se zbytkovou životností. Dalším krokem je modelování následků, kde musíme zahrnout chování konstrukce, míru škod, možná opatření, opravy, ztráty funkčnosti a škody na životním prostředí. [3]

4.5 ŘÍZENÍ RIZIK

Proces řízení rizik se skládá ze tří hlavních oblastí: analýza rizik, hodnocení rizik, plánování bezpečnostních opatření. Při řízení rizik postupujeme podle obrázku 5., který nám ukazuje kroky procesu řízení rizik. Na začátku je nutné jasně definovat cíle a omezení pro danou analýzu, potom identifikujeme nebezpečí. Míru podrobnosti zajistíme dostatečnou komunikací se zadavatelem. Následuje ocenění zjištěných rizik (kvantitativně nebo kvalitativně), které pak podrobíme analýze. Pracujeme s analýzou pravděpodobnosti a analýzou následků. K analýze využíváme níže zmíněné metody. V závěru je naším cílem odhadnout možná rizika a nutná opatření. [1][6][19]



Obrázek 5: Řízení rizik, zdroj: vlastní zpracování z TP 229 [19]

Hodnocení rizika pro tunel musí obsahovat sociální riziko porovnané se společensky přijatelným rizikem. Toto kritérium nám udává například minimální pravděpodobnost počtu smrtelných událostí na km za určité časové období. Pokud dojde k překročení pravděpodobnosti, kritérium není společensky akceptovatelné a musí se zvýšit bezpečnostní opatření v daném tunelu. Tato metoda se využívá u kvantitativní analýzy rizik. Analýza scénářů neřeší akceptovatelné riziko, ale zabývá se konkrétními událostmi na přesně stanovených místech, tudíž známe přesně vybavení tunelu, dopravní data apod. Tato metoda zajišťuje specifické možnosti ochrany přítomných osob. Na základě této analýzy může docházet k navrhování zlepšení bezpečnostního vybavení. [1] [3]

4.6 KVALITATIVNÍ METODY

Kvalitativní metody popisu problému využívají slovní popisy k popsání následků a pravděpodobností těchto následků. Tento typ metod nám pomáhá nalézt možná rizika, která poté můžeme dále a podrobněji zkoumat. Využíváme je také pokud nemáme k dispozici dostatečně množství numerických dat k využití kvantitativních metod, avšak musíme zajistit, že máme skutečná fakta. Hlavní roli v těchto metodách má rizikový analytik, který vytváří způsoby hodnocení následků a dopadů, tím udává rizika. Metody jsou založeny na různých principech: např. hodnocení expertů a jiných specialistů či dotazníky a diskuze. Některé z metod jsou popsány níže. Je možné také využívat matice hodnocení rizik s ohodnocením pravděpodobností výskytu rizika a intenzity negativního dopadu pomocí stupnice 1 až 5. Můžeme tedy říct, že čím vyšší je pravděpodobnost výskytu a intenzita negativního dopadu, tím je riziko významnější. Podle významnosti můžeme dále rizika dělit do kategorií. Existuje také semikvantitativní hodnocení, kdy matice hodnocení rizik obsahuje číselné vyjádření významnosti jednotlivých rizik, která vznikla expertní metodou. Hodnocení významnosti rizika pak spočítáme jako součin ohodnocení pravděpodobnosti jeho výskytu a ohodnocení negativního dopadu konkrétního rizika. [1]

4.6.1 Expertní hodnocení

Expertní hodnocení (Expert judgement) hodnotí určité přesně dané problémy pomocí experta nebo skupiny expertů. Jejich schopnosti formulovat závěry, veřejné mínění a znalosti udávají kvalitu výsledku. Nejčastěji jsou výstupy v relativních jednotkách, protože dochází k porovnávání něčeho nového se systémy s již známými vlastnostmi. Expertem se volí někdo s relevantními zkušenostmi a dostatečnými znalostmi konkrétní problematiky. Velice často se volí neovlivněný člověk mimo projektový tým, avšak mezi expertní hodnocení můžeme zařadit i hodnocení zákazníků, zadavatelů projektu, sponzorů či potenciálních dodavatelů. Závěr může být jak kvalitativní, tak semikvantitativní. Toto hodnocení se využívá, pokud nemáme dostatečné statistické údaje nebo nám chybí data. Metoda nemá jasně stanovená pravidla a postupy. Je přínosné ji využívat na začátku hodnocení, protože dokáže upozornit na možné problémy. Při hodnocení se nejprve zaměříme na zpracování seznamu otázek, který budeme poskytovat vybraným expertům. Z výstupů od expertů se vytvoří závěr, který se rozešle všem zúčastněným pro potvrzení výsledků. Druhý výstup je už finální hodnocení projektu. K expertnímu hodnocení můžeme využívat historická data podobného projektu, brainstorming (pokud máme více expertů a méně času) nebo pozvat na poradou opravdu kvalifikovanou osobu se zkušenostmi. Porada pak může probíhat formou otázek na jednoho člověka. [1][9]

Využívají se různé metody pravděpodobnostního rozdělení významných rizikových faktorů. Rovnoměrné rozdělení, kdy předpokládáme, že každá hodnota v našem intervalu (podmínkou je znát minimum a maximum) má stejnou pravděpodobnost výskytu. Nevýhodou této metody je poměrně vysoká míra nejistoty. Následnou analýzou citlivosti můžeme stanovit významné rizikové faktory. Často používané rozdělení je trojúhelníkové, kdy opět známe minimum a maximum a k tomu ještě hodnotu, která je nejvíce pravděpodobná. Pravděpodobnosti jednotlivých hodnot potom lineárně klesají od nejpravděpodobnější hodnoty po krajní hodnoty. Trojúhelníkové rozdělení nemá příliš velký teoretický základ a závisí spíše na geometrii, kdy se řeší, jak jsou vzdálené krajní body od nejpravděpodobnější hodnoty. Nevýhodou je, že některé obsáhlejší intervaly mohou v krajních mezích padat až do záporných hodnot, což v rámci nějakých projektů není možné. Dalším typem je BetaPERT rozdělení, to je lepší druh trojúhelníkového rozdělení. U tohoto rozdělení máme větší váhu přiřazenou k nejvíce pravděpodobné hodnotě a u ní je větší koncentrace hodnot. Pravděpodobnost ke krajním hodnotám poté klesá rychleji než lineárně. Rozdělení definované uživatelem se využívá v případě, že žádné z výše zmíněných nelze použít. Je nutné si definovat hodnoty, jejich pravděpodobnosti a váhy, intervaly, ve kterých se pohybujeme a je také možné zvolit rostoucí nebo klesající váhy. Váhy výskytu se pak přeměňují na pravděpodobnosti. [2]

Pokud se experti v rámci rozdělení pravděpodobnosti neshodnou a máme dva odlišné výstupy, je nutné do nejistoty zahrnout oba. Není možné tyto výstupy zprůměrovat, jelikož vznikne výstup, který pravděpodobně nemůže nastat. [2]

4.6.2 Kontrolní seznam

Kontrolní seznam (Check List) slouží jako nástroj pro hodnocení jasně daného problému. Jedná se o velice jednoduchou techniku, která vychází z praxe, kdy se vytváří seznam kontrolních otázek, který je předem připravený. Na jeho vytvoření se podílí více zúčastněných osob. Nemusí jít pouze o experty, ale mohou se zapojit i správci či projektanti. Kontrolní otázky vznikají z minimálních standardů bezpečnosti, dopadů na životní prostředí nebo možných rizik. Tento seznam dokáže upozornit na rizika, která vzniknou odchylkami od standardů. Pokud registrujeme z kontrolního seznamu nějaké riziko, je cílem přijít s opatřením, které toto riziko sníží na minimum. Výstupem kontrolního seznamu je tedy výčet doporučení a opatření k zamezení nalezených rizik. Tato metoda se může využít i při nalezení vzniku již existujících problémů nebo pro potvrzení správného fungování jednotlivých komponent systému a testování postupů lidských činitelů. [1][6][10][11]

4.6.3 “Co-když” analýza

“Co-když” analýza (What-If analysis) je analytická technika, která pomáhá při rozhodování a řízení rizik. Určuje, jak je možné najít dopady nežádoucích provozních situací a slabá místa. Cílem analýzy je zjistit chování komplexního systému. Metoda nemá jasně danou strukturu ani žádné formalizované postupy, spíše se zakládá na formě diskuze specialistů. Tu nejčastěji vede rizikový analytik. Tento druh analýzy je díky tomu velice flexibilní a dá se přizpůsobit konkrétním situacím. Při analýze se musí jasně specifikovat oblast řešeného problému a cíle problematiky, následně se vytváří soubory otázek: “Co se stane když..?,” s odpověďmi. Například v rámci tunelů se skupina analytiků snaží vytvořit seznam scénářů událostí, které by mohly v tunelu nastat. Následně se každé události přiřadí hodnota a specifikují se její následky. Na závěr analýzy se navrhuje možná řešení či opatření, aby došlo k minimalizování rizika. Díky zpracovávání a porovnávání různých scénářů můžeme snížit potenciální riziko tím, že porozumíme, co ho může způsobit a snažit se těmito scénářům vyhnout. Tento způsob analýzy se dá srovnat s expertním hodnocením, jelikož opět dochází k brainstormingu několika expertů nad konkrétními scénáři a vyhodnocením možných dopadů. [1][12][13][14][15]

4.6.4 Analýza statistických dat

Analýza statistických dat zahrnuje sběr, interpretaci a využití dat. Při statistické analýze se na datech vytváří různé procesy s cílem získat určité výstupy a výsledky. Dělíme data na spojitá a diskrétní, spojitá data jsou ta, která mohou nabývat všech hodnot z konečného nebo nekonečného intervalu, tzn. mohou se měnit spojitě bez skoků. Diskrétní data mohou nabývat pouze jednotlivých hodnot (celých čísel) z konečného nebo nekonečného intervalu, tzn. mohou se měnit jen po skocích. V rámci analýzy můžeme například počítat průměr, odchylky od normálu, regresi či testovat hypotézy. V tunelu se může využívat u technologií, které jsou schopny zaznamenávat určité soubory dat. Může se jednat o data dopravního typu, fyzikální data a databáze všech mimořádných událostí. Data vyprodukovaná těmito technologiemi slouží pro analýzu četností událostí i následků pro konkrétní tunel. Z dlouhodobých dat můžeme spočítat například četnosti jednotlivých událostí a díky tomu je možné se zaměřit na případné plánování nutných oprav pro zamezení poruchy konkrétní technologie. [1][17]

4.6.5 Analýza možných poruch a jejich následků

Analýza příčin a následků poruch (FMEA – Failure Modes and Effect Analysis) má najít místa vzniku poruch nebo vady systému. Nejprve probíhá porada expertů formou brainstormingu. V této diskuzi se identifikují a popisují poruchy, které mohou ovlivnit funkci systému nebo kvalitu a bezpečnost. Také se řeší, co se může stát, proč se to stane a jaké jsou následky případné poruchy. Poté se každé poruše přiřazuje odhad rizika na relativní stupnici. Stupnice nám určuje závažnost poruchy. Cílem je opravit procesy a umět vyhodnotit poruchovost ještě, než porucha vznikne a spustí nechtěný řetězec událostí. Pro možné využití této metody je potřeba, aby tým perfektně znal zkoumaný systém a mohl namodelovat případné procesy. Pro tunely existuje modifikace této analýzy a to **SAFMEA** (Statistical Failure Modes and Effect Analysis), ta využívá statistické hodnocení souboru expertních odpovědí. V rámci SAFMEA řídí proces rizikový analytik, čím početnější je jeho tým expertů (minimum 5), tím více roste vypovídající schopnost výsledku. V první fázi dochází k určení aspektu, který se v rámci analýzy bude řešit a vytipování segmentů, tzn. určit možná místa výskytu rizika. V další fázi jasně definují rizikové faktory, které budou dále hodnotit z hlediska závažnosti a pravděpodobnosti vzniku události.

Obě numerické hodnoty vybíráme z logické celočíselné stupnice hodnot, které si předem stanovíme. Každá událost má vypočítaný index RPN , tento index udává relativní hodnotu rizika pomocí vzorce:

$$RPN_{jk} = Sv_{jk} \times Lk_{jk}$$

, kde Sv_{jk} nám udává závažnost události a Lk_{jk} pravděpodobnosti vzniku události.

Pro každý rizikový faktor je nutné spočítat střední hodnotu $mRPN$ podle vzorce:

$$mRPN_j = \frac{\sum_{k=1}^{n_e} RPN_{jk}}{n_e}$$

, kde n_e je počet expertních hodnot v daném řádku.

Můžeme brát v potaz všechny rizikové faktory a stanovit individuální index RPN_j , kdy součtem všech j hodnot se získá sumární index RPN_{sum} . Tento druh indexu používáme pouze pro porovnávání jeho změny při použití bezpečnostních úprav systému. Nebo mezi sebou můžeme porovnávat hodnoty různých událostí (požár, nehoda, selhání). Tato metoda se v praxi využívá více. Výstupem metody SAFMEA je tabulka s výčtem možných rizikových faktorů. Každému faktoru jsou přiděleny dvě číselné hodnoty: závažnost události Sv a pravděpodobnost vzniku události Lk . V případech, že si rizikový expert či jiný expert není jistý, jak správně ohodnotit nějaký rizikový faktor, je doporučeno nevyplnit kolonku vůbec a nechat toto rozhodnutí na expertovi, který dané problematice rozumí. Pro každý řádek tabulky vyhodnotíme index RPN . Z každého řádku můžeme vypočítat směrodatnou odchylku $sRPN_j$, ta se počítá jen v případě, že se analýzy zúčastnilo více než pět expertů.

$$sRPN_j = \sqrt{\frac{1}{n_e - 1} \sum_k (RPN_{jk} - mRPN_j)^2}$$

Společně se směrodatnou odchylkou je dobré určit odhad kvantilu (orientační hodnotu, která udává představu o náhodnosti indexu) rozdělení indexu $qRPN$:

$$qRPN_j = mRPN_j + sRPN_j$$

V samém závěru musí rizikový analytik individuálně projít všechny rizikové faktory a zaměřit se na ty, které sice mají vysokou závažnost S_v , ale nízkou pravděpodobnost vzniku události L_k , protože z matematického výpočtu indexu RPN nemusí správně vypovídat o závažnosti událostí, pokud jejich pravděpodobnost vzniku je nízká. V poslední části se sepisují doporučení a udává se seznam faktorů podle významu předchozího vyhodnocení. Faktory poté dělíme na rizika přijatelná, podmíněčně přijatá a nepřijatelná. [1][17][19]

4.7 DETERMINISTICKÉ ANALÝZY RIZIK

Tento typ analýzy je založen na myšlence, že následky mají své příčiny a pravděpodobnosti vzniku události, která je možná nebo nemožná. Nezávisle na četnosti určité události vytváříme havarijní scénář, kdy předpokládáme s nejhorším možným scénářem. Pokud jsme vytvořili opatření pro nejhorší scénář, tak existuje dostatečné opatření pro méně závažné scénáře v rámci této konkrétní události. [50]

4.7.1 Analýza scénářů

Analýza scénářů (Scenario Analysis) je kvantitativní metodou, která hodnotí následky událostí. Vždy jde o konkrétní událost na jasně daném místě a v jasně daný čas. Analýza popisuje vývoj a reakce všech stavebních, technologických a lidských činitelů na tuto událost. Událost je vždy detailně popsána, modelována a kalibruje se skutečností. Snahou je přijít na možnosti záchrany osob a majetku. Metoda se nazývá Capita. Evakuace je čas, který zahrnuje dobu zjištění události, reakci a dobu pro únik. Tento čas by měl být dostatečně dlouhý na to, aby se osoba dostala na bezpečné místo. Lidský faktor do této metody vnáší nepředvídatelné chování. Evakuační modely jsou simulace chování cestujících od okamžiku, kdy si při události uvědomí, že jsou v nebezpečí, až po chvíli, kdy se dostanou do bezpečí. Moderní simulace dokážou rozlišit rychlost i rozměry jedinců, tím dokáží lépe hodnotit a popisovat proces evakuace. [1][23]

Zásadním prvkem této metody je myšlenka, že první minuty jsou pro únik do bezpečí zásadní, tzn. čas před příjezdem IZS. Důležité je tedy zkrátit evakuační dobu na minimum. Ta záleží i na vzdálenostech únikových východů či včasné informovanosti lidí. Metodu je možné doplnit o evakuační model a model fyzikálních jevů. Model fyzikálních jevů je matematický model fyzikálních jevů, který popisuje dynamický vývoj důsledků událostí. U tohoto modelu se využívají analytické a numerické metody. [1][23][19]

K vývoji analýzy scénářů vedly neúspěchy strategických rozhodnutí, které byly založeny na jedné představě o budoucnosti a dopadu tohoto rozhodnutí. Scénáře jsou tedy obrazy budoucnosti, které vychází z množin vzájemně propojených faktorů kvalitativní i kvantitativní povahy. Scénáře většinou nepovažujeme za prognózy, ale jako něco, co nám umožní lépe pochopit možné trendy vývoje významných faktorů a vazeb mezi nimi. [19]

Kvalitativní scénáře, obsahující nejčastěji slovní popisy, tvoří dlouhodobější představu vývoje. Cílem je lepší pochopení problematiky a rozšíření okruhu myšlení zúčastněným osobám.

Kvantitativní scénáře vznikají vzájemně konzistentní kombinací hodnot klíčových faktorů rizika a slouží ke stanovení dopadů, hodnocení a výběru rizikových rozhodnutí. Pravděpodobnostní stromy zde slouží jako nástroj zobrazení scénářů. Ty se však dají využít u menšího počtu diskretních faktorů rizik pro dostatečnou přehlednost. Kvantitativní scénáře se tvoří čtyřmi kroky: výběr faktorů pro tvorbu scénářů, stanovení hodnot faktorů, tvorba scénářů a ověřování konzistence a stanovení pravděpodobnosti scénářů. První krok (výběr faktorů) patří k nejdůležitějším, protože značně ovlivňuje kvalitu a přínosy využití scénářů při stanovení dopadů. Nevýhodou je, že je nutné vybrat pouze 2-3 nejvýznamnější faktory, aby se omezil počet scénářů, které vzniknou a metoda tak byla co nejefektivnější. Faktory vybíráme pomocí analýzy citlivosti nebo matice hodnocení rizik. Při stanovení hodnot faktorů je nutné rozlišit faktory diskretní a spojité. Spojité faktory jsou v rámci této části těžší na zpracování, kdy se často musí pomocí aproximace nahradit spojité faktory diskretními s menším počtem hodnot. Při tvorbě scénářů využíváme matici scénářů nebo pravděpodobnostní stromy pro snazší orientaci. V rámci tvorby scénářů je nutné ověřit konzistenci, tzn. zjistit, zda kombinace hodnot faktorů je logická a podložená fakty. Případné nekonzistentní scénáře je potřeba za souborů vyloučit. Je vhodné zajistit reprezentativnost scénářů, tzn. vybrat faktory a reprezentativní hodnoty, které mohou nahradit určité intervaly spojitých faktorů. Cílem je mít soubor scénářů schopný pokrýt většinu možných výsledků. Základem stanovení pravděpodobnosti scénáře je rozdělení pravděpodobnosti a je nutné si určit kořen stromu (uzel ležící úplně vlevo schématu). Poté postupujeme doprava přes podmíněné pravděpodobnosti až dosáhneme výsledku, který leží úplně vpravo schématu. Pravděpodobnost každého scénáře je určena součinem pravděpodobností hodnot faktorů ležící na stejné větvi stromu. Nejčastěji se využívá subjektivní rozdělení pravděpodobnosti, to bývají názory expertů vycházející např. z jeho zkušeností. Výhodou scénářů je možnost respektovat nejistotu klíčových faktorů (pozitivních i negativních). Uplatňují se i při strategickém rozhodování v rámci tvorby strategických variant a analýzy rizik a hodnocení. To nám značně napomáhá při hledání vhodných opatření pro snížení rizikovitosti a tvorbě systému včasného varování. Scénáře můžeme využít v různých oblastech a je možné je využívat s jinými nástroji (např. simulace Monte Carlo, operační analýza, matematické programování apod.). Nevýhodou je diskretní charakter hodnot a omezený počet faktorů, což oslabuje integrace scénářů se simulací Monte Carlo. K úspěšnosti scénářů je nutné mít kvalitní informace z více zdrojů, respektovat interní konzistenci, realističnost a konfliktní požadavky reprezentativnosti, spoléhat se na logické úvahy a počítat s možnostmi aktivního ovlivnění budoucnosti. [2]

4.7.2 Simulace Monte Carlo

Simulace Monte Carlo je založena na generování velkého počtu scénářů. Využívá se u projektu, kde nejde předem požadovaný výsledek spočítat, a je tedy potřeba simulovat postup pomocí výpočetní techniky. Je skoro jisté, že skutečné hodnoty se budou od předpokladu lišit, je však důležité zjistit, jaký vliv to bude mít na náš cíl. V rámci této formulace definujeme rizika bodových odhadů nebo intervalu viz kapitola. Jednou z nejdůležitějších částí modelování a simulace jsou influenční diagramy, které slouží k tomu, aby byl model správně pochopen. Je nutné správně definovat otázky, na které má model odpovídat. Prvním krokem je identifikace faktorů a stanovení nutných výstupů. Dále vytvoříme tabulky s hodnotami rizikových faktorů, ze kterých poté bude simulace Monte Carlo vycházet. Všechny rizikové faktory musí být číselné hodnoty. Z těchto dat vzniká matematický model, ze kterého můžeme určit klíčové faktory rizika a pomocí analýzy citlivosti nalézt ty, které značně ovlivňují výstupy. V dalším kroku stanovujeme rozdělení pravděpodobností klíčových faktorů rizika. Rozdělení pravděpodobností u diskrétních faktorů rizika mají tabulkový tvar. U faktorů musíme zvolit typ rozdělení, to záleží na tom, zda máme nebo nemáme historická data určitého faktoru. Pokud tyto data nemáme využíváme intervalové odhady vstupní veličiny. Poté je nutné stanovit statistické závislosti faktorů rizika, kde řešíme, zda jsou na sobě některé faktory závislé a není možné je generovat samostatně. V posledním kroku probíhá samotná simulace s využitím počítačového programu. Jde o proces, kdy se tvoří simulační kroky. Počet simulačních kroků si volíme vždy sami. Každý krok generuje možné hodnoty rizikových faktorů a umí propočítat výstupní kritéria. Výsledek simulace je v grafické i číselné podobě, z nich můžeme určit například ztráty projektu, pravděpodobnosti klíčových faktorů rizika apod. Výhodou této simulace je nutnost rozdělit objekt na menší subjekty, a tím zjišťovat rizikové faktory, toto vede k hlubšímu poznání rizikové stránky jednotlivých objektů. Za nevýhodu může být považována náročnost realizace této simulace, a také to, že nejvýznamnější faktory rizika mohou být nepředvídatelné (jelikož vychází z hodnocení současnosti a minulosti). Simulace tedy může způsobit nesprávnou kvantifikaci rizik. U scénářů se simulace využívá v situacích s malým počtem faktorů rizika, často s diskrétním charakterem. V tomto případě je nutné spojitě faktory rizik nahradit diskrétními. Tímto zvyšujeme rozsah scénářů (menší přehlednost) a snižujeme věrnost zobrazení. Simulace Monte Carlo umí zvýšit přehlednost a srozumitelnost scénářů v pravděpodobnostních stromech i pro faktory rizika se spojitým charakterem. Simulaci lze využít i u rozhodovacích stromů, kdy jsme nejistoty veličin a jejich dopady na střední hodnoty zjišťovali pomocí analýzy citlivosti. Simulace pomáhá lépe respektovat nejistoty veličin se spojitým nebo diskrétním charakterem. [2]

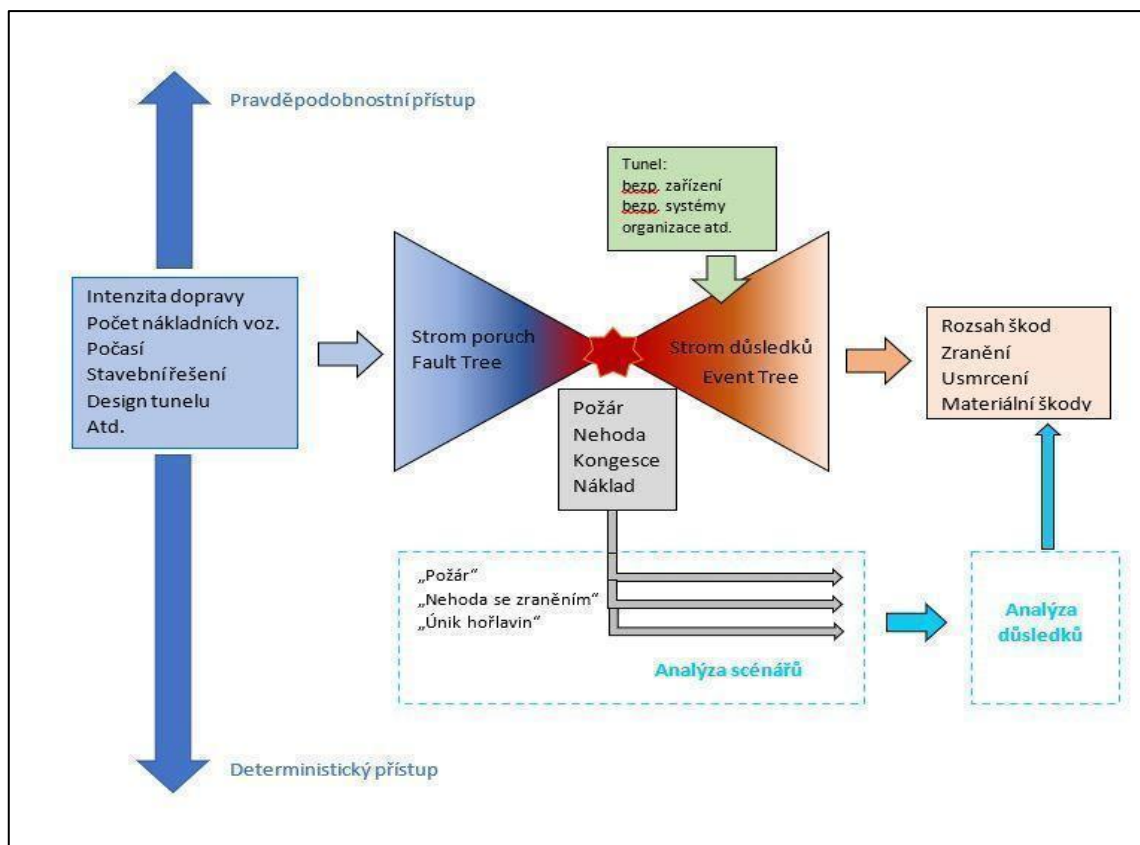
4.8 KVANTITATIVNÍ METODY

Kvantitativní metody pracují s pravděpodobnostní analýzou a určení závažnosti scénářů. Cílem je tedy vyčíslit pravděpodobnost a možný rozměr rizika. Je nutné identifikovat všechny zdroje rizika a přiřadit jim správnou váhu. [50]

4.8.1 TECHNIKY ZALOŽENÉ NA POUŽITÍ STROMOVÝCH DIAGRAMŮ

Pokud u techniky založené na použití stromových diagramů využíváme kvalitní a reálné statistické podklady, je analýza velice dobře kontrolovatelná. V porovnání s kvalitativními metodami je více časově i finančně náročná, ale o to podrobnější může být. Mezi výhody rozhodovacích stromů patří možnost respektování dílčích rozhodovacích procesů v závislosti na čase, umí určit optimální strategii rozhodnutí v jednotlivých etapách a je přehledný. Společně s analýzou citlivosti je možné posoudit robustnost hodnocení variant a identifikovat klíčová opatření a snížit rizika. Mezi nevýhody patří jednokriteriální charakter stromů a složitost stanovení optimální strategie minimalizace nebo maximalizace střední hodnoty kritéria. [19]

Analýza příčin a důsledků (Cause-Consequences Analysis) je analytická technika využívaná v risk managementu. Pomáhá nám lépe pochopit poruchy tím, že stanovíme pravděpodobnost této poruchy. Metoda také zahrnuje identifikaci potenciálních příčin poruch konkrétních částí systému, ze kterých následně vyvozuje možné důsledky a řetězové reakce. Řetězovými reakcemi se myslí další poruchy nebo změny v normálním provozu systému. Po objevení všech možných příčin a následků nám analýza může pomáhat identifikovat systémové poruchy již v jejich počátku. Je nutné si uvědomit, že závažnější události nevznikají samy od sebe. Většinou jim předchází drobnější události, které mohou být tvořeny i nepatrnými změnami v normálním provozu. Ty se pak mohou šířit systémem podle několika scénářů a způsobit různé následky. Tento model hodnocení rizika nazýváme motýlkový model (bow tie model) a můžeme ho vidět na následující stránce (obrázek 6).



Obrázek 6: Motýlkový model (Bow tie model), zdroj: vlastní zpracování z TP229

Na levé straně vidíme možné příčiny poruchy (počasí, stavební řešení, intenzita dopravy, podíl nákladních vozidel). Levá polovina motýlku nám udává poruchy, které skončí nežádoucí událostí (požár, nehoda, kongesce, porušení nákladu). Na pravé straně už pracujeme s konkrétní nežádoucí událostí. Získáváme informace o stavu důsledků a fungování bezpečnostních zařízení tunelu. Mezi to řadíme i jednotlivé činnosti tunelových technologií. Na pravé straně pak vidíme výstup jako rozsah škod, které nežádoucí událost způsobila. **Analýza stromu poruch (FTA – Fault Tree Analysis)** využívá deduktivní logiku a pracuje s pravděpodobnostmi. Metoda zahrnuje logický vývoj událostí postihující chyby systémů, ale i lidské chyby. Stromový diagram popisuje vztah mezi událostí a příčinou jejího vzniku. Tato logika dokáže pracovat se zpětnými úvahami, kdy známe výslednou událost a zpětně hledáme příčiny této události. Do FTA zahrnuje všechny uzly, které mohou ovlivnit četnost událostí. Například diagram větvíme podle druhu provozu (jednosměrná a obousměrný), podle intenzity vozidel, podle délky tunelu nebo podílu nákladních vozidel. **Analýza stromu událostí (ETA – Event Tree Analysis)** využívá induktivní logiku, ta hodnotí možné následky událostí. Analýza je založena na tom, že dochází ke sledování události od samého počátku přes všechny sekvence události. Průběh procesu má vždy dvě možnosti – příznivé a nepříznivé. Jednotlivým uzlům ve stromovém diagramu jsou přiřazeny podmíněné pravděpodobnosti scénáře (reakce dispečera, činnost ventilace apod.). Diagram obsahuje i četnost pro různé druhy podmínek.

Výstupem je seznam událostí, které vznikly různou posloupností ve stromovém diagramu. Nevýhodou této metody je to, že neobsahují časovou dimenzi, ale jen časové statisticky nepodložené výpočty expertů. Tyto časové odhady jsou postupem času upřesňovány. [20][19][21][22]

4.9 OSTATNÍ METODY

4.9.1 Analýza nákladů a přínosů

Analýza nákladů a přínosů (Cost-benefit analysis) pomáhá při hodnocení investičních projektů. Jedná se o metodický postup, který porovnává náklady a výnosy veřejného projektu. Umí vypočítat potřebné náklady na realizaci daného projektu. Dokáže určit výhody a společenské přínosy projektu v rámci státu, města, obce nebo obyvatel. Tyto výsledky pak přepočítá na peněžní jednotky. Díky finančnímu ohodnocení je jednodušší si spočítat potřebnou počáteční investici. Cost-benefit analýza ve výsledku vydá několik standardních ukazatelů (IRR, ARR, NPV, Benefit-cost ratio). Tyto ukazatele nám pomáhají při porovnávání několika projektů. Analýza dokáže pracovat s více cíli, tzn. počítá s několika možnostmi vývoje projektu. Cíle projektu mohou být vzájemně v konfliktu (např. ulehčíme stavbou tunelu v dané lokalitě ostatním komunikacím, ale zvýšíme hluk v oblasti vjezdu a výjezdu do/z tunelu). Výsledek analýzy poslouží při rozhodování, zda projekt zahájit. Pokud je projekt částečně dotován je v počátku kontrolována jeho finanční udržitelnost, pokud není úspěšná, dotace může být odebrána. Analýza proto kromě počáteční investice do nákladů na realizaci zahrnuje ještě náklady na provoz projektu. Dnes se tato analýza může přidávat k žádosti o dotaci v EU (Evropská Unie), pro potvrzení finanční udržitelnosti projektu. EU využívá svou metodiku, ta se skládá z několika kroků: analýzy souvislosti a definicí cílů, identifikací projektu, studií proveditelnosti, finanční a ekonomickou analýzou, analýzou citlivosti a analýzou rizik. V rámci zaměření na tunely slouží pro budoucí správce a provozovatele tunelu. [7][8]

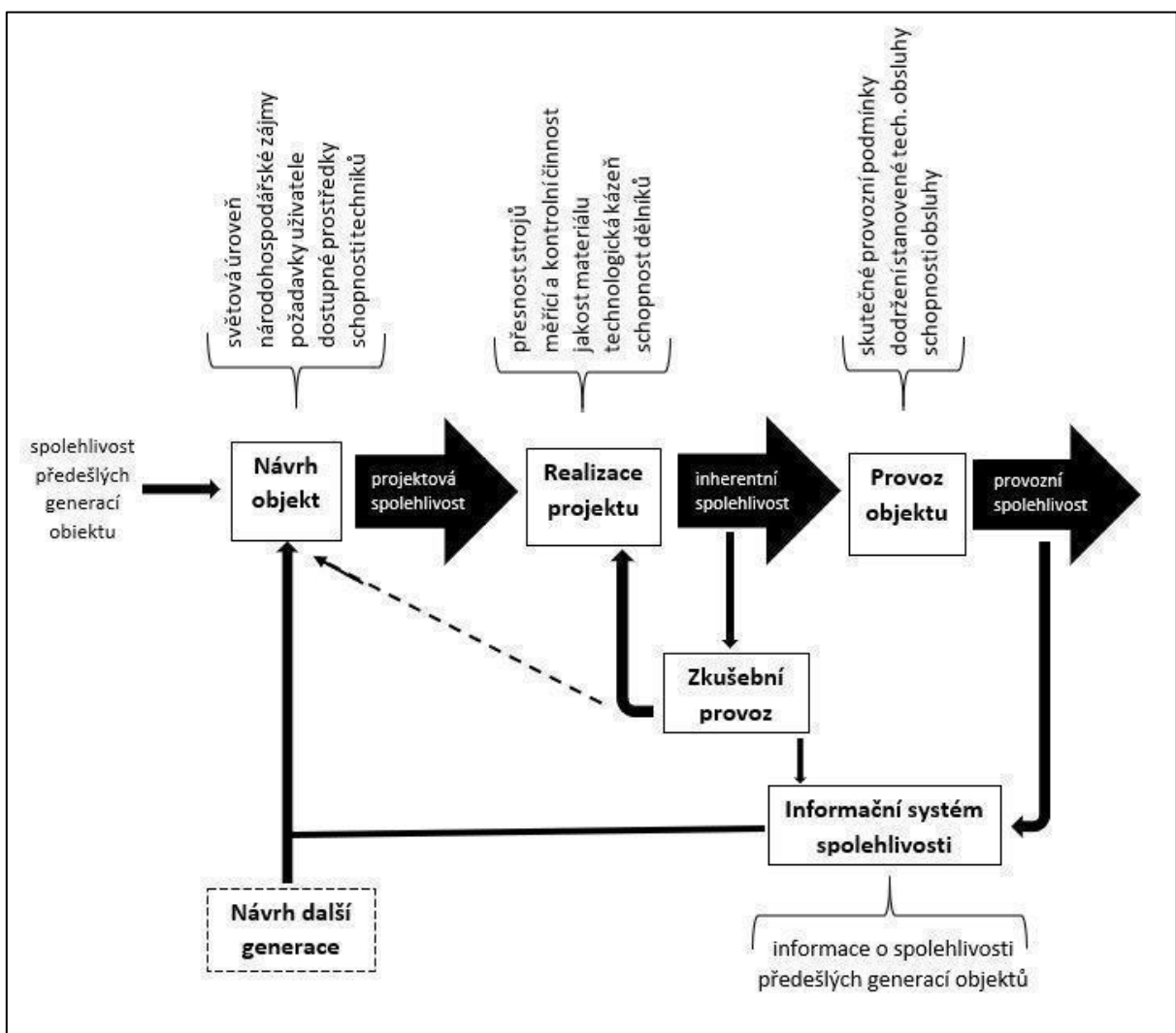
5 SPOLEHLIVOSTNÍ MODELY

Spolehlivost je termín pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují, tj. bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby. Dle normy ČSN ISO 84022 a ČSN IEC 50 je to vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených podmínek. Můžeme jí také chápat jako míru pravděpodobnosti, že po jistou dobu se systémové funkce nebudou odchylovat od požadované hodnoty více než o dovolené odchylky. Pojem spolehlivost bývá často spojován s jakostí (ČSN ISO 8402), to je souhrn znaků entity, které ovlivňují schopnost uspokojovat stanovené nebo předpokládané potřeby (entitou se rozumí výrobek, technické zařízení, služba atd.). Spolehlivostní modely se vytváří již v samém počátku navrhování systému, aby se pomocí analýzy spolehlivosti dokázalo předejít poruchám způsobených nespolehlivostí systému. K tomuto nám slouží spolehlivostní ukazatele a různé metody. [37][38]

Spolehlivost jako taková se skládá z několika vlastností: bezpečnost, bezporuchovost, životnost, udržovatelnost, pohotovost, zajištěnost údržby a skladovatelnost. Ukazatel spolehlivosti je poté kvantitativní vyjádření těchto vlastností. Každá část systému prochází životním cyklem, který se skládá ze 3 částí a každá má vlastní spolehlivost. První je projektová spolehlivost, ta se řeší při návrhu systému. Je zde snaha skloubit danou míru spolehlivosti s minimem nákladů. Ve druhé části máme inherentní spolehlivost, která se popisuje v rámci realizace systému. Jedná se o spolehlivost, která vyjadřuje možnosti správného fungování systému, ale nepočítá s proměnlivostí provozních podmínek a pracuje s „ideálním“ prostředím. Po uvedení výrobku do provozu se inherentní spolehlivost změní na poslední spolehlivost a to provozní. V rámci této spolehlivosti se počítá s proměnlivostí podmínek (špatné zacházení obsluhy, příliš namáhané technologie apod). Projektová i inherentní spolehlivost počítá s plánem údržby, kontrol a školení, ten se však v rámci provozní spolehlivosti často mění. Za správný chod zodpovídá jmenovaný inženýr, který zajišťuje včasné opravy a hlídá kvalitu a bezpečnost systému. Etapy spolehlivosti můžete vidět na obrázku 7. [37][39]

Při hodnocení spolehlivosti systému dělíme systém na tři významné struktury (technická, funkční a informační). Organizační struktura se využívá při posuzování vlivu lidského činitele na spolehlivost systému. V rámci spolehlivostní analýzy se zkoumají jednotlivé struktury už v etapě navrhování. Výpočet spolehlivosti technické struktury (měřící a řídicí prvky, ochrana, signalizace apod.) je jeden z nejrozšířenějších. Výpočty získané v etapě návrhu mají pouze informativní a predikční charakter, ale umožňují navrhovat opatření ke zvýšení spolehlivosti.

Pro kvantitativní výpočet ukazatelů spolehlivosti využíváme metodu strukturální spolehlivosti, která umožňuje stanovit spolehlivostní chování systému pro známé vlastnosti prvků. U systému dělíme poruchy na krátkodobé narušení provozuschopnosti, kdy porucha vymizí samovolně a na stálé narušení provozuschopnosti, kdy je třeba odstranit poruchu nápravnou údržbou nebo odstraněním následků. Je nutné také pracovat s požadovanými hodnotami spolehlivostních ukazatelů. Mohou být určeny legislativními předpisy (ekologické systémy, jaderná energetika apod.), z ekonomických analýz (běžné průmyslové účely), kdy náklady na vývoj, projekt, výrobu a provoz by měly být optimální. Spolehlivostní model tedy slouží k predikčním výpočtům ukazatelů spolehlivosti a vyjadřuje vztah mezi definovaným popisem struktury systému a spolehlivostními vlastnostmi systému v daných podmínkách použití. Na problematiku spolehlivosti umělých systému nahlížíme ze čtyř hlavních hledisek: návrh a konstrukce, analýza spolehlivosti existujícího systému, spolehlivost interakce mezi umělými systémy a lidským činitelem a posledním hlediskem jsou doporučení a normy. [34]



Obrázek 7: Etapy spolehlivosti v průběhu životního cyklu, zdroj: Spolehlivost a diagnostika (Vrožina. David) [39]

5.1 SPOLEHLIVOSTNÍ UKAZATELE

Spolehlivostní ukazatele jsou vyjadřovány pomocí pravděpodobností, jelikož jejich charakter je náhodný. Mezi nejrozšířenější ukazatele patří pravděpodobnost poruchy, intenzita poruchy, pravděpodobnost bezporuchového provozu apod. Při výpočtech spolehlivostních ukazatelů musíme rozlišovat objekty opravované a neopravované. Opravované jsou ty, u kterých je porucha řešena údržbou a neopravené jsou ty, u kterých se součástka vymění (ložiska, pojistky apod.). [39]

Pravděpodobnost poruchy je hodnota pravděpodobnosti, která udává, že v čase $\tau \leq t$ dojde na objektu k poruše. Pokud je t čas měřený od uvedení objektu do provozu, pravděpodobnost poruchy objektu do času t pak můžeme popsat distribuční funkcí:

$$Q(t) = P(\tau \leq t) = \int_0^t f(t) dt$$

, kde $f(t)$ je hustota pravděpodobnosti.

Pokud máme diskrétní náhodné veličiny, můžeme pravděpodobnost definovat jako:

$$Q(t) = \frac{N_P}{N_0}$$

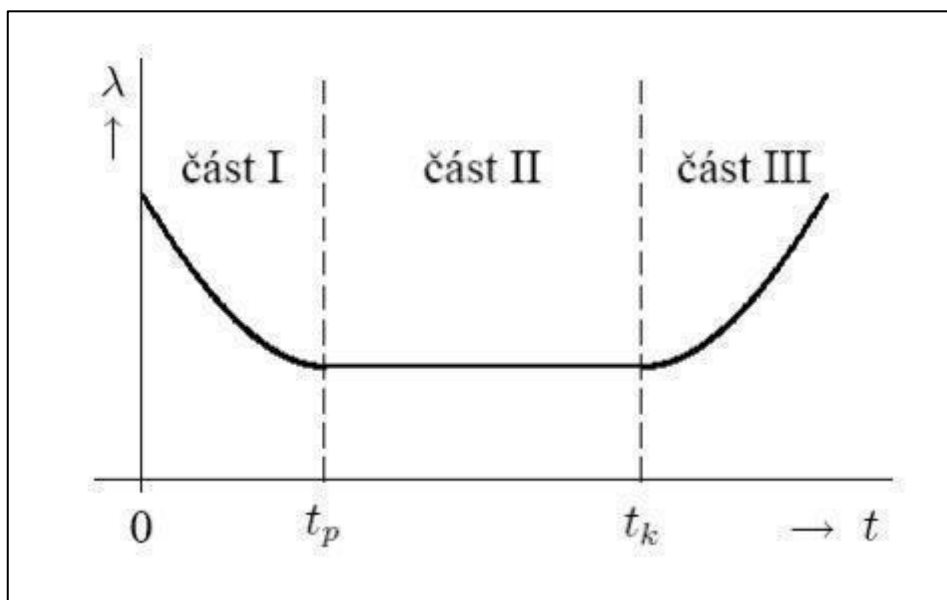
, kde N_p je počet výrobků porušených za sledovaný interval (0 až t) a N_0 je celkový počet výrobků ve zkoušeném souboru.

Intenzita poruch je pravděpodobnost, že dojde k poruše objektu za nekonečně malou časovou jednotku po daném okamžiku. Nutnou podmínkou je, že do tohoto daného okamžiku nedošlo k žádné poruše. Udává tedy frekvenci poruch za časové období. Intenzita poruch patří k nejdůležitějším spolehlivostním ukazatelům, které užíváme v praxi. Hodnotíme jím hlavně bezporuchovost součástek.

$$\lambda = \frac{1}{T_s}$$

, kde T_s je střední doba mezi poruchami.

Průběh **časové závislosti intenzity poruch** má charakteristický tvar, který nazýváme vanová křivka, ta je zobrazená na obrázku 8.



Obrázek 8: Vanová křivka, zdroj: *BP Diagnostika spolehlivosti technických zařízení, Bábek [39]*

První část nazýváme etapou časných poruch a trvá desítky až stovky hodin. Dochází k poruchám způsobených například materiálovými vadami či nedodržením postupů. Ty mohou vznikat nedostatečnou kontrolou. Druhá část je ustálený provoz a je to nejdelší úsek (desetitisíce hodin). Intenzity poruchy jsou zde v podstatě konstantní. Poruchy v tomto intervalu jsou náhodné a závisí na jednotlivých vlastnostech součástek. Poslední (třetí) část je etapa stárnutí, kdy dochází vlivem opotřebení k vzrůstající intenzitě poruch. V této etapě se vyměňují či opravují opotřebované části.

Střední doba mezi poruchami je aritmetický průměr všech naměřených časů bezporuchového provozu od dokončení opravy do výskytu následující poruchy. Nepočítáme s dobou opravy.

$$T_s = \frac{t_p}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{P_i}}{n}$$

, kde t_p je kumulativní doba provozu (součet všech dob provozu za sledované období) a n je počet výpadků způsobených poruchami.

S opravami souvisí i střední doba oprav T_0 , která udává průměrnou dobu opravy a střední frekvence oprav μ , ta vyjadřuje střední počet oprav, které lze s dostupnou opravářskou kapacitou uskutečnit za jednotku času.

$$T_0 = \frac{t_0}{n} \quad \mu = \frac{1}{T_0}$$

, kde t_0 je kumulativní doba oprav a n počet poruch.

Pravděpodobnost bezporuchového provozu vyjadřuje, s jakou pravděpodobností může objekt plnit svou funkci v časovém intervalu, tzn. nedojde k poruše. Poruchový a provozuschopný stav se navzájem vylučují. Může tedy nastat vždy pouze jeden z nich. Proto platí, že $R(t) + Q(t) = 1$. Pomocí distribuční funkce můžeme pak pravděpodobnost vyjádřit jako:

$$R(t) = 1 - Q(t) = P(\tau > t) = 1 - \int_0^t f(t) dt$$

, kde $f(t)$ je hustota pravděpodobnosti.

Pokud máme diskrétní náhodné veličiny, můžeme pravděpodobnost definovat jako:

$$R(t) = \frac{N_D}{N_0} = 1 - \frac{N_P}{N_0}$$

, kde N_p je počet výrobků porušených za sledovaný interval (0 až t), N_0 je celkový počet výrobků ve zkoušeném souboru a N_b je počet výrobků v bezporuchovém stavu.

Hustota pravděpodobnosti poruchy je pravděpodobnost, že dojde k poruše objektu za nekonečně malý čas po daném okamžiku. Je definována jako derivace pravděpodobnosti poruchy podle času t .

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$$

Střední doba bezporuchového provozu, známé také jako MTTF (Mean Time To Failure) je střední hodnota provozní doby objektu, za kterou nenastala porucha. [37][38][39]

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

5.2 PŘÍSTUPY KE SPOLEHLIVOSTNÍM MODELŮM

5.2.1 Deduktivní přístup

K deduktivním přístupům patří metody, které jsou preventivní. Při hledání příčin kritických poruch v subsystémech a prvcích využíváme metodu stromu poruch FTA. Je to logický grafický model, jehož větve vedou k důležitým událostem. Analýza postupuje systematicky od poruchy k příčině a vytváří přehledný graf vzniku poruchy na všech možných úrovních. Tato metoda se využívá po čas celého návrhu a realizace systému pro zvýšení samotné spolehlivosti systému. Pomáhá identifikovat slabá místa v systému. FTA tedy umožňuje najít příčiny poruch anebo modelovat a předpovídat spolehlivost systému. Využíváme ji jako kvalitativní analýzu, pokud známe pravděpodobnosti událostí. Strom poruch je sestaven tak, že zahrnuje sled událostí, které samostatně nebo v kombinaci s jinými událostmi mohou vést k vrcholové události (tj. událost, která je předmětem zájmu, pod kterou se rozvíjí strom poruchových stavů). Tato událost se předem definuje a je výchozím bodem našeho stromu poruchových stavů. U svislé verze je vrcholová událost umístěna na vrcholu hierarchie. U vodorovné verze je vrcholová událost nalevo.

Postup FTA:

- definovat prvky a vrcholové události
- konstrukce stromu poruch
- analýza stromu poruch

Vrcholovou událostí většinou bývá porucha nebo havarijní stav. Cílem je tedy nalézt příčiny, které způsobují vrcholovou událost a navrhnout, jak zvýšit pravděpodobnost bezporuchovosti odpovídající analýzou. Je nutné identifikovat možné řetězové reakce, které mohou vzniknout a určit jejich pravděpodobnosti. Výstupem FTA je pak seznam kombinací chyb (tzv. kritický řez), které vedou k vrcholové události. Metoda umí zahrnout i lidské chyby. [37][39][41]

5.2.2 Induktivní přístup

Metoda FMEA umí odhalit provozní cykly, při kterých může docházet k nežádoucím poruchám. Odhalí kritická a slabá místa v systému a na základě analýzy navrhne nutné modifikace v systému již v procesu navrhování. Umí diagnostikovat vzniklé chyby a poruchy a vyřešit otázku alternativního provozu při vzniku nečekaných poruch. Nevýhodou FMEA je její složitost při vysokém počtu komponent a neumí zahrnout lidské chyby. Metoda FMEA je podrobně popsána v kapitole 4.6.5. [39][41]

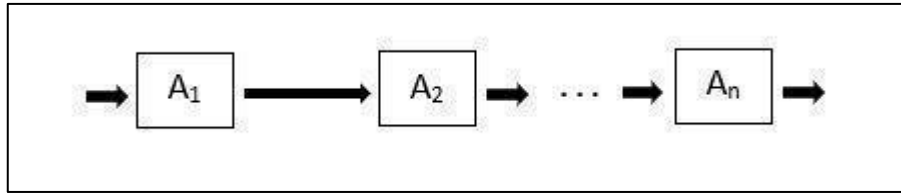
Metoda FTA je analýza shora dolů a FMEA zdola nahoru. Využitím obou metod docílíme kvalitnějších výsledků a větší důvěře v systém. Základním rozdílem je, že FTA je praktická pro analýzu nežádoucích událostí a FMEA umí identifikovat základních událostí a navrhnout opatření pro slabá místa systému. [39][41]

5.3 DRUHY SPOLEHLIVOSTNÍCH MODELŮ

5.3.1 Blokový spolehlivostní model

Blokový spolehlivostní model se využívá u systému, který má nezávislé prvky. Díky tomu můžeme jednoduše vyjádřit, jak se prvky ovlivňují navzájem, a jak ovlivňují celkovou spolehlivost. Jednotlivé prvky jsou reprezentovány bloky, ty obsahují údaje o prvcích (název, intenzita poruch apod.). Bloky jsou propojovány orientovanými hranami a vyjadřují provozuschopný stav systému. U určování bezporuchového stavu musí všechny prvky, kterými projdeme mít alespoň jednu cestu (hranu) spojující začátek a konec. K výpočtu tedy využíváme jednoduché vztahy a můžeme určit pravděpodobnost výskytu několika navzájem nezávislých událostí, jako součin pravděpodobností každé z nich a pravděpodobnost výskytu některé z navzájem se vylučujících událostí, jako součet pravděpodobností výskytu každé z nich. [40]

Sériový spolehlivostní model



Obrázek 9: Sériový spolehlivostní model, zdroj: vlastní zpracování

Model na obrázku 9 ukazuje logické řazení vzhledem k pravděpodobnosti bezporuchového provozu. Velkou nevýhodou tohoto modelu je, že když vznikne porucha jednoho bloku, porouchá se celý systém. Pokud již máme vypočítanou pravděpodobnost bezporuchového provozu pro každý blok (prvek), je pak výsledná pravděpodobnost bezporuchového provozu dána:

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

, kde R_i je pravděpodobnost bezporuchového provozu prvku A_i (i značí konkrétní prvek).

Intenzitu poruch pak vyjádříme součtem intenzit poruch:

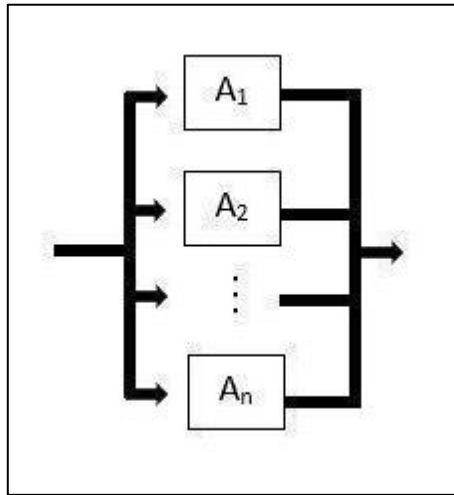
$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Střední dobu bezporuchového stavu vypočítáme jako:

$$T_S = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

Sériový systém tvořený prvky, pro něž platí exponenciální zákon, se jako celek řídí stejným zákonem. [40]

Paralelní spolehlivostní model



Obrázek 10: Paralelní spolehlivostní model, zdroj: vlastní zpracování

Model na obrázku 10, narozdíl od sériového modelu, při poruše jednoho bloku (prvku) předá funkci dalšímu bloku v paralelním zapojení. Systém tedy funguje bezporuchově do doby, než se všechny paralelně zapojené bloky porouchají. Pravděpodobnost poruch se tedy v poruchovém stavu musí vypočítat pro všechny prvky zapojené paralelně. Vypočítáme to jako součin pravděpodobností poruch jednotlivých prvků:

$$Q_P(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t)$$

, kde $Q_i(t)$ je pravděpodobnost poruchy jednotlivých prvků.

Pravděpodobnost bezporuchového stavu spočítáme jako:

$$R_P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

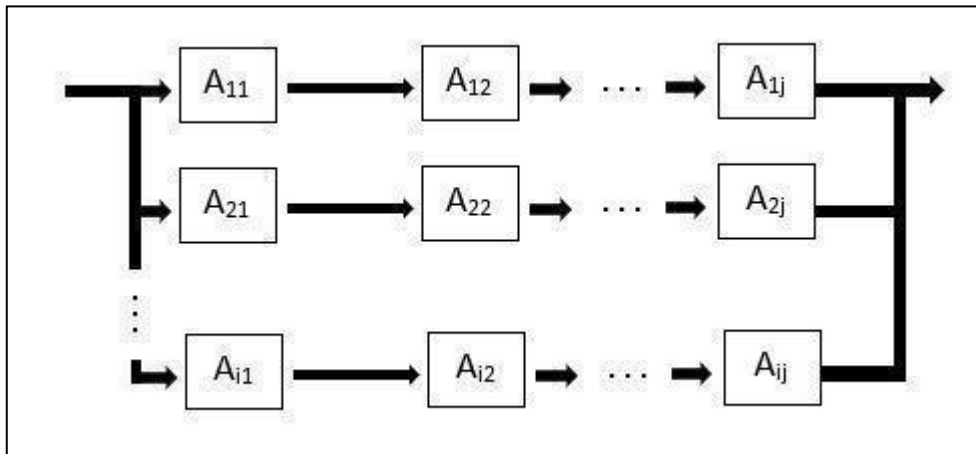
, kde R_i je pravděpodobnost bezporuchového provozu jednotlivých prvků.

Pro paralelní modely platí, že s rostoucím počtem prvků roste pravděpodobnost bezporuchového provozu soustavy. [40]

Kombinované modely

Paralelně-sériový model

Na obrázku 11 můžeme vidět, že ho tvoří paralelně uspořádané větve. Každá větev obsahuje n prvků.



Obrázek 11: Paralelně-sériový model, zdroj: vlastní zpracování

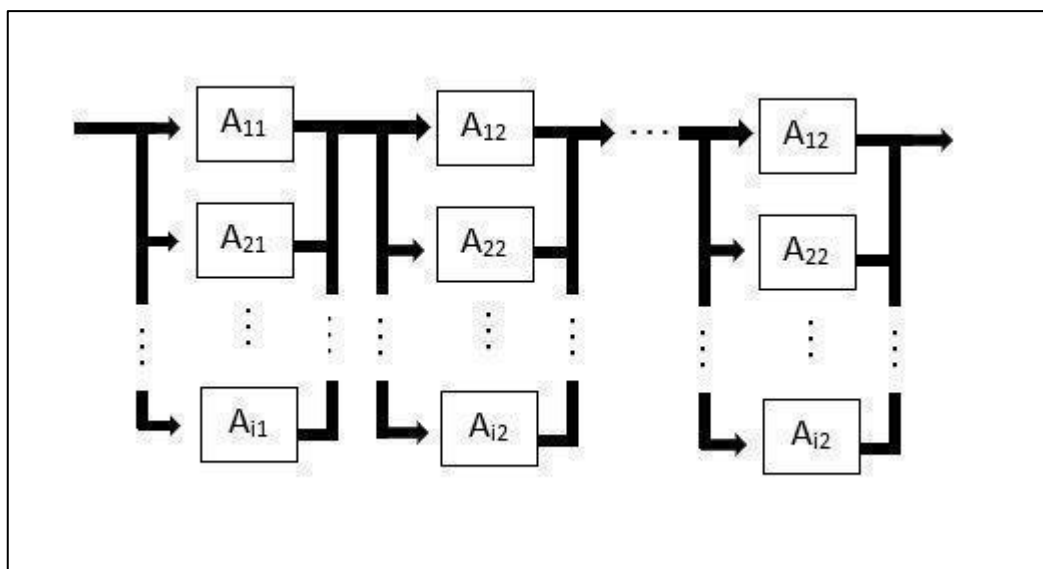
Pravděpodobnost bezporuchového provozu:

$$R_{PS} = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \prod_{j=1}^n R_{ij} \right)$$

, kde R_{ij} je pravděpodobnost bezporuchového provozu jednotlivých prvků, m je počet paralelních větví a n je počet prvků v sérii. [40]

Sériově-paralelní model

Dle obrázku 12 vidíme sériově propojené paralelní podsystémy s prvky.



Obrázek 12: Sériově-paralelní model, zdroj: vlastní zpracování

Pravděpodobnost bezporuchového provozu:

$$R_{Sp} = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^m R_{ij} \right)$$

, kde R_{ij} je pravděpodobnost bezporuchového provozu jednotlivých prvků, m je počet paralelních větví a n je počet prvků v sérii.

Jelikož v sériově paralelním modelu existuje vyšší množství cest ze vstupu do výstupu, je lepší používat tento model. Při stejném rozměru m , n a stejných hodnotách pravděpodobnosti bezporuchového provozu vychází lépe R_{Sp} . [39][40]

5.4 ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI

Zkoušky spolehlivosti slouží k vyhodnocení a kontrole spolehlivostních ukazatelů. Dají se doplnit analýzou poruch a návrhy nutných opatření ke zlepšení celkové spolehlivosti systému. Výsledkem zkoušky bývá náhodná veličina, která je odhadem skutečné hodnoty sledovaného parametru. Je tomu tak, protože se zkoušky provádí na náhodném výběru základních souborů s rozsahem dostatečným proto, aby výsledek s přijatelnou přesností vypovídal o spolehlivostních vlastnostech systému. Tuto hodnotu nazýváme bodový odhad, který nám udává skutečnou střední hodnotu základního souboru. Často se udává i odhad intervalový (interval spolehlivosti nebo konfidenční interval) pro přesnější výsledek. Spolehlivost intervalu obvykle nabývá hodnot 0.95, 0.99, 0.90 apod. Máme pak 95 % intervalu spolehlivosti, který obsahuje střední hodnotu. Konfidenční interval je definován hodnotami sledovaného parametru, ve kterém se skutečná hodnota nalézá s pravděpodobností $1-\alpha$. Předem stanovené riziko odhadu je vyjádřeno hodnotou významnosti α . Hodnota $1-\alpha$ je konfidenční úroveň odhadu. Pokud je odhadovaný parametr T , označíme dolní mez T_d a horní mez T_h , pak pro konfidenční interval platí:

$$P(T_d < T < T_h) = 1 - \alpha$$

Konfidenční interval může být jednostranný nebo oboustranný, o tom rozhoduje význam odhadovaného parametru. Pro tento výpočet využíváme chí kvadrát nebo Studentovo rozdělení t . V rámci zpracování výsledků spolehlivostních zkoušek se ověřuje statistická hypotéza. Vychází se z hypotézy o zákonu rozdělení v základním souboru a ověřuje se, zda přijaté předpoklady jsou v souladu s alternativní hypotézou danou pozorováním. K tomu využíváme statistické testy např. test dobré shody (Kolmogorov – Smirnov) nebo Pearsonův test. [42]

Zkoušky spolehlivosti dělíme:

- podle cílů na určující a ověřovací. Ověřovací zkoumají, zda naše hodnoty spolehlivostních ukazatelů nabývají předepsaných hodnot. Zkoušky se provádějí pro ověření stálé kvality. Určující stanovují neznámé hodnoty ukazatelů spolehlivosti a provádějí se v rámci nových systému.
- podle spolehlivostních ukazatelů na zkoušky bezporuchovosti, životnosti, opravitelnosti, udržitelnosti.

- podle doby trvání zkoušky. Rozlišujeme zkoušky ukončené po poruše všech pozorovaných objektů a zkrácené zkoušky, které ukončíme, než dojde k poruše všech pozorovaných částí. Zkrácené zkoušky mohou záviset na počtu evidovaných poruch (je stanoven limit) nebo na ztížených podmínkách.
- podle místa realizace na laboratorní a provozní. V rámci laboratorních zkoušek se udržují stálé podmínky a kontroly jsou jednodušší. Provozní zkoušky jsou přesnější, protože umí zajistit všechny podmínky.

Zkoušky spolehlivosti patří k náročné problematice, kvůli složité analýze dat. Je třeba vyhodnotit časový průběh poruch, selhání, chyb, příčin vzniku, doby detekce, odstranění a řadu dalších organizačních i technických opatření. [37]

5.5 VLIVY LIDSKÉHO FAKTORU NA BEZPEČNOST A SPOLEHLIVOST SOUSTAV

V rámci tvorby systému musíme brát v potaz nutný vliv lidského faktoru na fungování uměle vytvořeného systému. S postupem v čase, kdy roste např. poptávka po přepravě osob a zboží, rostou také nároky na provozní spolehlivost a bezpečnost. Cílem je minimalizovat škody. Hlavním problémem spolehlivosti umělých systémů bývá člověk a jeho chyby. Při technickém pokroku se spolehlivost systémů rapidně zvyšovala tzn., že jejich pravděpodobnost poruchy je velice nízká, avšak pravděpodobnost poruchy způsobené lidským činitelem se zvyšuje s rostoucí komplexností a výkonností systémů. Důvodem jsou zvyšující se požadavky na schopnosti operátorů, úroveň jejich pozornosti a rychlost jejich reakcí. S tímto rychlým rozvojem všech systémů tedy lidská chyba může v dnešní době způsobit ztráty obrovských rozměrů a mít velice závažné důsledky. Můžeme tedy říct, že nejslabším článkem spolehlivosti je lidský činitel, protože jen velice malá část poruch vznikla čistě technickou příčinou.

Spolehlivost obecně závisí na:

- spolehlivosti, životnosti a bezpečnosti umělého systému,
- spolehlivosti, životnosti a bezpečnosti působení lidských operátorů,
- spolehlivosti, životnosti a bezpečnosti vzájemné interakce mezi umělým systémem a operátorem a jinými lidskými činiteli.

U dopravních systémů můžeme pozorovat nárůst dopravních nehod. To může být způsobené i tím, že žádný dopravní systém nefunguje bez interakce s člověkem.

Je statisticky dokázáno, že plnou pozornost člověka je možné očekávat pouze cca 1 hodinu, poté dochází k poklesu pozornosti a prodlužování jeho reakční doby tzn. roste pravděpodobnost chybných reakcí a rozhodnutí. [4]

Působení člověka v dopravních systémech dělíme na několik úrovní:

- řidiči a piloti,
- dispečerů dopravy,
- supervizoři dopravních systémů,
- cestující,
- uživatelé,
- okolí.

Řidiči a piloti přímo ovládají dopravní prostředky, které nedokážou fungovat zcela automaticky. Mezi nejdůležitější aspekty patří úroveň pozornosti, rychlost reakce, pravděpodobnost správné reakce a šíře spektra vnímaných stimulů. Dispečerů dopravy mají značný vliv na chod rozsáhlých dopravních systému, které zasahují s mimořádným významem do života společnosti. Přestože v posledních letech dochází k rozvoji inteligentních dopravních systémů, nemůže zatím žádný fungovat autonomně. Příkladem může být systém zabezpečující řízení dopravy (např. letecká nebo v silničním tunelu), kdy operátoři a dispečerů musejí mít vysokou odbornou kvalifikaci a výbornou pozornost. Při neočekávaném poklesu pozornosti by mohlo docházet k událostem s fatálními následky. U supervizorů se také kladou vysoké nároky na koordinační schopnosti a schopnost rychlé a správné reakce. Cestující a uživatelé jsou pak velice širokým spektrem možných jednotlivců, se kterými je možné se setkat (chodci, cyklisté, řidiči, policisté apod). [4]

K trénování dispečerů je možné využít tunelový trenažér TOMMS od ELTODO a.s., který simuluje řídicí systém tunelu ve virtuálním 3D prostředí. Trenažér se využívá při zaškolení nových a prověření schopností již pracujících dispečerů. TOMMS dokáže simulovat např. dopravní nehody, požáry, poruchy různých technologií. Mohou se využívat i reálné scénáře, které se v minulosti udály a dispečer při nich nepostupoval standardně. Tento virtuální simulátor vznikl pro zlepšení výcviku dispečerů a snížení nákladů při ověřování schopností dispečerů (není nutné celodenní uzavření tunelu pro cvičení a prověřování postupů). Funguje na základě serveru HMI (Human Machine Interaction) se simulací PLC (Programmable Logic Controller) a stanicemi řídicího systému tunelu, ta kontroluje chování fyzikálních veličin, videodetekci intenzity dopravy apod. [44][45][46]

6 PREDIKTIVNÍ DIAGNOSTIKA

Cílem prediktivní diagnostiky je sbírat relevantní data z jednotlivých technologických celků tunelu, získávat z nich potřebné informace, a tím umožňovat predikci poruch či nutné údržby. Data využívaná pro predikci získáme z historických dat, informacích od dodavatele a z konkrétně změřených dat. Naměřená data můžeme srovnávat s životním cyklem jednotlivých technologických částí. Prediktivní diagnostika hraje významnou roli při plánování nutné údržby technologií v rámci tunelu. Jelikož výdaje za údržbu a opravy tunelu zabírají značnou sumu v provozu tunelu, je prioritou větším opravám předcházet menšími opravami – predikovat a tím předcházet možným selháním. [26] [47]

Údržby dělíme na korektivní, kdy dochází k okamžité nebo odložené údržbě po výskytu poruchy a na preventivní, ke které dochází několikrát do roka. Preventivní mohou být predikované pomocí naměřených dat anebo předem determinované. Při tomto typu údržby dochází k případné výměně jednotlivých komponent v oblasti známých běžně se vyskytujících selhání. [26]

Při predikování nutné údržby z naměřených dat určujeme optimální čas, kdy je potřeba údržbu naplánovat, tak aby nedošlo k selhání systému. Pro kvalitní predikci musíme využít relevantní historická naměřená data a údaje o stavu zařízení (životnost) v konkrétním tunelu. Každý tunel je vzhledem k umístění a využití různých zařízení jedinečný a většinou se model predikce nedá používat univerzálně na všechny tunely. [25]

6.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Preventivní nebo předem determinované údržby, které jsou plánované na základě časového plánu nemusí mít vždy očekávaný efekt, naopak mohou být velmi nákladné. Nejvhodnější možností metod údržby může být preventivní údržba podle technického stavu zařízení (CBM – Condition Based Maintenance). CBM využívá k určení životnosti zařízení diagnostické a prognostické nástroje. Sbírá potřebné údaje o stavu zařízení a umí tedy předvídat úroveň degradace sledovaného zařízení. Z toho zjišťujeme případné blížící se selhání a nařídíme prediktivní údržbu. Cílem je včas zjistit a opravit komponent dříve, než dojde k nevratnému poškození následující nákladnou výměnou. Technická diagnostika zjišťuje aktuální stav zařízení. Kromě detekce poruch zařízení zvládne i detekci drobnějších anomálií. [47]

6.2 TECHNICKÁ PROGNOTIKA

V technické prognostice se snažíme s určitou pravděpodobností určit hodnoty RUL (Remaining Useful Life) a TTF (Time To Failure) pro jednotlivé komponenty nebo celé zařízení. Je případně nutné věnovat pozornost nejen selháním konkrétních jednotlivých komponent, ale i možnostem dopadu těchto selhání na ostatní komponenty. RUL je časový interval, který začíná od přesně daného časového okamžiku po okamžik, kdy zařízení není provozuschopné. Podle této hodnoty můžeme plánovat údržbu zařízení nebo výměnu komponent. TTF je časový interval, který začíná od daného časového okamžiku po okamžik, kdy se objeví porucha, ta ovšem nemusí znamenat ztrátu provozuschopnosti zařízení. [25] [47]

6.2.1 Prognostika na základě údajů

Metoda využívá a zpracovává objektivní údaje získané sledováním provozovaného zařízení. Naměřené hodnoty různých vstupních a výstupních parametrů nám udávají stav zařízení a jeho případná selhání. Údaje jsou relativně stálé do doby, než se v systému objeví selhání. Základem této prognostiky je především teorie rozpoznávání vzoru, která využívá různé techniky (multivariantní statistické metody, metody „černé skříňky“ založené na neuronových sítích, grafické metody, analýzy signálů, fuzzy rozhodovací systémy). Prognostika umí transformovat a redukovat velké množství údajů do mnohem menšího počtu důležitých informací. Avšak je závislá na kvantitě a kvalitě získaných údajů. Tento přístup je často využíván u komplexních zařízení, jejichž chování nemůže být zcela popsáno fyzikálním modelem, a kde neexistuje přesný matematický model. [47]

6.2.2 Prognostika s použitím modelu

Tato prognostika naopak má k dispozici poměrně přesný matematický a fyzikální model zařízení. Využíváme odhad doby selhání zařízení jako základní parametr princip rezidua, ty jsou výsledkem porovnávání výstupů z daného zařízení s výstupy získanými výpočtem podle jeho matematického modelu. Pracuje s velikostí rezidua (velké – selhání, malá – bezproblémový provoz), jehož mezní hodnoty určíme odhadováním parametrů, pozorováním nebo vztahy rovnosti. Metoda nám umožňuje hodnoty některých parametrů odvozovat přímo z modelu. Prognostika se často využívá v oblasti navrhování, kdy k matematickému a fyzikálnímu modelu přidáme modely degradací jednotlivých komponent. [25] [47]

6.2.3 Prognostika založená na pravděpodobnosti

Řadí se k nejstarším typům prognostiky. Nepotřebují příliš podrobná data a používají různé distribuční funkce pravděpodobnosti (normální, Weibullovo, exponenciální rozdělení) pro konkrétní zařízení nebo jeho části. Meze určitosti, které stanovují přesnost a pravděpodobnost odhadu, můžeme získat z tzv. vanové křivky (obr. 8), která popisuje intenzitu poruch v závislosti na čase. Při analýze spolehlivosti technických prvků využíváme distribuční funkci pravděpodobnosti. [25]

6.2.4 Přístup k prognóze technického stavu pomocí neuronových sítí

Nejnovějším prostředkem na modelování nelineárních procesů v predikci časových řad jsou neuronové sítě. Umožňují modelovat nelineární procesy bez nároku na podrobné znalosti funkčních závislostí mezi jednotlivými vstupními a výstupními proměnnými. Neuronové sítě jsou flexibilním a všeobecným nástrojem predikce časových řad a učí se na základě prezentování vzorových příkladů. Díky tomu dokážou zachytit funkční závislost mezi jednotlivými proměnnými, i když je to pro nás neznámé nebo těžko popsatelné. Predikce časových řad může vycházet z předcházejících hodnot časové řady. Budoucí hodnota je pak předpovězena na základě předchozí hodnoty, která byla vstupem do sítě. Problémem v tomto řešení je stanovení počtu vstupních uzlů. Vstupní vektor je nejčastěji tvořen tzv. pohyblivým oknem, které putuje časovou řadou. Výhodou neuronových sítí je možnost jednoduššího dodatečného zařazení proměnných do procesu prognózy. Nevýhodou metody neuronových sítí je přístup černé skříňky. Nemůžeme analyzovat vztahy mezi vstupními a výstupními veličinami, a to poté může způsobit problém v interpretaci výsledků. Hledání závislostí mezi proměnnými zastává neuronová síť a celé řešení je před uživatelem skryté. Úkolem uživatele je pouze poskytnout vstupní data, na základě, kterých síť vytvoří výsledek ve formě předpovědi. Neuronové sítě nedokážou stanovit, kdy je vhodné vykonat údržby nebo výměny součástí, vytvoří pouze predikci hodnot zvoleného parametru. Neuronové sítě chápeme jako strukturu informací složených ze základních stavebních jednotek (neuronů). Metodika je inspirovaná biologickým nervovým systémem. Každý neuron má libovolný počet vstupních informací a jeden výstup. Každý neuron tedy přijímá libovolný konečný počet vstupních proměnných a předá dalším neuronům libovolný počet stejných vstupních proměnných svého jediného, ale rozvětveného výstupu. Práci neuronových sítí můžeme rozdělit na dvě etapy. V první etapě se neuronové sítě učí. Na základě působení vstupních a výstupních signálů dochází k adaptačním změnám vah jednotlivých spojení neuronů v síti. Neuronové sítě se mohou učit s učitelem, kdy využíváme trénovací množinu vstupů a výstupů. Díky těmto vzorovým vstupům a výstupům se pomocí algoritmu nastavují váhy a prahy neuronové sítě.

Další možností je učení bez učitele, kdy neexistují vzorové vstupy a výstupy. Na vstup se vkládají vstupní vektory, u kterých se nastavují váhy. Po dokončení učení nastává druhá etapa, kdy se aktivují neuronové sítě a vytváří se odezvy na vstupní signály, ale už se nemění váhy. Na funkčnost sítí má tedy vliv architektura sítě. Nejčastěji využívaným typem neuronových sítí jsou dopředné neuronové sítě se špatným šířením nebo vícevrstvý perceptron (MLP – Multilayered Perceptron). V tomto typu sítě jsou neurony seřazené do vrstev a neurony v jednotlivých vrstvách nejsou propojené. Tento typ se využívá u aplikace diagnostických postupů, hlavně při predikci časových řad. [5] [47]

7 ZAHRANIČNÍ VÝZKUMY

Sledování stavu a možnost diagnostikovat poruchy systému jsou nezbytné pro výzkum v oblasti systémového inženýrství a údržbě v průmyslu. Velkým problémem ve strojním průmyslu jsou točivé prvky strojů, které nalezneme skoro všude v rámci strojního inženýrství (motory, pumpy, kompresory apod.). Tato ložiska jsou schopná způsobit až 90 % všech poruch. V návaznosti na tento problém je nutné zajistit správné monitorování komponentů systému, aby se předcházelo poruchám a významně se zlepšilo fungování systému jako celku. Z dlouhodobého hlediska dochází k redukci financí vydaných v rámci oprav, kterým se dalo předejít včasnou výměnou jen části systému a zabránit tak nevratnému poškození. K poškození točivých ložisek dochází nejčastěji kvůli opotřebením, vysokým teplotám, vlivem rychlostí točivého momentu nebo nesprávného promazání. K určení, v jakém stavu se nachází ložisko, se využívají jeho vibrace, které nám pomáhají detekovat anomálie a tím předcházet poruchám. Změřené anomálie nám později pomáhají s predikovaním opotřebením součástky a včasnou údržbou či výměnou. [27]

7.1 Sledování stavu dieselového motoru

Dieselové motory jsou důležité pro výrobu energie pro různá průmyslová odvětví (automobilové, lodní, zemědělské, strojní, konstrukční), ale mohou být také velice poruchové. Nová metoda diagnostiky selhání byla založena na základě rozmanitého učení a metodě inteligence hejna. Metoda využívá vibrace motoru, ale počítá s velkým množstvím rušivých elementů, proto je nutné optimalizovat vstupy a výstupy pomocí statistických metod, které se často kombinují pro dosažení vhodných výsledků. Využívá se například analýza hlavních komponent (PCA – Principal Component Analysis) pro dekorelaci dat. Analýza dokáže snížit dimenzi dat, aniž by došlo ke ztrátě velkého množství důležitých hodnot. Byly použity tři druhy učícího algoritmu na propojení vlastností získaných z naměřených vibrací dieselového motoru. Vlastnosti po filtraci obsahují důležité výchyly, ty se promítají do nového nelineárního prostoru. Pomocí inteligence hejna se optimalizoval více jádrový vektorový stroj, který dokázal po implementaci algoritmů identifikovat selhání. Tato metoda byla podrobena zátěžové zkoušce, kdy se výstupy z inteligence hejna spojily s vektorovým strojem s různými druhy učících algoritmů. Velká část detekce selhání vděčí kombinaci těchto dvou metod. Cílem je vylepšit monitorovací průmysl stavu strojů vylepšením financování, prognostiky či umožnit včasnou údržbu. [28]

7.2 Distribuovaný přístup prediktivního modelování pro predikci a diagnostiku klíčového indexu výkonnosti v rámci celého závodu

Predikce a diagnostika je dnes důležitým prvkem v oblasti systémového inženýrství. Distribuovaný systém řízení nám umožnil nasbírat velké množství dat ze zpracovatelského průmyslu. Výhodou distribuovaného modelování dat je flexibilita, tolerance chyb, citlivost a znovupoužitelnost. Metoda přichází s tím, že některé klíčové výkonnostní indexy nemohou být měřené po dobu celého procesu. Tyto indexy můžeme jen predikovat na základě předchozích hodnot či proměnných, které můžeme průběžně měřit (teplota, tlak). Jako příklad uvádějí výrobu propylenu, kdy nemůžeme změřit index tavení v průběhu procesu, ale až po zpracování pomocí laboratorní analýzy. Hodnotu tohoto indexu se snažíme predikovat z naměřených hodnot v průběhu procesu. Abychom mohli vytvořit účinný systém kontroly kvality, měl by model umět diagnostikovat a přímo lokalizovat příčiny zhoršení výkonnostních indexů. Prediktivní modelování dělíme na modelování na základě dat nebo na základě modelů. Metoda pracující s daty je více flexibilní a dají se pomocí ní zpracovat i složitější výrobní procesy. Můžeme využívat regresi, parciální metodu nejmenších čtverců (PLS – Partial Least Squares) nebo umělé neuronové sítě (ANN – Artificial Neural Networks). Metoda založená na modelech je závislá na procesním mechanismu a znalostech systému. Systém počítá s rozdělením výrobních procesů na skupiny bloků, díky tomu mohou být důležitá data získávána účinnějšími metodami. Bloky se mohou např. dělit podle druhu procesů probíhajících v bloku nebo inženýrské zkušenosti. Klíčová bloková data jsou integrována dohromady a importována do regresního modelu. Je žádoucí vyhodnocovat i historická data. Z tohoto modelu se vytváří predikční model. Pokud se z modelu vyhodnotí snížení výkonu nebo nějaký druh anomálie, musíme identifikovat příčiny a v tuto chvíli přecházíme na diagnostiku. Abychom mohli zjistit příčiny snížení výkonnosti klíčového indexu, musíme vytvořit diagnostické schéma. Každý blok má v tomto schématu daný podíl, podle toho můžeme identifikovat kritické části procesu. Ve všech kritických blocích se vyhodnocují jak všechny procesní proměnné, tak lokalizujeme základní příčiny poklesu výkonnosti. Můžeme využívat analýzu hlavních komponent (PCA) a Gaussovy modely procesních regresí. [29]

7.3 Sledování stavu a diagnostika závad indukčních motorů

Je neustálý zájem o snížení nákladů na provoz a údržbu u indukčních motorů. Tyto dvě částky mohou být výrazně sníženy, pokud se bude systém pravidelně sledovat. Pravidelné kontroly zajistí včasnou detekci malých závad a změn v normálním provozu motoru. Díky tomu budeme schopni včas zajistit výměnu, opravu a předcházet nevratným závadám. Monitorování vlastností systému je důležitým úkolem inženýrů a výzkumných pracovníků v průmyslu (např. železnice, těžba, zemědělství). Sledováním stavu systému můžeme zlepšit produktivitu, účinnost, snížit náklady a zvýšit dostupnost strojů. Indukční motory jsou v různých průmyslových odvětvích hodně využívané díky své jednoduchosti a spolehlivé konstrukci. Jednofázové motory, které jsou velice účinné a spolehlivé se například využívají pro ventilátory, čerpadla či dmychadla. Přestože jsou u indukčních motorů pravidelně prováděny kontroly, údržby a opravy, může postupem času docházet ke zhoršení stavu motoru rychleji, než jsou plánované údržby. Online monitorování stavu motoru je tedy nezbytnou součástí pro zlepšení účinnosti, výkonu, produktivity, prodloužení životnosti a snížení vnitřních a vnějších škod. Společně s online monitorováním můžeme detekovat i chyby v systému, tím předcházet neočekávaným selháním a zabránit neplánovaným prostojům ve výrobě. Stav motoru můžeme sledovat pomocí akustických emisí, to je diagnostická metoda, při které pozorujeme akustické signály vysílané mechanicky namáhaným tělesem. Akustická emise není destruktivní a podává informace o momentálním dynamickém stavu měřeného objektu. Nevýhodou je možný šum pozadí a nejednoznačná interpretace této metody. Společně s akustickou emisí se používá MCSA (Motor Current Signature Analysis), při níž dochází k měření proměnných motorů, které jsou pravidelně zaznamenávány. Metody bývají účinné, ale je k nim potřeba pořídit relativně drahé senzory. Systém je poté schopný sbírat data přímo z motoru a analyzovat je, společně s diagnostickým systémem poruch umí vydat včasná varování o možných blížících se selháních. Diagnostický systém poruch vyžaduje inteligentní systém (např. technika umělé inteligence, genetický algoritmus, fuzzy logiku, neuronové sítě nebo jiné expertní systémy). Neuronové sítě jsou účinný nástroj k lepšímu odhadu a predikce zbývajících životnosti strojů a jiných zařízení. Byly vytvořeny tak, aby byly schopné diagnostikovat a identifikovat poruchy ložisek, k tomu využívají kvalitativní simulace. Fuzzy logika nám u indukčních motorů převážně pomáhá optimalizovat preventivní údržbu a její plánování. Účinnost a spolehlivost motoru se také odvíjí od jeho velikosti, stáří, době v provozu či kategorizaci, tyto informace by se do diagnostického schématu měly také zahrnout. Až 75% selhání vznikne opotřebovanými ložisky nebo poruchou statoru. Plánovaná údržba byla u indukčních motorů zavedena z důvodu zkoumání integrity vad ložisek a integrity vinou stárnutí motorů. [30][31]

7.4 Systém pro prediktivní údržbu v leteckém průmyslu

Letecký průmysl je jeden z nejvíce regulovaných průmyslů. Kvalita operačních systémů v rámci bezpečnosti má přímý vliv na lidské životy a jejich zdraví. V leteckém průmyslu je cílem detekovat anomálie, a ne až vzniklé poruchy. Výrobci letadel usoudili, že pomocí prediktivní analýzy, inženýrských znalostí a také nasbíraným datům (během letu, data z jednotlivých komponentů a jejich životnosti) mohou udržet déle v chodu součástky, a to díky sledování jeho stavu a včasným údržbám. K tomu využívají prognostiku, která jim umožňuje predikovat, předcházet poruchám, snížit výdaje za údržbu a zlepšit správu „vozového“ parku (Fleet management). Pomocí prognostiky mohou monitorovat aktuální stav výbavy, jeho provozní stav, detekovat anomálie a tím předcházet neplánovaným odstávkám stroje. Systém prognostiky musí umět pracovat s obrovským množstvím dat z velkého počtu součástí a umět s jistotou předpovídat fatální selhání. Ke zpracování dat se může využívat autoregrese pro predikci časových řad a tento model poté využít k detekci anomálií. Některé studie uvádí problém s předvídáním včasné výměny výfukového systému pro řízení větrání letadla. Zde autoři využili metodu modelování časových řad nebo vektorovou lineární autoregresi. Po sestavení lineárních modelů předpovídají možné budoucí hodnoty a ty porovnávají s naměřenými hodnotami. Zde se poté rozhoduje, zda se jedná nebo nejedná o anomálii. Autoři studií uznávají, že vytvořit kvalitní a komplexní modely predikce pro diagnostiku včasné údržby v rámci leteckého průmyslu je velice složité, protože data mají velké množství rušivých elementů. V obecném řešení se proces dělí na několik kroků. Nejprve je třeba identifikovat jednotlivé subsystémy, detekovat anomálie, vytvořit a otestovat varovný systém a vytvořit formu kontroly. Při identifikaci subsystému musíme vypočítat jakou mají mezi sebou závislost jednotlivé části, to nám pomůže vytvořit graf závislostí. Vrcholy reprezentují jednotlivé části a ohodnocené hrany jejich vzájemné závislosti. Při detekci anomálií musíme stanovit mezní hodnoty, abychom odlišili normální provoz od mimořádných situací. Tímto způsobem můžeme zlepšit spolehlivost dat a upřesnit naše modely pro predikci. K detekci anomálie můžeme také využít náhradní model, kde na základě predikce chyb můžeme odhadnout nejistoty při rozhodování o anomálii. Systém musí být dostatečně přesný na to, aby nedocházelo k příliš častým falešným poplachům ohledně nadcházejících poruch. Pokud bude systém vykazovat častěji falešné poplachu, než opravdové poruchy, mohou k nim pracovníci ztratit důvěru a brát tyto časté poplachu na lehkou váhu. Citlivost systému měří podíl událostí, které systém dokáže podchytit ku počtu zahrnutých událostí. [33]

7.5 Flexibilní nelineární prediktivní modely pro diagnostiku větrných turbín

Značné úsilí investuje větrný průmysl do snížení nákladů souvisejících s provozem a údržbou větrných elektráren, aby docílili snížení celkových nákladů za větrnou energii. Prediktivní údržba turbín je jedním z nástrojů používaných k realizaci snížení nákladů. Důležitým prvkem těchto programů je schopnost provozovatelů větrných elektráren získávat přesné informace o poruchách turbín a provozním stavu z dat shromážděných z monitorovaných větrných turbín. Cílem této studie je zkoumat, jak lze získat další diagnostické poznatky z již existujících zdrojů dat. Práce je založena na bezporuchových stavových modelech, kde hledáme přesné prediktivní modely pro data z turbínových senzorů během bezporuchového stavu. Pokud bude možné shromáždit dostatečné množství dat ze senzorů, bylo by možné obejít se bez fyzického modelu a používat flexibilní, obecné modely, které jsou vyškoleny na shromážděných datech. S tím, jak se nyní snižují náklady na data a výpočetní výkon, získávají metody založené na datech pro monitorování turbín značný zájem průmyslu. Omezíme se na úkol předpovědi teploty sestavy ložisek rotoru. Poté se pomocí údajů z velkého počtu skutečných poruch ložisek větrných turbín, zkoumá, do jaké míry lze výstup z těchto predikčních modelů využít v systému detekce poruch. Práce se nejprve zabývá prediktivní výkonností různých učebních architektur v dlouhodobém prostředí, která je hodnocena v celé řadě různých turbín. Důraz je kladen na dlouhodobou stabilitu předpovědí. Poté stanoví strukturovanou metodiku hodnocení diagnostických vlastností. Modely jsou vyškoleny na bezchybných datech a testovány na 22 skutečných poruchách ložisek. Modely jsou vybaveny bezchybnými stavovými daty a detekce chyb je pak koncipována jako odlehlý detekční problém. Jasnou výhodou tohoto přístupu je, že nejsou vyžadovány žádné údaje o závadách. Pokud je k dispozici dostatek údajů o závadách, mohly by být algoritmy detekce chyb řízené údaji, vyškoleny i v kontrolovaném smyslu, a tím by se naučily přímo rozlišovat mezi stavy závad a stavy bez závad. Práce dokazuje, že pružné modely založené na datech poskytují vysoce přesné předpovědi teploty rotoru ve větrných turbínách. Nelinearity přítomné v nastavení problému vedly k lepší prediktivní výkonnosti modelů založených na neuronové síti oproti lineárním modelům. Adaptivní distribuce hluku se ukázala být účinným regulátorem, protože umožnila modelům klást menší důraz na chyby v předpovědích v regionech s vysokým hlukem. Tyto modely poskytly nejlepší celkové prediktivní výsledky. Studie poskytla odborníkům v průmyslu údaje o výkonnosti potřebné pro porovnání modelování založeného na teplotě s jinými přístupy k monitorování ložisek rotorů. [48]

7.6 Vývoj diagnostického a prognostického nástroje pro prediktivní údržbu v železničním průmyslu

Ložisko kola je jednou z kritických součástí systému kolejových vozů, a proto určuje dostupnost a spolehlivost celkového systému. Fakt, že může v provozu katastrofálně selhat, znamená, že musí být zavedeno monitorování v reálném čase s možností predikce selhání. Jeho katastrofální selhání představuje určité bezpečnostní riziko, stejně jako značné nepohodlí při jízdě a zároveň snižuje celkovou dostupnost a spolehlivost systému. Nenadálá porucha obvykle vede k neplánovanému přerušení provozu a údržbě, která je v porovnání s preventivní údržbou nákladná. Proces prediktivní údržby obvykle využívá matematické nebo stochastické modely pro predikci nebo se řídí údaji získanými historicky nebo pomocí citlivých přístrojů používaných pro měření kritických provozních parametrů komponent v reálném čase. U přístupů založených na údajích začíná proces získáváním údajů relevantních pro provoz a udržování složky v provozuschopném stavu za různých provozních podmínek. To vede k vývoji algoritmu pro výcvik modelu s cílem odhalit a klasifikovat závady, jakož i odhadnout zbývající užitečnou životnost (RUL) součástky. Studie se zabývá využitím obálkového spektra a analýzou kurtózy (měřítko tloušťky nebo hustoty konců distribuce) pro detekci vnitřní a vnější vady ložiska v železničním voze. Diagnostická část pomáhá detekovat brzdící selhání, zatímco prognostický nástroj předpovídá zbývající životnost komponenty na základě shromážděných dat. Metoda umí i poskytnout informace týkající se rezonančního pásma související s monitorováním stavu součástky. Analýza kurtózy nemusí být dostatečná pro včasnou detekci závady, to však zvládne analýza obálkového spektra. Pomocí diagnostického algoritmu byly funkce z historických a nezpracovaných dat extrahovány a proškoleny v prostředí MATLAB. Analýza kurtózy ukazuje velkou odchylku od normálního rozdělení pro vnitřní ložisko, zatímco vnější ložisko vykazuje malou odchylku s rizikem zhoršení s časem. To znamená, že vnitřní ložisko má vyšší riziko kritického selhání. Zjištění z této práce by měli pomoci obsluze a personálu údržby sledovat technický stav ložisek. [49]

8 NÁVRH UPLATNITELNOSTI SPOLEHLIVOSTNÍCH A DIAGNOSTICKÝCH PŘÍSTUPŮ

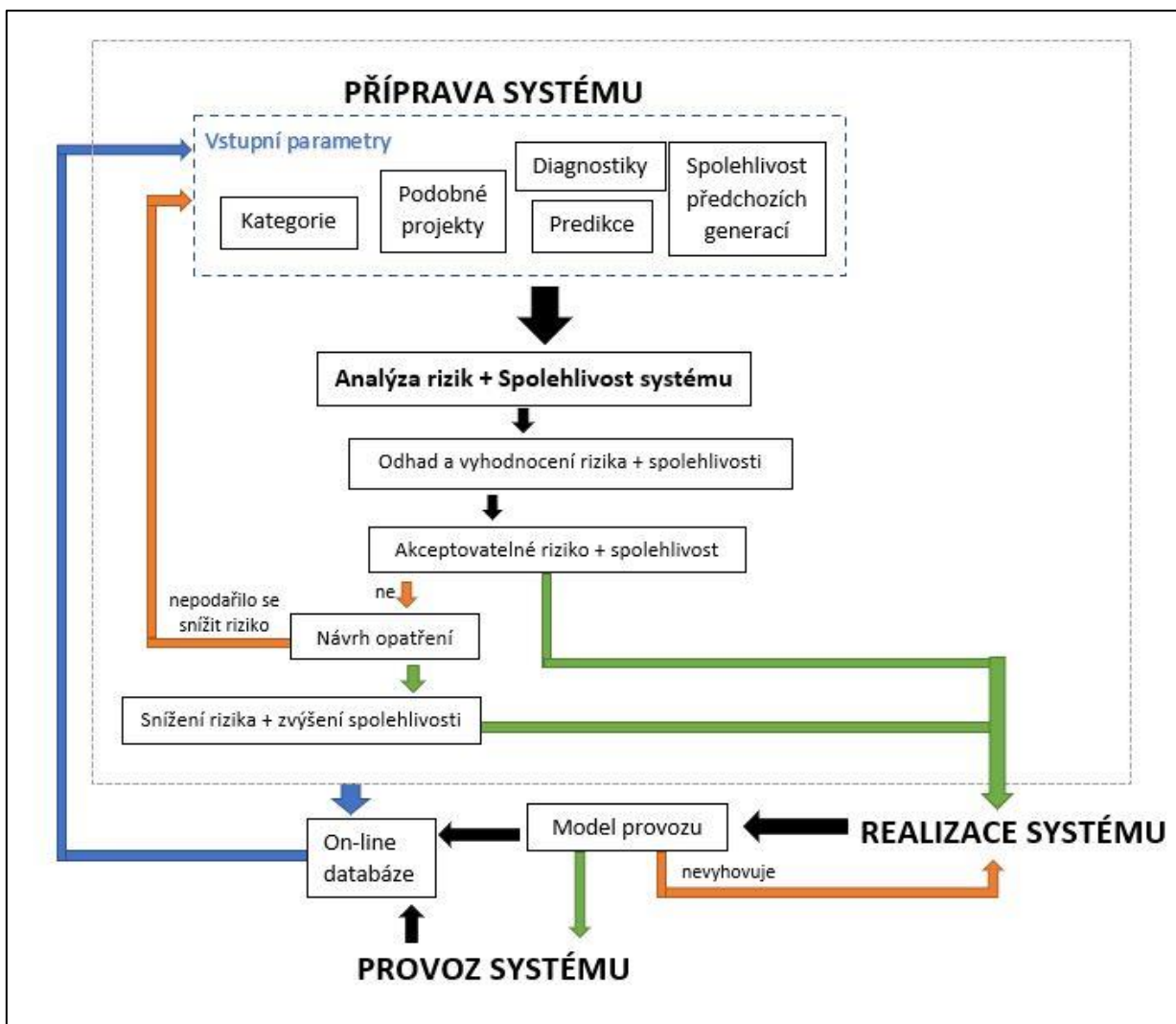
Na problematiku bezpečnosti je kladen stále větší důraz. Důvodem mohou být fatální následky způsobené dopravní nehodou, výpadkem technologií nebo lidskou chybou. Diagnostika slouží jako nástroj prediktivní údržby, kdy zjišťujeme skutečný stav systému a jejich trend pomocí měření a analýzy. Analýza spolehlivosti nám pomáhá dosáhnout co nejvyšší spolehlivosti, a tím snížit intenzitu poruch našeho systému. Cílem analýz je zvýšit bezpečnost a snížit náklady na provoz a údržbu. Metody pro zvýšení bezpečnosti nemusí být implementovány pouze do nových tunelů. Je tedy možné zlepšovat bezpečnostní prvky a monitorování stavů subsystému i u již existujících tunelů v rámci jejich modernizace. Budeme se zabývat i návrhem samotného diagnostického systému a nutných prvků pro zajištění kvalitních výstupů a možných predikcí. Do návrhu je vhodné zahrnout i perspektivní technologii s názvem digitální dvojče, která umožní optimalizaci systému. V této kapitole jsou uvedeny grafické modely postupu při navrhování systému navržené autorem práce.

8.1 Příprava a ladění

Při přípravě nového tunelového systému je třeba vycházet z dodaných vstupních parametrů. Dostatečné množství kvalitních vstupních dat je krok ke kvalitnějšímu systému. Po dohodě se zadavateli projektu, experty a ostatními subjekty je možné tyto vstupní parametry libovolně rozšiřovat o další nezbytné hodnoty. Jednou z nejdůležitějších částí přípravy systému je tedy kvalitní sběr dat o událostech a technologiích v rámci předchozích podobných systémů. K lepšímu pochopení tohoto komplexního oboru nám může pomoci Manuál silničních tunelů, který napomohl sjednocení norem a doporučení týkající se silničních tunelů. Před začátkem přípravy je možné zahrnout analýzu nákladů pro výpočet nákladů na realizaci projektu. Kromě toho analýza poskytne výhody a společenské přínosy např. v rámci města. Výsledky udává v peněžních jednotkách pro lepší orientaci.

Pro lepší pochopení systému byl vytvořen strukturální návrh přípravy postupu s vytvořeným modelem provozu a podkladem vytvoření daného funkčního modelu provozu, který můžete vidět na obrázku 13 níže. Model provozu je základní kámen pro následnou realizaci a vlastní diagnostiku a predikci funkce systému, který se promítá do obrázku 14 (na str. 70), jako virtuální model nebo digitální dvojče. Modrý přerušovaný obdélník reprezentuje všechny podstatné vstupní parametry. Černé šipky nám značí kroky při návrhu systému postupného výpočtu a běžící požadované sekvence.

Zelené šipky u rozhodovacích kroků značí pozitivní (kladnou) „cestu“ potvrzující správnou funkci, oranžová šipka značí nedostatečné hodnoty nebo negativní výstup, jež můžeme považovat za zpětné nebo nápravné kroky. Cílem oranžových cest je zlepšit výsledky hodnot rizik a spolehlivosti. Šedý přerušovaný obdélník nám reprezentuje přípravu systému a je modrými šipkami propojen na on-line databázi, vlastní provoz a realizaci.



Obrázek 13: Strukturální návrh přípravy postupu s vytvořením modelu provozu, zdroj: vlastní zpracování po konzultaci s vedoucími práce [53][60]

Analýza rizik

Dnes je již nutností při vytváření nových systémů analyzovat možná rizika ještě před samotnou realizací projektu. Důležitým krokem je zvolit vhodnou metodu analýzy. Měli bychom být schopní určit pravděpodobnosti konkrétních situací a jejich důsledky. Musíme brát v potaz, že rizika nemusí být pouze negativní. Můžeme v průběhu analýzy objevit rizika, které nám například zlepší hospodářské výsledky. V rámci analýzy rizik musíme počítat i s identifikací rizika nejistoty. To lze případně snížit opatřeními, ale nelze úplně odstranit.

Je vhodné kombinovat kvalitativní a kvantitativní metody analýzy rizik. Doporučuji využít metodu SAFMEA, což je analýza možných poruch a jejich následků vytvořená přímo pro tunelové systémy. Využívá statistické hodnocení expertních odpovědí a dokáže vytipovat místa s vysokým výskytem rizika. Rizikové faktory definujeme z hlediska pravděpodobnosti vzniku události a závažnosti. Výsledkem je soubor doporučení a seznam rizikových faktorů seřazených podle závažnosti. Metoda je podrobněji popsána v kapitole 4.6.5. Analýzu je možné rozšířit o analýzu scénářů (kapitola 4.7.1) a pravděpodobnostní stromy v kvalitativní formě (kapitola 4.8.1), které nám dodají konzistentní kombinaci hodnot klíčových faktorů a slovní popisy možných událostí. Scénáře nám přináší kvalitní obraz budoucnosti, které nám pomůžou lépe pochopit možné trendy vývoje významných faktorů a jejich vazeb. Pravděpodobnostní stromy nám slouží jako nástroj pro zobrazení scénářů. Ve výsledku bychom měli mít soubor scénářů, který nám pokryje většinu možných výsledků. Pravděpodobnost každého scénáře určíme jako součin pravděpodobností hodnot faktorů na stejné větvi. Nevýhodou scénářů může být nutný výběr pouze 2-3 faktorů pro zajištění efektivity metody. Stromové diagramy stojí na kvalitních statistických datech a jsou přehledné. Přichází s myšlenkou, že závažnější události vznikají jako výsledek souboru menších událostí či anomálií. Časové odhady jsou vytvořeny nepodloženými výpočty expertů, ty se v průběhu provozu upřesňují.

Spolehlivost systému

Spolehlivost zahrnuje vlastnosti jako bezpečnost, bezporuchovost, životnost, udržovatelnost, pohotovost apod. Spolehlivost systému řešíme v průběhu návrhu, realizace i provozu a je úzce spojená s analýzou rizik. V průběhu návrhu se jedná o projektovou spolehlivost a cílem je mít maximální možnou spolehlivost s minimem nákladů. Základem je výpočet spolehlivosti technické struktury, jejíž výpočty získané v etapě návrhu mají informativní a predikční charakter. Pokud je spolehlivost systému nedostatečná, můžeme díky predikčním výpočtům navrhnout opatření ještě v rámci návrhu systému. K přesnějším výsledkům využíváme spolehlivostní ukazatele, které jsou vyjadřovány pomocí pravděpodobností. Tyto ukazatele nám určují např. pravděpodobnost poruchy, intenzitu poruchy, střední dobu mezi poruchami apod. (kapitola 5.1). K docílení kvalitních výsledků a větší důvěře systému je doporučeno využít metodu FMEA a FTA. FTA je praktická pro analýzu nežádoucích událostí a FMEA umí identifikovat základní události a navrhnout opatření pro slabá místa systému. Spolehlivostní ukazatele pak vyhodnocujeme a kontrolujeme pomocí zkoušek spolehlivosti. Ty můžeme, pro zvýšení spolehlivosti systému, rozšířit o analýzu poruch a nutná opatření. Zkoušky spolehlivosti můžeme využít k ověření dodržování předepsaných hodnot spolehlivostních ukazatelů.

K lepšímu pochopení souvislostí v rámci systému můžeme využít spolehlivostní modely. Je pro nás nejvhodnější kombinovaný model sériově-paralelní, protože obsahuje větší množství cest ze vstupu do výstupu. To nám pozitivně zvyšuje pravděpodobnost bezporuchového provozu.

Odhad a vyhodnocení rizika

Po analýze rizik dochází k vyhodnocení zjištěných rizik, které je nutné porovnat s kritériem přijatelnosti a posoudit, zda je riziko akceptovatelné. K hodnocení akceptovatelnosti rizika nám může sloužit princip ALARP, který nám dělí rizika do tří stupňů. Nepřípustné – to je nutné zcela odstranit, bezvýznamné a riziko přípustné (nachází se hodnotami mezi nepřípustnými a bezvýznamnými). U nepřípustných rizik je nutné zajistit, aby se jejich hodnota dostala pod přípustnou hranu, jinak je nutné je eliminovat. Při hodnocení rizik musíme dbát na to, že se jedná pouze o odhady a zvážit porovnání dalších variant řešení v podobných systémech. Ke stanovení významnosti rizika je možné využít analýzu citlivosti, která nám rizikové faktory rozdělí na méně důležité a významné. Analýza následků nám pomůže odhalit sociální, ekonomická a ekologická rizika pomocí vyhodnocení ve stejné jednotce. Považuji to za vhodnou metodu, protože pracuje i nepřímými následky, které mohou vzniknout důsledkem poruchy jiné technologie. Výhodou metody SAFMEA je to, že zahrnují i hodnocení rizik a její dělení na přijatelná, podmíněčně přijatá a nepřijatelná.

Návrh opatření

Pokud riziko není akceptovatelné, musíme přistoupit k navrhování opatření s cílem toto riziko a jeho dopady snížit. Rizika můžeme dělit na ovlivnitelná a neovlivnitelná. Ovlivnitelná můžeme eliminovat, neovlivnitelná se můžeme pokusit snížit. ***Snížení rizika*** můžeme chápat jako eliminaci příčin, snížení negativních dopadů nebo můžeme toto riziko přesunout na jiný subjekt. Zpětnými úvahami, po zjištění nepřijatelného rizika, najdeme příčiny a navrheme opatření pro jeho snížení rizika. Ke snížení rizika nám může pomoci upravit vstupní parametry nebo obstarat kvalitnější součástky. Pokud nám žádná opatření nepomůžou, je nutné vrátit se na začátek návrhu. Například když zadavatel požaduje směrově nerozdělený tunel, je nutné přihlídnout k riziku vzniku dopravní nehody. To může způsobit rostoucí trend intenzity vozidel. Je nutné přistoupit k rozdělení dopravního prostoru na dvě tunelové trouby. Ve výsledku se změní kategorie tunelu, a tím i vstupní parametry systému. Můžeme přijít s opatřeními, které pomůžou riziko snížit.

Jedním z nepřijatelných rizik může být riziko častých výpadků větrání, způsobené nekvalitními součástkami této technologie. Řešením je pak změnit dodavatele a zajistit kvalitnější součástky s delší životností.

Po vyhodnocení přijatelné spolehlivosti je možné přistoupit k **realizaci systému** a **modelu provozu**. Zde pracujeme s inherentní spolehlivostí, která pracuje v „ideálním“ prostředí a nepočítá s proměnlivostí podmínek. Už v rámci modelového (zkušebního) provozu probíhá monitorování systému a ukládání údajů do **online databáze** (napojení on-line databáze na systém je popsáno níže). V případě, že modelový provoz nevyhovuje, je potřeba vrátit se o krok zpět, upravit kroky v realizaci projektu a navrhnout nutná opatření.

Může jít například o nepříznivý vliv lidského faktoru a je potřeba zařadit odborné proškolení zúčastněných zaměstnanců. Pokud je modelový provoz úspěšný, je možné přejít do plného **provozu systému**. Posledním typem spolehlivosti je provozní, ta počítá s proměnlivostí podmínek a ovlivňuje plánované údržby. Spolehlivost počítá i s lidským faktorem, který je brán jako nejslabší článek. S růstem složitosti systému roste i intenzita lidských chyb a s tím je přímo spojen růst fatálních událostí. On-line databáze má v rámci přípravy systému vytvořenou zpětnou vazbu do vstupních parametrů. Tato vazba nám slouží k možnosti doladění vstupních parametrů na základě získaných znalostí o provozu.

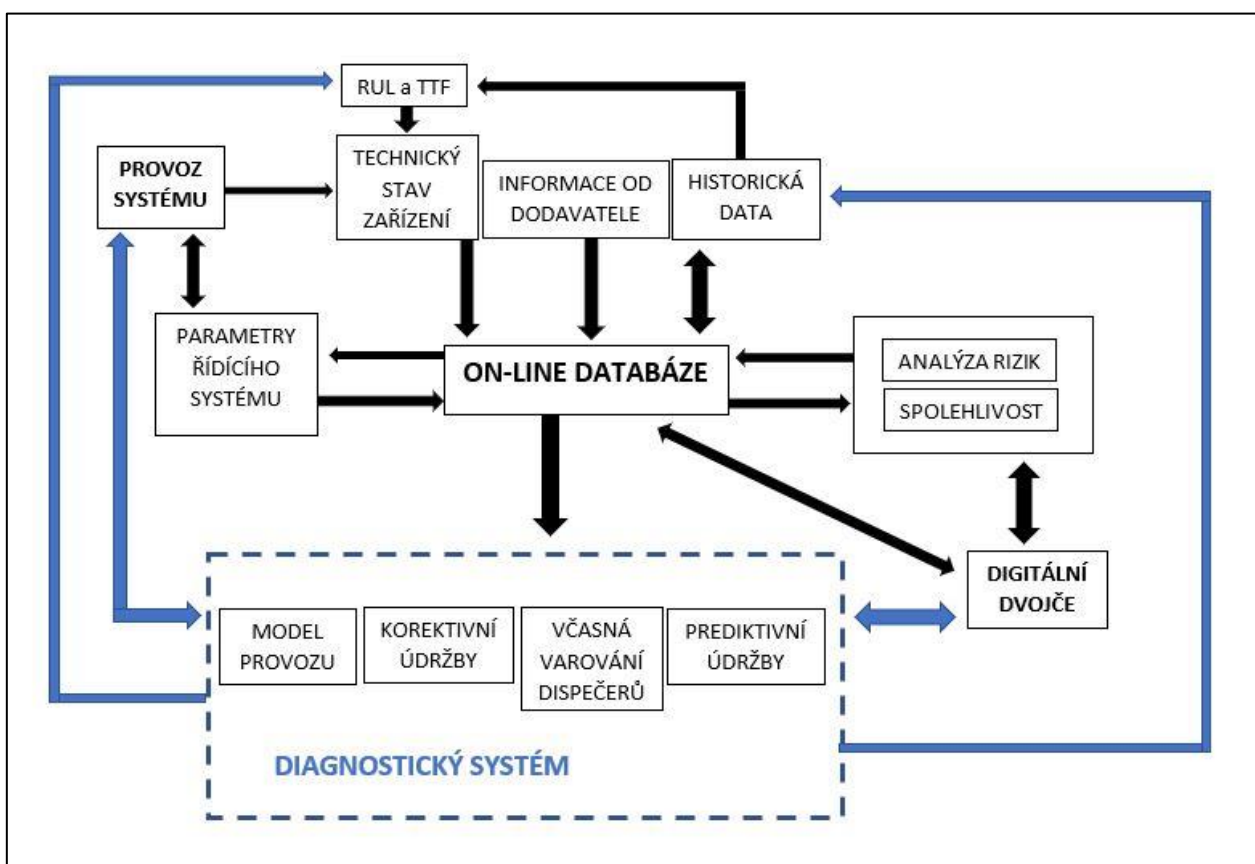
8.2 Realizace prediktivního diagnostického systému

Všechny hodnoty sledovaných subsystémů by měly být v rámci provozu zaznamenávány do přístupné on-line databáze pro možnost dohledání hodnot parametrů.

Digitální dvojče je ustálený model reálného systému, který nám pomáhá simulovat jeho vazby a funkce. Jedná se o virtualizaci našeho systému ještě před uvedením do plného provozu a pomáhá modelovat samotný model provozu. Digitální dvojče vzniklo z naší předchozí přípravy a zkracuje dobu přípravy a návrhu systému. Nahráváme do něj data a již od prvního kroku procesu umí sledovat chyby v algoritmech a sekvencích a předpovědět fatální chyby ještě před uvedením do provozu. Digitální dvojče se začalo vytvářet z důvodů rychlého rozvoje technologií a s tím vzrůstající složitostí a komplexností systémů. Virtuální replika systému nám pomáhá optimalizovat procesy a zlepšit efektivitu. Je vytvořena specialisty a odborníky pracující s aplikovanou matematikou. Technologie je považována za jednu z významných strategických technologických trendů a do budoucna by mohla zahrnovat i lidi a procesy. Složitost repliky závisí na složitosti navrhovaného systému a požadavcích zadavatele. V rámci tunelů může mimo jiné pomáhat i s testováním, zda je nutné součástku vyměnit nebo stačí jen menší údržba systému. Technologie zrychluje a ulehčuje rozhodovací procesy, a to díky práci s identifikací následků a chování systému. Digitální dvojče je považováno za poměrně velkou investici již v počátku systému, ale u složitějších systémů dokážou ušetřit čas i peníze. Při návrhu a realizaci tunelových systémů je kladen velký tlak na rychlost návrhu a realizace, a to s co nejnižšími výdaji, digitálním dvojčete je tedy výhodným řešením. Jak již bylo zmíněno patří technologie digitálního dvojčete k perspektivní metodě simulace, jelikož by měla být schopná nasimulovat téměř cokoliv a umožnit posunout systémy na vyšší level. Příkladem může být možnost vytvoření digitálního modelu pro jakékoliv město. Dokáže tak testovat městskou infrastrukturu a připravit město události jako je např. růst populace a intenzity vozidel. Využití digitálního prostředí ušetří peníze za zkoušky námahy součástí bez nutnosti pořizování náhradních součástí pro tyto pokusy. Digitální dvojče bude nastavené tak, aby bylo schopné zpracovávat možné scénáře a navrhopat opatření, kterými by zabránila nenávratným škodám. Samotný pojem digitální dvojče bývá často spojován s IoT (Internet of Things) a jeho bezpečností. IoT technologie můžeme považovat za „myslové orgány“ digitálního prostředí a je to pro nás platforma pro získávání a vizualizaci dat. [54][55][56][57][58]

Digitální dvojče využívá např. vývojové oddělení týmu McLaren pro optimalizaci svého vozidla, firma DHL v rámci logistických procesů, Boeing, který díky tomu zvýšil kvalitu a produkci dílů a systémů pro výrobu letadel nebo ve zdravotnictví. [59]

Strukturu návrhu diagnostického systému s on-line databází a zásadními moduly pro predikci a funkci systémů můžete vidět níže na obrázku 14. Modré šipky nám ve schématu popisují napojení diagnostického systému (modrý přerušovaný obdélník) na systém tunelu nebo jiný definovaný provoz systému. Diagnostický systém přes modré šipky komunikuje se subsystemy, jež vyhodnocuje stav systému. Černé šipky ukazují kroky, které databáze pravidelně poskytuje všem systémům pro jejich funkce, kde silnou vazbou je právě vazba na diagnostický systém. Tento systém působí vzájemně na vyhodnocování provozních stavů a porovnává je s digitálním dvojčtem (virtuálním modelem) systému pro ověřování požadovaných funkcí.



Obrázek 14: Strukturální návrh diagnostického systému s on-line databází, zdroj: vlastní zpracování po konzultaci s vedoucími práce [53][60]

On-line databáze má přístup a možnost ukládat data do souboru historických dat, jinak je zásadním zdrojem veškerých dat po jednotlivé systémy. Dalšími vstupy do databáze jsou informace od dodavatele (životnost, kvalita, materiál apod.) a reálný technický stav zařízení odvozený z RUL a TTF. Tyto dvě hodnoty je vhodné určovat pro jednotlivé komponenty zařízení a vyhodnocovat tak prognózy pro celý systém na základě nejnižší TTF. Pro některé technologie můžeme využít prognostiku založenou na modelech. Ta využívá přesné fyzikální a matematické modely pro zařízení, díky tomu můžeme porovnávat reálné hodnoty s hodnotami udanými v modelech.

Na databázi je přes parametry řídicího systému přímo napojený provoz systému a s ním spojené monitorování systémů. Díky tomu databáze dokáže získávat parametry systémů v reálném čase a zároveň analyzovat rizika a spolehlivost systému založených na těchto změřených parametrech. Pomocí videodetekce, která obsahuje několik vrstev virtuálních smyček je systém schopen rozeznat zastavená vozidla, jiné předměty na vozovce, kouř, směr a rychlost provozu apod. Monitorovány jsou tedy i parametry dopravního proudu, to může sloužit k optimalizaci rychlosti při změně intenzity vozidel. Výstupem tohoto komplexního systému pak mohou být včasné upozornění dispečerů o vzniklých anomáliích, které by mohly vést k závažnějším událostem. Toto považujeme za diagnostickou část systému udávající hodnoty, které mohou ovlivňovat RUL a TTF. Na základě toho je databáze schopná predikovat a sledovat trendy. Diagnostický systém obsahuje i model provozu, popisovaný v předchozím schématu. Zpětná vazba u diagnostického systému modeluje napojení na historická data a možnost do nich zasílat reporty. Reporty bude možné vkládat s časovým razítkem, kdy tyto údržby nebo opravy proběhly. Díky tomu je systém schopen určit další nutnou údržbu či výměnu na základě životnosti. U včasných varování dispečerů bude diagnostický systém zaznamenávat kroky, které dispečer podnikl, s cílem zabránění mimořádné události. Diagnostický systém je také oboustranně napojen na provoz systému, přes který dokáže na přímo pracovat s parametry řídicího systému a pomocí modelu provozu předpovídat možné scénáře a analyzovat technický stav zařízení. Předpovědi a možné scénáře nám bude vytvářet digitální dvojče ve spolupráci s analýzou rizik, spolehlivostí systému a samotnou on-line databází. Digitální dvojče nám pomůže optimalizovat údržby a spolehlivost systémů, a to díky možnostem vyhodnocování parametrů subsystémů, kterými dokáže předpovídat možné výpadky a poruchy tunelových technologií. Data potřebná k vyhodnocení může sbírat z online systému, který je napojený na zbytek celého systému. Výhodou je, že digitální prostředí navrhne změny, které budou mít za cíl optimalizaci procesů bez nutnosti je předem realizovat na skutečném provozu, pro zjištění výsledků. Díky provázanosti diagnostického systému s provozem a digitálním dvojčetem je možné dosáhnout kvalitního systému pro vytváření algoritmů pro prediktivní modelování. Tato struktura systému zajistí komplexní fungování a optimalizaci sledování tunelových technologií.

9 DOPORUČENÍ PŘI NAVRHOVÁNÍ SYSTÉMU

Tunelové technologie pracují v nepřetržitém provozu, je tedy nutné, aby byl stav technologií a subsystémů neustále monitorován. Tunel obsahuje dva typy technologických souborů. Na jedné straně je to typ, který lze navrhnout exaktně a na straně druhé typ, který nelze navrhnout modelováním či výpočtem (viz. 2.2). Kromě kategorie tunelu musíme brát v potaz navrhované rychlosti, odstavné pruhy, druh provozu, organizace dopravy, skladbu dopravního toku nebo příčné uspořádání uvnitř a vně tunelu a jeho vybavení. Vždy je nutné provést analýzu propojení jednotlivých relevantních parametrů. Cílem je předejít problémům již v průběhu realizace stavby nebo rekonstrukce tunelu. Kvůli těmto proměnným, na které musíme nahlížet při navrhování tunelu, je nutné každý nově navrhovaný tunel brát jako úplně nový systém, a i k němu takto přistupovat. Manuál silničních tunelů vydaný PIARC nám popisuje, jak postup návrhu nového tunelu, tak postup při renovaci a vylepšování stávajících tunelů. Manuál zahrnuje obecné aspekty tunelu (bezpečnost, lidský faktor, provoz a údržbu s následným ohledem na životní prostředí), provozní a bezpečnostní doporučení (geometrii, stavební zařízení pro provoz bezpečnosti, zařízení a systémy, reakce tunelu během nežádoucích událostí) a glosář. Viz kapitola 3. Je tedy možné v rámci hodnocení rizik a analýzy následků využívat již vytvořené návrhy pro odlišný tunel, jelikož za podobný systém můžeme považovat systém s podobnými vstupy a modely.

9.1 Konkrétní doporučující body

Následující body podrobněji rozepisují další doporučení a opatření pro využití v diagnostice zařízení a systémů.

- **skloubit kvalitativní i kvantitativní metody**

Pro kvalitní diagnostiku a predikci je vhodné využít jednu z metod hodnocení expertů. Díky slovním popisům a rozsáhlým názorům odborníků bude možné problematiku lépe pochopit a vytyčit možná rizika. Scénáře v kvantitativní formě nám pak umožní hodnotit následky událostí. V důsledku toho vznikají vzájemně konzistentní kombinace hodnot klíčových faktorů rizika sloužící ke stanovení dopadů, hodnocení a výběru rizikových rozhodnutí. Díky využití obou metod je možné lépe pochopit problematiku, protože budeme mít k dispozici konkrétní hodnoty zkombinované s názory expertů na jasně definované situace.

- **kvalitně ohodnotit rizika a navrhnout vhodná opatření pro snížení dopadů**

Velké množství odhadů se vytváří na základě zkušeností nebo odborným odhadem. Analýzou citlivosti můžeme odkrýt jak pesimistické, tak optimistické hodnoty faktorů. Významnost rizika vychází z pravděpodobnosti výskytu rizika a intenzity negativního dopadu. Je doporučeno porovnávat výsledky s jinými systémy založených na stejných zjednodušených modelech. V rámci přijatelnosti rizika lze využít ALARP, pro rozdělení rizik do tří stupňů. Za důležitý krok je třeba považovat navrhování opatření s cílem snížit rizika. U některých rizik stačí snížit jejich dopady, ale některé je nutné úplně eliminovat. Tím můžeme docílit zpětnou analýzou, která nám dohledá parametry ovlivňující výsledek.

- **detekovat anomálie, plánovat včasné údržby a případné výměny součástek**

Ke správnému fungování technologií a plánování údržby mohou přispět expertní názory od zkušených odborníků, zabývající se pravidelnými prohlídkami tunelových technologií, a také názory dispečerů, kteří tunel řídí. Všechny vzniklé závady, záznamy o údržbách a nenadálé události by měli být uloženy do systému pro budoucí přesnější predikci a diagnostiku. K tomuto kroku nám pomůže navržený diagnostický systém s on-line databází zobrazený na obrázku 14.

- **kontrolovat dostatečnou spolehlivost systému v průběhu celého procesu navrhování, realizace a provozu tunelu**

Průběžně vyhodnocovat spolehlivostní ukazatele (viz. 5.1), které nám umožní určit míru spolehlivosti subsystémů. V rámci návrhu systému je vhodné využít FMEA a FTA metody, které nám umožňují modelovat a předpovídat spolehlivost. Je však nutné znát pravděpodobnost událostí, kterou můžeme získat z dat podobných tunelů. S využitím obou metod můžeme pokrýt analýzu nežádoucích událostí a identifikaci základních událostí. To pomůže s návrhem opatření pro zvýšení spolehlivosti.

- **zahrnout lidské chyby a sledovat vlivy lidského faktoru na bezpečnost a spolehlivost systému**

Je obecně známo, že s rostoucí složitostí systému roste i pravděpodobnost poruchy způsobené lidským činitelem. S tím je spojený i fakt, že čím více je systém výkonný a komplexní, tím fatálnější následky může mít chyba způsobená člověkem. Je tedy nutné počítat s možnými chybami dispečerů v řízení tunelu. Dispečery dopravy je nutné pravidelně školit a zkoušet na simulacích pro dosažení maximální pozornosti a rychlých reakcí během nežádoucích událostí.

- **využit kombinovaný spolehlivostní model sériově-paralelní**

Výpočet jednotlivých ukazatelů bezporuchovosti se provádí postupným zjednodušováním dílčích sériových a paralelních zapojení, až do úplného zjednodušení. Při řešení se musí postupně řešit jednotlivé paralelně uspořádané prvky a sériové řetězce, a přitom se nesmí zaměnit postup správné metodiky násobení pravděpodobnosti poruchy či bezporuchového stavu. Převod z jednoho parametru do druhého se provádí jednoduchým odečtem od jedničky. Sériově paralelní systém popisuje zálohování každého prvku samostatně, zatímco v paralelně sériovém systému je zálohovaný vždy celý podsystém.

- **využit nenadálé události v rámci tréninku na тренаžéru**

Dispečer v tunelu musejí mít vysokou odbornou kvalifikaci a pravidelně podstupovat přezkoušení a cvičení, pro zlepšení přípravy na život ohrožující situace. Tunelový тренаžér simuluje řídicí systém tunelu ve virtuálním 3D prostředí. Obor HMI je dnes velice perspektivní a rozvíjející se obor se stále realističtějšími simulacemi. Dispečer tak může plnohodnotně otestovat svoje schopnosti bez možného vzniku fatálních následků. Z databází reálných událostí je možné využít scénáře, které se skutečně staly. Simulátor tímto může pomoci zlepšit výcvik a přípravu na reálný provoz tunelu.

- **promítat do predikcí i životní cykly jednotlivých subsystémů a aktualizované informace vnášet do online systémů**

Díky průběžnému monitorování a vkládání aktualizovaných zpráv bude systém schopný predikovat potenciální poruchy způsobené délkou životnosti či menšími výkyvy změřených v subsystémech a včas na ně upozornit. Tato funkce také pomůže s optimalizací plánování nutných oprav či jiné údržby. Systém by měl umožnit načíst do systému i historická data. Aktuální informace o všech subsystémech tunelu by tedy měly být nepřetržitě dostupné dispečerům, pracovníkům IZS a ostatním subjektům.

- **zapojení on-line systému do IoT**

Internet věcí nám udává síť zařízení, které jsou schopné si mezi sebou vyměňovat datové soubory, a to zejména prostřednictvím technologií bezdrátového přenosu dat a internetu. Cílem je zjednodušit komunikaci na celoměstské až celostátní úrovni. IoT pomáhá sledovat události a změny strukturálních podmínek, zejména ty, které by mohl narušit bezpečnost. V současnosti se některé frameworky IoT soustředí na řešení zaznamenávání dat v reálném čase a nabízejí možnost interakce více subjektů. Propojená zařízení umožní sběr velkého množství dat, se kterými bude možné dále pracovat.

- **zahrnout digitální dvojče**

Využít ustálený model reálného systému, který nám pomůže s optimalizací a usnadní nám rozhodovací procesy. Je do něj možné vkládat i lidské chování a modelovat scénáře v identické replice skutečného systému. Systém je schopný s pomocí digitálního dvojčete predikovat scénáře a opatření, které zabrání poruchám a výpadkům systémů. Je tedy možné předejít fatálním chybám ještě před uvedením do provozu. Digitální dvojče urychlí přípravy a realizaci projektu a usnadní provoz. Přestože je realizace digitálního dvojčete poměrně nákladná počáteční investice do systému, ušetří v průběhu celého projektu čas i náklady.

- **zabezpečit kyberprostor**

S pokrokem a částečným přesunem systému do virtuálního světa je nutné zajistit bezpečnost těchto kyberprostorů. Návazností na tuto problematiku vznikl před 5 lety zákon o kybernetické bezpečnosti. V návrhu systému je potřeba počítat s tím, že dojde k narušení bezpečnosti a mít připravené kroky k minimalizaci škod. Tyto kroky mohou být opatření, které navrhujeme v rámci analýzy rizik. Díky digitálnímu dvojčeti je možné si narušení bezpečnosti vyzkoušet ve virtuálním světě a připravit na to nejslabší článek systému, člověka.

- **sledovat a diagnostikovat jednotlivá zařízení napříč tunely**

Do budoucna by měla být možnost porovnávání a replikování zkušeností z jiných tunelů. Tento předpoklad počítá s tím, že tunely budou využívat stejný typ zařízení. Tento krok by mohl výrazně ušetřit čas a náklady spojené s přípravou a realizací tunelových systémů. Jelikož by bylo možné propojovat zařízení přes IoT, digitální dvojče by mohlo posloužit jako model reálného systému pro více tunelů.

10 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byly rozsáhlé rešerše analyzující aktuální stav uplatnění diagnostiky a predikce pro technologie v tunelech. Na začátku práce bylo nutné definovat tunel jako celek a popsat jeho dílčí technologie. Na to navazuje podrobná rešerše analýzy rizik, která se mimo jiné zabývá i některými metodami analýzy. V jednotlivých kapitolách rozebírám prediktivní diagnostiku a spolehlivost systémů. Bakalářská práce udává doporučení, jak postupovat při návrhu nového systému. Popisuje vhodné metody diagnostiky a spolehlivosti pro predikci stavů subsystémů technologií v tunelech. Ty jsou znázorněny pomocí grafických schémat a detailněji popsány.

Je nutné vyzdvihnout metodu SAFMEA vytvořenou přímo pro tunelové systémy. Ta je popsána i v *TP 229: Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací*. Je však vhodné jí zkombinovat a rozšířit i v TP o jinou kvantitativní metodou, příkladem může být FTA. To pomůže s upřesněním výsledků pravděpodobností rizikových faktorů.

V rámci svojí práce jsem se zaměřila i na zahraniční zdroje, jejich metody diagnostiky a využití prediktivních metod. Problematika je stále více zahrnována do návrhu všech možných systémů. Prediktivní diagnostika a spolehlivost systému je tedy velkým přínosem napříč různým odvětvím, a to díky své schopnosti zajistit vyšší bezpečnost a snížit provozní náklady. Zahraniční zdroje velice často využívaly k prognóze technického stavu neuronové sítě. Tuto metodu považuji za nevýhodnou z toho důvodu, že nevíme, co se s daty uvnitř systému děje. Avšak je nutné podotknout, že k využití neuronových sítí je třeba mít pouze balíček vstupních dat. Věřím, že se tato problematika bude díky pozitivním vlivům na systémy dále rozvíjet a bude na pevně zařazena do architektury většího množství systémů.

Vzhledem k široké oblasti tématu a nutným rozsáhlým rešerším mě bakalářská práce obohatila o nové znalosti v rámci této problematiky a naplnila mé očekávání v tom, že se jedná o velice perspektivní téma napříč obory. Výsledkem práce jsou návrhy uplatitelnosti spolehlivostních a diagnostických přístupů a doporučení při navrhování systému.

11 ZDROJE

- [1] PŘIBYL, Pavel a Jiří BARTÁK. *Tunely na pozemních komunikacích*. 2011. České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04723-1
- [2] FOTR. Jiří a Jiří HNILICA. *Aplikovaná analýza rizik ve finančním managementu a investičním rozhodování*. 2., aktualizované vydání 2014. Grada Publishing a.s. ISBN 978-80-247-5104-7
- [3] JUNG, Karel, Miroslav Sýkora, Milan Holický, Jana Marková, Pavel Maňas, Zdeněk Vintř a Lubomír Kroupa. *Hodnocení bezpečnosti a rizik silničních mostů a tunelů*. ČVUT 2018. ISBN 978-80-01-06516-7
- [4] NOVÁK, Mirko, Václav Šebesta a Zdeněk Votruba. *Bezpečnost a spolehlivost systémů*. Vydavatelství ČVUT 2003. ISBN 80-01-02807-0
- [5] KRCHNÁR, Jozef, Juraj Guláš, Róbert Olšiak, Karol Prikkel a Karol Stračár. *Simulácia hydrostatického systému plavebnej komory a jej využitie na prognózovanie technického stavu*. Slovenská technická univerzita v Bratislavě 2011. ISBN 978-80-227-3483-7
- [6] NEUGEBAUER, Tomáš. *Vyhledávání a vyhodnocení rizik v praxi*. 3. Vydání. Woltres Kluwer ČR a.s., 2018. ISBN 978-80-7552-072-2
- [7] Evropská komise, nové programové období 2007-2013. Pracovní dokument 4: *Metodické pokyny pro provedení analýzy nákladů a přínosů*. 2006 online: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/2007/working/wd4_cost_cs.pdf
- [8] SOUKOPOVÁ, Jana. *Analýza nákladů a přínosů – Cost-benefit analýza*. Studijní text. IS MUNI 2013. Online: https://is.muni.cz/el/econ/jaro2013/MPV_VZVP/um/33148301/Studijni_text_CBA.pdf
- [9] SOTILLE, Mauro. *Expert judgement*. Project manager.com, 2016. Online: <https://www.projectmanagement.com/wikis/344587/Expert-judgment>
- [10] *Checklist Analysis (CLA)* online: Safeopedia Inc., 2018 <https://www.safeopedia.com/definition/5005/checklist-analysis-cla>
- [11] *Analýza pomocí kontrolního seznamu – CLA (Checklist analysis)* online: ManagementMania.com, 2017. <https://managementmania.com/cs/analyza-kontrolni-seznam-cla-checklist-analysis>

- [12] Rizzi S. (2009) *What-If Analysis*. In: LIU L., ÖZSU M.T. (eds) *Encyclopedia of Database Systems*. Springer, Boston, MA
online: https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_466
- [13] Co – když analýza (*What-If Analysis*) online: ManagementMania.com, 2015.
<https://managementmania.com/cs/co-kdyz-analyza-what-if-analysis>
- [14] CALLINES, D., Guy, S. *What-if analysis*. BMC, online:
<https://www.ibm.com/garage/method/practices/think/what-if-analysis>
- [15] *What-if Analysis*. Online: ACS Chemistry for life, 2015.
<https://www.acs.org/content/acs/en/chemical-safety/hazard-assessment/ways-to-conduct/what-if-analysis.html>
- [16] DILLARD, John. *5 Most Important Methods For Statistical Data Analysis*. Big Sky Associates, 2015. <https://www.bigskyassociates.com/blog/bid/356764/5-Most-Important-Methods-For-Statistical-Data-Analysis>
- [17] *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Tool*, Institute for Healthcare Improvement, Cambridge, 2012.
<http://www.ihl.org/resources/Pages/Tools/FailureModesandEffectsAnalysisTool.aspx>
- [18] *FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)*, ManagementMania.com, 2016.
<https://managementmania.com/cs/failure-mode-and-effect-analysis>
- [19] TP 229: *Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací*. ELTODO EG a.s., 2010.
- [20] CCA (*Cause-Consequence Analysis*), ManagementMania.com, 2017.
<https://managementmania.com/en/cca-cause-consequence-analysis>
- [21] L.M.Ridley and J.D.Andrews. *Application of the Cause-Consequence Diagram Method to Static Systems*. Department of Mathematical Sciences Loughborough University, 2002.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.130.2514&rep=rep1&type=pdf>
- [22] ŠOLAR, Ondřej. *Diagnostika poruch tunelových staveb*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, fakulta bezpečnostního inženýrství, 2017
https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/118527/SOL0037_FBI_N3908_3908T0_05_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=n

- [23] POKORNÝ, Jiří a Petr Kučera. *FIRESAFE – Zásady evakuačních procesů a evakuační modely*. HZS MSK, Česká asociace hasičských důstojníků, 2015. Online: https://www.researchgate.net/publication/287997824_Zasady_evakuacnich_procesu_a_evakuacni_modely
- [24] *Manuál silničních tunelů*. PIARC, 2019 <https://tunnels.piarc.org/cs>
- [25] KRUPA, Miroslav. *Technická prognostika v kontextu prediktivní údržby*. AUTOMA, 2012 https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/9344.pdf
- [26] TICHÝ, Tomáš, Jiří Brož, Zuzana Bělinová a Petr Kouba. *Predictive diagnostics usage for telematic systems maintenance*. Smart Cities Symposium Prague, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9134051/authors#authors>
- [27] Attoui, I., Oudjani, B., Boutasseta, N. et al. *Novel predictive features using a wrapper model for rolling bearing fault diagnosis based on vibration signal analysis*. Int J Adv Manuf Technol 106, 3409–3435 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04729-4>
- [28] Zhixiong Li, Yu Jiang, Zhihe Duan a Zhongxiao Peng. *A new swarm intelligence optimized multiclass multi-kernel relevant vector machine: An experimental analysis in failure diagnostics of diesel engines*. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, 2018. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1475921717746735s>
- [29] Zhiqiang Ge. *Distributed predictive modeling framework for prediction and diagnosis of key performance index in plant-wide processes*, Journal of Process Control, volume 65, 2018. ISSN 0959-1524. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2017.08.010> (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152417301622>)
- [30] Fossum Dallas. *Identifying Mechanical Faults with Motor Current Signature Analysis*. Allied Services Group, Reliable Plant <https://www.reliableplant.com/Read/28633/motor-current-signature-analysis>
- [31] Choudhary, A., Goyal, D., Shimi, S.L. et al. *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review*. Arch Computat Methods Eng 26, 1221–1238, 2019 <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9286-z>

- [33] Burnaev, E.V. *On Construction of Early Warning Systems for Predictive Maintenance in Aerospace Industry*. J. Commun. Technol. Electron. 64, 1473–1484, 2019. <https://doi.org/10.1134/S1064226919120027>
- [34] *Materiály z 54. Setkání odborné skupiny pro spolehlivost. Úvod do spolehlivosti*. Česká společnost pro jakost, 2014. https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Spolkova_cinnost/Odborne_skupiny/Spolehlivost/Sborniky/sbornik.pdf
- [35] *Spolehlivost elektronických systémů*. Studijní text. IS MUNI, 2005. <https://is.muni.cz/el/1433/podzim2005/PV171/Spolehlivost.pdf>
- [36] DVOŘÁK, Petr, Marek Paška. *Modely pro sledování spolehlivosti a životnosti komplexních řídicích systémů*. Technical Report No. DCSE/TR-2007-17, 2007. University of West Bohemia in Pilsen Department of Computer Science and Engineering. <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/21588/1/Dvorak.pdf>
- [37] VROŽINA, Milan, Jiří David. *Spolehlivost a diagnostika*. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/SD/Spolehlivost%20a%20diagnostika.pdf>
- [38] ADÁMEK, Ondřej. *Ukazatelé spolehlivosti v podmínkách různých typů distribučních sítí VN*. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně, 2012. https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51197
- [39] BÁBEK, Tomáš. *Diagnostika spolehlivosti technických zařízení*. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně, 2009. https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16573
- [40] HUSÁK, Miroslav a Tomáš Vítek. *Spolehlivostní modely*. Elektronické zabezpečovací systémy. Přednášky ČVUT FEL
- [41] MAHEL, Roman. *Analýza stromu poruchových stavů (FTA) a analýza možných vad a jejich důsledků (FMEA) procesu pájení a vodivého lepení v elektronice*. Diplomová práce. ČVUT FEL, 2016.
- [42] TURČIČOVÁ, Marie. *Intervaly spolehlivosti*. MFF UK, matematicko-fyzikální katedra. https://www2.karlin.mff.cuni.cz/~turcic/Konfidencni_intervaly.pdf

- [43] TP 98: *Technologické vybavení pozemních komunikací*. ELTODO EG a.s., 2004.
- [44] ELTODO A.S., *Tunelový trenažér TOMMS*, 2014, online: <http://www.tomms.cz/tomms>
- [45] TICHÝ, T., Štefan, J., Miklůšik, I. *Systém pro analýzu a diagnostiku technologie v tunelech*. Silniční konference 2018, Sborník str. 111 - 114.
- [46] TICHÝ, T., Štefan, J., Pixa, R., Miklůšik, I. *Systém pro řízení, diagnostiku a simulaci technologie v tunelech*, poskytnuto docentem Tichým.
- [47] PIXA, R., Tichý, T. *Spolehlivostní diagnostika technologických zařízení*, ELTODO, a.s., ČVUT FD, kód projektu: TH04010481, 2019-2021
- [48] Bach-Anderson, M., Rømer-Odgaard, B., Winther, O. *Flexible non-linear predictive models for large-scale wind turbine diagnostics*, 2016, online: <https://doi.org/10.1002/we.2057>
- [49] I.A. Daniyan, K. Mpofo, A.O. Adeodu, *Development of a diagnostic and prognostic tool for predictive maintenance in the railcar industry*. Procedia CIRP, 2020, ISSN 2212-8271, online: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.001>
- [50] Sikorová, K., Bernatík, A. *Analýza a hodnocení rizik při dopravě nebezpečných látek*, 2014, ISBN 978-80-248-3492-4, online: https://fbiweb.vsb.cz/safeteach/images/pdf/Materialy/Analýza_a_hodnoceni_rizik_pri_doprave_nebezpecnych_latek.pdf
- [51] Rýzmar, F. *Použití funkční bezpečnosti u kolejových vozidel*, Bakalářská práce, VŠB Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, institut dopravy, 2010, online: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/81458/RYZ028_FS_B2341_2301R002_2010.pdf
- [52] Šustek, M., Škodáček, M. *Technologické vybavení tunelů na Pražském okruhu*, časopis Inženýrské stavby, říjen 2011, online: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/tunely/technologicke-vybaveni-tunelu-na-prazskem-okruhu>
- [53] Konzultace s vedoucím bakalářské práce doc. Ing. Tomášem Tichým, Ph.D., MBA

- [54] *Digitální dvojče*, Wikipedia, 2020, online: https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin
- [55] Slouka, D. *Co je digitální dvojče a proč je užitečné?* Internet Info DG, a.s., 2019, online: <https://aiworld.cz/digitalizace/co-je-digitalni-dvojce-a-proc-je-uzitecne-232>
- [56] Bílik, P. *Digitální dvojče: Vůdčí technologie inteligentního průmyslu*. Trade Media International, 2019, online: <https://www.vseoprumsly.cz/digitalizace/digitalni-prototypovani/digitalni-dvojce-vudci-technologie-inteligentniho-prumyslu.html>
- [57] Toman, P., *Digitální dvojče mění plánování*, časopis Logistika, Economia, a.s., 2019, online: <https://logistika.ihned.cz/c1-66607370-digitalni-dvojcata-meni-planovani>
- [58] *Digitální dvojče bude připravovat Newcastle na krizové situace*, Ekonomický deník, 2019, online: <https://ekonomickydenik.cz/digitalni-dvojce-bude-pripravovat-newcastle-krizove-situace/>
- [59] *Digital Twin: už jste někdy potkali digitální dvojče?*, IoTPORT, České Radiokomunikace a.s., 2020, online: <https://www.iotport.cz/digital-twin-uz-jste-nekdy-potkali-digitalni-dvojce>
- [60] Konzultace s druhým vedoucím bakalářské práce Ing. Jiří Brož

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Subsystemy tunelu, jejich vazby a začlenění tunelu do dopravního systému oblasti a útvaru z hlediska telematického přístupu, zdroj: vlastní zpracování z TP98 [43]	12
Obrázek 2: Kategorizace tunelů, zdroj: vlastní zpracování dle knihy Tunely na pozemních komunikacích Příbyl, Barták [1].....	14
Obrázek 3: Třípásmová metoda, zdroj: Použití principů funkční bezpečnosti u kolejových vozidel, Rýzmar [51]	23
Obrázek 4: Obecný postup hodnocení rizik, Zdroj: Hodnocení bezpečnosti a rizik silničních mostů a tunelů [3]	25
Obrázek 5: Řízení rizik, zdroj: vlastní zpracování z TP 229 [19].....	27
Obrázek 6: Motýlkový model (Bow tie model), zdroj: vlastní zpracování z TP229	38
Obrázek 7: Etapy spolehlivosti v průběhu životního cyklu, zdroj: Spolehlivost a diagnostika (Vrožina. David) [39].....	41
Obrázek 8: Vanová křivka, zdroj: BP Diagnostika spolehlivosti technických zařízení, Bábek [39]	43
Obrázek 9: Sériový spolehlivostní model, zdroj: vlastní zpracování	47
Obrázek 10: Paralelní spolehlivostní model, zdroj: vlastní zpracování	48
Obrázek 11: Paralelně-sériový model, zdroj: vlastní zpracování	49
Obrázek 12: Sériově-paralelní model, zdroj: vlastní zpracování	50
Obrázek 13: Strukturální návrh přípravy postupu s vytvořením modelu provozu, zdroj: vlastní zpracování po konzultaci s vedoucími práce [53][60]	65
Obrázek 14: Strukturální návrh diagnostického systému s on-line databází, zdroj: vlastní zpracování po konzultaci s vedoucími práce [53][60]	70

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Kategorizace tunelu.....	14
Tabulka 2: Kategorizace tunelu.....	15