

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F6

Fakulta dopravní
Ústav dopravní telematiky

Spolehlivost zásobování technických zařízení v silničním tunelu el. energií

Marián Mikloš

Vedoucí: Ing. Zuzana Bělinová, Ph.D.

Školitel–specialista: prof. Ing. Pavel Příbyl, CSc.

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Obor: Inteligentní dopravní systémy

Květen 2018



K620..... Ústav dopravní telematiky

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Marián Mikloš

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – IS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Spolehlivost zásobování technických zařízení v silničním tunelu el. energií**

Název tématu (anglicky): Reliability Assessment of El. Energy for Technical Equipments in Road Tunnel

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

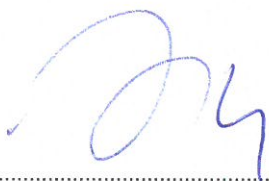
- analýza metody RAMS (reliability, availability, maintainability, safety), data pro sledování technického stavu, jejich analýza a určení spolehlivosti,
- základní požadavky na zásobování a zálohování ve vztahu k platným technickým předpisům,
- kvalitativní - kvantitativní analýza systému napájení silničního tunelu.

- Rozsah grafických prací: stanoví vedoucí diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Příbyl P., Janota A., Spalek J.: Analýza a řízení rizik v dopravě, BEN, Praha, 2008, ISBN 978-80-7300-2140-0.
IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Standards Board, 2007, ISBN 0738153001.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Příbyl, CSc.**
Ing. Zuzana Bělinová, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **27. července 2016**
(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 diplomové práce: **29. května 2018**
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

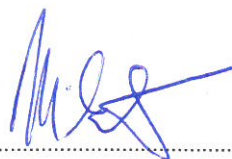


doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravní telematiky



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Marián Mikloš
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 1. prosince 2017

Podakovanie

V prvom rade by som týmto rád poďakoval môjmu školiteľovi a vedúcemu diplomovej práce, pánovi prof. Ing. Pavlovi Příbylovi, CSc., za vedenie diplomovej práce a obetovanie svojho voľného času pri konzultáciách.

Rád by som ďalej poďakoval pánovi Ing. Tomčíkovi a pánovi Kacianovi za odborné rady a cenné pripomienky.

Prehlásenie

Nemám závažný dôvod proti užívaniu tohto školského diela v zmysle § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonů (autorský zákon).

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o etickej príprave vysokoškolských záverečných prác.

V Prahe, 29. mája 2018

Abstrakt

Diplomová práca rieši problematiku spoľahlivosti zásobovania technických zariadení v tuneli pozemných komunikácií elektrickou energiou. Sú analyzované štyri varianty napájania, z toho je jedna varianta podľa základných požiadaviek na zásobovanie a zálohovanie vzhľadom na platné technické predpisy. Pre každý variant modelu napájania je vytvorená kvalitatívna aj kvantitatívna (probability analysis a simulácia Monte Carlo) analýza.

Kľúčové slová: tunel, pozemné komunikácie, RAMS, zásobovanie elektrickou energiou, analýza stromu porúch, simulácia Monte Carlo, analýza spoľahlivosti

Vedúci: Ing. Zuzana Bělinová, Ph.D.
Ústav dopravní teematiky
Konviktská 20
110 00 Praha 1

Abstract

The master thesis deals with reliability assessment of power supply of technical equipment in the road tunnels. Four variants of power supply are analyzed. One variant is modeled on based on essential requirements for power supply and back-up in accordance with applicable technical regulations. A qualitative and quantitative analysis (probability analysis and Monte Carlo Simulation) is created for each variant of power supply.

Keywords: tunnel, road communications, RAMS, power supply, fault tree analysis, Monte Carlo simulation, reliability analysis

Title translation: Reliability assessment of el. energy for technical equipments in road tunnel

Obsah

Zoznam skratiek	1	3 Napájanie cestného tunelu elektrickou energiou	21
Úvod	2	3.1 Základné požiadavky na zásobovanie elektrickou energiou	21
1 RAMS a cestné tunely	4	3.1.1 Zdroje elektrickej energie . .	22
1.1 Úvod do RAMS parametrov . .	4	4 Analýza návrhu napájania tunela Čebrať elektrickou energiou	26
1.1.1 Bezporuchovosť	4	4.1 Napätová hladina 0,4 kV - rozvádzače RH1, RH2, napájanie z dvoch nezávislých el. staníc 110/22 kV	27
1.1.2 Pohotovosť	8	4.2 Napätová hladina 0,4 kV - napájanie z dvoch nezávislých el. staníc 110/22 kV, UPS a diesel agregátov	31
1.1.3 Unavailability - nedostupnosť q	10	4.3 VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV	35
1.1.4 Udržiavateľnosť	12	4.3.1 Uvažujme poruchu na prvom úseku, tzn. po DOU 2	39
1.1.5 Bezpečnosť	14	4.3.2 Uvažujme poruchu na druhom úseku, tzn. medzi DOU2 a DOU23	43
2 Analýza stromu porúch FTA	15	4.3.3 Uvažujme poruchu na treťom úseku, tzn. medzi DOU23 a DOU21	43
2.1 Konštrukcia stromu porúch . .	16	4.3.4 Uvažujme poruchu na štvrtom úseku, tzn. za DOU21	43
2.2 Softvér OpenFTA, databáza primárnych udalostí stromu porúch	17		
2.3 Základné logické symboly a hradlá stromu porúch	18		

4.4 El. stanica 110/22 kV	44	6.3.1 Kvalitatívna analýza	68
5 Spracovanie výstupných hodnôt z OpenFTA	52	6.3.2 Kvantitatívna analýza	69
5.1 Kvalitatívne hodnotenie	52	6.3.3 Monte Carlo simulácia	70
5.2 Kvantitatívne hodnotenie	53	6.4 Napájanie variant 4	71
5.2.1 Simulácia Monte Carlo	56	6.4.1 Kvalitatívna analýza	71
5.3 Vývoj plynulosti prenosu a distribúcie elektriny v období 2012 až 2016, oblasť SSE-D, a.s.	57	6.4.2 Kvantitatívna analýza	72
6 Analýza výstupných hodnôt z OpenFTA	61	6.4.3 Monte Carlo simulácia	73
6.1 Napájanie variant 1	61	Záver	75
6.1.1 Kvalitatívna analýza	62	Literatúra	79
6.1.2 Kvantitatívna analýza	62	A Register	81
6.1.3 Monte Carlo simulácia	64	B Zoznam príloh	82
6.2 Napájanie variant 2	65		
6.2.1 Kvalitatívna analýza	65		
6.2.2 Kvantitatívna analýza	65		
6.2.3 Monte Carlo simulácia	67		
6.3 Napájanie variant 3	68		

Obrázky

1.1 Funkcia distribúcie $F(t)$ a funkcia hustoty pravdepodobnosti $f(t)$...	5	2.7 Symbol hradla AND	19
1.2 Funkcia spoľahlivosti $R(t)$	6	2.8 Symbol hradla OR	20
1.3 Vaňová krivka	6	2.9 Symbol transfer IN	20
1.4 Časové intervaly prvku so zameraním na parameter pohotovosti	8	2.10 Symbol transfer OUT	20
1.5 Pravdepodobnosť spiacej poruchy v závislosti na čase	11	4.1 Trasovanie tunela Čebrať	26
1.6 Obecná schéma údržby	12	4.2 Napájanie z distribučnej siete - prepínacia logika	28
1.7 Blokový diagram pre systém bez redundancie	14	4.3 Prehľadová schéma napájania z distribučnej siete	29
2.1 FTA - jednotlivé kroky realizácie	16	4.4 Napájanie z distribučnej siete, UPS a dieselagregátu - prepínacia logika	33
2.2 openFTA - zadávanie primárnych udalostí do databáze	18	4.5 Prehľadová schéma napájania z distribučnej siete, UPS a dieselagregátu	34
2.3 Symbol strednej udalosti.....	18	4.6 Počet porúch podľa miesta vzniku na hladine VN	37
2.4 Symbol základnej inicializačnej udalosti	19	4.7 VN vedenie č. 137 z el. stanice Lisková po napájanie 22/0,4 kV tunela Čebrať	38
2.5 Symbol nerozvinutej udalosti .	19	4.8 Typy porúch na vzdušnom vedení VN (holý vodič)	40
2.6 Symbol nerozvinutej udalosti .	19	4.9 Prehľadová schéma rozvodne 22 kV Lisková	44

4.10 Jednopolová schéma vlastnej spotreby el. stanice Lisková	46	6.6 Porovnanie spoľahlivosti rôznych druhov diesel agregátu a napájania variantom 1	77
4.11 Výpadky TS 110/22 kV	47		
4.12 Jednopolová schéma rozvodne 110 kV Lisková	49		
4.13 Zapojenie el. stanice Lisková a Mokrad do elektrizačnej sústavy SR	51		
5.1 Plynulosti prenosu a distribúcie elektriny	59		
5.2 Porovnanie priemernej hodnoty SAIDIC s výstupnou hodnotou z modelu FTA	59		
6.1 Parametre simulácie Monte Carlo - po NN rozvádzač <i>RH1</i> . .	64		
6.2 Parametre simulácie Monte Carlo - variant napájania bez UPS a bez diesel agregátov	67		
6.3 Parametre simulácie Monte Carlo - variant napájania z distribučnej siete, s diesel agregátmi a UPS .	70		
6.4 Parametre simulácie Monte Carlo - variant napájania z distribučnej siete a z UPS, bez diesel agregátov	73		
6.5 Porovnanie spoľahlivosti rôznych variant napájania el. energiou . .	76		

Tabuľky

4.1 Poruchovosť komponentov na napäťovej hladine NN	30	4.11 Rozvodňa 110 kV Lisková - vývody	48
4.2 Vybrané poruchové režimy istiacich prvkov (všetky napäťové hladiny)	30	4.12 Rozvodňa 110 kV Mokrad - vývody	48
4.3 Rozvodňa 22 kV Lisková - vývody	35	4.13 Poruchovosť komponentov rozvodňa 110 kV	49
4.4 Rozvodňa 22 kV Mokrad - vývody	36	4.14 Poruchovosť na vedení 110 kV	50
4.5 Počet porúch a čas ich lokalizácie na VN vedení	40	6.1 Výstup z kvalitatívnej analýzy - po NN rozvádzač <i>RH1</i>	62
4.6 Počet porúch a čas obnovy dodávky el. energie na VN vedení - holý vodič	41	6.2 Výstup z kvantitatívnej analýzy - po NN rozvádzač <i>RH1</i>	63
4.7 Počet porúch a čas obnovy dodávky el. energie na VN vedení - kábel	41	6.3 Výstup zo simulácie Monte Carlo - po NN rozvádzač <i>RH1</i>	64
4.8 Poruchovosť TS 22/0,4 kV ...	42	6.4 Výstup z kvalitatívnej analýzy - variant napájania bez UPS a bez diesel agregátov	65
4.9 Počet porúch a čas obnovy dodávky el. energie po vyriešení poruchy E1 s výjazdom (manipuláciou)	42	6.5 Výstupy z kvantitatívnej analýzy - variant napájania bez UPS a bez diesel agregátov	67
4.10 Počet porúch a čas obnovy dodávky el. energie po vyriešení poruchy E1 bez výjazdu (manipulácie)	43	6.6 Výstup zo simulácie Monte Carlo - variant napájania bez UPS a bez diesel agregátov	68
		6.7 Výstup z kvalitatívnej analýzy - variant napájania z distribučnej siete, s diesel agregátmi a UPS .	69

6.8 Výstupy z kvantitatívnej analýzy - variant napájania z distribučnej siete, s diesel agregátmi a UPS .	70
6.9 Výstup zo simulácie Monte Carlo - variant napájania z distribučnej siete, s diesel agregátmi a UPS .	71
6.10 Výstup z kvalitatívnej analýzy - variant napájania z distribučnej siete a z UPS, bez diesel agregátov	71
6.11 Výstup z kvantitatívnej analýzy - variant napájania z distribučnej siete a z UPS, bez diesel agregátov	72
6.12 Výstup zo simulácie Monte Carlo - variant napájania z distribučnej siete a z UPS, bez diesel agregátov	74
6.13 Obstarávacia cena záložných zdrojov	78



Zoznam skratiek

Skratky	Popis
ATS	automatický prenosový prepínač
DOU	diaľkovo ovládaný úsekový odpínač
ID	identifikácia
IT	prístrojový transformátor
NN	nízke napätie
RH	rozdávateľ
SCP	MONDI Severoslovenské celulóžky a papierne, a.s.
SSE - D	Stredoslovenská energetika - Distribúcia, a.s.
TR	transformovňa
TS	transformačná stanica
UPS	neprerušiteľný zdroj napájania
URSO	Úrad pre reguláciu sieťových odvetví
VN	vysoké napätie



Úvod

„Behind every problem there is always an opportunity“
Galileo Galilei (1564 - 1642)

Tunely je potrebné vnímať ako integrálnu súčasť komunikačného systému, vytvárajúcu najslabší článok z hľadiska bezpečnosti. Vždy je potrebné hľadať optimalizáciu bezpečnostných, ekonomických, sociálnych a ekologických dopadov. Väčšina tunelového vybavenia a systémov vyžaduje na svoju prevádzku elektrickú energiu a preto sa kladie určitý dôraz na zabezpečenie jej dodávky. Dodávaná el. energia musí spĺňať štandardy kvality a zabezpečiť prevádzku potrebného vybavenia počas všetkých prevádzkových situácií.

Na Slovensku je ku 1.1.2018 deväť cestných tunelov v celkovej dĺžke 12,415km z toho šesť tunelov je v dĺžkovom rozmedzí 500m až 3000m, štyri tunely sú vo výstavbe a ďalšie plánované.

Práca má za cieľ určiť spoľahlivosť zásobovania technických zariadení v tuneloch pozemných komunikácií. Práca je koncipovaná do šiestich kapitol. Prvá kapitola sa zameriava na parametre metódy RAMS, základné vlastnosti technického systému z hľadiska jeho kvality a sú opísané vzorce, ktoré boli použité na výpočet spoľahlivosti primárnych udalostí v strome porúch.

Druhá kapitola obsahuje stručný návod konštrukcie stromu porúch nasledovaná krátkym úvod do softvéru použitého v tomto projekte, zadávaním primárnych udalostí do databázy a významom logických symbolov použitých v softvère.

Tretia kapitola sa zameriava na základné požiadavky zásobovania elektrickou energiou technických zariadení cestného tunela podľa platných noriem a technických podmienok, vymenovaním systémov a časom ich zálohovania.

Štvrtá kapitola rieši zásobovanie el. energie z konkrétnej topológie distribučnej siete pre daný tunel, rôzne varianty napájania na napäťovej hladine NN. Varianty sa odlišujú v závislosti na zálohovaní technických zariadení. Ku jednotlivým variantom sú k dispozícii prepínacie logiky a prehľadové schémy. Rozpísaná je topológia siete 22 kv, 110 kv a el. stanice 110/22 kV, uvedené sú číselné podklady, z ktorých bola počítaná spoľahlivosť primárnych udalostí.

V piatej kapitole sú rozpísané analytické metódy používané v softvéri OpenFTA, pri kvalitatívnom aj kvantitatívnom výstupe hodnotenia, ktoré boli použité pri všetkých variantoch napájania. Na záver kapitoly je zhrnutá plynulosť prenosu a distribúcie elektriny za obdobie 2012 až 2016, oblasť SSE-D, ktorá je porovnaná s výsledkami získanými zo softvéra OpenFTA, pri variante napájania č. 1.

V šiestej kapitole sú zosumarizované výstupy z analytického softvéra OpenFTA pre jednotlivé varianty napájania. Jedná sa o výstupy kvalitatívne a kvantitatívne medzi ktoré patrí aj simulácia Monte Carlo. Minimálne kritické rezy sú usporiadané zostupne podľa pravdepodobnosti spôsobujúcu vrcholovú udalosť.

Kapitola 1

RAMS a cestné tunely

1.1 Úvod do RAMS parametrov

RAMS je akronym, ktorý vo svojom označení obsahuje dôležité atribúty kvality všetkých technických systémov a to nasledovne:

- Reliability (bezporuchovosť)
- Availability (pohotovosť)
- Maintability (udržiavateľnosť)
- Safety (bezpečnosť)

1.1.1 Bezporuchovosť

Definícia 1.1. Bezporuchovosť podľa ISO 9000 je schopnosť prvku¹ vykonávať požadované funkcie za daných okolných a prevádzkových podmienok po uvedení časovú dobu.

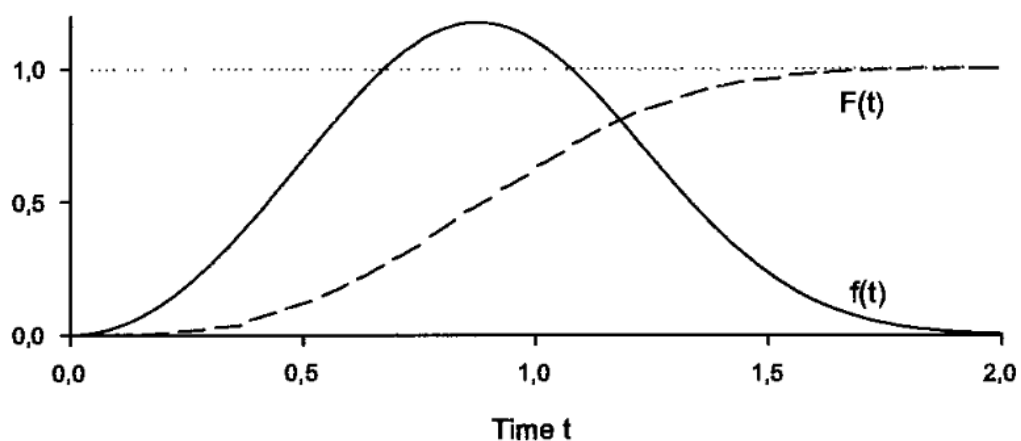
¹ Pod pojmom prvok si môžeme predstaviť všetko od malej súčiastky až po veľký systém.

Predpokladajme, že čas do poruchy T je spojitý, funkcia hustoty pravdepodobnosti je $f(t)$ a distribučná funkcia je

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \int_0^t f(u)du \text{ pre } t > 0$$

Pre funkciu hustoty pravdepodobnosti $f(t)$ platí:

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t)$$

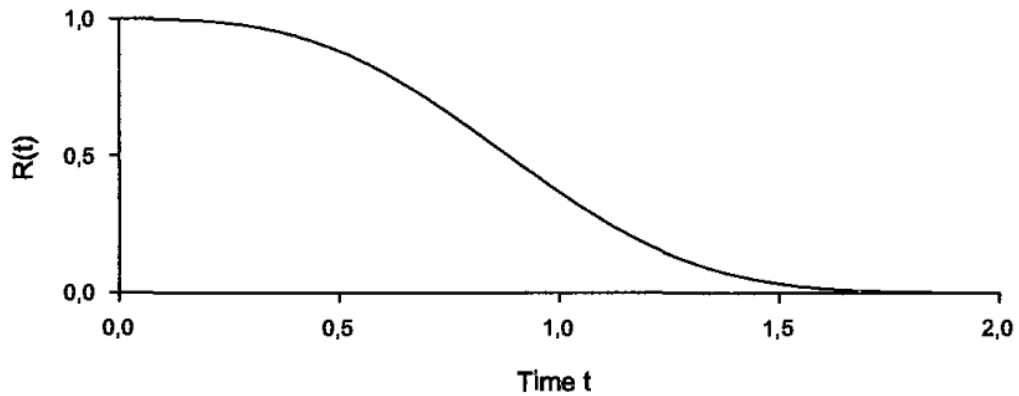


Obrázok 1.1: Funkcia distribúcie $F(t)$ a funkcia hustoty pravdepodobnosti $f(t)$ [RH04]

- funkcia spoľahlivosti $R(t)$ je definovaná

$$R(t) = 1 - F(t) = \Pr(T > t) \text{ pre } t > 0$$

$F(t)$ predstavuje pravdepodobnosť, že prvok zlyhá v časovom intervale $(0, t]$



Obrázok 1.2: Funkcia spoľahlivosti $R(t)$ [RH04]

- pravdepodobnosť, že prvok nezlyhá v časovom intervale $(0, t]$, inými slovami, pravdepodobnosť, že prvok prežije časový interval $(0, t]$ a stále bude funkčný v čase t

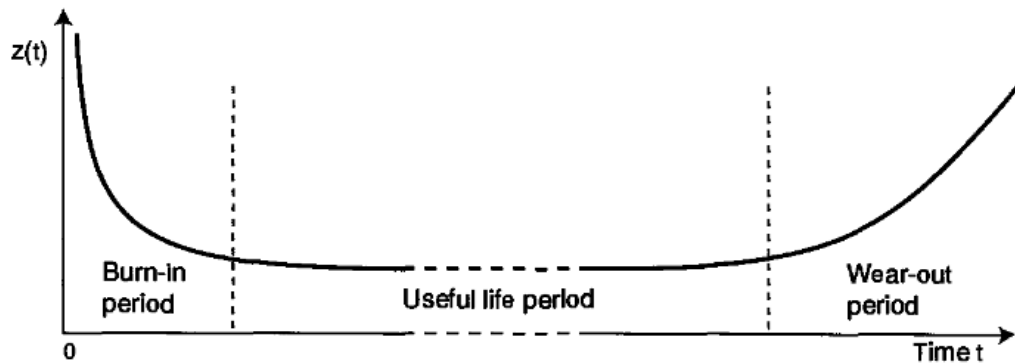
■ **funkcia intenzity poruchy $z(t)$** ²

Pravdepodobnosť, že prvok bude poruchový v časovom intervale $(t, t + \Delta t]$, keď vieme, že prvok v čase t fungoval je

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t)}{\Pr(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)}$$

Podelením tejto pravdepodobnosti dĺžkou časového intervalu, Δt , a uvažovaním $\Delta t \rightarrow 0$, dostaneme funkciu intenzity poruchy uvažovaného prvku

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda$$



Obrázok 1.3: Vaňová krivka [RH04]

² V niektorých publikáciách sa môžeme stretnúť s názvom *сила úmrtnosti* (force of mortality - FOM)

Intenzita poruchy je často vysoká v počiatkovej fáze (*burn-in period*) zavedenia sledovaných prvkov do prevádzky. Tento poznatok možno vysvetliť neobjavenými defektmi (známe ako *infant mortality*); tieto defekty sa objavujú spravidla pri aktivovaní prvkov. V prípade, keď prvok prekoná počiatkovú fázu, intenzita poruchy sa stabilizuje a ustáli na hodnote, ktorá ostáva po určitý čas približne konštantná až pokiaľ nedôjde k zvýšeniu opotrebovania prvku. Od určitého opotrebovania prvku (*wear-out period*) dochádza k rýchlemu nárastu intenzity porúch. [RH04]

- **priemerná doba do poruchy $MTTF$** je podľa [RH04] definovaná nasledovne

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

Pokiaľ $MTTF < \infty$, potom môžeme písať

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

Používanie pojmu **$MTTF$** by sa mal spájať s prvkami, ktoré nie sú opraviteľné. Ak uvažujeme prvky, ktoré sú po poruche opraviteľné, tak by sme mali používať pojem **$MTBF$** (Mean Time Between Failures).

$$MTTF = \frac{\text{celkový prevádzkový čas}}{\text{počet porúch}}$$

- **priemerná reziduálna životnosť MRL**

Uvažujme o prvku s časom do poruchy T , ktorý je uvedený do prevádzky v čase $t=0$ a stále funguje v čase t . Pravdepodobnosť, že prvok s vekom t prežije ďalší interval x je podľa [RH04]

$$R(x|t) = \Pr(T > x + t | T > t) = \frac{\Pr(T > x + t)}{\Pr(T > t)} = \frac{R(x + t)}{R(t)}$$

$R(x|t)$ sa nazýva *podmienečná funkcia spoľahlivosti* prvku vo veku t . Stredná reziduálna životnosť, MRL , prvku vo veku t je

$$MRL(t) = \mu(t) = \int_0^{\infty} R(x|t) dx = \frac{1}{R(t)} \int_t^{\infty} R(x) dx$$

- **poruchovosť λ**

$$\lambda = \frac{\text{počet porúch}}{\text{celkový prevádzkový čas}}$$

Pokiaľ uvažujeme, že $\lambda = \text{konst.}$, tak potom platí vzťah medzi $MTBF$ a λ :

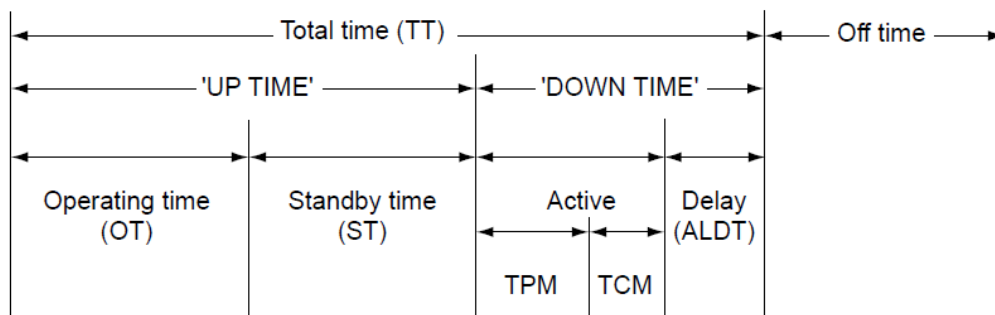
$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

1.1.2 Pohotovosť

Pohotovosť, označená A , predstavuje ďalšiu vlastnosť, charakteristiku, ktorá vyjadruje, že prvok bude schopný (v kombinovaných aspektoch jeho bezporuchovosti, udržiavateľnosti a s podporou údržby) vykonávať požadované funkcie v deklarovanom časovom okamihu alebo po uvedení časovú dobu. [Hau14]

■ Pohotovosť a jej časové elementy

Obrázok 2.3 znázorňuje rozdelenie celkovej doby zariadenia do časových elementov na základe, ktorých je založená analýza sledovaného parametru pohotovosti.



Obrázok 1.4: Časové intervaly prvku so zameraním na parameter pohotovosti.

TT = Celková predpokladaná doba využitia (celkový čas), TCM = Celková neplánovaná doba údržby za stanovené obdobie. TPM = Celková preventívna (plánovaná) doba údržby za určité obdobie. ALDT = Administratívne a logistické odstávky strávené čakaním na náhradné diely, administratívne spracovanie, pracovníkov údržby či dopravu za určité obdobie. Celková doba údržby: TMT = TCM + TPM. Celková doba odstávky: TDT = TMT + ALDT. OT = Prevádzková doba (zariadenie v prevádzke). ST = Pohotovostná doba (prvok nie je v prevádzke, ale predpokladá sa jeho ovládateľnosť) v stanovenej lehote. [Sta09]

Základné matematické vyjadrenie pohotovosti podľa [CLT82] je

$$A = \frac{\text{UP TIME}}{\text{TOTAL TIME}}$$

S prihliadnutím na rôzne kombinácie časových elementov definujeme rôzne druhy pohotovosti.

■ Inherentná pohotovosť A_i

Pohotovosť definovaná s ohľadom na prevádzkovú dobu (OT) a opravné práce (TCM) pri nebraní v úvahu pohotovostný režim (ST) a čas oneskorenia spojený s plánovanou alebo preventívnou údržbou (TPM) a ALDT. [CLT82] MTBF vyjadruje priemernú dobu medzi poruchami pre opraviteľný prvok (systém). Pri neopraviteľnom prvku je MTBF ekvivalentné s MTTF.

$$A_i = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} = \frac{\text{OT}}{\text{OT} + \text{TCM}}$$

V niektorých vzťahoch je MTTR používané namiesto MDT (mean down time - priemerná odstávka). MTTR nemusí vyjadrovať rovnakú hodnotu ako MDT a to v nasledujúcich prípadoch pokiaľ:

- Porucha nie je zaznamenaná presne v čase vzniku.
- Začiatok odstraňovania poruchy nezačne bezodkladne od jej vzniku.
- Zariadenie sa nesmie uviesť do prevádzky okamžite po odstránení poruchy.

Preto či sa používa MDT alebo MTTR, je dôležité, aby to odrážalo celkový čas, počas ktorého nie je zariadenie k dispozícii pre servis, inak bude vypočítaná pohotovosť nesprávne.

■ Prevádzková pohotovosť A_o

$$A_o = \frac{\text{OT} + \text{ST}}{\text{OT} + \text{ST} + \text{TPM} + \text{TCM} + \text{ALDT}}$$

Tento vzťah poskytuje reálne ohodnotenie pohotovosti zariadení, ktoré sú nasadené a pracujúce v prostredí, pre ktoré boli navrhnuté. Prevádzková pohotovosť sa používa na podporu posúdenia prevádzkových skúšok a nákladov životného cyklu.[CLT82]

Jeden významný problém spojený so stanovením A_o je, že sa stáva nákladné a časovo náročné definovať parametre vystupujúce v definícii.

Definovanie ALDT a TPM v reálnych podmienkach nie je vo väčšine prípadov možné.

■ Dosiahnutá pohotovosť A_a

$$A_a = \frac{\text{OT}}{\text{OT} + \text{TPM} + \text{TCM}}$$

Pohotovosť cestného tunela je ovplyvňovaná mnohými rôznymi faktormi. NPRA³ zdefinovala šesť príčin, do ktorých môžeme zaradiť faktory spôsobujúce obmedzenie pohotovosti:

³ Norwegian Public Roads Administration

- Plánovaná odstávka: Plánovaná údržba
- Plánovaná odstávka: Rekonštrukcia technických vybavení a konštrukcie
- Neplánovaná odstávka: Dopravné udalosti (nehody, núdzového zastavenia, požiar)
- Neplánovaná odstávka: Opravy, externá príčina
- Neplánovaná odstávka: Stavebná porucha
- Neplánovaná odstávka: Technické zlyhanie systému

1.1.3 Unavailability - nedostupnosť q

1. Poruchovosť λ a repair rate r sú konštantné v čase.

V mnohých prípadoch zlyhanie elektrického zariadenia je ľahko zistiteľné, a to buď signalizáciou alebo tým, že dôjde k narušeniu systému, takže jeho oprava môže začať okamžite. Ak budeme predpokladať poruchovosť λ a repair rate r konštantnú v čase tkz. ustálený stav, tak pre nedostupnosť q môžeme písať:

$$\begin{aligned} \text{Unavailability} &= 1 - \text{availability} \\ \text{Unavailability} &= 1 - \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \\ \text{Unavailability} &= \frac{\text{MTBF} + \text{MTTR}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} - \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \\ \text{Unavailability} &= \frac{\text{MTTR}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \\ q &= \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} \\ q &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \\ \omega &= \lambda(1 - q) \end{aligned}$$

kde ω je frekvencia poruchy komponentu $\left[\frac{\text{počet chýb}}{\text{hodina}}\right]$.

V mnohých oblastiach, do ktorých spadajú elektrotechnické prvky a súčiastky platí $q \ll 1$, potom po aproximácii pre q a ω dostávame:

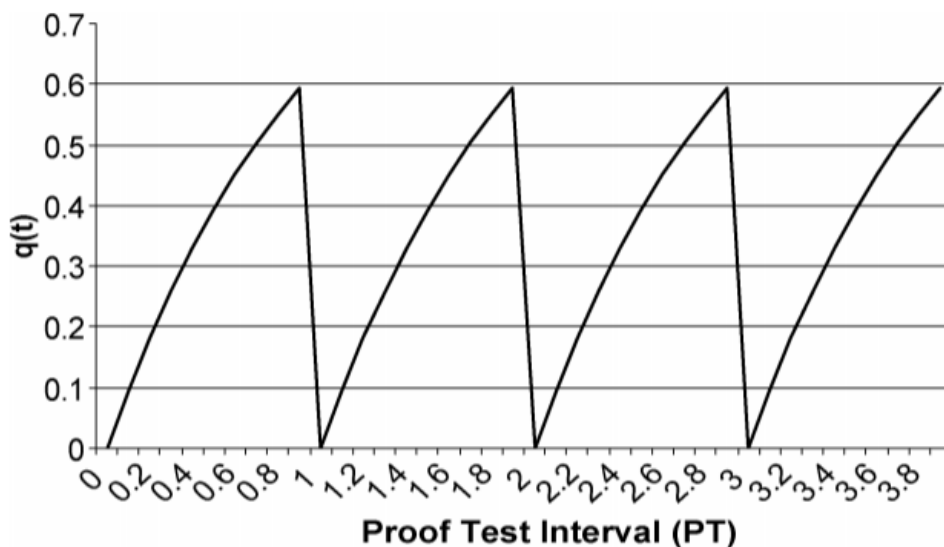
$$\begin{aligned} q &\approx \lambda \cdot r \\ \omega &\approx \lambda \end{aligned}$$

2. Fixná nedostupnosť základnej udalosti.

Najjednoduchší základný model má len bezrozmernú hodnotu pravdepodobnosti, ktorá reprezentuje jeho nedostupnosť q . Pretože táto hodnota pravdepodobnosti sa nemení v čase, dostala pomenovanie *fixná*. Poruchovosť λ nie je aplikovaná na tento typ nedostupnosti. Príklad: pravdepodobnosť ľudskej chyby spojená s nesprávnou kalibráciou relé...[Jac04]

3. Nedostupnosť q zapríčinená spiacou (latentnou) poruchou.

Ako už bolo zmienené, porucha na systéme nemusí byť zistená bezodkladne pri jej vzniku. S nefunkčným ochranným systémom iniciálna udalosť, napríklad zopnutie alebo rozopnutie vypínača (CB) na príkaz, môže viesť k rozsiahlemu výpadku systému. Zlyhanie je zistené len vtedy, keď: 1) komponent zlyhá pri požiadavke počas kontrolného testu alebo 2) položka zlyhá na skutočnú požiadavku (Pozdĺžny vypínač medzi dvomi rozvádzačmi, ktorý je v normálnom stave rozopnutý, ale v prípade straty napájania jedného z rozvádzačov dá ovládacia logika povel na zopnutie tohto vypínača). Preto je dôležitá frekvencia testovania na určenie dostupnosti komponentu alebo implementácia monitorovacieho alebo ochranného zariadenia na vykonanie zamýšľanej funkcie na požiadanie. zariadenie na vykonanie zamýšľanej funkcie na požiadanie. V skutočnosti, spiace komponenty vykazujú charakteristiky podobné neopraviteľných komponentov v období medzi inšpekciami. Skutočná zmena nedostupnosti q s časom má periodický charakter a mení sa s intervalom kontroly (PT).



Obrázok 1.5: Pravdepodobnosť spiackej poruchy v závislosti na čase [Jac04]

$$q_{mean} = \frac{\lambda \cdot PT}{2} + \lambda \cdot MTTR$$

kde PT je inšpekčný interval v hodinách.

Ak platí $\lambda \cdot MTTR \ll 1$ potom môžeme q_{mean} aproximovať na

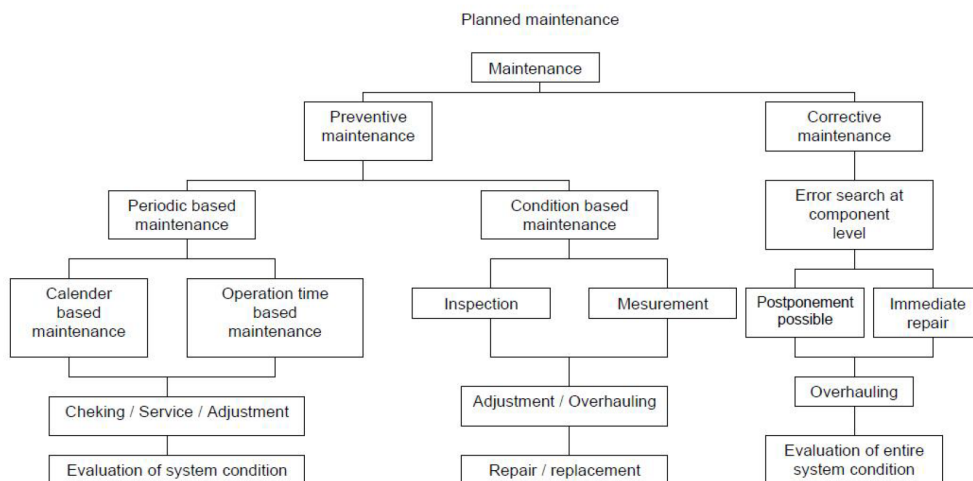
$$q_{mean} = \frac{\lambda \cdot PT}{2}$$

1.1.4 Udržateľnosť

Udržateľnosť je charakteristika prvku vyjadrená pravdepodobnosťou, že **preven-
tívna údržba** alebo **opravné práce** na prvku budú vykonané vrámci uvedeného časového intervalu pri daných postupoch a zdrojoch (počet a úroveň zručnosti personálu, náhradné diely, skúšobné zariadenia, ...). Z kvalitatívneho hľadiska, udržateľnosť môže byť definovaná ako schopnosť prvku byť udržiavaný v určenom stave. Očakávaná priemerná doba opravy je značená ako *MTTR*. *MTTPM* je označenie pre priemernú dobu preventívnej údržby. [Bir99]

Údržba

Pod pojmom *údržba* rozumieme všetky činnosti, ktoré sú vykonávané na prvku za účelom jeho udržiavania alebo obnovy do špecifikovaného stavu.[Bir99] Údržbu môžeme rozdeliť nasledovne:



Obrázok 1.6: Obecná schéma údržby [C.410]

Preventívna údržba

Vykonávaná v určených časových intervaloch, podľa predpísaných postupov s cieľom znížiť pravdepodobnosť zlyhania alebo degradáciu funkčnosti prvku.

- Test všetkých príslušných funkcií, rozpoznanie skrytých porúch.
- Činnosť smerujúca ku kompenzácii odchýlok a redukcii chýb vzniknutých z opotrebovania.
- Prehliadka za účelom zvýšenia životnosti.

■ **Opravné práce**

Zahájená po rozpoznaní poruchy za účelom navrátiť prvok do stavu, v ktorom opäť môže vykonávať požadované funkcie. Môže obsahovať niektoré alebo všetky z nasledujúcich krokov:

- Rozpoznanie poruchy.
- Lokalizácia a diagnóza poruchy.
- Oprava (odstránenie) poruchy.
- Preskúšanie funkcií.

■ **Výpočet MTTR**

Uvažujme o systéme bez redundancie s prvkami E_1, \dots, E_n v sérii vid' obrázok 1.7. Systém je odpojený počas opravy a čas zabraný opravou systému je zanedbateľný, to znamená, že $MTTR_i \ll MTTF_i$. V tomto prípade je očakávaná priemerná hodnota počtu porúch celého systému počas času T : $\sum_{i=1}^n \frac{T}{MTTF_i}$ [Bir99]

Stredná hodnota celkového času na opravu prvkov systému

$$\sum_{i=1}^n MTTR_i \frac{T}{MTTF_i} \text{ [Bir99]}$$

Stredná hodnota času na opravu prvkov systému $MTTR_s$

$$MTTR_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{MTTR_i}{MTTF_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTTF_i}} \text{ [Bir99]}$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{r} \left[\frac{\text{opráv}}{\text{hodina}} \right]$$



Obrázok 1.7: Blokový diagram pre systém bez redundancie [Bir99]

1.1.5 Bezpečnosť

Bezpečnosť je schopnosť systému, prvku, že nedôjde k zraneniu osôb, ku významnému poškodeniu materiálu alebo k iným neprijateľným dôsledkom v priebehu jeho používania. [Bir99]

V modernom cestnom tuneli je bezpečnosť zaistená integrovaným prístupom. Sady dobre vyvinutých nástrojov - ako *risk assessment*, bezpečnostné kontroly a bezpečnostné postupy - sú k dispozícii napomáhať k dosahovaniu bezpečnostných cieľov od počiatkových fáz plánovania a dizajnu nových tunelov, až po prevádzku a modernizáciu existujúcich tunelov. [ttc15]

Faktory ovplyvňujúce bezpečnosť v cestnom tuneli

Úroveň bezpečnosti v tuneloch je ovplyvňovaná v rôznej miere v závislosti od rozdielnych faktorov, ktoré môžeme hromadne zhrnúť do štyroch hlavných skupín:

1. účastníci cestnej premávky
2. prevádzkovanie, obsluha tunela
3. infraštruktúra
4. vozidlá

Kapitola 2

Analýza stromu porúch FTA

Strom porúch je podľa [RH04] logický diagram, ktorý zobrazuje vzájomné vzťahy medzi potenciálne kritickými udalosťami (poruchami) v systéme a príčinami týchto udalostí. Príčiny môžu byť spôsobené environmentálnymi podmienkami, ľudskými chybami, bežnými udalosťami (očakávané udalosti počas životnosti systému) a špecifickým zlyhaním komponentov. Analýza stromu porúch môže byť kvalitatívna, kvantitatívna alebo zmiešaná, v závislosti od samotných cieľov analýzy. Možné výsledky analýzy môžu tvoriť napríklad:

- Zoznam možných kombinácií environmentálnych faktorov, ľudských chýb, normálnych udalostí a zlyhaní komponentov, ktoré môžu viesť ku kritickej udalosti systému.
- Pravdepodobnosť vzniku kritickej udalosti počas určeného časového intervalu.

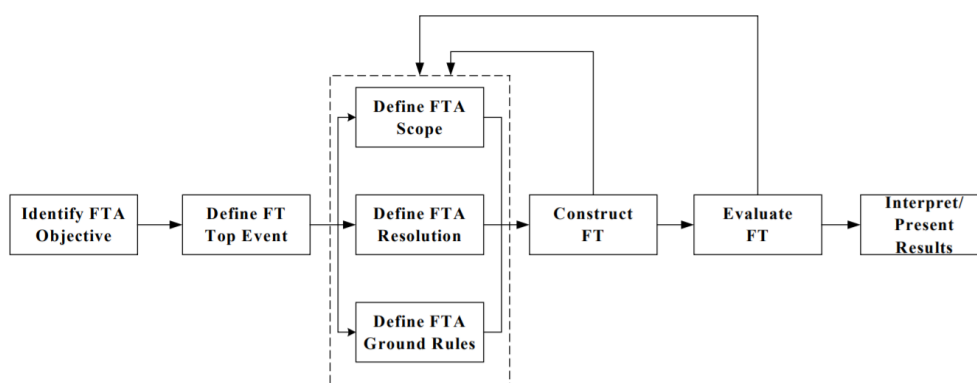
Výhodou analýzy je skutočnosť, že donúti analytika poruchy predstaviť si a podrobne popísať logiku rozvoja poruchy v systéme, odhaliť všetky kauzálne väzby medzi prvkami a poruchou, a to až do zvolenej úrovne systému. Pretože sa jedná o deduktívnu metódu, strom sa rozvíja od vrcholovej udalosti k ďalším javom nižšej úrovne, pričom sa posudzujú možné príčiny vzniku nadradeného poruchového javu.[SPA08]

2.1 Konštrukcia stromu porúch

Úspešná FTA podľa [Rai02] vyžaduje vykonanie nasledujúcich krokov:

1. Identifikovanie cieľa FTA.
2. Definovanie vrcholovej udalosti (Top Event) stromu porúch.
3. Definovanie rozsahu FTA.
4. Definovanie rozlíšenia FTA.
5. Určenie základných pravidiel FTA.
6. Konštrukcia stromu porúch.
7. Ohodnotenie stromu porúch.
8. Interpretovanie a prezentácia výsledkov.

Prvých päť krokov zahŕňa formuláciu problému FTA. Zvyšné kroky zahŕňajú konštrukciu stromu porúch na základe bodov 1 - 5, hodnotenie stromu porúch a interpretáciu výsledkov stromu porúch. Zatiaľ čo väčšina krokov sa vykonáva postupne, kroky 3 - 5 môžu pokračovať súbežne. Nie je nezvyčajné kroky 4 - 5 upravovať počas realizácie krokov 6 - 7.



Obrázok 2.1: FTA - jednotlivé kroky realizácie [Rai02]

Určením vrcholovej udalosti by sa malo zodpovedať na tri otázky:

- **Čo?** Popisuje, aký typ kritickej udalosti (poruchy) sa vyskytne.
- **Kde?** Popisuje, kde nastane kritická udalosť.
- **Kedy?** Popisuje, kedy nastane kritická udalosť (napr. počas bežnej prevádzky).

2.2 Softvér OpenFTA, databáza primárnych udalostí stromu porúch

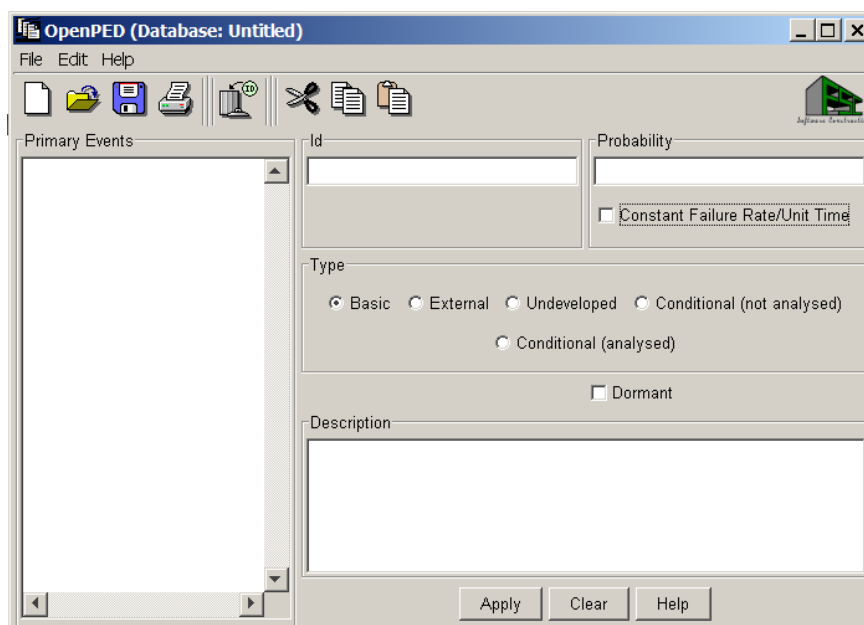
Na analýzu stromu porúch je použitý freeware OpenFTA. Je to pokročilý nástroj na analýzu stromov porúch, ktorý umožňuje užívateľovi vytvárať, upravovať alebo analyzovať poruchové stromy.

Vybrané užívateľské nástroje a funkcie programu:

- grafické užívateľské rozhranie typu point-and-click umožňuje rýchle kreslenie stromov porúch
- podpora úplnej sady symbolov stromov porúch v súlade s NUREG-0492¹
- databáza pre ukladanie a zadefinovanie primárnych udalostí
- kvalitatívna analýza stromov porúch na určenie minimálnych kritickej rezov
- kvantitatívna analýza stromov porúch (vrátane simulačného nástroja Monte Carlo)

Pridanie primárnej udalosti do databázy openFTA vyžaduje určité minimálne množstvo informácií pre danú udalosť. Každá udalosť musí mať jedinečné ID v databáze primárnych udalostí, musí mať pravdepodobnosť nedostupnosti q a musí mať určený typ, viď obrázok 2.2. Primárne udalosti obsahujú textový popis, ktorý ich rozlíši alebo poskytne ďalšie informácie.

¹ Podrobnejšie v časti *Základné logické symboly a hradlá stromu porúch*



Obrázok 2.2: openFTA - zadávanie primárnych udalostí do databáze

2.3 Základné logické symboly a hradlá stromu porúch

stredná udalosť

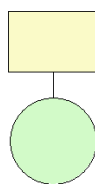
Používa sa na určenie udalosti poruchy, ktorá sa vyskytuje v dôsledku jednej alebo viacerých príčin, ktoré sa vyskytujú v logickej bráne pod ňou v stromovej štruktúre porúch.



Obrázok 2.3: Symbol strednej udalosti

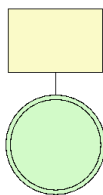
základná inicializačná udalosť

Používa sa na špecifikáciu udalosti poruchy, ktorá nevyžaduje žiaden ďalší vývoj, to znamená, že nemá žiadne hradlá alebo udalosti pod sebou v stromovej štruktúre.



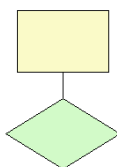
Obrázok 2.4: Symbol základnej inicializačnej udalosti

- základná inicializačná udalosť so spiacou (latentnou) poruchou
Slúži na špecifikovanie udalosti, ktorej nedostupnosť q je zapríčinená spiacou (latentnou) poruchou.



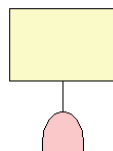
Obrázok 2.5: Základná inicializačná udalosť so spiacou (latentnou) poruchou

- nerozvinutá udalosť
Slúži na špecifikovanie udalosti poruchy, ktorá nie je rozvinutá, tak ako by mohla byť, buď preto, že udalosť nie je dôležitá v tomto strome porúch alebo preto, že nie je k dispozícii dostatok informácií.



Obrázok 2.6: Symbol nerozvinutej udalosti

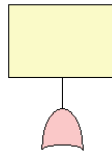
- hradlo AND
Používa sa na zobrazenie toho, že výstupná chyba sa stane len vtedy, ak dôjde k naplneniu všetkých vstupných udalostí.



Obrázok 2.7: Symbol hradla AND

- hradlo OR

Používa sa na zobrazenie toho, že výstupná chyba nastane len vtedy, ak sa naplní minimálne jedna alebo viac vstupných udalostí.



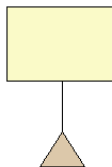
Obrázok 2.8: Symbol hradla OR

Transfer symboly

Tieto symboly sa používajú na moduláciu stromu porúch. Napríklad, ak existuje sekvencia udalostí, ktorá sa vyskytuje na viac ako jednom mieste v stromovej štruktúre jedného stromu porúch, môže byť táto sekvencia nahradená príslušným transferovým symbolom. Daná sekvencia udalostí je umiestnená do samostatného podstromu porúch s príslušným odkazom prostredníctvom transferových symbolov v hlavnom strome porúch a na podstrome porúch.

■ transfer IN

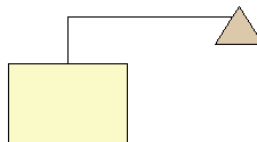
Používa sa na priradenie podstromu porúch pre konkrétnu udalosť, ktorý bol vytvorený v samostatnom súbore.



Obrázok 2.9: Symbol transfer IN

■ transfer OUT

Používa sa na určenie toho, že strom porúch pod týmto symbolom vyjadruje podstrom stromu porúch, ktorý je uložený v inom súbore.



Obrázok 2.10: Symbol transfer OUT

Kapitola 3

Napájanie cestného tunelu elektrickou energiou

3.1 Základné požiadavky na zásobovanie elektrickou energiou

Základná požiadavka je zaistenie dodávky elektrickej energie pre celý komplex cestného tunelu z dvoch nezávislých zdrojov. Za nezávislý zdroj z distribučnej siete sa podľa ČSN 73 0802 považuje uzol prenosovej siete 22 kV, v ktorom na rôznych prípojniciach sú pripojené vedenia rôznych uzlov 110 kV. Výnimočne sa môže dodávka elektrickej energie zaistiť pripojením na distribučnú sieť slučkou alebo pripojením na mrežovú sieť. [hla10]

Pokiaľ nie je možné takto zaistiť napájanie elektrickou energiou z distribučnej siete, je nutné použiť ako druhý nezávislý zdroj záložný zdroj elektrickej energie. Stupeň dodávky ¹ pre jednotlivé objekty a prevádzku tunelového komplexu sa rieši diferencovane podľa ich dôležitosti. [hla10]

¹ Dodávka elektrickej energie se rozdeľuje podľa dôležitosti do troch skupín:

- Prvý stupeň - dodávka elektrickej energie musí byť zaistená z dvoch nezávislých zdrojov, z ktorých každý musí mať taký výkon, aby zabezpečil dodávku elektrickej energie pre všetky spotrebiče prvého stupňa dôležitosti.
- Druhý stupeň - spôsob napájania je daný miestnymi pomermi a zriaďuje sa zálohovaním.
- Tretí stupeň - dodávka elektrickej energie nemusí byť zabezpečená zvláštnym spôsobom.

3.1.1 Zdroje elektrickej energie

- zdroj vysokého napätia do 52 kV,
- záložný zdroj napájania elektrickou energiou,
- zdroj neprerušovanej dodávky elektrickej energie.

Zdroj vysokého napätia do 52 kV

Hlavným zdrojom napájania elektrickou energiou v komplexe cestného tunela je transformačná stanica, napájaná z dvoch na sebe nezávislých napájacích zdrojov z distribučnej siete, tj. prívodov, u ktorých poškodenie alebo vypnutie jedného z nich nemá za následok vypnutie druhého prívodu. Transformačná stanica musí byť riešená v stupni zabezpečenia elektrickej energie 1, tj. musí byť vybavená minimálne dvoma transformátormi. Výkon každého z nich musí úplne pokryť požadovanú spotrebu. [hla10]

Záložný zdroj napájania elektrickou energiou

Ak kategória tunela vyžaduje zásobovanie elektrickou energiou z dvoch nezávislých rozvodní 22 kV a nedajú sa zriadiť, musí byť zabezpečené záložné zásobovanie z agregátov na výrobu elektrickej energie - vlastný záložný zdroj.

Agregáty musia byť vybavené automatickým štartom pri výpadku siete. Zásoba pohonných hmôt pre prevádzku agregátu, prípadne kapacita akumulátorových batérií v prípade výnimočného použitia statickej UPS ako záložného zdroja, musí zabezpečiť prevádzku zariadení špecifikovaných nižšie v bodoch 1 a 2, minimálne po dobu 4 hodín. Po ďalšiu dobu musí byť zabezpečená prevádzka zariadení špecifikovaných v časti „Zdroj neprerušovanej dodávky elektrickej energie“.[hla10]

1. Zariadenia u ktorých krátkodobý výpadok napájania nemá bezprostredný vplyv na bezpečnosť:
 - Zariadenie pre usmerňovanie pohybu dymu pri požiari v tuneli (ventilácia, dymové klapky, pretlakové vetranie záchranných ciest).
 - Zariadenie pre zásobovanie požiarnou vodou - výkonová časť (čerpadlá).

- Vyhrievacie káble pre ohrev požiarneho vodovodu v tuneli.
 - Ostatné zariadenia (napr. niektoré skupiny akomodačného osvetlenia, vonkajšie osvetlenie a servisné zásuvky).
2. Zariadenia napájané z rozvodne NN tunelovej stavby a napájanie je zálohované zdrojom neprerušovaného napájania (UPS) alebo zariadenia napájané z vlastných zdrojov:
- Riadiace systémy tunela.
 - Dopravný systém, tj. premenné dopravné značky, zariadenie pre prevádzkové informácie a riadenie dopravy na vjazde.
 - Technické zariadenie, ktoré má zásadný význam pre zabránenie nedovoleného vjazdu do tunela.
 - SOS kabíny vrátane poplachovej signalizácie (mimo servisné zásuvky).
 - Zariadenie pre potlačenie požiaru alebo výbuchu (samočinné hasiace systémy).
 - Zariadenie pre zásobovanie požiarou vodou – riadiaca časť.
 - Zariadenie pre obmedzenie šírenia požiaru (požiarne klapky, požiarne dvere a požiarne uzávery otvorov vrátane ich funkčného vybavenia).
 - Zariadenie pre bezpečný únik osôb pri požari v tuneli (núdzové osvetlenie únikových ciest, dispečingu a vybraných technologických priestorov, značenie únikových ciest (v prípade, že značenie únikových ciest potrebuje elektrické napájanie)).
 - Náhradné osvetlenie tunelu a tunelových priestorov.
 - Systém videodohľadu.
 - Detekcia škodlivín a meranie fyzikálnych veličín.
 - Bezpečnostné SOS hlásky pred portálmi tunela, vrátane poplachovej signalizácie, mimo časť určenú pre výkon servisu.
 - Spojovacie a dorozumievacie zariadenie (rádiové spojenie a informačný rozhlas).
 - Prípadne ďalšie zariadenia dôležité pre bezpečnosť prevádzky alebo požiaru ochranu vyplývajúcu z konkrétneho riešenia (ochrana proti zaplaveniu).
 - Požiarne bezpečnostné zariadenia - zariadenia pre požiaru signalizáciu (EPS).

■ Zdroj neprerušovanej dodávky elektrickej energie

Zdroj neprerušovanej dodávky elektrickej energie (**UPS**) zabezpečuje nepretržité napájanie vybraných elektrických spotrebičov v komplexe cestného tunelu. Zdroje

UPS musia pri výpadku siete zaistiť napájanie elektrickou energiou bez prerušenia. Výstupy z UPS upozorňujú na jeho stav, vrátane údajov o stupni vybitia, sú privedené do riadiaceho systému. Údaj o vybití na stanovenú kritickú hranicu je poplachovým hlásením. Pokiaľ nedošlo k prepnutiu napájania na záložný zdroj (druhý nezávislý zdroj z distribučnej siete, dieselaagregát...), musí byť zásobovanie el. energiou vybraných systémov a zariadení zaistené po dobu stanovenú podľa [hla10] kapitola 11.3, nasledovne:

Systémy nepretržite zásobované el. energiou po dobu minimálne 180 minút:

- Zariadenie pre potlačenie požiaru alebo výbuchu (samočinné hasiace systémy).
- Zariadenie pre usmerňovanie pohybu dymu pri požiaru v tuneli (ventilácia, dymové klapky, pretlakové vetranie záchranných ciest).
- Zariadenie pre zásobovanie požiarou vodou - výkonová časť (čerpadlá).
- Spojovacie a dorozumievacie zariadenie (rádiové spojenie a informačný rozhlas).
- Požiarne bezpečnostné zariadenia - zariadenia pre požiaru signalizáciu (EPS).

Systémy nepretržite zásobované el. energiou po dobu minimálne 120 minút:

- Riadiace systémy tunela.
- Technické zariadenie, ktoré má zásadný význam pre zabránenie nedovoleného vjazdu do tunela.
- Zariadenie pre zásobovanie požiarou vodou – riadiaca časť.
- Zariadenie pre obmedzenie šírenia požiaru (požiarne klapky, požiarne dvere a požiarne uzávery otvorov vrátane ich funkčného vybavenia).
- Zariadenie pre bezpečný únik osôb pri požiaru v tuneli (núdzové osvetlenie únikových ciest, dispečingu a vybraných technologických priestorov, značenie únikových ciest (v prípade, že značenie únikových ciest potrebuje elektrické napájanie)).
- Systém videodohľadu.

Systémy nepretržite zásobované el. energiou po dobu minimálne 30 minút:

- Dopravný systém, tj. premenné dopravné značky, zariadenie pre prevádzkové informácie a riadenie dopravy na vjazde.
- SOS kabíny vrátane poplachovej signalizácie (mimo servisné zásuvky).
- Detekcia škodlivín a meranie fyzikálnych veličín.
- Bezpečnostné SOS hlásky pred portálmi tunela, vrátane poplachovej signalizácie, mimo časť určenú pre výkon servisu.
- Prípadne ďalšie zariadenia dôležité pre bezpečnosť prevádzky alebo požiarnu ochranu vyplývajúcu z konkrétneho riešenia (ochrana proti zaplaveniu).

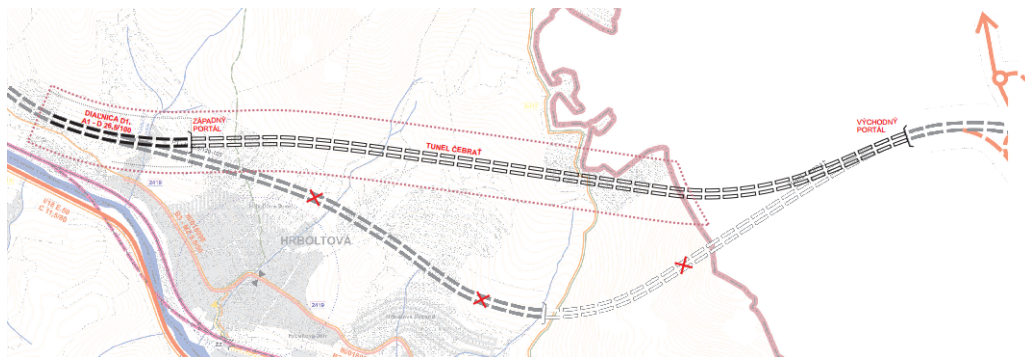
Predpisy pre nižšie vymenované zariadenia resp. systémy požadujú napájanie z vlastného zdroja a jeho kapacita je rádovo väčšia, alebo že táto doba je dôležitá pre požiarnu bezpečnosť a vyplýva z konkrétneho riešenia danej stavby.

- Náhradné osvetlenie tunelu a tunelových priestorov.
- Vyhrievacie káble pre ohrev požiarneho vodovodu v tuneli.
- Ostatné zariadenia (napr. niektoré skupiny akomodačného osvetlenia, vonkajšie osvetlenie a servisné zásuvky).

Kapitola 4

Analýza návrhu napájania tunela Čebrať elektrickou energiou

Dvojrúrovňový tunel s dĺžkou 3 650 metrov vo výstavbe, ktorý sa nachádza na diaľnici D1 na úseku medzi Hubovou a Ivachnovou. Oficiálny začiatok razenia tunela sa uskutočnil 19. septembra 2014.



Obrázok 4.1: Trasovanie tunela Čebrať [Zil16]

Napájanie navrhovaného cestného tunelu elektrickou energiou bude riešené prostredníctvom dvoch na sebe nezávislých prívodov z distribučnej siete VN. Prvý prívod bude riešený z elektrickej stanice transformovne 110/22 kV Lisková a bude smerovaný ako vzdušné vedenie, VN vedenie č. 137, do hlavnej rozvodne portálového objektu VÝCHOD.

Druhý, nezávislý prívod by mal byť riešený z elektrickej stanice transformovne

110/22 kV Mokrad a bude smerovaný ako vzdušné vedenie, do hlavnej rozvodne portálového objektu ZÁPAD.

Kapitola je rozdelená na jednotlivé časti podľa napätových hladín 0,4kV, 22kV a 110kV. Každá časť obsahuje topológiu napájania tunela na danej napätovej hladine a údaje, ktoré tvorili podklad na určenie nedostupnosti q primárnych udalostí.

4.1 Napätová hladina 0,4 kV - rozvádzače RH1, RH2, napájanie z dvoch nezávislých el. staníc 110/22 kV

Uvažujme model napájania tunela, viď obrázok 4.3: *Prehľadová schéma napájania z distribučnej siete*. Ako vrcholovú udalosť stromu porúch budeme predpokladať, že NN *subrozdávač_1*¹ bude na vstupe bez el. energie. Výsledný strom porúch, ktorý popisuje toto napájanie, je súčasťou prílohy pod názvom *distribucia.pdf*. Strom porúch *distibucia.pdf* má v sebe zakomponovaný transfer in symbol pre *pokus_QA.pdf*, ktorý vyjadruje strom porúch s vrcholovou udalosťou, že hlavný deón rozvádzača RH1, vetva Lisková, bude bez el. energie (podrobnejšie viď kapitola 4.3 a 4.4). Ďalej sú v strome porúch *distribucia.pdf* nerozvinuté udalosti *RH1_dis* a *RH2_dis*, ktorých pravdepodobnosti sú získané zo stromu porúch *RH1_dis.pdf* a *RH2_dis.pdf*. Vyjadrujú poruchu na RH1 a RH2.

Pravdepodobnosť straty napájania el. energie po deón QB rozvádzača RH2, vetvou Mokrad, uvažujeme v modeli za číselne rovnakú akú sme vypočítali zo stromu porúch *pokus_QA.pdf*. Z hľadiska tvorby minimálne kritických rezov by bolo najvhodnejšie, aby sa namiesto nerozvinutých udalostí používali symboly transfer in/out, čo ale pri tak robustnom strome porúch by čas potrebný na výpočet presiahol reálne možnosti.

Všetky primárne udalosti spolu s ich ID, pravdepodobnosťou, typom, popisom a zdrojom získanej pravdepodobnosti, viď obrázok 2.2, sú uvedené v prílohe *databaza_primarne_udalosti.pdf* pre všetky stromy porúch.

Pri zostavovaní stromu porúch sa postupovalo nasledovne:

Každú NN zbernicu bude možné nezávisle na seba napájať z príslušnej TS prostredníctvom transformátora 22/0,4 kV. Každý rozvádzač RH bude pozostávať

¹ Istiaci prvok *Q1.1* je súčasťou *subrozdávača_1*, poruchu *subrozdávača_1* v modeli neuvažujeme.

z hlavného vypínača na vstupe (QA, QB), z výstupných istiacich prvkov (ich počet v závislosti na konkrétnom návrhu NN rozvádzača podľa platných technických noriem, v modeli počítam s piatimi istiacimi prvkami na výstupe) a pozdĺžneho odpojovača QT. V režime normálnej prevádzky uvažujeme napájanie z el. stanice Lisková, hl. vypínač QA aj ďalšie istiace prvky Q1 a Q1.1 sú v zopnutom stave. Pozdĺžny odpojovač QT, hl. vypínač QB aj istiace prvky Q2 a Q2.1 sú v rozopnutom stave.

■ Prepínacia logika

Súčasťou prepínacej logiky by mali byť meracie zariadenia (prístrojové transformátory napätia a prúdu), ktoré by mali vyhodnocovať prípadnú poruchu napájania NN zbernice z príslušného TS 22/0,4 kV. Vedenia, z rozvodne Lisková a Mokrad, zabezpečujúce dodávku elektrickej energie sa považujú za plne nezávislé, viď obrázok 4.3.

Subrozvádzač _1 je možné napájať z dvoch nezávislých el. staníc, celkovo štyrmi rôznymi variantami, v závislosti na mieste výskytu poruchy alebo iných povinných revízných odstávok viď obrázok 4.2.

		QA	Q1	Q1.1	QT	QB	Q2	Q2.1
1	Napájanie z el. stanice Lisková cez Q1	Normálna prevádzka	c	c	c	o	o	o
2	Napájanie z el. stanice Lisková cez Q2	Porucha za Q1	c	o	o	c	o	c
3	Napájanie z el. stanice Mokrad cez Q1	Bez prívodu el. energie z distribučnej siete, vetva Lisková	o	c	c	c	o	o
4	Napájanie z el. stanice Mokrad cez Q2	Bez prívodu el. energie z distribučnej siete, vetva Lisková a porucha na rozvádzači RH1	o	o	o	o	c	c

O - poloha open, C - poloha close

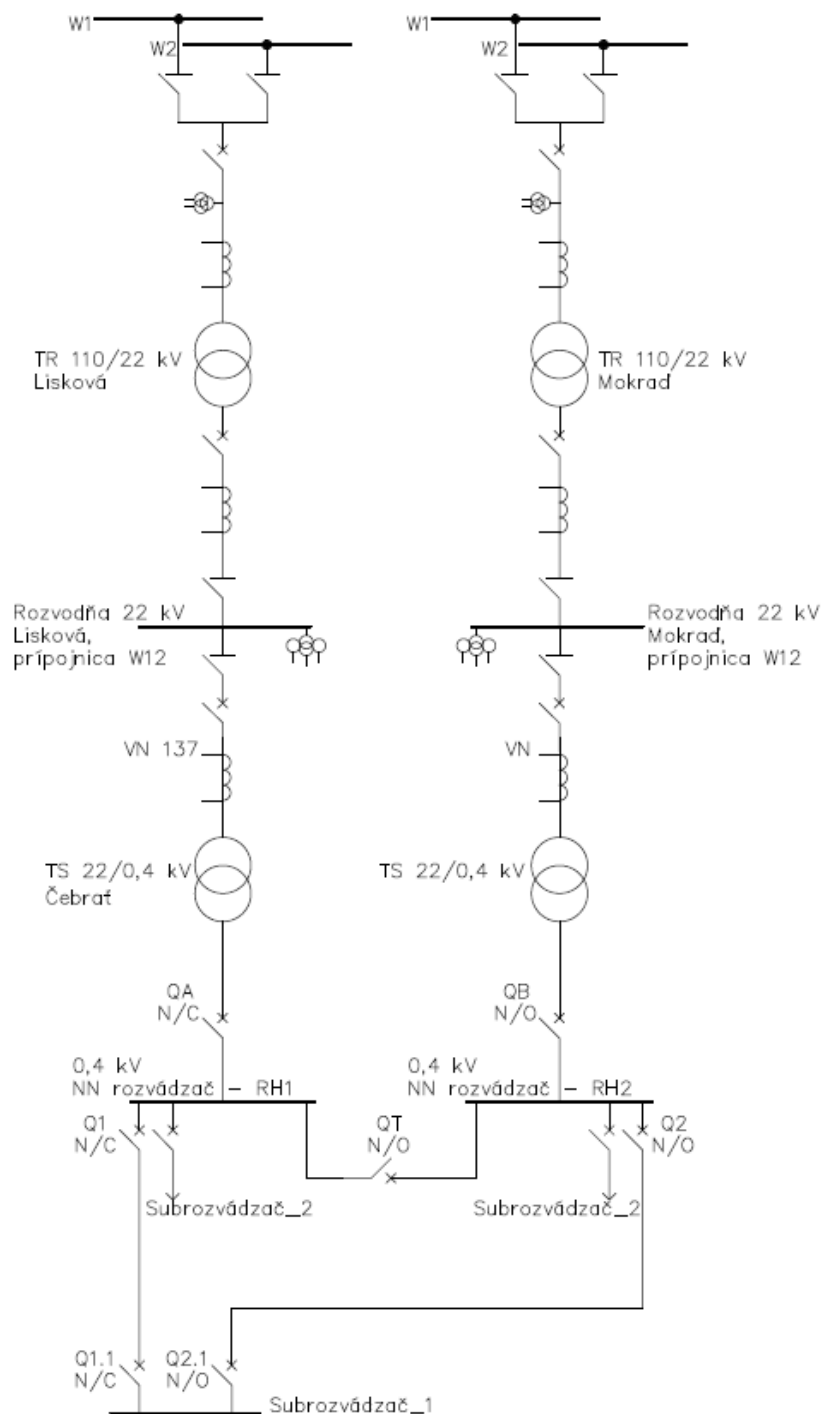
Obrázok 4.2: Napájanie z distribučnej siete - prepínacia logika

Pri poruche napájania el. energie z príslušnej TS 22/0,4 kV do NN zbernice (pred hlavným vypínačom QA alebo QB) sa príslušný hlavný vypínač rozopne. V prípade poruchy pred QA logika prepínania rozopne QA následne na to zopne hl. vypínač QB a pozdĺžny odpojovač QT a obe NN zbernice budú napájané z jedného zdroja.

Porucha rozvádzača RH1 alebo RH2 (súčasťou rozvádzača sú komponenty: prípojnice, hl. vypínač, výstupné istiace prvky, prístrojový transformátor napätia,...) počas prevádzky bude mať za následok rozpojenie príslušného hl. vypínača a výpadok napätia na všetkých vývodoch v postihnutom rozvádzači RH. V prípade poruchy na QA alebo QB bude potrebné rozpojiť úsekový odpínač na VN strane pred príslušným TS 22/0,4kV.

4.1. Napätová hladina 0,4 kV - rozvádzače RH1, RH2, napájanie z dvoch nezávislých el. staníc 110/22 kV

Porucha pozdĺžneho odpojovača QT zapríčiní, že QA a QB budú súčasne rozopnuté. Výstup z NN zberníc rozvádzačov RH1 a RH2 bude bez napätia.



Obrázok 4.3: Prehľadová schéma napájania z distribučnej siete

V nasledujúcej tabuľke 4.1 sú uvedené komponenty, s ktorými sa uvažovalo pri

4.1. Napätová hladina 0,4 kV - rozvádzače RH1, RH2, napájanie z dvoch nezávislých el. staníc 110/22 kV

zostavení stromu porúch, viď príloha: *RH1_dis.pdf* a *RH2_dis.pdf*.

Popis	Typ poruchy	λ [$\frac{\text{poruchy}}{\text{hodina}}$]	MTTR, PT [hod]	q
Switchgear, bare bus, <=600 V, all cabinets, ckt. bkrs. not included	Constant failure rate	1,08333E-06	7,29	7,8975E-06
Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), <600 A, normally closed trp., ckt. inc.	Constant failure rate	2,397E-08	6	1,4382E-07
Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), <600 A, normally open trp., ckt. inc.	Constant failure rate	2,9109E-07	6	1,74654E-06
Prístrojový transformátor napätia, NN	Constant failure rate	/	/	3,4246E-07
Prístrojový transformátor prúdu, NN	Constant failure rate	/	/	3,4246E-07

Tabuľka 4.1: Poruchovosť komponentov na napätovej hladine NN[Spo07]

Tabuľka 4.2 udáva percentuálny podiel vybranej poruchy istiacich prvkov zo všetkých zlyhaní pre všetky napätové hladiny.

Percentuálny podiel vybranej poruchy zo všetkých zlyhaní	Charakteristika poruchy
9 %	Požadované záložné ochranné vybavenie (počas rozopnutia zlyhalo)
7 %	Poškodené pri úspešnom rozopínaní
5 %	Nepodarilo sa zopnúť, pri povelé zopnutia
2 %	Poškodené pri zopínaní

Tabuľka 4.2: Vybrané poruchové režimy istiacich prvkov (všetky napätové hladiny)[Spo07]

4.2 Napätová hladina 0,4 kV - napájanie z dvoch nezávislých el. staníc 110/22 kV, UPS a diesel agregátov

Uvažujme model napájania tunela, viď obrázok 4.5: *Prehľadová schéma napájania z distribučnej siete, UPS a dieselagregátu*. Ako vrcholovú udalosť stromu porúch budeme predpokladať, že NN *subrozdávač_1*² bude na vstupe bez el. energie. Výsledný strom porúch *Test_ups.pdf* je súčasťou prílohy.

Strom porúch *Test_ups.pdf* obsahuje tri nerozvinuté udalosti:

- porucha v distribučnej sieti po deón QA, spôsobujúca výpadok napájania el. energiou tunelový komplex po vetve Lisková, ktorej pravdepodobnosť bola vypočítaná na základe stromu porúch *pokus_QA.pdf*, viď kapitola 4.3 a 4.4
- porucha v distribučnej sieti po deón QB, spôsobujúca výpadok napájania el. energiou tunelový komplex po vetve Mokrad, ktorej hodnota pravdepodobnosti bola získaná z *pokus_QA.pdf*, pretože v modeli uvažujeme s rovnakou pravdepodobnosťou výpadku pre vetvu napájania z rozvodne 110/22kV Lisková aj rozvodne Mokrad
- porucha na rozvádzači RH1, viď príloha strom porúch *RH1_dis.pdf*

Ďalšie udalosti stromu porúch *Test_ups.pdf* sú primárne a ich popis je súčasťou prílohy *databaza_primarne_udalosti.pdf*.

Pri zostavovaní stromu porúch sa postupovalo nasledovne:

Každá NN zbernica rozvádzačov RH1 a RH2 bude nezávisle na seba napájaná z príslušnej TS prostredníctvom transformátora 22/0,4 kV. Rozvádzače RH1 a RH2 budú pozostávať z hlavného vypínača na vstupe (QA, QB), pozdĺžneho odpojovača QT a z výstupných istiacich prvkov (ich počet v závislosti na konkrétnom návrhu NN rozvádzača podľa platných technických noriem, v modeli počítam s piatimi istiacimi prvkami na výstupe, ktoré sú súčasťou napájania ďalších subrozdávačov). Hlavný vypínač QA a výstupné istiace prvky (ističe) v RH1 sú počas normálnej prevádzky v zopnutom stave pod napätím. Pozdĺžny odpojovač je v priebehu normálnej prevádzky rozopnutý. Hlavný vypínač QB a výstupné istiace prvky (ističe) v RH2 sú počas normálnej prevádzky v rozopnutom stave.

² Istiaci prvok *Q_sub1* je súčasťou *subrozdávača_1*, poruchu *subrozdávača_1* v modeli neuvažujeme.

Hlavný rozvádzač RH1 je možné napájať prostredníctvom ATS1³ z distribučnej siete (el. stanica Lisková), z *diesel agregátu_1* alebo pomocou QT z RH2. Primárne je nastavený na polohu 1.

ATS3 je primárne napájaný z RH1 cez istiaci prvok Q1 (normally closed). Rozvádzač RH1 je určený ako hlavný rozvádzač. Po konštrukčnej stránke sú istiace prvky v rozvádzači RH1 v prevádzke *normally closed* a v rozvádzači RH2 v prevádzke *normally open*.

■ Prepínacia logika

Súčasťou prepínacej logiky by mali byť meracie zariadenia (prístrojové transformátory napätia a prúdu), ktoré by mali vyhodnocovať prípadnú poruchu napájania príslušnej zbernice rozvádzača RH1 a RH2 z príslušného TS 22/0,4 kV. Vedenia, z **rozvodne Lisková a Mokrad**, zabezpečujúce **primárnu dodávku** elektrickej energie sa považujú za plne nezávislé, viď obrázok 4.5.

Subrozvádzač _1 je možné napájať z dvoch nezávislých el. staníc, z dvoch dieselagregátov a jedného UPS, celkovo ôsmymi rôznymi variantami, v závislosti na mieste výskytu poruchy alebo iných povinných revíznych odstávok viď obrázok 4.4.

Pri poruche ATS1 je potrebné rozopnúť úsekový odpínač na VN strane TS Čebrať. V tomto prípade sa rozopne aj hl. vypínač QA aby bolo k dispozícii zásobovanie do *subrozvádzača_1* cez RH1. Analogicky je to možné použiť pri poruche ATS2.

Porucha rozvádzača RH1 alebo RH2 (súčasťou rozvádzača sú komponenty: prípojnice, hl. vypínač, výstupné istiace prvky, prístrojový transformátor napätia,...) počas prevádzky bude mať za následok rozpojenie príslušného hl. vypínača a výpadok napätia na všetkých vývodoch v postihnutom rozvádzači RH. V prípade poruchy na QA alebo QB bude potrebné rozpojiť úsekový odpínač na VN strane pred príslušným TS 22/0,4kV alebo uzamknúť príslušný ATS v polohe 0.

³ automatický prepínač ATS v danom prevedení má tri polohy:

- 1 - prepnutie na zdroj el. energie z distribučnej siete (pri ATS1 to predstavuje napájanie z rozvodne 22 kV Lisková, pri ATS2 rozvodňa Mokrad),
- 2 - prepnutie na zdroj el. energie z diesel agregátu,
- 0 - prepínač vo vypnutej polohe.

4.2. Napätová hladina 0,4 kV - napájanie z dvoch nezávislých el. staníc 110/22 kV, UPS a diesel agregátov

Porucha pozdĺžneho odpojovača QT zapríčiní, že QA a QB budú súčasne rozopnuté. Výstup z NN zberníc rozvádzačov RH1 a RH2 bude bez napätia.

Pri nefunkčnosti napájania subrozdávčača_1 trasou cez UPS je možnosť odpojiť UPS od siete a preklenúť UPS prostredníctvom istiaceho prvku Q_byPass.

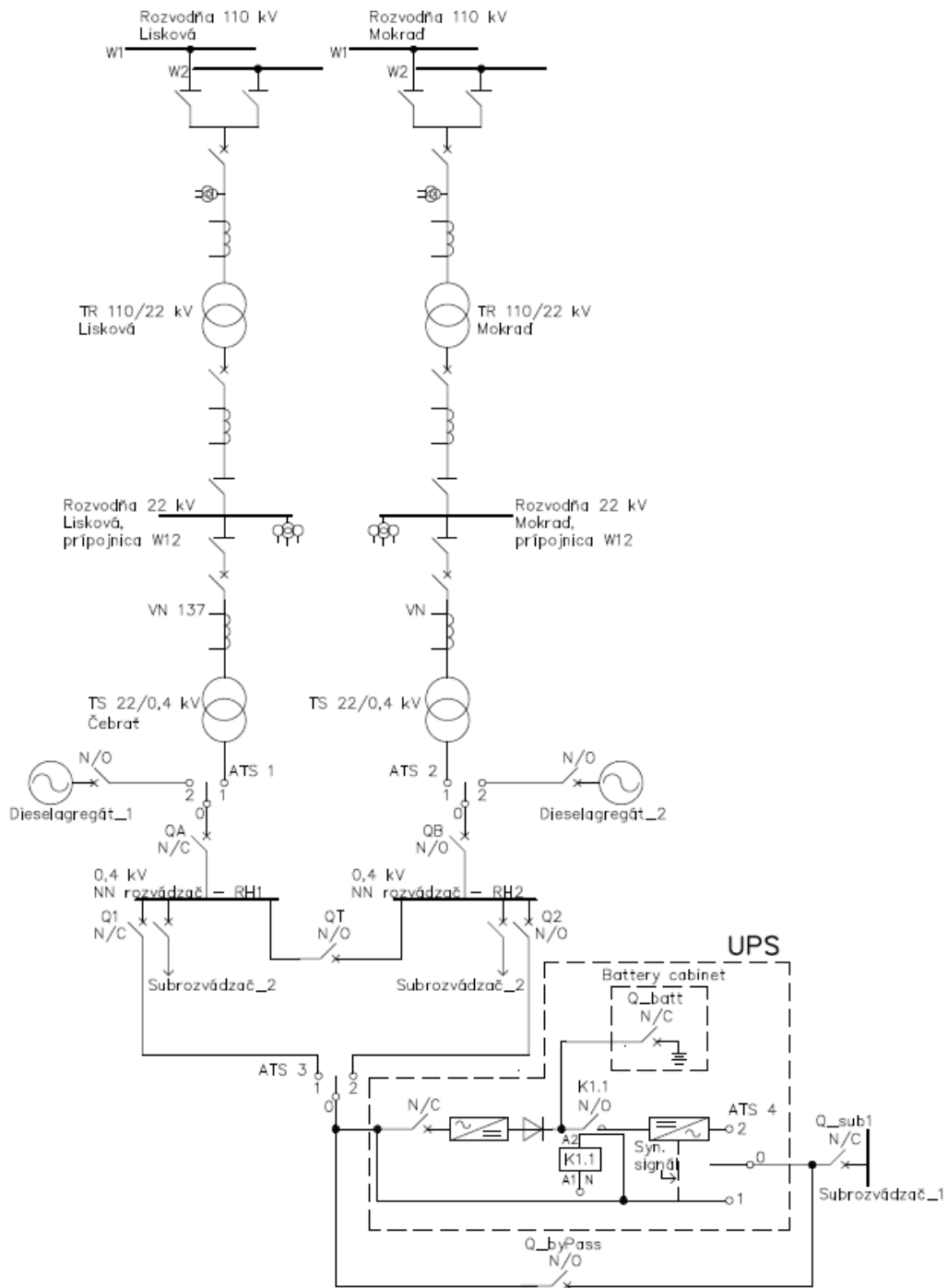
		ATS_1	QA	RH1_CB_Diesel	Q1	QT	ATS_2	QB	RH2_CB_Diesel	Q2
1	Napájanie z el. stanice Lisková cez Q1	Normálna prevádzka	1	C	0	C	0	0	0	0
2	Napájanie z el. stanice Lisková cez Q2	Porucha za Q1	1	C	0	0	C	0	0	C
3	Napájanie z el. stanice Mokrad' cez Q1	Bez prívodu el. energie z distribučnej siete, vetva Lisková	0	0	0	C	C	1	C	0
4	Napájanie z el. stanice Mokrad' cez Q2	Bez prívodu el. energie z distribučnej siete, vetva Lisková a porucha na rozvádzači RH1	0	0	0	0	0	1	C	0
5	Napájanie z diesel agregátu_1 cez Q1	Bez prívodu el. energie z distribučnej siete, vetva Lisková a Mokrad'	2	C	C	C	0	0	0	0
6	Napájanie z diesel agregátu_1 cez Q2	Bez prívodu el. energie z distribučnej siete, vetva Lisková a Mokrad' a porucha za Q1	2	C	C	0	C	0	0	C
7	Napájanie z diesel agregátu_2 cez Q1	Bez prívodu el. energie z distribučnej siete, vetva Lisková a Mokrad' a porucha na diesel agregáte_1	0	0	0	C	C	2	C	C
8	Napájanie z diesel agregátu_2 cez Q2	Bez prívodu el. energie z distribučnej siete, vetva Lisková a Mokrad', porucha na diesel agregáte_1 a porucha na rozvádzači RH1	0	0	0	0	0	2	C	C

O - poloha open, C - poloha close

Obrázok 4.4: Napájanie z distribučnej siete, UPS a dieselagregátu - prepínacia logika

Strom porúch, viď príloha *Test_NO_diesel.pdf*, vyjadruje pravdepodobnosť napájania tunela pozemných komunikácií z distribučnej siete, UPS a bez dieselagregátov (varianta 4, viď obrázok6.5)

4.2. Napätová hladina 0,4 kV - napájanie z dvoch nezávislých el. staníc 110/22 kV, UPS a diesel agregátov



Obrázok 4.5: Prehľadová schéma napájania z distribučnej siete, UPS a dieselagregátu

■ 4.3 VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV

V tejto časti je rozpísaná topológia distribučnej siete 22 kV v súvislosti s napájaním tunela Čebrať, údaje a číselné hodnoty, ktoré boli použité na výpočet nedostupnosti q primárnych udalostí stromu porúch *pokus_QA.pdf*

Napätová hladina 22 kV: vzdušné (holý vodič) a káblové VN vedenie, transformovňa 22/0,4kV. Obdobie: 1.1.2013 až 30.6.2017. VN vývody z el. staníc:

- TR 110/22 kV Lisková (LIS), tabuľka4.3
- TR 110/22 kV Mokrad (MOK), tabuľka4.4

Lisková				
Prípojnice	Číslo vedenia	Dĺžka VN vedenia		Počet TS 22/0,4 kV
		Holý vodič	Káblové vedenie	
W11	161	23,13	5,695	44
	267	2,345	1,633	1
	190	2,273	1,798	4
	198	2,624	10,867	20
	164	12,264	1,66	12
	209	47,539	6,366	98
W12	189	0	8,05	8
	167	31,141	9,027	96
	230	0	10,885	21
	196	9,002	1,794	8
	137	64,79	7,034	72
W13	243	52,464	22,293	106
	236	5,202	0,443	1
	237	6,35	2,948	11
	257	16,879	0,152	4

Tabuľka 4.3: Rozvodňa 22 kV Lisková - vývody

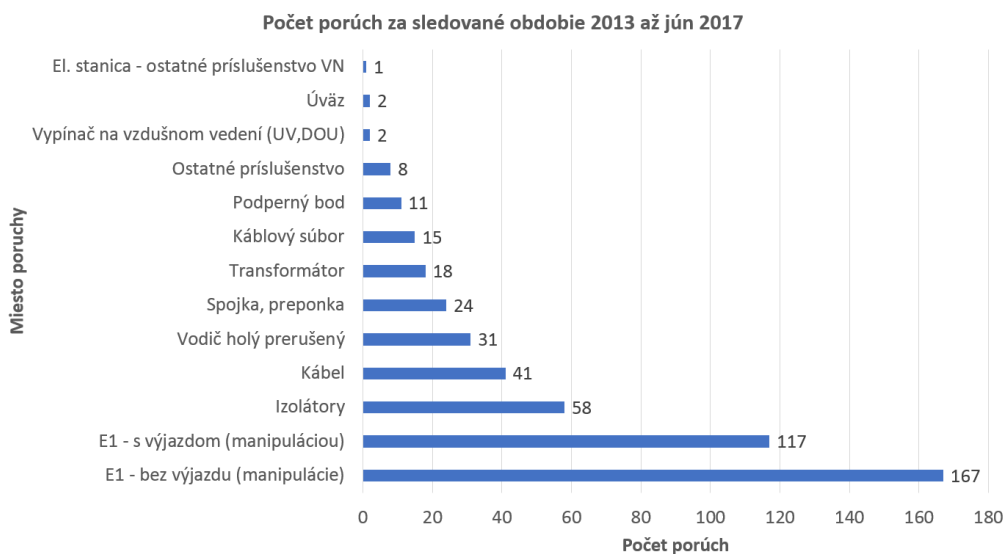
■ ■ ■ 4.3. VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV

Mokrad'				
Prípojnice	Číslo vedenia	Dĺžka VN vedenia		Počet TS 22/0,4 kV
		Holý vodič	Káblové vedenie	
W11 - W21	1359	0	0,468	0
	1356	0	0,466	1
	1357	0	0,465	1
	1358	0	0,468	1
W11	220	13,576	0,834	155
	214	37,392	5,912	69
	143	9,894	2,768	10
	144	3,72	0,296	0
W12	139	1,679	1,792	5
	140	1,696	1,311	1
	238	73,723	9,802	81
	239	17,575	4,125	32
	146	4,11	7,353	19
	138	11,883	8,8	31
	137	64,79	7,034	72

Tabuľka 4.4: Rozvodňa 22 kV Mokrad' - vývody

Počet transformátorov 22/0,4 kV na sledovanom území je 912. Celková dĺžka káblového vedenia je 135,505 km a vzdušného vedenia je 451,251 km. Údaje boli získané ku dňu 30. 11. 2017.

■ ■ ■ 4.3. VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV



Obrázok 4.6: Počet porúch podľa miesta vzniku na hladine VN⁴

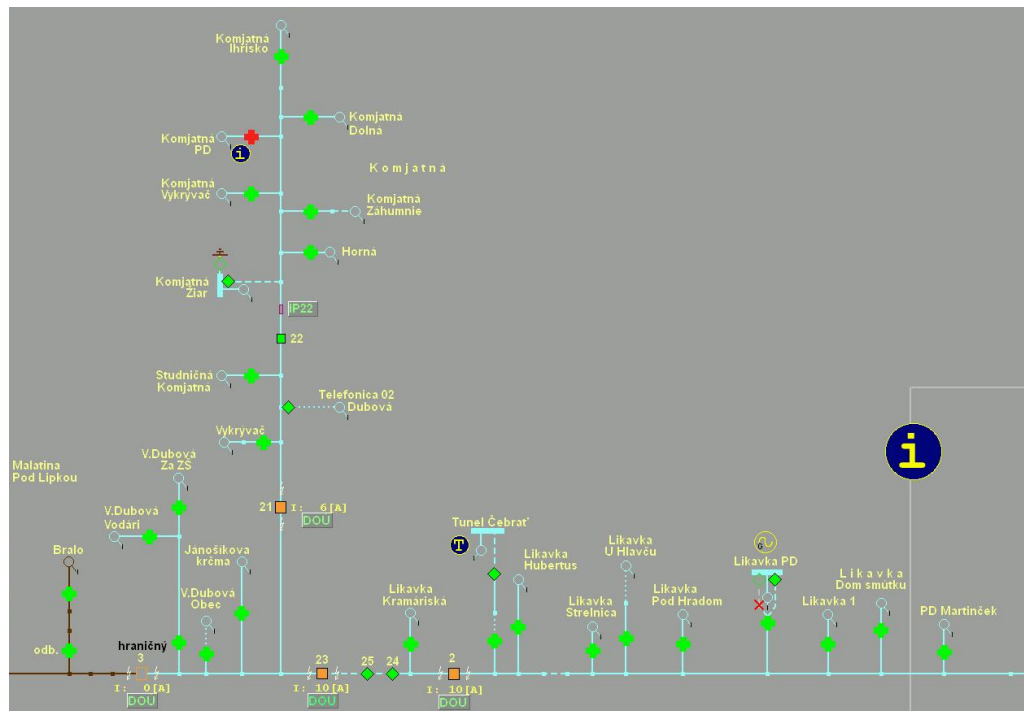
Z obrázku 4.6 je zrejmé, že najväčšie zastúpenie miesta poruchy spadá do kategórie *E1 bez výjazdu*, 167 výpadkov, *E1 s výjazdom*, 117 výpadkov. Primárne príčiny vzniku týchto výpadkov sú meteorologické vplyvy (vietor, búrka, námraza,...), padnuté stromy, zvieratá, vtáky a neznáme príčiny za normálnych a zhoršených atmosferických podmienok. Prerušenia dodávky z kategórie *E1 bez výjazdu* sú v priemernom časovom trvaní cca **41 sekúnd**.

- východný portál, napájaný z rozvodne Lisková
- západný portál, napájaný z rozvodne Mokrad

Konštrukčne sa napájanie z TR Lisková aj TR Mokrad bude považovať za technologicko-topologicky takmer identické. VN linka v oboch prípadoch je majoritne vzdušného typu, holý vodič.

⁴ **E1 - bez výjazdu:** výpadok, kedy nebolo potrebné vyslať pracovnú skupinu
E1 - s výjazdom: výpadok, kedy bolo potrebné vyslať pracovnú skupinu
E2: výpadok, kedy bolo potrebné vyslať pracovnú skupinu a bolo poškodené zariadenie/a

■ ■ ■ 4.3. VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV



Obrázok 4.7: VN vedenie č. 137 z el. stanice Lisková po napájanie 22/0,4 kV tunela Čebrať⁵

Dĺžka vzdušného vedenia z rozvodne 22 kV Lisková do TS Čebrať 22/0,4 kV je približne 10 km a káblového vedenia 1 km. Vedenie je možné pomocou troch diaľkovo ovládaných úsekových odpínačov (DOU) rozdeliť na štyri sériové úseky (napr. aby bolo možné zásobovať posledný úsek, musia byť prvé tri úseky a všetky 3 DOU prevádzky schopné). Napájanie tunela je riešené z prvého úseka, tzn. po DOU 2, viď obrázok 4.7.

⁵ Print screen obrazovky z riadiaceho informačného systému (RIS).
Význam symbolov:

- zelený hrubý krížik: úsekový odpínač
- zelený kosoštvorec: odpínač, „triple-nože“
- oranžový štvorec: diaľkovo ovládaný úsekový odpínač
- zelený štvorec: výkonový komorový úsekový odpínač
- fialový obdĺžnik IP22: indikátor skratového prúdu
- červený hrubý krížik: úsekový odpínač, za ktorým je „poškodené zariadenie,“ rozkliknutím ikonky *i* sú k dispozícii bližšie informácie o poruche
- čiarkovaná svetlomodrá čiara: káblové vedenie
- plná svetlomodrá čiara: vedenie holý vodič

■ ■ ■ 4.3. VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV

Poruchy na VN vedení by sme mohli rozdeliť do dvoch skupín podľa ich vplyvu na TS 22/0,4kV Čebrať:

1. poruchy, ktoré obmedzia dodávku el. energie do TS Čebrať po celú dobu ich odstraňovania:
 - výkonnový vypínač 22kV
 - prístrojový transformátor na VN linke (prúdu, súčtový, ...)
 - všetky diaľkovo ovládané úsekové odpínače DOU v smere od rozvodne 22 kV po najbližší DOU, ktorým oddeľuje sledovaný úsek od ďalšieho úseku v smere ďalej od rozvodne 22kV, v našom prípade by to bol DOU2
 - poruchy E1 bez výjazdu (manipulácie) na celej linke
 - porucha káblového vedenia VN a káblového súboru (spojka priama, koncová), od rozvodne 22kV po DOU2 (po 8 úsekových vypínačov + celý vývod do TS Čebrať)
 - porucha na vzdušnom VN vedení od rozvodne 22kV po DOU2 (po 8 úsekových vypínačov + celý vývod do TS Čebrať)
 - úsekové odpínače od rozvodne 22kV po DOU2
 - poruchy E1 s výjazdom (manipuláciou) na vývode TS Čebrať
2. poruchy, ktoré obmedzia dodávku el. energie len na dobu potrebnú na lokalizovanie poruchy a rozopnutie úsekového odpínača obsluhou alebo diaľkové odpojenie DOU z dispečingu.

■ 4.3.1 Uvažujme poruchu na prvom úseku, tzn. po DOU 2

Pokiaľ nastane porucha pred diaľkovo ovládaným úsekovým odpínačom DOU 2, na úseku z ktorého je napájaná TS Čebrať 22/0,4 kV, tak rozlišujeme:

- porucha za úsekovým odpínačom⁶ (ktorýkoľvek úsekový odpínač na zmiennom úseku okrem úsekového odpínača TS Čebrať). Po lokalizácii poruchy za daným úsekovým odpínačom, sa manuálne rozopne odpínač a môže sa obnoviť dodávka el. energie do neporušených častí vedenia. V prípade, že

⁶ je potrebné odlišovať medzi DOU (diaľkovo ovládaným úsekovým odpínačom, na obrázku 4.7 značený ako oranžový štvorček) a úsekovým odpínačom.

■ ■ ■ 4.3. VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV

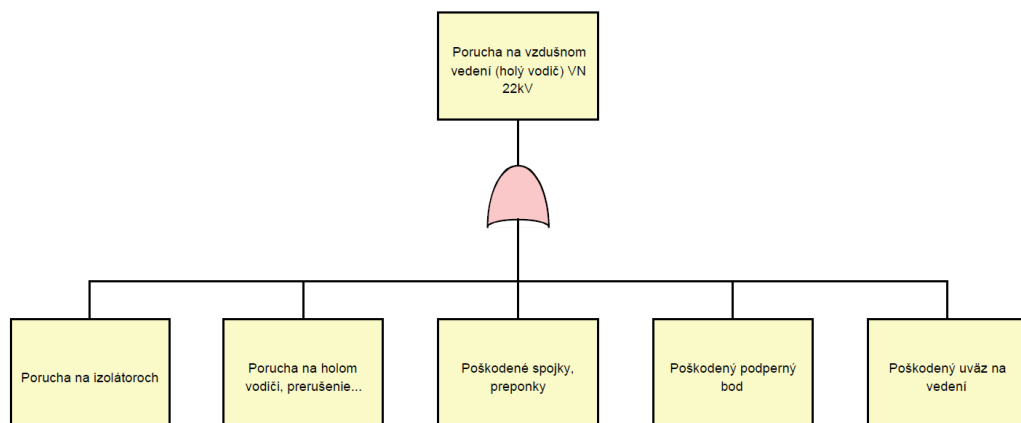
by porucha bola na samotnom úsekovom odpínači, tak do jej vyriešenia by bol úsek bez el. napätia. Celkovo je na úseku 9 vývodov do TS 22/0,4kV a každý vývod má úsekový odpínač.

Rok	Celkový čas do lokalizovania poruchy v hod. v danom roku	Počet porúch v danom období
1. polovica 2017	157,99	47
2016	177,43	73
2015	251,32	88
2014	256,84	71
2013	147,86	51
Súčet	991,44	330

Tabuľka 4.5: Počet porúch a čas ich lokalizácie na VN vedení

■ Porucha na trase do TS Čebrať

- vzdušné VN vedenie (holý vodič) z rozvodne 22 kV do TS 22/0,4kV súčasťou, ktorého sú aj izolátory, podperné body vedenia, spojky a preponky...



Obrázok 4.8: Typy porúch na vzdušnom vedení VN (holý vodič)

■ ■ ■ 4.3. VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV

Rok	Celkový čas do obnovenia dodávky el. energie v hod., 2013-jún 2017	Počet porúch v danom období
izolátory	352,93	58
podperný bod	123,49	11
spojka, preponka	83,33	24
vodič holý prerušený	417,52	31
úsekový odpínač (UV)	13,10	5
úväz	18,74	3
Súčet	1009,11	132

Tabuľka 4.6: Počet porúch a čas obnovy dodávky el. energie na VN vedení - holý vodič

- káblové VN a NN vedenie súčasťou ktorého sú aj káblové koncovky a spojky

Rok	Celkový čas do obnovenia dodávky el. energie v hod., 2013-jún 2017	Počet porúch v danom období
kábel VN	77,37	41
káblový súbor VN	41,73	15
Súčet	119,10	56

Tabuľka 4.7: Počet porúch a čas obnovy dodávky el. energie na VN vedení - kábel

- 22/0,4 kV transformátor + prepäťová ochrana a VN poistky

Sledované obdobie: 2013 až jún 2017 (vrátane) na vzorke 912 TS 22/0,4kV (počet ku dňu 30.11.2017). Celkovo bolo zaznamenaných 23 porúch, čo predstavuje v prepočte na jednu jednotku (jednotkou sa rozumie transformátor + prepäťová ochrana a VN poistky príslušného transformátora)
 $\lambda = 0,00000063975 \frac{\text{porúch}}{\text{hodina}}$.

Pre porovnanie, IEEE - std 493 - 2007 udáva, pre kategóriu Transformer, liquid, non-forced air, <=3000 kVA,

$$\lambda = 0,00000012617 \frac{\text{porúch}}{\text{hodina}}$$

Celkový priemerný čas od začiatku prerušenia dodávky el. energie do jej opätovného obnovenia = 3,21 hod.

■ ■ ■ 4.3. VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV

Rok	Celkový čas do obnovenia dodávky el. energie v hod v danom roku	Počet porúch v danom období
1. polovica 2017	18,52	4
2016	14,08	3
2015	10,67	6
2014	17,76	6
2013	12,73	4
Súčet	73,75	23

Tabuľka 4.8: Poruchovosť TS 22/0,4 kV

- Poruchy E1 - s výjazdom (manipuláciou)

Rok	Celkový čas do obnovenia dodávky el. energie v hod. v danom roku	Počet porúch v danom období
1. polovica 2017	20,67	12
2016	99,35	29
2015	127,96	36
2014	81,65	28
2013	64,57	14
Súčet	394,19	119

Tabuľka 4.9: Počet porúch a čas obnovy dodávky el. energie po vyriešení poruchy E1 s výjazdom (manipuláciou)

- Poruchy E1 - bez výjazdu, manipulácie

■ ■ ■ 4.3. VN vedenie od rozvodne 22 kV po napájanie NN zbernice, transformačná stanica 22/0,4 kV

Rok	Celkový čas do obnovenia dodávky el. energie v hod. v danom roku	Počet porúch v danom období
1. polovica 2017	3,64	30
2016	2,56	46
2015	1,32	26
2014	2,75	33
2013	0,62	29
Súčet	10,90	165

Tabuľka 4.10: Počet porúch a čas obnovy dodávky el. energie po vyriešení poruchy E1 bez výjazdu (manipulácie)

■ **4.3.2 Uvažujme poruchu na druhom úseku, tzn. medzi DOU2 a DOU23**

V prípade, že nastane porucha v úseku medzi DOU2 a DOU23 a odpínač DOU2 je plne funkčný, tak po lokalizovaní poruchového úseku linky dispečing primárne na diaľku odpojí DOU2 a sledované odberné miesto TS 22/0,4 kV Čebrať bude opätovne pod el. napätím.

■ **4.3.3 Uvažujme poruchu na treťom úseku, tzn. medzi DOU23 a DOU21**

V prípade, že nastane porucha v úseku medzi DOU23 a DOU21 a aspoň jeden z odpínačov DOU23 alebo DOU21 je plne funkčný, tak po lokalizovaní poruchového úseku linky dispečing primárne na diaľku odpojí funkčný odpínač bližšie ku poruchovému úseku v smere od rozvodne 22 kV a sledované odberné miesto TS 22/0,4 kV Čebrať bude opätovne pod el. napätím.

■ **4.3.4 Uvažujme poruchu na štvrtom úseku, tzn. za DOU21**

V prípade, že nastane porucha v úseku za DOU21 a aspoň jeden z odpínačov DOU23, DOU21 alebo DOU2 je plne funkčný, tak po lokalizovaní poruchového úseku linky dispečing primárne na diaľku odpojí funkčný odpínač bližšie ku

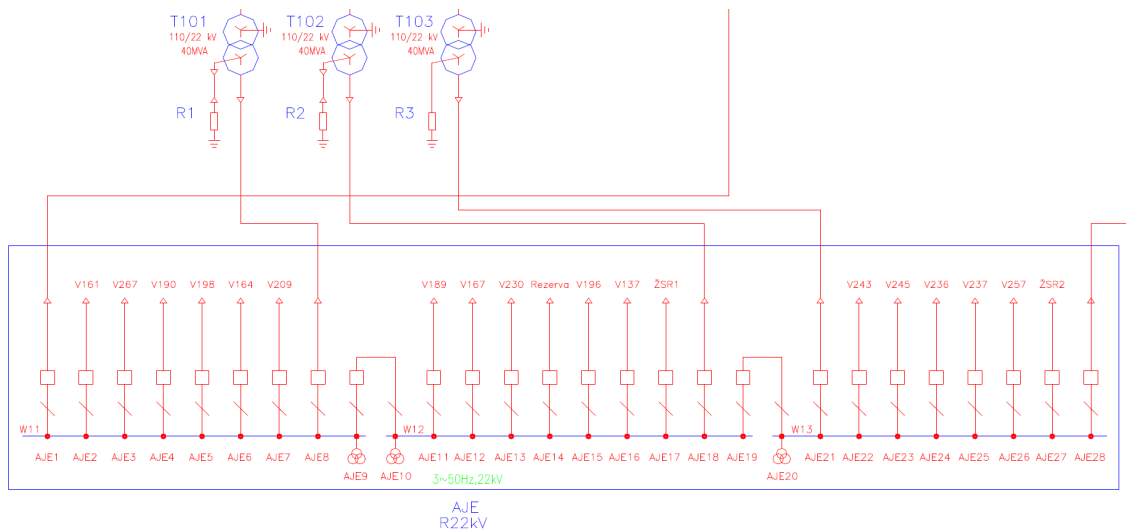
poruchovému úseku v smere od rozvodne 22 kV a sledované odberné miesto TS 22/0,4 kV Čebrať bude opätovne pod el. napätím.

4.4 El. stanica 110/22 kV

■ Rozvodňa 22 kV Lisková

Rozvodňa 22 kV Lisková je napájaná z rozvodne 110 kV Lisková. Na transformovanie napätia môže byť použitý jeden z troch transformátorov T101, T102 alebo T103. Každý vyúsťuje na samostatnú prípojnicu 22 kV.

Skladá sa z troch prípojnic W11, W12 a W13, ktoré môžu byť sériovo prepojené pozdĺžnym výkonovým odpojovačom (z každej strany prípojnice jeden) a výkonovým vypínačom. Medzi transformátorom 110/22 kV a zbernicou 22 kV je inštalovaný výkonový vypínač a výkonový odpojovač s uzemňovačom, prístrojový transformátor prúdu a napätia. Na výstupe z prípojnice 22kV, vedenie č. 137, sú inštalované výkonový odpojovač, výkonový vypínač, uzemňovač, prístrojový transformátor prúdu a súčtový transformátor prúdu.



Obrázok 4.9: Prehľadová schéma rozvodne 22 kV Lisková⁷

Možnosti napájania prípojnice W12 sú tri:

1. prostredníctvom transformátora T102 cez výkonový vypínač a výkonový odpojovač priamo na prípojnicu W12, pravdepodobnosť poruchy na prípojnici W12 vyjadruje strom porúch v prílohe *Lis22W12.pdf*

⁷ Zdroj: Miestne prevádzkové predpisy el. stanica: Lisková

2. prostredníctvom transformátora T101 cez výkonový vypínač a výkonový odpojovač na prípojnicu W11, z ktorej cez spínač sekcií na prípojnicu W12, pravdepodobnosť poruchy na prípojnici W11 vyjadruje strom porúch v prílohe *Lis22W11.pdf*
3. prostredníctvom transformátora T103 cez výkonový vypínač a výkonový odpojovač na prípojnicu W13, z ktorej cez spínač sekcií na prípojnicu W12, pravdepodobnosť poruchy na prípojnici W13 vyjadruje strom porúch v prílohe *Lis22W13.pdf*

■ Rozvodňa 22 kV Mokrad

Skladá sa z troch prípojnic W11, W12 a W21. Sú zásobované prostredníctvom dvoch transformátorov 110/22 kV T101 a T102.

T102 zásobuje prípojnicu W12, z ktorej môže byť cez spínač sekcií napájaná prípojnicou W11. T101 môže zásobovať buď prípojnicu W21 alebo prípojnicu W11. Prípojnice W11 a W21 je možné prepojiť cez spínač sekcií. Prípojnice W12 a W21 nie je možné priamo prepojiť z konštrukčných dôvodov rozvodne.

■ Vlastná spotreba celej elektrickej stanice 110/22 kV Lisková

Hlavné zariadenia a prístroje:

- transformátory T21, T22 - 22/0,4 kV
- rozvádzač ANG (ANG1 + ANG2)
- rozvádzač ANL
- rozvádzač ATJ (ATJ1 + ATJ2)
- rozvádzače NTXA11, NTXB12

Vlastná spotreba pre činnosť spoločných zariadení pre prevádzku transformovne je zabezpečená z rozvodne 22kV, káblowymi vývodmi z olejových transformátorov T21 a T22 s prevodom 22/0,4kV.

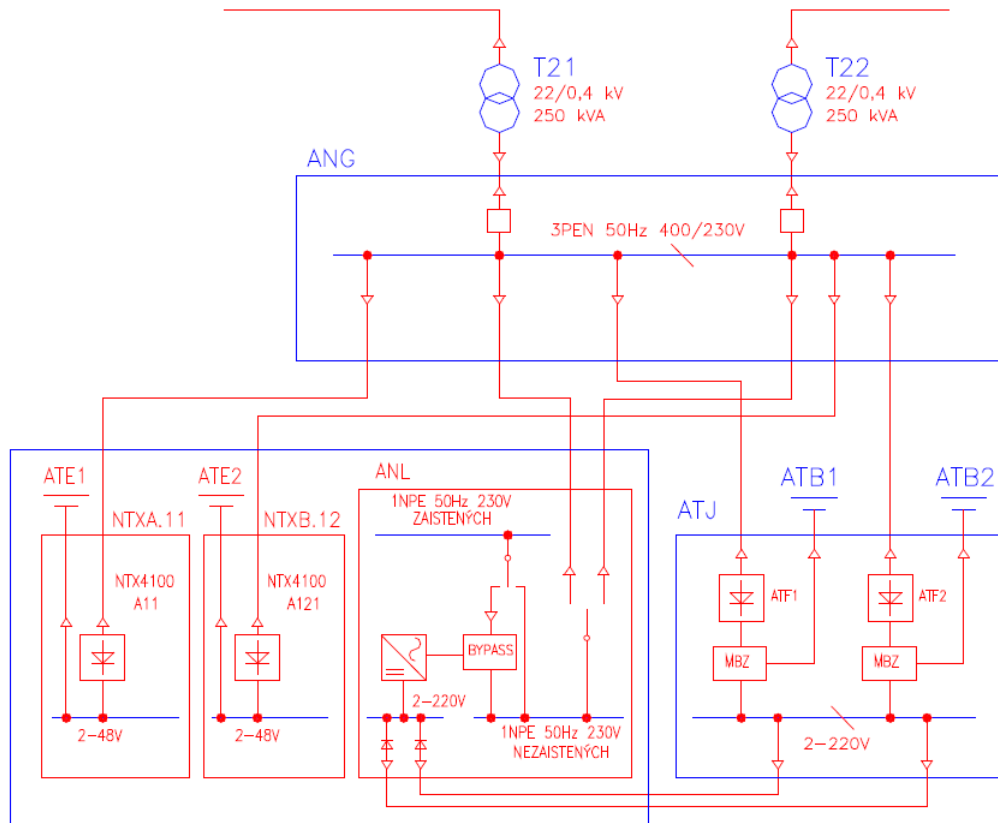
Z rozvádzača ANG (ANG1 + ANG2) sú vyvedené vývody potrebné pre technologické zariadenie transformovne, ako sú pohony vypínačov a odpojovačov VVN, ofukovanie transformátorov T101, T102, T103 regulácia T101, T102, T103, vykurovanie riadiacich skríň ako aj vývody pre rozvádzače elektroinštalácie budovy spoločných prevádzok, viď obrázok 4.10.

Automatický záskok medzi transformátorom T21 a T22: v prípade výpadku jedného transformátora sa automaticky zapne druhý transformátor. Automatické zapnutie riadi automatika záskoku.

Zaisteným napätím z ANL sú napájané: optické a telekomunikačné prenosové zariadenia, komunikačný počítač v dozorni a prevodníky na meranie el. veličín, ochrany.

Rozvádzače NTXA11, NTXB12 napájajú riadiaci a informačný systém (RIS) el. stanice Lisková.

Rozvádzač ATJ (ATJ1 + ATJ2) zabezpečuje rozvod napätia 220V DC, napr. napájanie el. ochrán rozvodne 110kV, pre signalizáciu poruchy riadiaceho a informačného systému.



Obrázok 4.10: Jednopolová schéma vlastnej spotreby el. stanice Lisková⁸

Nerovinná udalosť, pravdepodobnosť výpadku vlastnej spotreby rozvodne 110/22kV, použitá v strome porúch *pokus_QA.pdf* bola vypočítaná pomocou stromu porúch *Vlas_spot.pdf*, v ktorom sú implementované nasledovné stromy porúch:

1. *ANG1.pdf* vyjadruje pravdepodobnosť, že rozvádzač *ANG1* bude bez el. energie, *ANG1* je ľavá časť rozvádzača *ANG* po pozdĺžny odpojovač, viď obrázok4.10
2. *ANG2.pdf* vyjadruje pravdepodobnosť, že rozvádzač *ANG2* bude bez el. energie, *ANG2* je pravá časť rozvádzača *ANG* po pozdĺžny odpojovač, viď obrázok4.10
3. *W11NoE.pdf* vyjadruje pravdepodobnosť výpadku napájania el. energiou prípojnicu W11 rozvodne 22kV, z ktorej je taktiež napájaný transformátor T21 22/04kV vlastnej spotreby

⁸ Zdroj: Miestne prevádzkové predpisy el. stanica: Lisková

4. *W13NoE.pdf* vyjadruje pravdepodobnosť výpadku napájania el. energiou prípojnicu W13 rozvodne 22kV, z ktorej je taktiež napájaný transformátor T22 22/04kV vlastnej spotreby

■ Transformátor 110/22 kV

Obdobie: 1.1.2009 až 31.10.2017. Počet transformátorov: 27 v trinástich el. staniach.

Dátum	TS 110/22	El. stanica	Výber z voľby E1+E2+..	Prerušenie			
				od [hod:min:sec]	do [hod:min:sec]	čas [hod:min:sec]	MW
20.08.2016	T102	ZPO	E1 - s výjazdom	12:40:00	12:44:00	0:04:00	7.0
28.07.2016	T101	NIZ	E1 - s výjazdom	04:16:02	04:19:50	0:03:48	1.2
24.6.2016	T101	VRU	E2	20:03:31	20:13:00	0:09:29	11.5
04.09.2015	T101	KOS	E1 - s výjazdom	10:26:48	10:27:26	0:00:38	13.2
18.08.2015	T102	MOK	E1 - bez výjazdu	8:06:02	8:08:52	0:02:50	13.0
23.02.2015	T101	NIZ	E1 - s výjazdom	13:15:26	13:18:48	0:03:22	7
22.09.2014	T101	NIZ	E1 - bez výjazdu	9:25:01	9:27:10	0:02:09	4.6
12.08.2014	T102	ZPO	E1 - bez výjazdu	18:21:19	18:26:09	0:04:50	11.0
30.05.2014	T102	STR	E2	14:14:00	14:16:18	0:02:18	4.4
23.08.2013	T401	MED	E1 - bez výjazdu	13:36:27	13:43:12	0:06:45	99.0
06.10.2012	T101	MOK	E1 - bez výjazdu	5:35:40	5:36:55	0:01:15	11.0
11.11.2011	T102	MOK	E1 - bez výjazdu	12:54:01	12:57:17	0:03:16	19
29.04.2011	T102	LMI	E1 - bez výjazdu	2:52:25	2:56:12	0:03:47	7.7
30.03.2011	T102	MOK	E1 - s výjazdom	17:08:55	17:10:20	0:01:25	15.0
14.01.2011	T101	ZPO	E1 - bez výjazdu	11:34:28	11:35:47	0:01:19	16.5
13.06.2010	T101	VAV	E2	5:45:05	5:46:32	0:01:27	8.6
12.05.2010	T101	LMI	E1 - bez výjazdu	18:15:00	18:16:21	0:01:21	9.7
06.06.2009	T102	STR	E2	23:36:00	23:37:52	0:01:52	5.6
18.04.2009	T102	STR	E1	10:13:41	10:17:36	0:03:55	3.2

Obrázok 4.11: Výpadky TS 110/22 kV ⁹

Podklady z obrázka 4.11 boli použité na určenie primárnej udalosti poruchy transformátora 110/22 kV, použitej v stromoch porúch, viď prílohy *TS110_101.pdf*, *TS110_102.pdf* a *TS110_103.pdf*.

■ Rozvodňa 110 kV

Rozvodňa 110 kV Lisková je vonkajšieho vyhotovenia, s dvoma hlavnými prípojnícami W1(A), W2(B). Pripojenie transformovne do rozvodnej siete 110 kV je vedeniami č. 7203, 7204 z uzla Liptovská Mara (110 kV) a vedeniami č. 7856, 7857 z uzla Sučany (110 kV). Ďalej rozvodňa pozostáva z troch vývodov pre SCP (vedenia č. 7207, 7208, 7209), jedného vývodu do TR Mokrad (č. 7731) a spínača prípojnic (pričný spínač).

⁹ Spracované na základe podkladov poskytnutých zo SSE-D, a.s.

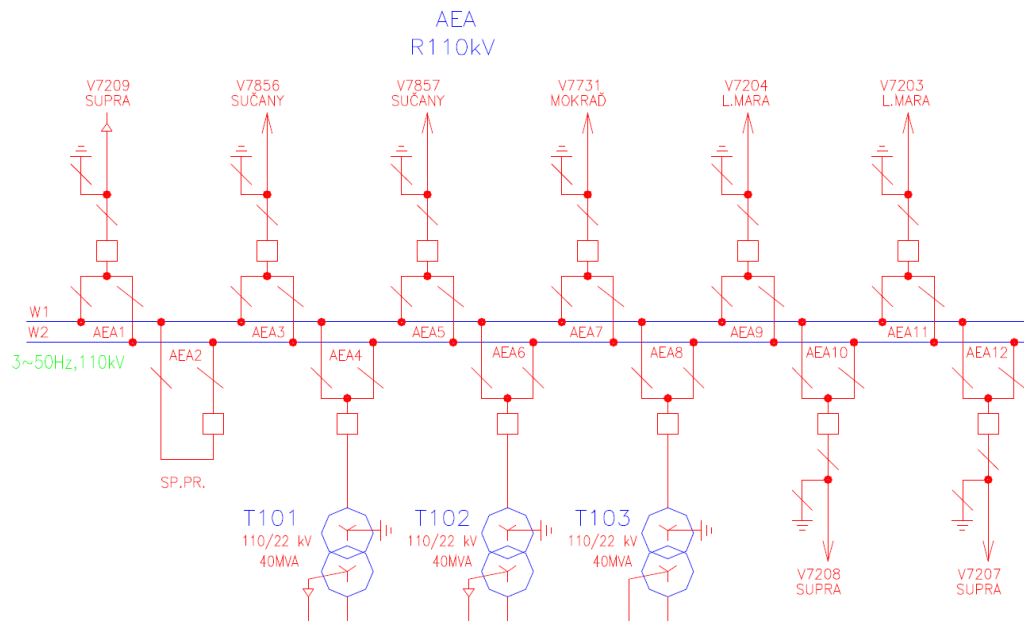
Číslo vedenia	Smer	Dĺžka vedenia
7209	SCP	
7856	Sučany	28 100 m
7857	Sučany	28 100 m
7731	Mokrad	29 609 m
7204	Lipt. Mara	13 724 m
7208	SCP	
7203	Lipt. Mara	13 724 m
7207	SCP	

Tabuľka 4.11: Rozvodňa 110 kV Lisková - vývody

Transformovňa Mokrad tvorí uzlový bod pre spojenie 110 kV sústavy s transformovňami Liptovská Mara, Lisková, Námestovo - Vavrečka a Nižná. Rozvodňa 110 kV má dve hlavné prípojnice W1 a W2.

Číslo vedenia	Smer	Dĺžka vedenia
7211	Nižná	24 100 m
7206	Lipt. Mara	33 100 m
7205	Lipt. Mara	33 100 m
7731	Lisková	27 400 m
7214	Vavrečka	24 700 m

Tabuľka 4.12: Rozvodňa 110 kV Mokrad - vývody

Obrázok 4.12: Jednopolová schéma rozvodne 110 kV Lisková¹⁰

Popis	Typ poruchy	λ [$\frac{\text{poruchy}}{\text{hodina}}$]	MTTR, PT [hod]	q
Air insulated switchgear high voltage disconnectors and earthing switches ¹¹	Constant failure rate	3,31050E-07	2,96	9,79569E-07
110kV busbars ¹²	Constant failure rate	1,25570E-06	2,50	3,13925E-06

Tabuľka 4.13: Poruchovosť komponentov rozvodňa 110 kV

Strom porúch, ktorý vyjadruje vo svojej vrcholovej udalosti pravdepodobnosť poruchy v rozvodni 110 kV, s následkom odstavenia rozvodne, je v prílohe uložený pod názvom *Roz110.pdf*, ktorý prostredníctvom symbolu transfer implementuje *Pri110W1.pdf* a *Pri110W2.pdf*. V tabuľke 4.13 sú uvedené komponenty aj s ich spoľahlivosťou, s ktorými sa uvažovalo pri zostavení stromu porúch *Pri110W1.pdf*

¹⁰ Zdroj: Miestne prevádzkové predpisy el. stanica: Lisková

¹¹ Zdroj: CIGRÉ WG A3.06: Final Report of the 2004 - 2007, International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 3 - Disconnectors and Earthing Switches, CIGRÉ Technical Brochure no. TB 511, 2012.

¹² Zdroj: A Review of the Reliability of Electric Distribution System Components: EPRI White Paper, EPRI, Palo Alto, CA:2001. 1001873.

a *Pri110W2.pdf*, ktoré vyjadrujú spoľahlivosť prípojnice W11, W12 rozvodne 110kV.

■ **Vedenie VVN 110 kV**

■ obdobie: 1.1.2012 až 31.10.2017

■ priemerná dĺžka: 2606,8 km

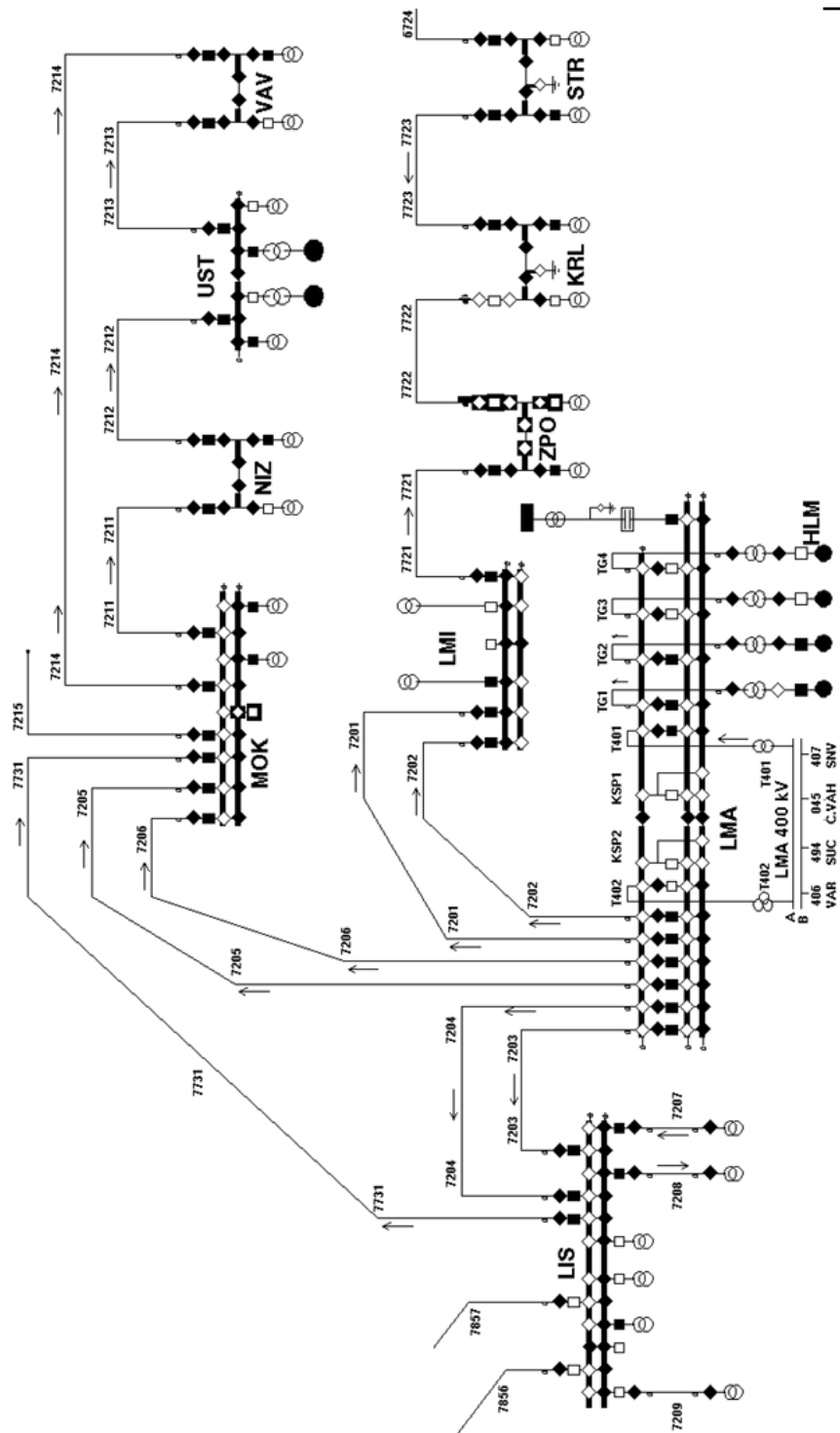
■ MTTR = 6,02 hod

■ $\lambda = 2,93527 \cdot 10^{-06} \frac{\text{porucha}}{\text{hod} \cdot \text{km}}$

Vedenie 110 kV		
Rok	Čas trvania poruchy [hod]	Počet porúch
do 31.11.2017	452,12	54
2016	141,42	49
2015	425,45	70
2014	548,70	69
2013	518,88	78
2012	266,77	77

Tabuľka 4.14: Poruchovosť na vedení 110 kV ¹³

¹³ Spracované na základe podkladov poskytnutých zo SSE-D, a.s.



Obrázok 4.13: Zapojenie el. stanice Lisková a Mokrad do elektrizačnej sústavy SR na napätovej hladine 110 kV¹⁴

¹⁴ Zdroj: Miestne prevádzkové predpisy el. stanica: Lisková

Kapitola 5

Spracovanie výstupných hodnôt z OpenFTA

5.1 Kvalitatívne hodnotenie

Pri kvalitatívnom hodnotení sú minimálne kritické rezy získavané z booleovskej redukcie stromu porúch. Získané minimálne kritické rezy sa používajú nie len pri kvalitatívnych hodnoteniach ale aj pri kvantitatívnych analýzach.

Dôležitosť minimálnych kritických rezov možno určiť na základe ich usporiadania podľa stupňa (počtu základných udalostí, ktoré tvoria jeden minimálny kritický rez). Minimálne kritické rezy, ktoré majú iba jednu základnú udalosť, sú rezy prvého stupňa. Minimálne kritické rezy, ktoré majú dve základné udalosti, sú rezy druhého stupňa, atď. Po vygenerovaní všetkých minimálnych kritických rezov je možné získať určitú predstavu o ich dôležitosti podľa ich stupňa.

Pravdepodobnosť zlyhania spojená s minimálnymi kritickými rezmi sa často znižuje s ich rastúcim stupňom a preto poradie na základe stupňa minimálnych kritických rezov dáva hrubý odhad dôležitosti minimálnych kritických rezov. Napríklad ak sú pravdepodobnosti zlyhania jednotlivých základných udalostí rádovo 10^{-3} , pravdepodobnosť minimálneho kritického rezu 1. stupňa bude rádovo 10^{-3} , pravdepodobnosť minimálneho kritického rezu 2. stupňa bude rádovo 10^{-6} , pravdepodobnosť minimálneho kritického rezu 3. stupňa bude rádovo 10^{-9} , atď.

Minimálny kritický rez 1. stupňa, tvorený len jednou základnou udalosťou, je z hľadiska spoľahlivosti systému dôležitejší ako základná udalosť, ktorá je súčasťou

minimálneho kritického rezu vyššieho stupňa.[D. 81]

5.2 Kvantitatívne hodnotenie

Kvantitatívna analýza stromu porúch pozostáva z nasledujúcich častí:

- *nedostupnosť* q jednotlivých komponentov
- kvantifikácia minimálnych kritických rezov (určenie pravdepodobnosti)
- hodnotenie systému ako celku (vyhodnotenie dôležitosti a citlivosti jednotlivých základných udalostí so zameraním na rizikovejšie miesta systému, určenie pravdepodobnosti vrcholovej udalosti)

Kvantitatívna analýza systému udáva percentuálny podiel z celkového času zlyhania systému zapríčinený konkrétnym minimálnym kritickým rezom.

■ Teória pravdepodobnosti [RH04]

Matematická metóda použitá pri kvantitatívnom hodnotení stromu porúch je založená na teórii pravdepodobnosti. Teória pravdepodobnosti je základom pre analýzu stromu porúch, pretože poskytuje analytické zaobchádzanie s udalosťami, ktoré sú základnými zložkami stromov porúch.

Nech n vyjadruje počet rozdielnych základných udalostí v strome porúch, strom porúch je n -tého stupňa. Základné udalosti n sú očíslované a nasledujúce premenné sú zavedené:

$$Y_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{pokiaľ základná udalosť } i \text{ nastane v čase } t \\ 0 & \text{inak, } i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Nech $Y(t) = (Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), \dots, Y_n(t))$ označuje stavový vektor pre štruktúru v čase t . Účel kvantitatívnej analýzy stromu porúch je určiť pravdepodobnosť vrcholovej udalosti. Vyjadrenie stavu vrcholovej udalosti v čase t môže byť vyjadrené binárnou premennou $\psi(Y(t))$.

$$\psi(Y(t)) = \begin{cases} 1 & \text{pokiaľ vrcholová udalosť nastane v čase } t \\ 0 & \text{inak} \end{cases}$$

Môžeme predpokladať, že stavy n -tých základných udalostí určujú stav vrcholovej udalosti stromu porúch. Táto funkcia sa nazýva štruktúrna funkcia stromu porúch:

$$\psi(Y(t)) = \psi(Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), \dots, Y_n(t))$$

Nech $q_i(t)$ určuje pravdepodobnosť, že základná udalosť i nastane v čase t , pre $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

$$q_i(t) = \Pr(Y_i(t) = 1) = E(Y_i(t)) \text{ pre } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Ak základná udalosť i vyjadruje, že komponent i v systéme je v poruchovom stave pre $i = 1, 2, 3, \dots, n$, potom nech $p(i)$ vyjadruje pravdepodobnosť, že komponent i je vo funkčnom stave v čase t ; $q_i(t)$ je nazvané nedostupnosť komponentu i v čase t .

$$\Pr(Y_i(t) = 1) = q_i(t) = 1 - p_i(t) \text{ pre } i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Nech $Q_o(t)$ vyjadruje pravdepodobnosť, že vrcholová udalosť nastane v čase t :

$$Q_o(t) = \Pr(\psi(Y(t)) = 1) = E(\psi(Y(t)))$$

■ **Strom porúch s jedným hradlom AND**

Výstupná udalosť stromu porúch nastane jedine pokiaľ dôjde k naplneniu všetkých vstupných udalostí. Funkcia štruktúry stromu porúch je

$$\psi(Y(t)) = Y_1(t) \cdot Y_2(t) \cdot Y_3(t) \cdots Y_n(t) = \prod_{i=1}^n Y_i(t)$$

Uvažujme, že základné udalosti stromu porúch sú nezávislé, potom platí:

$$\begin{aligned} Q_o(t) &= E(\psi(Y(t))) = E(Y_1(t) \cdot Y_2(t) \cdot Y_3(t) \cdots Y_n(t)) \\ &= E(Y_1(t)) \cdot E(Y_2(t)) \cdot E(Y_3(t)) \cdots E(Y_n(t)) \\ &= q_1(t) \cdot q_2(t) \cdot q_3(t) \cdots q_n(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t) \end{aligned}$$

Nedostupnosť vrcholovej udalosti stromu porúch, $Q_o(t)$, môže byť určená aj pomocou algebraických operácií. Nech $B_i(t)$ vyjadruje, že základná udalosť B_i nastane v čase t ; $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

$$\begin{aligned} Q_o(t) &= \Pr(B_1(t) \cap B_2(t) \cap B_3(t) \cdots \cap B_n(t)) \\ &= \Pr(B_1(t)) \cdot \Pr(B_2(t)) \cdot \Pr(B_3(t)) \cdots \Pr(B_n(t)) \\ &= q_1(t) \cdot q_2(t) \cdot q_3(t) \cdots q_n(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t) \end{aligned}$$

■ **Strom porúch s jedným hradlom OR**

Výstupná udalosť stromu porúch nastane pokiaľ dôjde k naplneniu aspoň jednej vstupnej udalosti. Funkcia štruktúry stromu porúch je

$$\begin{aligned}\psi(Y(t)) &= 1 - (1 - Y_1(t)) \cdot (1 - Y_2(t)) \cdot (1 - Y_3(t)) \cdots (1 - Y_n(t)) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i(t))\end{aligned}$$

Uvažujme, že základné udalosti stromu porúch sú nezávislé, potom platí:

$$\begin{aligned}Q_o(t) &= E(\psi(Y(t))) = 1 - \prod_{i=1}^n E(1 - Y_i(t)) = 1 - \prod_{i=1}^n E(1 - (Y_i(t))) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t))\end{aligned}$$

Nech $B_i(t)$ vyjadruje, že základná udalosť nastane v čase t a $B_i^*(t)$ vyjadruje, že základná udalosť nenastane do času t . Potom môžeme vyššie zmienené rovnice vyjadriť pomocou Booleanskej algebry nasledovne:

$$\Pr(B_i^*(t)) = 1 - \Pr(B_i(t)) = 1 - q_i(t) \text{ pre } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\begin{aligned}Q_o(t) &= \Pr(B_1(t) \cup B_2(t) \cup B_3(t) \cup \cdots \cup B_n(t)) \\ &= 1 - \Pr(B_1^*(t) \cap B_2^*(t) \cap B_3^*(t) \cap \cdots \cap B_n^*(t)) \\ &= 1 - \Pr(B_1^*(t)) \cdot \Pr(B_2^*(t)) \cdot \Pr(B_3^*(t)) \cdots \Pr(B_n^*(t)) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n q_i(t)\end{aligned}$$

■ **Aproximačný vzorec pre $Q_o(t)$ [RH04]**

Výpočet pravdepodobnosti vrcholovej udalosti vyžaduje veľké množstvo výpočtových prác, ktoré môžu byť v mnohých prípadoch časovo náročné, preto sa snažíme výpočet $Q_o(t)$ upraviť a nájsť priateľnú mieru zjednodušenia postupu. Zoberme do úvahy strom porúch s n minimálnymi kritickými rezmi $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$.

Nech $\check{Q}_j(t)$ vyjadruje pravdepodobnosť, že množina minimálneho kritického rezu j zlyhá v čase t . Základné udalosti sú považované za nezávislé, potom platí:

$$\check{Q}_j(t) = \prod_{i \in K_j} q_i(t)$$

Pravdepodobnosť vrcholovej udalosti je:

$$Q_o(t) = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - \check{Q}_j(t))$$

Pretože rovnaká základná udalosť môže patriť do viacerých množín minimálnych kritických rezov, v tom prípade sú množiny minimálnych kritických rezov navzájom závislé. Rovnica sa môže upraviť nasledovne:

$$Q_o(t) \leq 1 - \prod_{j=1}^k (1 - \check{Q}_j(t))$$

Pravá strana rovnice môže byť považovaná za hornú hranicu pravdepodobnosti zlyhania systému. Keďže hodnoty $q_i(t)$ sú malé, rovnica sa môže považovať za dobrú aproximáciu.

$$Q_o(t) \approx 1 - \prod_{j=1}^k (1 - \check{Q}_j(t))$$

Táto aproximácia sa nazýva aproximácia hornej hranice a používa sa v niekoľkých počítačových programoch na analýzu stromu porúch.

5.2.1 Simulácia Monte Carlo

Princípom simulácie Monte Carlo je simulovať výskyty primárnych udalostí (zlyhanie komponentov) pomocou generátora náhodných čísel.

Pri každej skúške sa každá primárna udalosť simuluje vytvorením (pseudo-) náhodného reálneho čísla v rozsahu od 0 do 1 vrátane. Ak je toto číslo menšie alebo sa rovná pravdepodobnosti primárnej udalosti, udalosť sa považuje za vykonanú a jej hodnota je nastavená na TRUE. V opačnom prípade sa predpokladá, že k udalosti nedošlo a jej hodnota je nastavená na hodnotu FALSE.[Lim05]

Strom porúch sa následne vyhodnotí pomocou týchto hodnôt primárnych udalostí (true/false), aby sa zistilo, či nastane vrcholová udalosť (zlyhanie systému). Počet vzniku vrcholovej udalosti sa zaznamenáva spolu s príslušným režimom porúch (zoznam primárnych udalostí), ktoré spôsobili vrcholovú udalosť.

Údaje sa potom použijú na získanie pravdepodobnosti vzniku vrcholovej udalosti a jednotlivých kritických rezov.

■ ■ ■ ■ 5.3. Vývoj plynulosti prenosu a distribúcie elektriny v období 2012 až 2016, oblasť SSE-D, a.s.

V OpenFTA sú simulované iba prípady, v ktorých nastane aspoň jedna primárna udalosť. Pravdepodobnosť, Pr, aspoň jednej primárnej udalosti, ktorá nastala, je vyhodnotená presne.

Treba poznamenať, že kritické rezy generované simuláciou Monte Carlo nie sú minimálne. Napríklad, ak {A} a {BC} sú minimálne kritické rezy, metóda Monte Carlo na výstupe určí kritické rezy {A}, {AB}, {AC}, {BC} a {ABC} samostatne. Za týmto účelom OpenFTA poskytuje komprimovaný zoznam kritických rezov, v ktorom sú odstránené takéto množiny kritických rezov.

Takto komprimovaný zoznam kritických rezov by mal byť tvorený len z minimálne kritických rezov, avšak OpenFTA to úplne negarantuje. Keď je odstránený kritický rez, ktorý nie je minimálny, z komprimovaného zoznamu, tak spôsobená porucha týmto kritickým rezom sa pripočíta ku každému minimálnemu kritickému rezu. Uvažovaním predchádzajúceho príkladu, chyba vzniknutá kritickým rezom {ABC} bude pripočítaná ku {A} a zároveň aj ku {BC}.

Súčet porúch celej množiny komprimovaného zoznamu bude teda väčší ako celkový počet porúch.

■ 5.3 Vývoj plynulosti prenosu a distribúcie elektriny v období 2012 až 2016, oblasť SSE-D, a.s.

Plynulosť prenosu elektriny a distribúcie elektriny charakterizujú nasledovné indikátory:

SAIDIN je priemerný čas neplánovaných prerušení distribúcie elektriny z dôvodu vzniku poruchy v distribučnej sústave na jedno odberné miesto počas kalendárneho roka.[cit17]

Hodnota SAIDIN sa vypočíta sa podľa vzorca:

$$\text{SAIDIN} = \frac{\sum n_i \cdot t_i}{N_i}$$

kde

■ ■ ■ ■ 5.3. Vývoj plynulosti prenosu a distribúcie elektriny v období 2012 až 2016, oblasť SSE-D, a.s.

n_i je počet dotknutých odberných miest pri i -tom prerušení distribúcie elektriny v distribučnej sústave, v ktorej došlo k poruche

t_i čas trvania i -tého prerušenia distribúcie elektriny v príslušnom kalendárnom roku v minútach; do výpočtu sa nezahŕňajú prerušenia distribúcie elektriny, ktoré trvali menej ako tri minúty

N_i celkový počet odberných miest pripojených do distribučnej sústavy v ktorej došlo k poruche

SAIFIN je priemerný počet neplánovaných prerušení distribúcie elektriny z dôvodu vzniku poruchy v distribučnej sieti na jedno odberné miesto počas kalendárneho roka.[cit17]

Hodnota SAIFIN sa vypočíta sa podľa vzorca:

$$\text{SAIFIN} = \frac{\sum n_i}{N_i}$$

kde

n_i je počet dotknutých odberných miest pri i -tom prerušení distribúcie elektriny v distribučnej sústave, v ktorej došlo k poruche

N_i celkový počet odberných miest pripojených do distribučnej sústavy, v ktorej došlo k poruche.

Čas neplánovaného prerušenia distribúcie elektriny a počet odberných miest dotknutých týmto prerušením, ktoré nevzniklo z dôvodu vzniku poruchy v distribučnej sieti, ale z dôvodov podľa § 5 vyhlášky č. 275/2012 Z. z., ktorými sú:

- stav núdze v elektroenergetike,
- živelná pohroma,
- havária na zariadení distribučnej sústavy spôsobená treťou osobou,
- odstraňovanie príčin udalostí, ktoré bezprostredne ohrozujú život alebo zdravie osôb, alebo môžu spôsobiť rozsiahle škody na majetku.

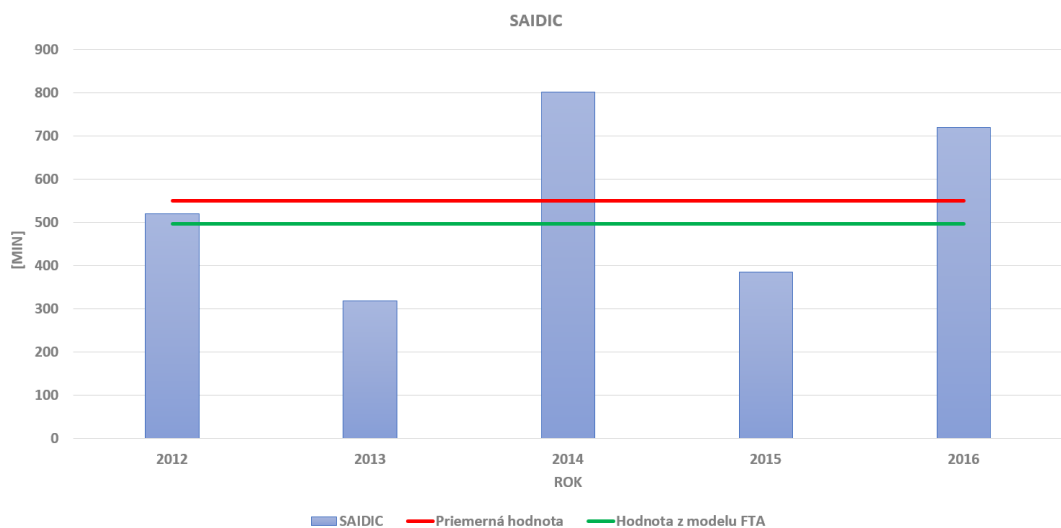
■ ■ ■ ■ 5.3. Vývoj plynulosti prenosu a distribúcie elektriny v období 2012 až 2016, oblasť SSE-D, a.s.

$$\text{SAIDIC} = \text{SAIDIN} + \text{SAIDI} \cdot \text{§5}$$

$$\text{SAIFIC} = \text{SAIFIN} + \text{SAIFI} \cdot \text{§5}$$

Rok	SAIDIN	SAIFIN	SAIDI§5	SAIFI§5	SAIDIC	SAIFIC	Celkový počet odberných miest
2012	81,38	1,78	439,88	0,55	521,26	2,33	724 711
2013	80,97	1,82	238,55	0,02	319,52	1,84	730 241
2014	70,70	1,61	732,44	0,91	803,14	2,52	735 704
2015	81,59	1,91	303,87	0,63	385,46	2,54	738 387
2016	80,54	2,14	639,94	0,76	720,48	2,90	743 821

Obrázok 5.1: Plynulosti prenosu a distribúcie elektriny [cit17]



Obrázok 5.2: Porovnanie priemernej hodnoty SAIDIC s výstupnou hodnotou z modelu FTA

Pri danej topológii distribučnej siete na území spravovanom SSE-D, a.s. bol za sledované obdobie 2012 - 2016 **priemerné SAIDIC 9,17 hodín**, minimálna hodnota SAIDIC bola 5,33 hodín a maximálna hodnota 13,39 hodín, údaje získané z *Vývoj plynulosti prenosu a distribúcie elektriny v regulačnom období 2012 až 2016*, URSO, máj 2017.

Ak by sme to chceli porovnať z modelom napájania tunela Čebrať ako odberným miestom, pri pohľade na schému napájania, by sme museli vychádzať len po deón QA pri napájaní z el. stanice 110/22 kV Lisková alebo po deón QB pri napájaní z el. stanice 110/22 kV Mokrač. Pri takomto zjednodušení modelu napájania by sme dostali **výpadok napájania 8,17 hodín za rok pri napájaní vetvou**

Lisková po deón QA (všetko za deónom a ani napájanie vetvou Mokrad by sme nebrali v úvahu).

Rozdiel medzi hodnotou SAIDIC získanou zo správy URSO a výsledkom z nášho modelu môže byť spôsobený nie presne identickým sledovaným obdobím a databázou získaných údajov, ktoré v našom prípade boli kombináciou dát z IEEE std. 493, rok 2007 a dát poskytnutých distribučnou spoločnosťou vybraných len z VN vývodov dvoch el. staníc 110/22kV spravovaného územia.

Kapitola 6

Analýza výstupných hodnôt z OpenFTA

V nasledujúcej kapitole sú rozpísané výstupy analýz jednotlivých variant napájania. Celkovo sme uvažovali so štyrmi variantami. Pre každý variant je k dispozícii kvalitatívna analýza, z ktorej sme získali kompletný zoznam minimálnych kritických rezov s usporiadaním podľa ich stupňa (počtu primárnych udalostí, ktoré obsahujú).

V kvantitatívnej analýze sú zostupne uvedené minimálne kritické rezy s najväčším percentuálnym podielom na vrcholovej udalosti. V rámci kvantitatívnej analýzy bola vykonaná pre každý variant napájania aj simulácia Monte Carlo, z ktorej výstupu môžeme určiť ku každému kritickému rezu percentuálny význam, odhadovanú pravdepodobnosť a počet, koľkokrát kritický rez nastal pri nastavení konkrétnych parametrov simulácie.

6.1 Napájanie variant 1

Spôľahlivosť zásobovania el. energiou z rozvodne 22 kV jednou vetvou po NN rozvádzač *RH1*.

6.1.1 Kvalitatívna analýza

Celkový počet minimálne kritických rezov je 2380, celá analýza je v prílohe, viď *variant_1_kvalitatívna_analyza.pdf*.

Minimálne kritické rezy		
	Stupeň	Počet
Počet základných udalostí: 115	1.	36
	2.	172
	3.	2172
Total		2380

Tabuľka 6.1: Výstup z kvalitatívnej analýzy - po NN rozvádzač *RH1*

6.1.2 Kvantitatívna analýza

Prvých 10 minimálne kritických rezov usporiadaných zostupne, poradie je zhodné aj v simulácii Monte Carlo, kapitola 6.1.3. Celý výstup z analýzy viď príloha *variant_1_probability.pdf*.

1. Porucha holého vodiča na vedení VN 22kV linky č. 137, , od rozvodne 22kV LIS po úsekové odpínače jednotlivých vývodov až do DOU2 (vrátane vývodu TS 22/0,4kV Čebrať) o dĺžke vedenia cca 10km.
2. Lokalizácia poruchy a manuálne odpojenie poruchového vývodu TS 22/0,4kV prostredníctvom úsekového odpínača na časti vedenia VN 22kV linky č. 137, kde je 9 vývodov TS 22/0,4kV (do úseku DOU2).
3. Porucha napájania vlastnej spotreby el. stanice Lisková.
4. Porucha káblového vedenia VN a káblového súboru (spojka priama, koncová), vedenie VN 22kV linky č. 137, od rozvodne 22kV LIS po úsekové odpínače jednotlivých vývodov až do DOU2 (vrátane vývodu TS 22/0,4kV Čebrať) o dĺžke vedenia cca 1km.
5. Porucha E1 - s výjazdom (manipuláciou), vývod do TS 22/0,4kV Čebrať.
6. Porucha E1 - bez výjazdu (manipulácie) na celej linke č. 137 LIS o dĺžke cca 36km.
7. Porucha na prípojnici W12, rozvodňa 22kV Lisková.

8. Beznapäťový stav na celej linke č. 137 zapríčinený ktoroukoľvek poruchou na úseku linky za DOU21 (porucha na vedení...+ lokalizácia príslušného poruchového úseku a rozopnutie DOU21).
9. Porucha na TS 22/0,4kV Čebrať + VN poistky, prepäťová ochrana...
10. Beznapäťový stav na celej linke č. 137 zapríčinený ktoroukoľvek poruchou na úseku linky medzi DOU23 a DOU21 (porucha na vedení...+ lokalizácia príslušného poruchového úseku a rozopnutie DOU23).

Pravdepodobnosť minimálne kritických rezov s ich významom v % v sledovanom modeli. Kritické rezy sú uvedené zostupne.

Minimálne kritický rez	Odhadovaná pravdepodobnosť smerujúca ku vrcholovej udalosti	Význam
1.	5,672881E-04	60,03%
2.	2,481970E-04	26,26%
3.	5,622612E-05	5,95%
4.	2,233040E-05	2,36%
5.	1,096463E-05	1,16%
6.	9,773410E-06	1,03%
7.	4,648820E-06	0,49%
8.	4,589570E-06	0,49%
9.	2,051320E-06	0,22%
10.	1,835830E-06	0,19%

Tabuľka 6.2: Výstup z kvantitatívnej analýzy - po NN rozvádzač *RH1*

6.1.3 Monte Carlo simulácia

Monte Carlo Simulation

=====

Tree : pokus_vypadokQA.fta
Time : Thu Apr 12 17:03:40 2018

Note: Only runs with at least one component failure are simulated

Number of primary events = 115
Number of tests = 100000000
Unit Time span used = 1.000000

Number of system failures = 32833817

Probability of at least = 2.877545E-003 (exact)
one component failure

Probability of top event = 9.448078E-004 (+/- 1.648856E-007)

Obrázok 6.1: Parametre simulácie Monte Carlo - po NN rozvádzač *RH1*

Pravdepodobnosť kritických rezov s ich významom v % v sledovanom modeli. Kritické rezy, získané zo simulácie Monte Carlo, sú uvedené zostupne, viď príloha *variant_1_monte_carlo.pdf*.

Kritický rez	Počet porúch	Odhadovaná pravdepodobnosť smerujúca ku vrcholovej udalosti	Význam
1.	19662732	5,658039E-04 (+/-1,275980E-07)	59,89%
2.	8600945	2,474960E-04 (+/-8,439081E-08)	26,20%
3.	1949174	5,608836E-05 (+/-4,017422E-08)	5,94%
4.	773768	2,226552E-05 (+/-2.531206E-08)	2,36%
5.	378833	1,090109E-05 (+/-1,771112E-08)	1,15%
6.	337756	9,719080E-06 (+/-1,672336E-08)	1,03%
7.	161661	4,651868E-06 (+/-1,156977E-08)	0,49%
8.	158770	4,568678E-06 (+/-1,146585E-08)	0,48%
9.	70873	2,039402E-06 (+/-7,660595E-09)	0,22%
10.	63624	1,830809E-06 (+/-7,258261E-09)	0,19%

Tabuľka 6.3: Výstup zo simulácie Monte Carlo - po NN rozvádzač *RH1*

6.2 Napájanie variant 2

Spôľahlivosť zásobovania el. energiou paralelne z dvoch rozvodní 22 kV po *subrozdávčač 1*, pri normálnej prevádzke bez UPS a diesel agregátov, viď 4.3.

Za normálnu prevádzku sa považuje topológia napájania z el. stanice 110/22kV Lisková, cez hl. rozvádzač NN *RH1* vetvou *Q1* do *subrozdávčača 1*.

6.2.1 Kvalitatívna analýza

Celý výstup z kvalitatívnej analýzy viď príloha *variant_2_kvalitatívna_analyza.pdf*.

Minimálne kritické rezy		
	Stupeň	Počet
Počet základných udalostí: 125	1.	0
	2.	150
	3.	761
	4.	9068
	5.	4516
	6.	2172
Total		16667

Tabuľka 6.4: Výstup z kvalitatívnej analýzy - variant napájania bez UPS a bez diesel agregátov, viď 4.3

6.2.2 Kvantitatívna analýza

Prvých 6 minimálne kritických rezov usporiadaných zostupne. Pri tomto variante napájania sú minimálne kritické rezy minimálne 2. stupňa. Celý výstup z analýzy viď príloha *variant_2_probability.pdf*.

1. ■ Bez prívodu el. energie do RH2, vetva Mokrad, záloha.

- Porucha holého vodiča na vedení VN 22kV linky č. 137, , od rozvodne 22kV LIS po úsekové odpínače jednotlivých vývodov až do DOU2 (vrátane vývodu TS 22/0,4kV Čebrať) o dĺžke vedenia cca 10km.
2. ■ Bez prívodu el. energie do RH2, vetva Mokrad, záloha.
 - Lokalizácia poruchy a manuálne odpojenie poruchového vývodu TS 22/0,4kV prostredníctvom úsekového odpínača na časti vedenia VN 22kV linky č. 137, kde je 9 vývodov TS 22/0,4kV (do úseku DOU2).
 3. ■ Porucha istiaceho prvku *QB* pri zopínaní alebo nezareagovanie na povel zopnutia.
 - Porucha holého vodiča na vedení VN 22kV linky č. 137, , od rozvodne 22kV LIS po úsekové odpínače jednotlivých vývodov až do DOU2 (vrátane vývodu TS 22/0,4kV Čebrať) o dĺžke vedenia cca 10km.
 4. ■ Bez prívodu el. energie do RH2, vetva Mokrad, záloha.
 - Porucha napájania vlastnej spotreby el. stanice Lisková.
 5. ■ Lokalizácia poruchy a manuálne odpojenie poruchového vývodu TS 22/0,4kV prostredníctvom úsekového odpínača na časti vedenia VN 22kV linky č. 137, kde je 9 vývodov TS 22/0,4kV (do úseku DOU2).
 - Porucha istiaceho prvku *QB* pri zopínaní alebo nezareagovanie na povel zopnutia.
 6. ■ Bez prívodu el. energie do RH2, vetva Mokrad, záloha.
 - Porucha káblového vedenia VN a káblového súboru (spojka priama, koncová), vedenie VN 22kV linky č. 137, od rozvodne 22kV LIS po úsekové odpínače jednotlivých vývodov až do DOU2 (vrátane celého vývodu TS 22/0,4kV Čebrať) o dĺžke vedenia cca 1km.

Pravdepodobnosť minimálne kritických rezov s ich významom v % v sledovanom modeli. Kritické rezy sú uvedené zostupne a všetkých šesť je 2. stupňa.

Minimálne kritický rez	Odhadovaná pravdepodobnosť smerujúca ku vrcholovej udalosti	Význam
1.	5,361129E-07	47,50%
2.	2,345574E-07	20,78%
3.	1,012609E-07	8,97%
4.	5,313623E-08	4,71%
5.	4,430317E-08	3,93%
6.	2,110324E-08	1,87%

Tabuľka 6.5: Výstup z kvantitatívnej analýzy - variant napájania bez UPS a bez diesel agregátov, viď 4.3

6.2.3 Monte Carlo simulácia

Monte Carlo Simulation

=====

Tree : distribucia.fta
Time : Fri Apr 13 22:52:24 2018

Note: Only runs with at least one component failure are simulated

Number of primary events = 125
Number of tests = 100000000
Unit Time span used = 1.000000

Number of system failures = 24364

Probability of at least one component failure = 4.661406E-003 (exact)

Probability of top event = 1.135705E-006 (+/- 7.275975E-009)

Obrázok 6.2: Parametre simulácie Monte Carlo - variant napájania bez UPS a bez diesel agregátov, viď 4.3

Pravdepodobnosť kritických rezov s ich významom v % v sledovanom modeli. Kritické rezy, získané zo simulácie Monte Carlo, sú uvedené zostupne, viď príloha *variant_2_monte_carlo.pdf*.

V poradí šiesty kritický rez je v simulácii Monte Carlo rozdielny v porovnaní s kapitola 6.2.2:

6.
 - Porucha istiaceho prvku QA pri rozopínaní alebo nezareagovanie na povel rozopnutia.
 - Porucha holého vodiča na vedení VN 22kV linky č. 137, od rozvodne 22kV LIS po úsekové odpínače jednotlivých vývodov až do DOU2 (vrátane vývodu TS 22/0,4kV Čebrať) o dĺžke vedenia cca 10km.

Kritický rez	Počet porúch	Odhadovaná pravdepodobnosť smerujúca ku vrcholovej udalosti	Význam
1.	11717	5,461769E-07 (+/-5,045743E-09)	48,09%
2.	5096	2,375452E-07 (+/-3,327604E-09)	20,92%
3.	2130	9,928794E-08 (+/-2,151328E-09)	8,74%
4.	1126	5,248743E-08 (+/-1,564178E-09)	4,62%
5.	843	3,929565E-08 (+/-1,353414E-09)	3,46%
6.	455	2,120940E-08 (+/-9,943118E-10)	1,87%

Tabuľka 6.6: Výstup zo simulácie Monte Carlo - variant napájania bez UPS a bez diesel agregátov, viď 4.3

6.3 Napájanie variant 3

Spôľahlivosť zásobovania el. energiou paralelne z dvoch rozvodní 22kV po *subrozdávčač_1*, kde napájacia vetva Mokrad' je považovaná za záložné napájanie. V prípade straty napájania z rozvodní 22kV Lis a Mok sú k dispozícii diesel agregáty (jeden na každý hl. rozvádzač NN) a napätový stav je sledovaný prostredníctvom UPS (ku každému subrozdávčaču), viď obrázok 4.5.

Za normálnu prevádzku sa v tomto prípade považuje topológia napájania viď obrázok 4.4, normálna prevádzka.

6.3.1 Kvalitatívna analýza

Celý výstup z kvalitatívnej analýzy viď príloha *variant_3_kvalitatívna_analyza.pdf*.

Minimálne kritické rezy		
	Stupeň	Počet
Počet základných udalostí: 35	1.	0
	2.	3
	3.	120
	4.	64
	5.	8
Total		195

Tabuľka 6.7: Výstup z kvalitatívnej analýzy - variant napájania z distribučnej siete, s diesel agregátmi a UPS, viď 4.5

6.3.2 Kvantitatívna analýza

Prvých 5 minimálnych kritických rezov usporiadaných zostupne. Pri tomto variante napájania sú minimálne kritické rezy minimálne 2. stupňa. Celý výstup z analýzy viď príloha *variant_3_probability.pdf*.

1.
 - Porucha automatického prepínača *ATS_3* (pred vstupom do UPS subrozdávča_1).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
2.
 - Porucha pozdĺžneho odpojovač *QT* (medzi *RH1* a *RH2*).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
3.
 - Porucha istiaceho prvku *Q_byPass* (pri premostení UPS subrozdávča_1).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
4.
 - Porucha automatického prepínača *ATS_1* (pred vstupom do *RH1*).
 - Porucha istiaceho prvku *QB* pri zopínaní alebo nezareagovanie na povel zopnutia.
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
5.
 - Porucha automatického prepínača *ATS_1* (pred vstupom do *RH1*).
 - Porucha automatického prepínača *ATS_2* (pred vstupom do *RH2*).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.

Pravdepodobnosť minimálnych kritických rezov s ich významom v % v sledovanom modeli. Kritické rezy sú uvedené zostupne.

Minimálny kritický rez	Odhadovaná pravdepodobnosť smerujúca ku vrcholovej udalosti	Význam
1.	1,203990E-10	96,56%
2.	3,740303E-12	3,00%
3.	5,020650E-13	0,40%
4.	2,149122E-14	0,02%
5.	6,768893E-15	0,01%

Tabuľka 6.8: Výstupy z kvantitatívnej analýzy - variant napájania z distribučnej siete, s diesel agregátmi a UPS, viď 4.5

6.3.3 Monte Carlo simulácia

Monte Carlo Simulation

=====

Tree : Test_ups.fta
Time : Mon Apr 16 23:02:12 2018

Note: Only runs with at least one component failure are simulated

Number of primary events = 35
Number of tests = 1000000000
Unit Time span used = 1.000000

Number of system failures = 21

Probability of at least one component failure = 6.132893E-003 (exact)

Probability of top event = 1.287908E-010 (+/- 2.810445E-011)

Obrázok 6.3: Parametre simulácie Monte Carlo - variant napájania z distribučnej siete, s diesel agregátmi a UPS, viď 4.5

Simulácia Monte Carlo bola uskutočnená na počte testov 1 000 000 000, celkový počet zlyhaní vrcholovej udalosti, ktoré vznikli bol 21, zapríčinené jedným

kritickým rezom, celý výstup zo simulácie viď príloha *variant_3_monte_carlo.pdf*.

1.
 - Porucha automatického prepínača *ATS_3* (pred vstupom do UPS subrozvádzača_1).
 - Porucha UPS subrozvádzača_1.

Kritický rez	Počet porúch	Odhadovaná pravdepodobnosť smerujúca ku vrcholovej udalosti	Význam
1.	21	1,287908E-10 (+/-2,810445E-11)	100%

Tabuľka 6.9: Výstup zo simulácie Monte Carlo - variant napájania z distribučnej siete, s diesel agregátmi a UPS, viď 4.5

6.4 Napájanie variant 4

Spôľahlivosť zásobovania el. energiou paralelne z dvoch rozvodní 22kV po *subrozvádzač_1*, kde napájacia vetva Mokrad' je považovaná za záložné napájanie a napätový stav je sledovaný prostredníctvom UPS (ku každému subrozvádzaču) - ako variant 3 bez diesel agregátov.

6.4.1 Kvalitatívna analýza

Celý výstup z kvalitatívnej analýzy viď príloha *variant_4_kvalitativna_analyza.pdf*.

Minimálne kritické rezy		
Počet základných udalostí: 29	Stupeň	Počet
	1.	0
	2.	3
	3.	120
	4.	20
Total		143

Tabuľka 6.10: Výstup z kvalitatívnej analýzy - variant napájania z distribučnej siete a z UPS, bez diesel agregátov

6.4.2 Kvantitatívna analýza

Prvých 5 minimálnych kritických rezov usporiadaných zostupne. Pri tomto variante napájania sú minimálne kritické rezy minimálne 2. stupňa. Celý výstup z analýzy viď príloha *variant_4_probability.pdf*.

1.
 - Porucha automatického prepínača *ATS_3* (pred vstupom do UPS subrozdávča_1).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
2.
 - Porucha pozdĺžneho odpojovač *QT* (medzi *RH1* a *RH2*).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
3.
 - Bez prívodu el. energie do *RH1*, vetva Lisková.
 - Bez prívodu el. energie do *RH2*, vetva Mokrad, záloha.
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
4.
 - Porucha istiaceho prvku *Q_byPass* (pri premostení UPS subrozdávča_1).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
5.
 - Bez prívodu el. energie do *RH1*, vetva Lisková.
 - Porucha istiaceho prvku *QB* pri zopínaní alebo nezareagovanie na povel zopnutia.
 - Porucha UPS subrozdávča_1.

Pravdepodobnosť minimálnych kritických rezov s ich významom v % v sledovanom modeli. Kritické rezy sú uvedené zostupne.

Minimálny kritický rez	Odhadovaná pravdepodobnosť smerujúca ku vrcholovej udalosti	Význam
1.	1,203990E-10	94,77%
2.	3,740303E-12	2,94%
3.	1,912641E-12	1,51%
4.	5,020650E-13	0,40%
5.	3,612593E-13	0,28%

Tabuľka 6.11: Výstup z kvantitatívnej analýzy - variant napájania z distribučnej siete a z UPS, bez diesel agregátov

6.4.3 Monte Carlo simulácia

```

Monte Carlo Simulation
=====

Tree   : Test_NO_diesel.fta
Time   : Tue Apr 17 16:09:10 2018

Note: Only runs with at least one component failure are
simulated

Number of primary events = 29
Number of tests          = 1000000000
Unit Time span used     = 1.000000

Number of system failures = 70

Probability of at least = 2.556902E-003 ( exact )
one component failure

Probability of top event = 1.789831E-010 ( +/- 2.139257E-011 )

```

Obrázok 6.4: Parametre simulácie Monte Carlo - variant napájania z distribučnej siete a z UPS, bez diesel agregátov

Simulácia Monte Carlo bola uskutočnená na počte testov 1 000 000 000, celkový počet zlyhaní vrcholovej udalosti, ktoré vznikli bol 70, zapríčinené následnými kritickými rezmi. Celý výstup zo simulácie vid príloha *variant_4_monte_carlo.pdf*.

1.
 - Porucha automatického prepínača *ATS_3* (pred vstupom do UPS subrozdávča_1).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
2.
 - Bez prívodu el. energie do RH1, vetva Lisková.
 - Bez prívodu el. energie do RH2, vetva Mokrad, záloha.
 - Porucha UPS subrozdávča_1.
3.
 - Porucha pozdĺžneho odpojovač *QT* (medzi *RH1* a *RH2*).
 - Porucha UPS subrozdávča_1.

Kritický rez	Počet porúch	Odhadovaná pravdepodobnosť smerujúca ku vrcholovej udalosti	Význam
1.	47	1,201744E-10 (+/-1,752923E-11)	67,14%
2.	12	3,068282E-11 (+/-8,857367E-12)	17,14%
3.	11	2,812592E-11 (+/-8,480283E-12)	15,71%

Tabuľka 6.12: Výstup zo simulácie Monte Carlo - variant napájania z distribučnej siete a z UPS, bez diesel agregátov



Záver

Práca sa zaoberala analýzou spoľahlivosti napájania tunela pozemných komunikácií pri rôznych variantách zásobovania el. energiou. Primárne sme vychádzali z jednej konkrétnej topológie napájania z distribučnej siete, ktorá bola v súlade s platným TP98 z roku 2010, s cieľom použiť výsledky analýzy v primeranej tolerancii spoľahlivosti na čo najväčší počet tunelov pozemných komunikácií pri rôznych topológiách napájania. Dáta, ktoré boli použité na počítanie spoľahlivosti primárnych udalostí stromu porúch boli získané majoritne z troch zdrojov: z dát poskytnutými distribučnou spoločnosťou, z IEEE štandardu 493 z roku 2007 a zo CIGRE, Rada pre veľké elektrické systémy.

Dáta poskytnuté distribučnou spoločnosťou sa museli najskôr spracovať, aby ich bolo možné následne použiť na kvantitatívne vyhodnotenie modelu napájania cestného tunelu. Na analýzu spoľahlivosti napájania bol použitý freeware openFTA od spoločnosti Auvation. Celkom boli spracované štyri varianty napájania, viď obrázok 6.5.

Z výstupov z kvalitatívnej analýzy je zrejmé, že varianty napájania 2 až 4 neobsahujú minimálne kritické rezy 1. stupňa, čo dáva hrubý odhad, že spoľahlivosť napájania bude vyššia. Tento odhad na základe kvalitatívnej analýzy bol potvrdený výstupmi z kvantitatívnych analýz.

Pri napájaní tunela pozemných komunikácií **variantom 1** (z jednej el. stanice 110/22kV z distribučnej siete) je celková ročná nedostupnosť napájania získaná z výstupu openFTA približne 8 hod. 17 min.¹

¹ Nevýhodou analytického softvéru OpenFTA je, že výstupná analýza neurčuje frekvenciu porúch vrcholovej udalosti.

Tento variant ako jediný zo štyroch variant predstavuje napájanie, ktoré **nie je zálohované**, čo predstavuje kardinálnu hodnotu z hľadiska spoľahlivosti.

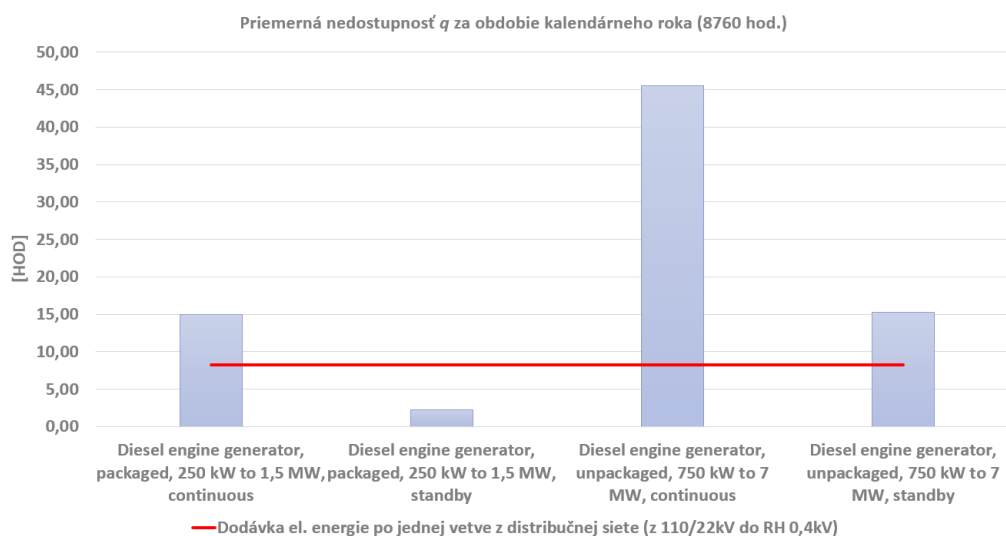
V našom konkrétnom prípade porucha holého vodiča na vedení VN 22kV linky č. 137, od rozvodne 22kV LIS po úsekové odpínače jednotlivých vývodov až do DOU2 (vrátane vývodu TS 22/0,4kV Čebrať) o dĺžke vedenia cca 10km, tvorí až 60,03% podiel na výpadku dodávky el. energie z distribučnej siete.

Varianta	Popis napájania	Výpadok v hod. za obdobie jedného kal. roka (8760 hod)	Dostupnosť zásobovania el. energiou
1.	Zásobovanie el. energiou z distribučnej siete (1 nezávislá el. stanica 110/22 kV) po hl. vypínač QA rozvádzača RH1	8 hod 17 min	99,90%
2.	Zásobovanie el. energiou z distribučnej siete (2 nezávislé el. stanice 110/22 kV) po subrozdávzač_1 (variant bez UPS a bez diesel agregátov)	36 sec (rádovo 10E-03 hod)	99,99988%
3.	Zásobovanie el. energiou z distribučnej siete (2 nezávislé el. stanice 110/22 kV) po subrozdávzač_1 (variant s UPS + diesel agregátmi na každý hl. rozvádzač (RH1, RH2))	1,09222E-06 hod	-
4.	Zásobovanie el. energiou z distribučnej siete (2 nezávislé el. stanice 110/22 kV) po subrozdávzač_1 (variant s UPS a bez diesel agregátov)	1,11291E-06 hod	-

Obrázok 6.5: Porovnanie spoľahlivosti rôznych variant napájania el. energiou

Pri napájaní tunela pozemných komunikácií **variantom 2** (z dvoch nezávislých el. staníc 110/22kV z distribučnej siete) je celková ročná nedostupnosť napájania získaná z výstupu openFTA približne **36 sekúnd**.

Pri dieselagregátoch, ktoré môžu byť použité ako záložné zdroje, ich nedostupnosť q vo veľkej miere závisí na konkrétnom type, viď obrázok6.6.



Obrázok 6.6: Porovnanie spoľahlivosti rôznych druhov diesel agregátu a napájania variantom 1²

Medzi variantom 3 a 4 je rozdiel v spoľahlivosti napájania minimálny. Diesela-gregáty použité v 3. variante napájania sú primárne použité z dôvodu zníženia kapacity batériových blokov UPS a zároveň predĺženia doby funkcie UPS tým, že batériové bloky by boli v prípade výpadku napájania z distribučnej siete, napájané z diesela-gregátov. Pre plné pokrytie požadovanej doby zálohovania (až 180 min. u vybraných systémov) by zdroj UPS (batériové bloky) nadobúdala veľkých rozmerov. V prípade použitia rotačného UPS, odpadá problém spojený s batériovými blokmi, avšak doba zálohy je len o niečo väčšia ako čas potrebný na pripojenie diesela-gregátu do el. siete tunela.

Uvažujme napájania podľa variantu 2 (dve nezávislé el. stanice 110/22 kV distribučnej siete). Na základe podkladov opierajúc sa o analýzu z výstupov openFTA, by stálo za zmienku prehodnotiť časový interval napájania vybraných systémov prostredníctvom UPS, aby pri strate hlavného aj záložného napájania z distribučnej siete, nebolo potrebné udržiavať, servisovať a prevádzkovať diesel agregáty na dobíjanie akumulátorov UPS, viď 6.13, **katalógové** ceny diesel agregátov a UPS z roku 2013.

² Spoľahlivosť rôznych typov diesel agregátov získaná z [Spo07], na celkovej vzorke 1 354 sledovaných diesel agregátov, publikované v roku 2007. V modeli (variant 3) bol uvažovaný diesel engine generator, unpackaged, 750 kW to 7 MW, standby.

Diesel agregát		UPS	
Výkon [kVA]	Jednotková cena [Kč]	Výkon [kVA]	Jednotková cena [Kč]
200	1 100 000	160	520 000
440	2 100 000	400	730 000
800	4 600 000		
1 850	9 800 000		

Tabuľka 6.13: Obstarávacia cena záložných zdrojov[Klo13]

Pritom sú stále prostriedky pre bezpečné zastavenie dopravy do tunela cestou UPS a príslušných dopravných značiek bez potreby dieselaagregátov, ktorí reprezentuje variant napájania 4 s nedostupnosťou dodávky el. energie za obdobie jedného kal. roka $1, 113 \cdot 10^{-6}$ hod.

Uvažujme cestný dvojrúrový tunel kategórie *TB*, dĺžky 3000m a dopravnej intenzity 1000 vozidiel/deň/jazdný pruh a štatistickú hodnotu požiaru 0,007797373 [požiarov/1 mil. vozidlo kilometrov], ktorá je prevzatá z TP 229, *Bezpečnosť v tuneloch pozemných komunikácií*. Chceme vypočítať **pravdepodobnosť, že aspoň jedno vozidlo v tuneli, zmienených parametrov, príde do stretu s požiarom za obdobie jedného roka**. Pri Poissonovom rozdelení

$$P(x = n) = \frac{\lambda^n}{n!} \cdot e^{-\lambda}$$

kde $n \geq 1$, dostávame hodnotu pravdepodobnosti **0,016931**.

Pokiaľ by nedošlo k prepnutiu napájania na druhý nezávislý zdroj, na základe analýzy, doporučujeme prehodnotiť dobu zásobovania tunela el. energiou v závislosti na kategórii tunela z hľadiska bezpečnostného vybavenia. Pri tejto kategorizácii tunelov, kde vplyv na kategóriu zohráva dĺžka tunela a intenzita dopravy, by pre tunely kategórie *TB*³ bolo doporučené stanoviť čas na 15 min, pri zvýšenej pohotovosti dispečera alebo operátora. V takýchto prípadoch, by stálo za uváženie ponechať maximálnu povolenú rýchlosť na 80 km/hod. Počas týchto 15 minút by systémy, ktorých krátkodobý výpadok napájania nemá bezprostredný vplyv na bezpečnosť,⁴ nemuseli byť napájané. Ak by nedošlo k obnoveniu dodávky el. energie do 15 minút, bolo by nutné zastaviť dopravu smerujúcu do tunela.

³ Tunel kategorizovaný ako *TB* má dĺžku 500 až 3000m a intenzita vozidiel klesá nelineárnou závislosťou mocninovej funkcie so záporným regresným koeficientom: od 15000 vozidiel/deň/jazdný pruh pre dĺžku 500m do 1000 vozidiel/deň/jazdný pruh pre dĺžku 3000m. Pre krátke tunely kategórie *TD*, *TD-H* a *TC*, *TC-H* sa pripúšťa napájanie el. energiou v 2. stupni.

⁴ Zariadenia pre usmerňovanie pohybu dymu pri požiaroch v tuneli (ventilácia, dymové klapky, pretlakové vetranie záchranných ciest), zariadenia pre zásobovanie požiarou vodou - výkonová časť (čerpádlá), vyhrievacie káble pre ohrev požiarneho vodovodu v tuneli, niektoré skupiny akomodačného osvetlenia, vonkajšie osvetlenie a servisné zásuvky.



Literatúra

- [Bir99] Alessandro Birolini, *Reliability engineering, theory and practice*, 3rd ed., Springer, New York, 1999.
- [C.410] PIARC TECHNICAL COMMITTEE C.4, *Working group 1: Improve tunnel operation and maintenance - life cycle aspects of tunnel equipment*, PIARC, Paris, 2010.
- [cit17] *Vývoj plynulosti prenosu a distribúcie elektriny v regulačnom období 2012 až 2016*, Úrad pre reguláciu sieťových odvetví - Odbor monitoringu a analýz, 2017.
- [CLT82] John C. Conlon, Walter A. Lilius, and Frank H. Tubbesing, *Test & evaluation of system reliability, availability and maintainability - a primer*, 3rd ed., Office of the Director Defense Test and Evaluation Under Secretary of Defense for Research and Engineering, Washington, D.C., 1982.
- [D. 81] W. E. Vesely, F. F. Goldberg, N. H. Roberts, D. F. Haasl, *Fault tree handbook*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. 20555, January 1981.
- [Hau14] Jon Mikkell Haugen, *Rams and life cycle cost assessment of road tunnels*, dostupné z: <http://frigg.ivt.ntnu.no/ross/stud/Jon%20Mikkel%20Haugen.pdf> (citované: 24.9.2016), NTNU - Trondheim, 2014.
- [hla10] ELTODO EG, a.s., hlavný editor: Prof. Ing. Pavel Příbyl, CSc., *Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací; změna č. 1 technických podmínek tp 98*, 1. ed., MD ČR - OSI, 2010.
- [Jac04] Richard Bono, Robert Alexander, Andrew Dorman, Yong-Jin Kim, Jack Reisdorf, *Analyzing reliability—a simple yet rigorous approach*, IEEE

TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 40, NO. 4, 2004.

- [Klo13] Martin Kloc, *Elektrické napájení silničního tunelu*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013.
- [Lim05] Formal Software Construction Limited, *Openfta - user manual*, version: 1.0 ed., 2005.
- [Rai02] Vesely WE, Dugan J, Fragola J, Minarick J, Railsback J, *Fault tree handbook with aerospace applications*, 1.1 ed., National Aeronautics and Space Administration, NASA, 2002.
- [RH04] M. Rausand and A. Høyland, *System reliability theory, models, statistical methods, and applications*, 2nd ed., Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2004.
- [SPA08] PŘIBYL Pavel, JANOTA Aleš, SPALEK Juraj, *Analýza a řízení rizik v dopravě*, BEN - technická literatura, Praha, 2008.
- [Spo07] Sponsor, *IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, N.Y, 2007.
- [Sta09] Rudolph Frederick. Stapelberg, *Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design*, Springer, London, 2009.
- [ttc15] "Road Tunnel Operations" technical committee, *Road tunnel manual*, dostupné z: <http://tunnels.piarc.org/en/transverse-aspects/safety> (citované: 15.11.2016), La Défense Cedex - France, 2015.
- [Zil16] Zilinskediaľnice.sk, dostupné z: <http://zilinskediaľnice.sk/poznane-nove-riesenie-problematickeho-tunela-cebrat/> (citované: 26.10.2017), 2016.



Dodatok A

Register

E1 - bez výjazdu, 37, 42

E1 - s výjazdom, 37, 42

E2, 37

FTA, 15

RAMS, 4

Dodatok B

Zoznam príloh

Stromy porúch generované softvérom OpenFTA uložené vo formáte .pdf:

- | | |
|----------------|--------------------|
| 1. ANG1 | 11. RH2_dis |
| 2. ANG2 | 12. Roz110 |
| 3. distribucia | 13. Test_NO_diesel |
| 4. Lis22W11 | 14. Test_ups |
| 5. Lis22W12 | 15. TS110_101 |
| 6. Lis22W13 | 16. TS110_102 |
| 7. pokus_QA | 17. TS110_103 |
| 8. Pri110W1 | 18. Vlas_spot |
| 9. Pri110W2 | 19. W11NoE |
| 10. RH1_dis | 20. W13NoE |

Kvalitatívna a kvantitatívna analýza z výstupu OpenFTA, pre všetky 4 varianty napájania, uložená vo formáte .pdf v elektronickej verzii:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. variant_1_kvalitativna_analyza | 4. variant_2_kvalitativna_analyza |
| 2. variant_1_probability | 5. variant_2_probability |
| 3. variant_1_monte_carlo | 6. variant_2_monte_carlo |

- | | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 7. variant_3_kvalitativna_analyza | 11. variant_4_probability |
| 8. variant_3_probability | 12. variant_4_monte_carlo |
| 9. variant_3_monte_carlo | 13. databaza_primarne_udalosti |
| 10. variant_4_kvalitativna_analyza | |