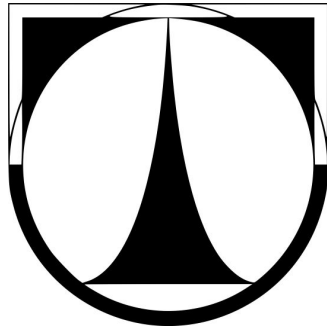


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1802R022 – Informatika a logistika

Určení kritičností základních událostí FTA

FTA basic events criticalities determination

Bakalářská práce

Autor: Jiří Knop

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Zajíček, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jan Kamenický, Ph.D.



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo. Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 15.5.2011

Podpis

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Zajíčkovi PhD. za to, že byl ochoten vést tuto práci, za jeho přístup a samozřejmě za jeho faktické připomínky a rady v průběhu vypracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat všem ostatním, kteří mě jakýmkoli způsobem podporovali v mém snažení vypracovat tuto práci.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou stromu poruchových stavů (FTA) a určováním kritičností základních událostí v této analýze.

V teoretické části je představena analýza stromu poruchových stavů, její historie vzniku, postupy při vytváření této analýzy, události a logická hradla. V druhé polovině teoretické části jsou popisovány výpočty kritičností základních událostí.

V praktické části jsou uvedeny dva modelové příklady stromu poruch, na kterých jsou demonstrovány výpočty kritičností základních událostí (Birnbbaumova funkce kritičnosti, kritičnost míry důležitosti, Fussel-Veselý, Barlow-Proschan).

Klíčová slova: Analýza stromu poruchových stavů (FTA), Birnbbaumova funkce kritičnosti, kritičnost míry důležitosti, Fussel-Veselý, Barlow-Proschan

## Abstract

This work presents fault tree analysis (FTA) and basic events criticalities determination of this analysis. The theoretical part presents a fault tree analysis, the history, procedures for making this analysis, events and logic gates. In the second half of the theoretical part basic events criticalities calculations are described.

Practical part presents two examples of fault-tree on which criticalities of the basic events calculations are demonstrated (Birnbau's measure, Criticality measure of importance, Fussel-Vesely, Barlow-Proschan).

Keywords: Fault Tree Analysis (FTA), Birnbau's measure, Criticality measure of importance, Fussel-Vesely, Barlow-Proschan

# Obsah

1	Úvod.....	10
2	Analýza stromu poruchových stavů - základní informace a postupy.....	11
2.1	Historie analýzy FTA .....	11
2.2	Norma ČSN EN 61025.....	12
2.3	Postup vytváření analýzy FTA.....	12
2.4	Události analýzy stromu poruchových stavů .....	13
2.5	Logická hradla analýzy FTA.....	16
2.6	Kvalitativní analýza FTA .....	19
2.7	Kvantitativní analýza FTA.....	19
2.8	Závěrečná zpráva analýzy .....	20
2.9	Určení přijatelnosti vrcholové události .....	21
3	Analýza stromu poruchových stavů - míra důležitosti.....	22
3.1	Deterministická míra důležitosti .....	22
3.2	Stochastická míra důležitosti - pohotovostní .....	23
3.3	Stochastická míra důležitosti - spolehlivostní.....	27
4	Analýza stromu poruchových stavů - určení kritičností – aplikace .....	29
4.1	Spolehlivostní software ITEM .....	29

4.2	Příklad 1 .....	30
4.3	Příklad 2 .....	36
5	Závěr.....	43



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Sedm kroků analýzy FTA .....	13
Obrázek 2: Vrcholová událost .....	14
Obrázek 3: Mezilehlá událost .....	14
Obrázek 4: Základní událost .....	15
Obrázek 5: Nerozvíjená událost.....	15
Obrázek 6: Schématická značka AND, podle amerického standardu ANSI/IEEE .....	17
Obrázek 7: Schématická značka OR, podle amerického standardu ANSI/IEEE.....	18
Obrázek 8: Schématická značka majoritního hradla m z n, podle amerického standardu ANSI/IEEE.....	19
Obrázek 9: Matice rizika.....	21
Obrázek 10: Grafické odvození QSYS pro systém 2 ze 3 .....	24
Obrázek 11: Logo společnosti .....	29
Obrázek 12: Strom poruchových stavů - příklad 1 .....	31
Obrázek 13: Strom poruchových stavů - příklad 2 .....	37

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Pravdivostní tabulka AND.....	16
Tabulka 2: Pravdivostní tabulka OR.....	17
Tabulka 3: Minimální kritické řezy - příklad 1.....	33
Tabulka 4: Tabulka kritičností ITEM - příklad 1.....	35
Tabulka 5: Minimální kritické řezy - příklad 2.....	40
Tabulka 6: Tabulka kritičností ITEM - příklad 2.....	42
Tabulka 7: Srovnání příkladů .....	43

# 1 Úvod

Tématem bakalářské práce je analýza stromu poruchových stavů. Úkolem této práce je popsat kroky při tvorbě této analýzy a hlouběji představit určení kritičností základních událostí. Budou představeny různé typy kritičností základních událostí, postupy jejich výpočtu a rozdíly mezi jednotlivými kritičnostmi. V praktické části budou na jednoduchém příkladu stromu poruchových stavů předvedeny výše zmíněné výpočty kritičností základních událostí, budou porovnávány mezi sebou a s výsledky vypočtenými spolehlivostním softwarem Item Toolkit.

Jelikož při tvorbě této práce bylo čerpáno většinou z cizojazyčných zdrojů, které používají mezinárodní označení spolehlivostních veličin, rozhodl se autor tyto veličiny nepřepisovat podle českých norem. Hlavním důvodem je software Item Toolkit, který taktéž používá mezinárodní označení. Tímto by nemělo dojít ke zmatení čtenáře. Jedná se o veličinu nepohotovost, která se mezinárodně označuje  $Q$ , zatím co v české normě je značena  $U$ .

## 2 Analýza stromu poruchových stavů - základní informace a postupy

Fault tree analysis (FTA), jak se mezinárodně označuje analýza stromu poruchových stavů, je jedním z nástrojů oboru spolehlivosti. Jedná se o grafické vyobrazení poruchových stavů, které jsou různě pospojovány logickými hradly, směřujícími k jedné vrcholové události. Proto se používá přirovnání ke stromu. Grafická vizualizace, jak bude níže vyobrazeno, skutečně připomíná strom. Podle charakteru dostupnosti vstupních dat a výstupních požadavků může být strom poruch analyzován kvalitativně nebo kvantitativně. Většinou je tato analýza aplikována na systémy, u nichž se vyžaduje vyhodnocení bezpečnosti jejich provozu. Jejím cílem je odhalit příčiny poruch a jejich kombinace vedoucí ke vzniku námi předem určené události (viz vrcholová událost), analyzovat možnosti vedoucí k zlepšení bezporuchovosti či pohotovosti systému.

### 2.1 Historie analýzy FTA

Analýza stromu poruchových stavů byla vytvořena a poprvé použita H.A. Watsonem v roce 1962, který pracoval pro společnost Bell Laboratories na armádní zakázce. Jednalo se o startovací řídicí systém mezikontinentální balistické rakety Minuteman 1. Analýza byla efektivní, a proto byla o rok později aplikována na celý systém projektu rakety Minuteman 2. Ve veřejné (komerční) sféře byla poprvé analýza FTA použita společností Boeing v roce 1966, a to pro civilní letectví. Analýza FTA dokáže obsáhnout i složité systémy, používá se proto i v jaderné energetice, či v kosmonautice.

## 2.2 Norma ČSN EN 61025

Analýza stromu poruchových stavů hodnotí poruchové stavy většinou technických zařízení, a to především zařízení, jejichž poruchy mohou mít fatální dopad na zdraví obyvatelstva či životní prostředí (letectví, jaderná energetika, atd.). Z tohoto a mnoha dalších důvodů bylo zapotřebí sjednotit postupy a terminologii této analýzy. Tak vznikla překladem evropské normy česká technická norma ČSN EN 61025. Předmětem této normy je popis FTA v podobě vymezení základních principů, popisu a vysvětlení příslušného matematického modelování, vztahů k dalším technikám modelování bezporuchovosti, popisu jednotlivých kroků při analyzování, identifikace aktivních členů, identifikace a popis používaných značek.

## 2.3 Postup vytváření analýzy FTA

Podle výše zmíněné normy, se postup analýzy FTA skládá ze sedmi kroků. Prvním krokem je vymezení předmětu a rozsahu analýzy. V tomto kroku se určuje hranice analyzovaného systému. Zde musí být analytici opatrní, aby omylem nevyloučili nějaký ovlivňující člen. Poté by mohly vznikat nepřesnosti. Druhým krokem je seznámení se s návrhem, funkcemi a provozem systému. Většinou kvůli velkému rozsahu systému provádí analýzu tým odborníků s různým zaměřením. Další kroky (vymezení vrcholové události, sestavení stromu poruchových stavů, analýza logiky, závěrečná zpráva, zpětná vazba) jsou popsány v následujících kapitolách.



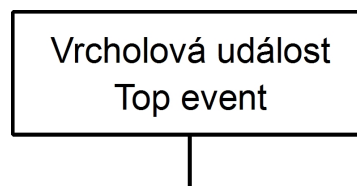
**Obrázek 1: Sedm kroků analýzy FTA**

## 2.4 Události analýzy stromu poruchových stavů

V FTA analýze se rozlišují čtyři základní a další méně užívané typy událostí. Mezi základní, často užívané, se řadí vrcholová událost, mezilehlá událost, základní událost a dále nerozvíjená událost.

## Vrcholová událost

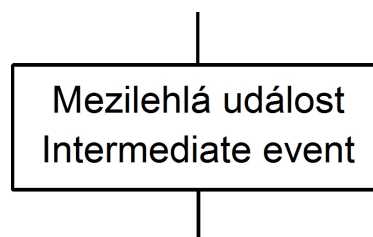
Vrcholová událost, mezinárodně označovaná jako Top event, tvoří kořen celého stromu analýzy FTA. To znamená, že v jednom stromu může být pouze jedna vrcholová událost. Vrcholová událost je zpravidla porucha systému nebo nedostupnost definované funkce. Vrcholovou událostí může však být i vznik nebezpečí, např. pro životní prostředí či lidské zdraví. Aby nedocházelo k nejasným výsledkům FTA analýzy, musí být vrcholová událost definována jednoznačně.



**Obrázek 2: Vrcholová událost**

## Mezilehlá událost

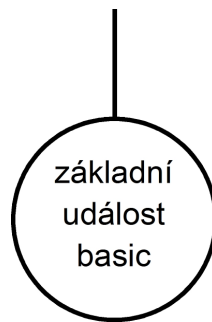
Mezilehlá událost (intermediate event) je událost předcházející vrcholové události nebo událostem mezilehlým události vrcholové. Mezilehlá událost představuje stav určité komponenty systému nebo stav systému mající vliv na zkoumaný systém a jeho vrcholovou událost.



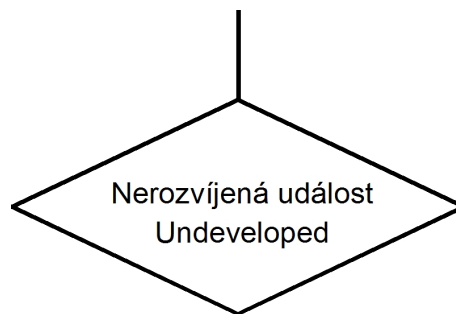
**Obrázek 3: Mezilehlá událost**

## Základní událost a dále nerozvíjená událost

Základní událost je definována jako událost, která už dále není dělená na dílčí události, jelikož to není možné. Dále nerozvíjená událost, je událost, u níž další rozšíření není možné např. z důvodu nedostatku podrobnějších informací, anebo je to událost, jejíž strom poruchových stavů je zpracovaný v jiné analýze.



**Obrázek 4: Základní událost**



**Obrázek 5: Nerozvíjená událost**



## 2.5 Logická hradla analýzy FTA

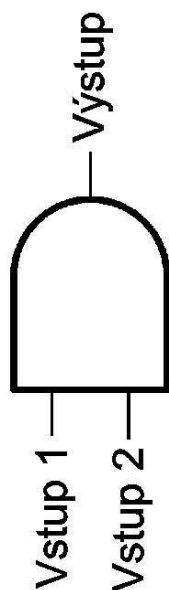
Logická hradla analýzy FTA jsou v cizojazyčné literatuře označována jako gates. S termínem logické hradlo se nejčastěji setkáme v elektrotechnice a informatice. V analýze stromu poruchových stavů mají logická hradla v podstatě totožnou funkci jako ve zmíněných oborech. Logické hradlo spojuje nejčastěji dvě události, s nimiž realizuje předem danou logickou funkci, jejíž výsledek je předán na výstup. Existují však i logická hradla spojující více než dvě události např. výběrové hradlo. Nejpoužívanější logická hradla jsou hradla AND, OR a výběrové hradlo m z n.

### Logické hradlo AND

Toto logické hradlo se dvěma vstupy a jedním výstupem je zcela ekvivalentní s binárním násobením dvou jednobitových čísel, kde log. 1 představuje poruchu. Aby nastala na výstupu porucha (tj. log. 1), musí do tohoto hradla vstoupit najednou dvě log. 1, což znamená na obou vstupech zároveň porucha. Z toho vyplývá, že AND se dá zobrazit jako paralelní zapojení dvou událostí. Pravděpodobnost, že na výstupu ANDu bude porucha, se vypočte vynásobením nepohotovostí vstupů tj.  $Q_I = Q_{O1} \cdot Q_{O2}$ . Existují i vícevstupé alternativy ANDu, u nichž počet vstupů může být libovolný. Logika u těchto alternativ však zůstává stejná jako u dvouvstupého ANDu. Další alternativou je hradlo NAND, což znamená negovaný AND. Stále však platí pravidlo, že co lze zapsat NANDy, lze zapsat ANDy.

**Tabulka 1: Pravdivostní tabulka AND**

Vstup 1	Vstup 2	Výstup
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



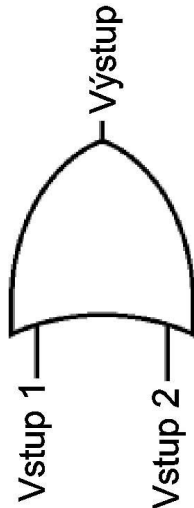
Obrázek 6: Schématická značka AND, podle amerického standardu ANSI/IEEE

## Logické hradlo OR

Dalším používaným hradlem o dvou vstupech a jednom výstupu je logické hradlo OR. Aby nastala vrcholová událost (log. 1) stačí, když alespoň na jednom vstupu ze dvou vstupů je log. 1 neboli porucha. OR se dá zobrazit jako sériové zapojení dvou událostí. Pravděpodobnost, že výstup bude v poruše, se vypočítá jako doplněk součinu pohotovostí vstupů  $(1 - Q)$  tj.  $Q_I = [1 - (1 - Q_{O1}) \cdot (1 - Q_{O2})]$ . Stejně jako u hradla AND i zde existují další alternativy hradla OR, např.: NOR (negovaný OR), XOR (exkluzivní OR), XNOR (negovaný exkluzivní OR).

Tabulka 2: Pravdivostní tabulka OR

Vstup 1	Vstup 2	Výstup
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

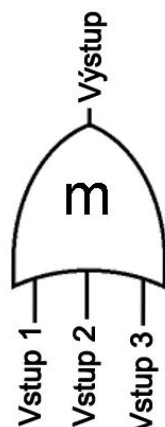


Obrázek 7: Schématická značka OR, podle amerického standardu ANSI/IEEE

## Výběrové hradlo m z n

Výběrové hradlo m z n má tři a více vstupů. Událost (porucha) na výstupu nastane tehdy, když alespoň m vstupů z n celkových vstupů se ve stejný čas vyskytuje v poruchovém stavu. Výběrové hradlo m z n se používá pro zálohování funkcí systému, zvyšuje celkovou spolehlivost systému. Pokud všechny vstupy mají stejnou pravděpodobnost výskytu poruchy  $q$ , pravděpodobnost výskytu výstupní události se vypočítá takto:

$$Q_I = \sum_{x=m}^n \binom{n}{x} \cdot Q^x \cdot (1-Q)^{n-x}$$



Obrázek 8: Schématická značka majoritního hradla  $m$  z  $n$ , podle amerického standardu ANSI/IEEE

## 2.6 Kvalitativní analýza FTA

Kvalitativní analýza FTA se provádí pomocí kritických cest neboli kritických řezů (cut set), konkrétněji pomocí minimálních kritických řezů (minimal cut set). Termínem kritického řezu je označena množina základních událostí, které při souběhu vyvolají vrcholovou událost. Z této definice je odvozena definice minimálního kritického řezu. Je to minimální množina poruchových stavů, při kterých ve stejný okamžik nastane vrcholová událost. Určení kritických řezů, následně i minimálních kritických řezů, může být u rozsáhlých systémů časově náročné, proto je vhodné použít specializovaný software.

## 2.7 Kvantitativní analýza FTA

Kvantitativní analýza stromu poruchových stavů je aplikovatelná jen tehdy, pokud jsou k dispozici vybrané spolehlivostní ukazatele k základním událostem vyskytujícími se ve stromu poruchových stavů. Těmito ukazateli jsou míněny pravděpodobnost poruchového stavu, střední doba do poruchy (MTBF), intenzita poruch ( $\lambda$ ), doba do obnovy, nepohotovost atd. Jakmile jsou k dispozici údaje o spolehlivosti základních událostí, je možno postupně spočítat vhodný ukazatel pro vrcholovou událost. Pro výpočty se používají tři metody.

První metodou je metoda přímého výpočtu. Jak už název napovídá, postupuje se jednotlivě od základních událostí až po událost vrcholovou. Druhá metoda je metoda minimálních kritických řezů. Zde se vezmou všechny kritické řezy a společně se propojí v blokovém diagramu, z tohoto diagramu se poté vypočítá pravděpodobnost vzniku vrcholové události. Třetí metodou je metoda Monte Carlo. Tato dynamická metoda je založená na opakování pokusů, při níž pravděpodobnost vypočtená touto metodou konverguje při dostatečném počtu pokusů k pravděpodobnosti skutečné.

## 2.8 Závěrečná zpráva analýzy

Podle normy závěrečná zpráva nemá žádný předepsaný formát. Měla by však vždy obsahovat určité položky. Jako v jiných závěrečných zprávách i zde musí být uveden předmět a cíle analýzy, popis analyzovaného systému, seznam pracovníků podílejících se na analýze. Mimo samotné analýzy se uvádí její výsledky, z nichž jsou vyvozovány závěry a doporučení.

## 2.9 Určení přijatelnosti vrcholové události

S pojmem kritičnost je možné se setkat především v oboru hodnocení rizik. Je definována jako součin důsledku poruchy a pravděpodobnosti vzniku poruchy. Kritičnost je využívána také v matici rizika (nebo matici kritičnosti), kde je rozhodováno o přijatelnosti rizika.

		D		
		3	6	9
katastrofický				
kritický				
méně závažný				
		málokdy	příležitostně	frekventovaně
		f		

Obrázek 9: Matice rizika

Na předchozím obrázku byl vytvořen příklad matice rizika. Důsledky (D) byly rozděleny do tří kategorií: méně závažný, kritický a katastrofický. Tyto důsledky byly kvantifikovány stupni 1 (méně závažný) až 3 (katastrofický). Stejný postup byl proveden u frekvence (f). Kategorií může být více, jinak pojmenované i jinak kvantifikované. To záleží na analyzovaném systému a na pracovnících provádějících analýzu. V některých případech jsou kategorie a jejich kvantifikace určeny dokumentem (např.: směrnici, normou, zákonem, atd.). Červeně jsou v matici označeny nepřijatelné kritičnosti. Pro stanovení rozsahu přijatelné a nepřijatelné kritičnosti opět záleží na analyzovaném systému, na analyticích, či na předepsané dokumentaci.

### 3 Analýza stromu poruchových stavů - míra důležitosti

Míra důležitosti (Importance measures) vyjadřuje, jakou mírou se každá událost systému podílí na vrcholové (poruchové) události systému. Je to závislost vrcholové události, jako celkové poruchy analyzovaného systému, na jednotlivých základních a mezilehlých událostech. U těchto událostí je potřeba znát kvantitativní údaje o spolehlivosti např. nepohotovost, pravděpodobnost poruchy, dobu do obnovy atd. Míra důležitosti sděluje informace o citlivosti vrcholové události na poruchy základních událostí. Míra důležitosti se dělí na deterministickou a stochastickou. Stochastická míra důležitosti se pak dále dělí na pohotovostní a spolehlivostní.

#### 3.1 Deterministická míra důležitosti

Deterministická míra důležitosti (Deterministic importance measures) nepočítá s žádnou mírou pravděpodobnosti, což se samo o sobě dá považovat za méně přesné než u následujících stochastických vyjádření míry důležitosti. Vzorec pro výpočet je udán takto:

$I = \frac{N_A}{N_C}$ , kde  $N_A$  představuje počet stavů události A, kdy tato událost je v provozu

neschopném stavu,  $N_C$  pak celkový počet stavů pro (n-1) zbylých komponent.

Například v zapojení dvou komponent A a B je deterministická míra důležitosti komponenty A  $I_A = \frac{1}{2}$ , za předpokladu dvoustavového systému, přičemž jeden je kritický (provozu neschopný) a počet zbylých stavů jsou zbylé dva stavy komponenty B. Obdobným způsobem se zjistí deterministická míra důležitosti komponenty B, která v tomto případě je

$$I_B = \frac{1}{2}.$$

## 3.2 Stochastická míra důležitosti - pohotovostní

### Birnbaumova funkce kritičnosti

Birnbaumova funkce kritičnosti (Birnbaum's measure) je pravděpodobnost vzniklá rozdílem dvou dílčích pravděpodobností. První  $Q_{SYS}(1_i)$  je pravděpodobnost, že systém je v poruchovém stavu, když je v poruše komponenta  $i$ . Od této pravděpodobnosti je odečtena druhá  $Q_{SYS}(0_i)$ . To je pravděpodobnost, že systém je v poruchovém stavu, i přestože komponenta  $i$  není v poruše. Birnbaumova funkce kritičnosti je definována jako pravděpodobnost toho, do jaké míry je  $i$ -tá komponenta kritická pro selhání systému. Pravděpodobnost  $G_i$ , jak se označuje Birnbaumova funkce kritičnosti, se vyjádří takto:

$$G_i = Q_{SYS}(1_i) - Q_{SYS}(0_i)$$

Pro sériově zapojené komponenty A a B platí :

$$Q_{SYS} = q_A + q_B - q_A q_B$$

$$Q(1_A) = 1 + q_B - q_B$$

$$Q(0_A) = q_B$$

$$G_A = 1 - q_B$$



Pro paralelně zapojené komponenty A a B platí :

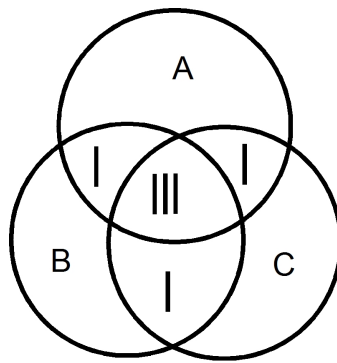
$$Q_{SYS} = q_A q_B$$

$$Q(1_A) = q_B$$

$$Q(0_A) = 0$$

$$G_A = q_B$$

Výše uvedeným způsobem se dá odvodit, jak by vypadalo  $G_A$  například pro systém dva ze tří. Kde:  $Q_{SYS} = q_A q_B + q_A q_C + q_B q_C - 2q_A q_B q_C$



Obrázek 10: Grafické odvození QSYS pro systém 2 ze 3

Aplikací booleovké algebry na vzorec pro získání Birnbaumovy funkce kritičnosti  $G_i(q)$ , kde  $Q_{SYS}(t)$  je lineární pro každé  $q_i$ , je možno  $G_i$  vyjádřit jako parciální derivaci:

$$G_i(q) = \frac{\partial Q_{SYS}}{\partial q_i}$$

## Kritičnost míry důležitosti

Kritičnost míry důležitosti (Criticality measure of importance) je pravděpodobnost, že se systém nachází v kritickém stavu a zároveň s tím je komponenta  $i$  v poruše. Výpočet kritičnosti míry důležitosti se provádí dle následujícího vzorce:

$$I_{CMi} = \frac{G_i(q(t)) \cdot q_i(t)}{Q_{SYS}(t)}$$

Kde  $G_i(q(t))$  je Birnbaumova funkce kritičnosti komponenty  $i$ .  $q_i(t)$  je nepohotovost komponenty  $i$ .  $Q_{SYS}(t)$  nepohotovost systému.

Takže v sériovém zapojení dvou komponent A a B se kritičnost míry důležitosti pro komponentu A vypočte takto:

$$I_{CMa} = \frac{(1 - q_b)q_a}{q_a + q_b - q_a q_b}$$

U paralelního zapojení dvou komponent A a B se kritičnost míry důležitosti pro komponentu A vypočte takto:

$$I_{CMa} = \frac{q_b q_a}{q_a q_b} = 1$$

## Míra důležitosti Fussel-Veselý

Míra důležitosti podle metody Fussell-Veselý (Fussell-Vesely measure of importance) je podíl pravděpodobnosti vzniku poruchy sjednocením minimálních kritických řezů obsahujících komponentu  $i$  a nepohotovosti systému. To můžeme vyjádřit takto:

$$I_{FVi} = \frac{P(\bigcup_{i \in C_j} C_j)}{Q_{SYS}}$$

Sériové zapojení dvou komponent A a B má dva minimální kritické řezy  $\{A\}$   $\{B\}$ , avšak komponentu A, pro níž zkoumáme míru důležitosti Fussel-Veselý, obsahuje pouze ten první. Výpočet míry důležitosti Fussel-Veselý komponenty A pro sériové zapojení komponent A a B se provede takto:

$$I_{FVa} = \frac{q_a}{q_a + q_b - q_a q_b}$$

Paralelní zapojení dvou komponent A a B má pouze jeden minimální kritický řez  $\{AB\}$  a ten obsahuje komponentu A, takže míra důležitosti Fussel-Veselý pro komponentu A v paralelním zapojení komponent A a B se vypočte takto:

$$I_{CMA} = \frac{q_b q_a}{q_a q_b} = 1$$

### 3.3 Stochastická míra důležitosti - spolehlivostní

#### Intenzita nepodmíněné poruchy systému

Aby systém selhal musí být v kritickém stavu pro některou z událostí a poté selhává i tato událost. Intenzita nepodmíněné poruchy (Unconditional Failure Intensity) pro komponentu  $i$  je vyjádřena takto:  $G_i(q(t)) \cdot w_i(t)dt$ . Součtem všech intenzit nepodmíněných poruch komponent je získána intenzita nepodmíněné poruchy systému pro poslední vyskytující se událost, tudíž i pro celý systém:

$$w_{sys} = \sum_i G_i(q(t)) \cdot w_i(t)$$

Zde se opět vyskytuje Birnbaumova funkce kritičnosti v součinu s  $w_i(t)$ , což je intenzita nepodmíněné poruchy komponenty. Intenzita nepodmíněné poruchy komponenty je definována jako pravděpodobnost výskytu poruchy za jednotku času. Pokud není intenzita nepodmíněné poruchy základní události známa, může se vypočítat pomocí intenzity poruch  $\lambda(t)$  a nepohotovosti  $Q(t)$  dané základní události, a to následujícím způsobem:  $w(t) = \lambda(t) \cdot [1 - Q(t)]$ . Z intenzity nepodmíněné poruchy systému vychází další ukazatel, který je pojmenován jako předpokládaný počet poruch systému.

## Předpokládaný počet poruch systému

Jak už samotný název napovídá, tato veličina udává předpokládaný počet poruch systému (Expected Number of System Failures). Předpokládaný počet poruch systému je získán integrací výše zmíněné intenzity nepodmíněné poruchy systému. Pro interval  $t_1 - t_2$  vyjádřeno takto:

$$W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left( \sum_i G_i(q(u)) \cdot w_i(u) du \right)$$

## Barlow-Proschanova míra důležitosti iniciátoru

Posledním souvisejícím ukazatelem ze skupiny pohotovostní stochastické míry důležitosti je Barlow-Proschanova míra důležitosti iniciátoru (Barlow-Proschan Measure of Initiator Importance). Iniciátor je iniciační událost, která vyvolá pád systému. Vychází z předpokládaného počtu poruch systému a z intenzity nepodmíněné poruchy systému. Barlow-Proschanova míra důležitosti iniciátoru je pravděpodobnost, že v intervalu  $(0, t)$  způsobí pád systému iniciační událost  $i$ .

$$I_{INi} = \frac{\int_0^t G_i(q(u)) \cdot w_i(u) du}{W(0, t)}$$

## 4 Analýza stromu poruchových stavů - určení kritičností – aplikace

Tato práce měla za úkol dle původního zadání aplikovat výše uvedené postupy na vybrané funkce z jaderné energetiky. Zjištěný rozsah stromů poruch příslušících k daným funkcím je však natolik rozsáhlý, že by výpočet bylo možné provést pouze pomocí softwaru bez kontroly vlastním výpočtem. Z tohoto důvodu byly navrženy jednodušší modelové úlohy, na kterých se postupy popsané v teoretické části práce vhodným způsobem ověřily.

### 4.1 Spolehlivostní software ITEM

#### O společnosti ITEM software

ITEM software je společnost s celosvětovou působností zabývající se softwarem pro spolehlivostní inženýrství. Společnost vznikla v roce 1984, kdy vytvářela software pro ministerstvo obrany Velké Británie. Jednalo se o software pro záznam a správu knihoven elektronických součástek a zařízení, který se řídí podle normy Military handbook (MIL HDBK-217) vydané ministerstvem obrany USA. Od této doby ITEM software poskytuje svoje služby v oblasti inženýrství RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety – Spolehlivost, pohotovost, udržovatelnost, bezpečnost) i pro firmy zabývající se letectvím, jaderným průmyslem, obranou, telekomunikacemi.

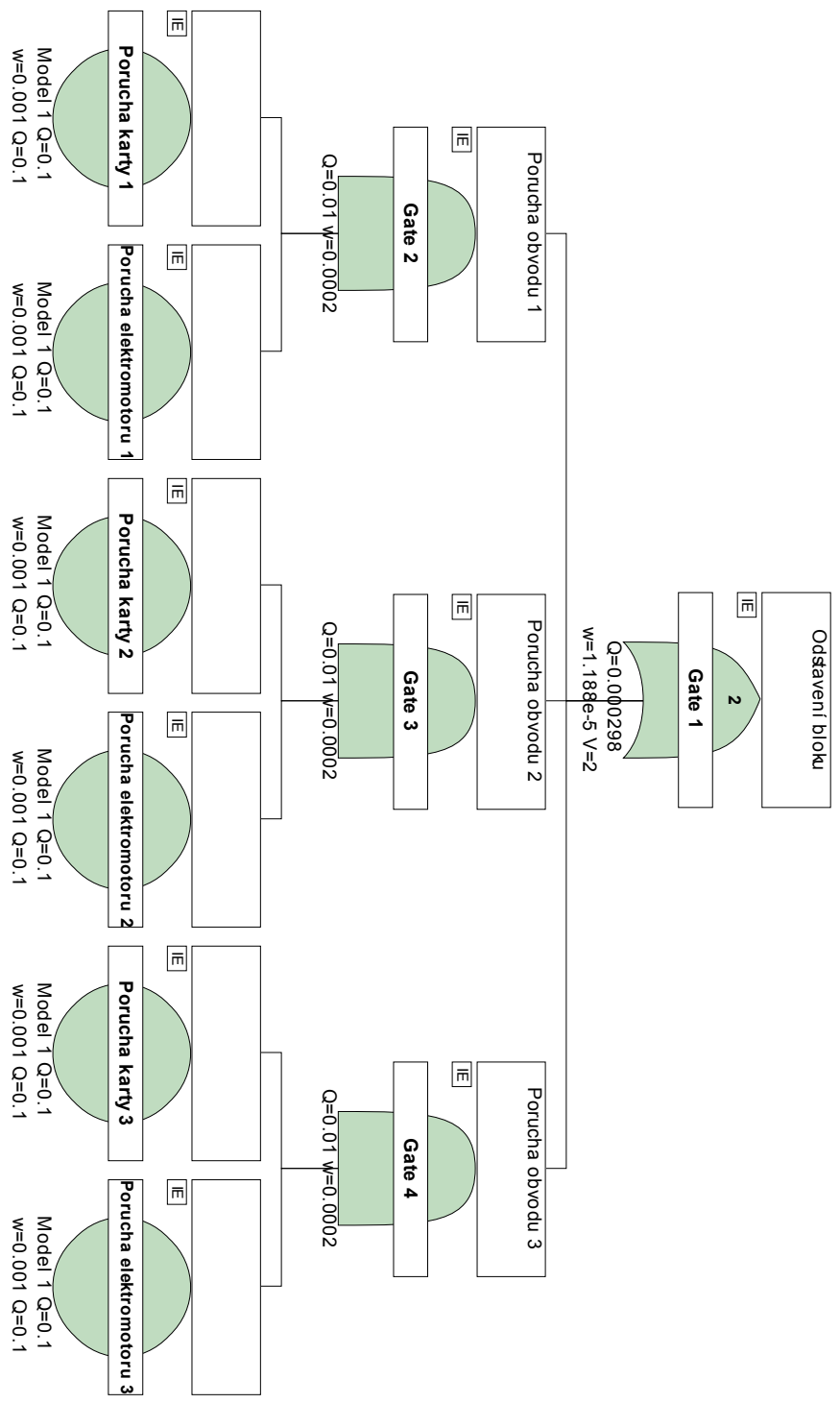


Obrázek 11: Logo společnosti

## 4.2 Příklad 1

### Popis systému v příkladu 1

V tomto stromu poruchových stavů je zkoumána vrcholová událost Odstavení bloku. Vrcholová událost Odstavení bloku je zálohovaná výběrovým hradlem 2 ze 3 obvodů. Jestli nastane porucha obvodu, závisí na dvou základních událostech propojených logickým hradlem AND. Obvody 1 až 3 jsou totožné. Do softwaru Item byla zadána nepohotovost  $Q = 0,1$  (software Item používá značení podle americké normy) a intenzita poruchy  $w = 0,001$  pro všechny základní události (porucha karty 1 až 3, porucha elektromotoru 1 až 3). Pro ostatní události tyto ukazatele dopočítá software Item.



Obrázek 12: Strom poruchových stavů - příklad 1



## Výpočet nepohotovosti obvodu 1 ( $Q_I$ )

Nepohotovost obvodu 1 (stejně tak i nepohotovosti obvodu 2 a 3) se vypočte  $Q_I = Q_K \cdot Q_E = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01$ , kde  $Q_K$  je nepohotovost karty a  $Q_E$  je nepohotovost elektromotoru.

## Výpočet nepohotovosti celého systému ( $Q_C$ )

Podle vzorce pro výpočet výstupu výběrového hradla  $Q_C = \sum_{x=m}^n \binom{n}{x} \cdot Q^x \cdot (1-Q)^{n-x}$

$$Q_C = \sum_{x=2}^3 \binom{3}{x} \cdot Q_I^x \cdot (1-Q_I)^{3-x} = 3 \cdot 0,01^2 \cdot 0,99^1 + 1 \cdot 0,01^3 \cdot 0,99^0 = 2,98 \cdot 10^{-4}$$

## Birnbaumova funkce kritičnosti ( $G_{K1}$ )

$q_{K1}$  – nepohotovost karty 1. obvodu (např.  $q_{E3}$  je nepohotovost elektromotoru 3. obvodu)

$Q_{SYS}$  – nepohotovost celého systému

$$Q_{SYS} = q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{E2} + q_{K1}q_{E1}q_{K3}q_{E3} + q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3} - 2q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3}$$

$Q(1_{K1})$  – pravděpodobnost, že systém je v poruchovém stavu, když je v poruše komponenta  $K1$

$$Q(1_{K1}) = q_{E1}q_{K2}q_{E2} + q_{E1}q_{K3}q_{E3} + q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3} - 2q_{E1}q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3}$$

$Q(0_{K1})$  – pravděpodobnost, že systém je v poruchovém stavu, i přestože komponenta  $K1$  není v poruše

$$Q(0_{K1}) = q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3}$$

$G_{K1}$  – pravděpodobnost toho, do jaké míry je komponenta  $K1$  kritická pro selhání systému

$$G_{K1} = Q(1_{K1}) - Q(0_{K1}) = 2,08 \cdot 10^{-3} - 10^{-4} = 1,98 \cdot 10^{-3}$$

Kritičnost míry důležitosti ( $I_{CM_{K1}}$ )

$I_{CM_{K1}}$  – pravděpodobnost, že se systém nachází v kritickém stavu a zároveň s tím je komponenta  $i$  v poruše

$$I_{CM_{K1}} = \frac{G_{K1} \cdot q_{K1}}{Q_{SYS}} = \frac{1,98 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1}{2,98 \cdot 10^{-4}} = 0,66442953$$

Míra důležitosti Fussel-Veselý

$P(\bigcup_{i \in C_j} C_j)$  je sjednocení všech minimálních kritických řezů, které obsahují Poruchu karty 1.

**Tabulka 3: Minimální kritické řezy - příklad 1**

		Fault Tree Cut Set View	
	Unavailability {Q}	Events	
1	0.0001	Porucha karty 1 :: Porucha elektromotoru 1 :: Porucha karty 2 :: Porucha elektromotoru	
2	0.0001	Porucha karty 2 :: Porucha elektromotoru 2 :: Porucha karty 3 :: Porucha elektromotoru	
3	0.0001	Porucha karty 1 :: Porucha elektromotoru 1 :: Porucha karty 3 :: Porucha elektromotoru	

$I_{FV_{K1}}$  – kritičnost komponenty K1 podle metody Fussel-Veselý

$$\begin{aligned}
 I_{FV_{K1}} &= \frac{P(\bigcup_{i \in C_j} C_j)}{Q_{SYS}} = \\
 &= \frac{q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{E2} + q_{K1}q_{E1}q_{K3}q_{E3} - q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3}}{q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{E2} + q_{K1}q_{E1}q_{K3}q_{E3} + q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3} - 2q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3}} \\
 &= \frac{10^{-4} + 10^{-4} - 10^{-6}}{2,98 \cdot 10^{-4}} = 0,667785234
 \end{aligned}$$

Barlow-Proschanova míra důležitosti iniciátoru ( $I_{IN_{K1}}$ )

$W(0,t)$  – předpokládaný počet poruch systému  $W(0,t) = \int_0^t \left( \sum_i G_i(q(u)) \cdot w_i(u) du \right)$

$$\begin{aligned}
 W(0,t) &= (q_{E1}q_{K2}q_{E2} + q_{E1}q_{K3}q_{E3} - 2q_{E1}q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3}) \cdot w_{K1} + \\
 &+ (q_{K1}q_{K2}q_{E2} + q_{K1}q_{K3}q_{E3} - 2q_{K1}q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3}) \cdot w_{E1} + \\
 &+ (q_{K1}q_{E1}q_{E2} + q_{E2}q_{K3}q_{E3} - 2q_{K1}q_{E1}q_{E2}q_{K3}q_{E3}) \cdot w_{K2} + \\
 &+ (q_{K1}q_{E1}q_{K2} + q_{K2}q_{K3}q_{E3} - 2q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{K3}q_{E3}) \cdot w_{E2} + \\
 &+ (q_{K1}q_{E1}q_{E3} + q_{K2}q_{E2}q_{E3} - 2q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{E2}q_{E3}) \cdot w_{K3} + \\
 &+ (q_{K1}q_{E1}q_{K3} + q_{K2}q_{E2}q_{K3} - 2q_{K1}q_{E1}q_{K2}q_{E2}q_{K3}) \cdot w_{E3} = 1,188 \cdot 10^{-5}
 \end{aligned}$$

$I_{INK1}$  – pravděpodobnost, že v intervalu  $(0,t)$  způsobí pád systému iniciační událost  $K1$

$$I_{INK1} = \frac{\int_0^t G_{K1}(q(u)) \cdot w_{K1}(u) du}{W(0,t)}$$

$$I_{INK1} = \frac{(q_{E1}q_{K2}q_{E2} + q_{E1}q_{K3}q_{E3} - 2q_{E1}q_{K2}q_{E2}q_{K3}q_{E3}) \cdot w_{K1}}{W(0,t)} =$$

$$= 0,166$$

Tabulka 4: Tabulka kritičností ITEM - příklad 1

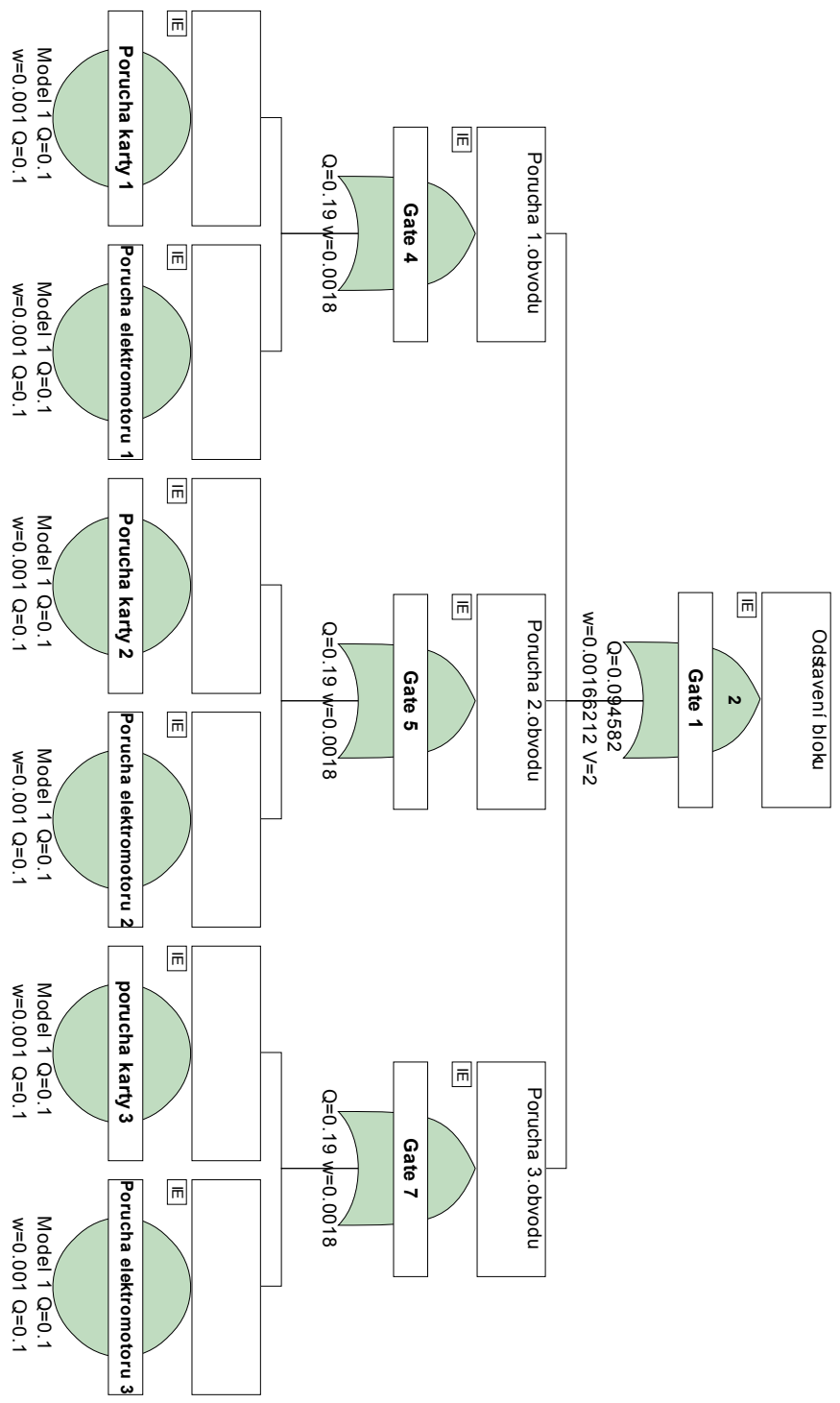
	Event	F-Vesely	Marginal	Diagnostic	B-Proschan
1	Porucha karty 1	0.69798658	0.00198	0.66442953	0.69798658
2	Porucha elektromotoru 1	0.69798658	0.00198	0.66442953	0.69798658
3	Porucha elektromotoru 3	0.69798658	0.00198	0.66442953	0.69798658
4	Porucha karty 3	0.69798658	0.00198	0.66442953	0.69798658
5	Porucha elektromotoru 2	0.69798658	0.00198	0.66442953	0.69798658
6	Porucha karty 2	0.69798658	0.00198	0.66442953	0.69798658

V tabulce (Tabulka 4: Tabulka kritičností ITEM - příklad 1) jsou uvedeny výsledky kritičností z programu ITEM Toolkit. Výsledky Birnbaumovy funkce kritičnosti (Marginal) a kritičnosti míry důležitosti (Diagnostic) se shodují s výsledky vypočtenými výše. Míra důležitosti Fussel-Veselý je rozdílná. V této práci je uveden postup nalezený v odborné literatuře a tento stejný postup je uveden i v nápovědě programu. Naproti tomu v příkladu 2 nevznikají žádné rozdíly mezi hodnotou vypočtenou v této práci a v ITEM Toolkit. U Barlow-Proschanovy míry důležitosti software ITEM nemá uvedený postup výpočtu této veličiny pro analýzu stromu poruchových stavů. Avšak podle literatury je výše uvedený výpočet korektní. Podle výpočtu softwaru ITEM je hodnota stejná jako u míry důležitosti Fussel-Veselý.

## 4.3 Příklad 2

### Popis systému v příkladu 2

Stejně jako v příkladu 1 i v tomto stromu poruchových stavů je zkoumána vrcholová událost Odstavení bloku. Vrcholová událost Odstavení bloku je zálohovaná výběrovým hradlem 2 ze 3 obvodů. To, jestli nastane porucha obvodu, závisí na dvou základních událostech propojených logickým hradlem OR. Obvody 1 až 3 jsou totožné. Do softwaru Item byla zadána nepohotovost  $Q = 0,1$  (software Item používá značení podle americké normy) a intenzitu poruchy  $w = 0,001$  pro všechny základní události (porucha karty 1 až 3, porucha elektromotoru 1 až 3). Pro ostatní události tyto ukazatele dopočítá software Item.



Obrázek 13: Strom poruchových stavů - příklad 2

## Výpočet nepohotovosti obvodu 1 ( $Q_I$ )

Nepohotovost obvodu 1 (stejně tak i nepohotovosti obvodu 2 a 3) se vypočte  $Q_I = [1 - (1 - Q_K) \cdot (1 - Q_E)] = [1 - (1 - 0,1) \cdot (1 - 0,1)] = 0,19$ , kde  $Q_K$  je nepohotovost karty a  $Q_E$  je nepohotovost elektromotoru.

## Výpočet nepohotovosti celého systému ( $Q_C$ )

Podle vzorce pro výpočet výstupu výběrového hradla  $Q_C = \sum_{x=m}^n \binom{n}{x} \cdot Q^x \cdot (1-Q)^{n-x}$

$$Q_C = \sum_{x=2}^3 \binom{3}{x} \cdot Q_I^x \cdot (1-Q_I)^{3-x} = 3 \cdot 0,19^2 \cdot 0,81^1 + 1 \cdot 0,19^3 \cdot 0,81^0 = 0,094582$$

## Birnbaumova funkce kritičnosti ( $G_{K1}$ )

$q_{K1}$  – nepohotovost karty 1. obvodu (např.  $q_{E3}$  je nepohotovost elektromotoru 3. obvodu).

$Q_{SYS}$  – nepohotovost celého systému

$$\begin{aligned} Q_{SYS} = & [1 - (1 - q_{K1})(1 - q_{E1})][1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})] + \\ & + [1 - (1 - q_{K1})(1 - q_{E1})][1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] + \\ & + [1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})][1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] - \\ & - 2[1 - (1 - q_{K1})(1 - q_{E1})][1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})][1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] \end{aligned}$$

$Q(1_{K1})$  – pravděpodobnost, že systém je v poruchovém stavu, když je v poruše komponenta  $K1$

$$Q(1_{K1}) = [1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})] + [1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] + \\ + [1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})][1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] - \\ - 2[1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})][1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] = 0,3439$$

$Q(0_{K1})$  – pravděpodobnost, že systém je v poruchovém stavu, i přestože komponenta  $K1$  není v poruše

$$Q(0_{K1}) = [1 - (1 - q_{E1})][1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})] + \\ + [1 - (1 - q_{E1})][1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] + \\ + [1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})][1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] - \\ - 2[1 - (1 - q_{E1})][1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})][1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] = 0,06688$$

$G_{K1}$  – pravděpodobnost toho, do jaké míry je komponenta  $K1$  kritická pro selhání systému

$$G_{K1} = Q(1_{K1}) - Q(0_{K1}) = 0,3439 - 0,06688 = 0,27702$$

Kritičnost míry důležitosti ( $I_{CM_{K1}}$ )

$I_{CM_{K1}}$  – pravděpodobnost, že se systém nachází v kritickém stavu a zároveň s tím je komponenta  $i$  v poruše

$$I_{CM_{K1}} = \frac{G_{K1} \cdot q_{K1}}{Q_{SYS}} = \frac{0,27702 \cdot 0,1}{0,094582} = 0,29288871$$



## Míra důležitosti Fussel-Veselý

$P(\bigcup_{i \in C_j} C_j)$  je sjednocení všech minimálních kritických řezů, které obsahují Poruchu

karty 1.

Tabulka 5: Minimální kritické řezy - příklad 2

Fault Tree Cut Set View		
	Unavailability (Q)	Events
1	0.01	Porucha karty 1 :: Porucha karty 2
2	0.01	Porucha elektromotoru 2 :: porucha karty 3
3	0.01	Porucha karty 2 :: Porucha elektromotoru 3
4	0.01	Porucha karty 2 :: porucha karty 3
5	0.01	Porucha elektromotoru 1 :: Porucha elektromotoru 3
6	0.01	Porucha elektromotoru 2 :: Porucha elektromotoru 3
7	0.01	Porucha elektromotoru 1 :: Porucha elektromotoru 2
8	0.01	Porucha elektromotoru 1 :: Porucha karty 2
9	0.01	Porucha karty 1 :: Porucha elektromotoru 3
10	0.01	Porucha karty 1 :: porucha karty 3
11	0.01	Porucha karty 1 :: Porucha elektromotoru 2
12	0.01	Porucha elektromotoru 1 :: porucha karty 3

$$\begin{aligned}
 P(\bigcup_{i \in C_j} C_j) &= q_{K1} \cdot \{[1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})] + \\
 &+ [1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})] - [1 - (1 - q_{K2})(1 - q_{E2})] \\
 &[1 - (1 - q_{K3})(1 - q_{E3})]\}
 \end{aligned}$$

$I_{FVK1}$  – kritičnost komponenty K1 podle metody Fussel-Veselý

$$I_{FVK1} = \frac{P(\bigcup_{i \in C_j} C_j)}{Q_{SYS}} = \frac{0,03439}{0,094582} = 0,363599839$$

## Barlow-Proschanova míra důležitosti iniciátoru

Jelikož vyjádření Barlow-Proschanovy míry důležitosti iniciátoru pomocí nepohotovostí základních událostí by bylo značně rozsáhlé, bude zde použito obecnější vyjádření.

$$W(0,t) - \text{předpokládaný počet poruch systému } W(0,t) = \int_0^t \left( \sum_i G_i(q(u)) \cdot w_i(u) du \right)$$

$$W(0,t) = \frac{\partial Q_{SYS}}{\partial q_{K1}} \cdot w_{K1} + \frac{\partial Q_{SYS}}{\partial q_{K2}} \cdot w_{K2} + \frac{\partial Q_{SYS}}{\partial q_{K3}} \cdot w_{K3} + \\ + \frac{\partial Q_{SYS}}{\partial q_{E1}} \cdot w_{E1} + \frac{\partial Q_{SYS}}{\partial q_{E2}} \cdot w_{E2} + \frac{\partial Q_{SYS}}{\partial q_{E2}} \cdot w_{E2} = 1,6548$$

$I_{INK1}$  – pravděpodobnost, že v intervalu  $(0,t)$  způsobí pád systému iniciační událost  $K1$

$$I_{INK1} = \frac{\int_0^t G_{K1}(q(u)) \cdot w_{K1}(u) du}{W(0,t)}$$

$$I_{INK1} = \frac{\frac{\partial Q_{SYS}}{\partial q_{K1}} \cdot w_{K1}}{W(0,t)} = 0,166$$

**Tabulka 6: Tabulka kritičností ITEM - příklad 2**

	<b>Event</b>	<b>F-Vesely</b>	<b>Marginal</b>	<b>Diagnostic</b>	<b>B-Proschan</b>
1	Porucha elektromotoru 1	0.36359984	0.27702	0.29288871	0.36359984
2	Porucha elektromotoru 3	0.36359984	0.27702	0.29288871	0.36359984
3	porucha karty 3	0.36359984	0.27702	0.29288871	0.36359984
4	Porucha elektromotoru 2	0.36359984	0.27702	0.29288871	0.36359984
5	Porucha karty 2	0.36359984	0.27702	0.29288871	0.36359984
6	Porucha karty 1	0.36359984	0.27702	0.29288871	0.36359984

V tabulce (Tabulka 6: Tabulka kritičností ITEM – příklad 2) jsou uvedeny výsledky kritičností z programu ITEM Toolkit. Výsledky Birnbaumovy funkce kritičnosti (Marginal) a kritičnosti míry důležitosti (Diagnostic) se shodují s výsledky vypočtenými výše. Míra důležitosti Fussel-Veselý je shodná, i když tomu tak nebylo v příkladu 1. U Barlow-Proschanovy míry důležitosti software ITEM nemá uvedený postup výpočtu této veličiny pro analýzu stromu poruchových stavů. Podle výpočtu softwaru ITEM je hodnota stejná jako u míry důležitosti Fussel-Veselý.

**Tabulka 7: Srovnání příkladů**

	Příklad 1 (AND)	Příklad 2 (OR)
$Q_C$	$2,98 \cdot 10^{-4}$	0,094582
$G_{K1}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	0,27702
$I_{MCK1}$	0,66442953	0,29288871
$I_{FVK1}$	0,667785234	0,36359984
$I_{INK1}$	0,166	0,166

## 5 Závěr

V této práci byla představena analýza stromu poruchových stavů FTA, její postupy a pravidla, kterými se řídí. Dále bylo představeno určování kritičností základních událostí v této analýze, druhy kritičností a výpočty. Je to jeden z mála česky psaných dokumentů věnující se tomuto tématu a mohl by tedy sloužit jako výukový text či jako „odrazový můstek“ pro ty, kteří se budou chtít věnovat hlouběji problematice stromu poruchových stavů.

V praktické části byly poznatky z teoretické části aplikovány na dvou modelových příkladech. V tabulce (Tabulka 7: Srovnání příkladů) byly proti sobě postaveny výsledky z příkladu 1 a z příkladu 2. Systém ve druhém příkladu má vyšší nepohotovost, což plyne už ze samotné podstaty hradla OR, jehož poruchu na výstupu vyvolá alespoň jedna porucha na vstupu. Birnbaumova funkce kritičnosti je opět vyšší u příkladu 2, protože komponenty spojené hradlem OR jsou pro celý systém více kritické, než je tomu u hradla AND.

U kritičnosti míry důležitosti je vypočtena vyšší hodnota u prvního příkladu. Když se systém porouchá, tak je u prvního příkladu pravděpodobné, že musí být v poruše komponenta K1 (karta v obvodu jedna). To vyplývá i z tabulky minimálních kritických řezů (Tabulka 3: Minimální kritické řezy - příklad 1). Naopak u druhého příkladu porucha karty prvního obvodu nemusí být nutně příčinou pádu systému. Stejně vysvětlení jako u kritičnosti míry důležitosti se použije i pro míru kritičnosti metodou Fussel-Veselý, která se vypočítá právě pomocí minimálních kritických řezů.

Barlow-Proschanova míra důležitosti iniciátoru vyšla v obou příkladech stejná, protože všechny základní události měly stejnou nepohotovost a intenzitu poruchy, čehož bylo využito při zjednodušení výpočtů. Pokud by byly v příkladu 2 pro každou základní událost zadány různé hodnoty, byl by výpočet Barlow-Proschanovy míry důležitosti iniciátoru už i u takového systému velice rozsáhlý. Právě proto se výpočty kritičností základních událostí provádějí pomocí softwarů jako je Item Toolkit.

## Literatura

- [1] ČSN EN 61025. *Analýza stromu poruchových stavů (FTA)*. [s.l.] : Český normalizační institut, 2007. 45 s.
- [2] Powerpointová prezentace FTA, Loughborough university, 2008
- [3] FUCHS, Pavel. *Využití spolehlivosti v provozní praxi*. Liberec : [s.n.], 2002.
- [4] Powerpointová prezentace ŘÍZENÍ SPOLEHLIVOSTI – VI, Technická univerzita v Liberci, 2006
- [5] FUCHS, Pavel. APLIKACE POSTUPŮ ANALÝZY RIZIK NA HODNOCENÍ KRITičNOSTI NÁRODNÍ INFRASTRUKTURY. Liberec : [s.n.], 2006.
- [6] JIŘÍČEK, Petr. *BEZPEČNOST TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ*. Brno, 2009. 66 s. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [7] BIRNBAUM'S MEASURE OF COMPONENT IMPORTANCE FOR NON-COHERENT SYSTEMS, S. Beeson and J. D. Andrews; Department of Mathematical Sciences, Loughborough University; Loughborough, Leicestershire, UK
- [8] BARLOW, Richard E.; PROSCHAN, Frank . *Importance of system components and fault tree event*. Florida : The Florida State University, 1974. 36 s.