

Řízení rizik spolehlivosti lidského faktoru na jaderné elektrárně

Maryana Royik

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení
Ústav krizového řízení

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Maryana Royik**
Osobní číslo: **L20654**
Studijní program: **B1022A020002 Management rizik**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Řízení rizik spolehlivosti lidského faktoru na jaderné elektrárně**

Zásady pro vypracování

- Zpracujte teoretickou rešerši možných souvislostí rizika a lidského faktoru.
- Popište vhodné analýzy rizik, kterými lze řešit selhání lidského faktoru.
- Analyzujte stávající opatření k minimalizaci lidských chyb v provozování jaderných elektráren, případně navrhněte opatření na možná zlepšení.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. IAEA Safety Standards No. SSG-51 *Human Factors Engineering in the Design of Nuclear Power Plants* IAEA/19-01229. ISBN 978-92-0-100419-2 June 2019.
2. IAEA *Human and Organizational Aspects of Assuring Nuclear Safety — Exploring 30 Years of Safety Culture. Proceedings of an International Conference Held in Vienna, Austria, 22–26 February 2016.* IAEA/18-01212. ISBN 978-92-0-103918-7 May 2019.
3. SKŘEHOT, P.A. *Identifikace zdrojů nebezpečí a vyhodnocení rizik. Edice Řízení bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v zodpovědné firmě. Personální a sociálně právní kartotéka.* 2016, č. 12. ISSN 1211-9482.

Další odborná literatura dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Oldřich Mach, Ph.D.**
Ústav krizového řízení

Datum zadání bakalářské práce: **1. prosince 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **5. května 2023**

LS.

doc. Ing. Zuzana Tužková, Ph.D.
děkanka

Ing. et Ing. Jiří Konečný, Ph.D.
ředitel ústavu

V Uherském Hradišti dne 2. prosince 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

V Uherském Hradišti, dne: 5. 5. 2023

Jméno a příjmení studenta: Maryana Royik

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Teoretická část bakalářské práce se věnuje tématu rizik a spolehlivosti lidského faktoru na jaderné elektrárně. Identifikuje pojem riziko, lidský faktor, spolehlivost v obecné rovině. Popisuje metody analýzy rizika, které jsou nezbytnou součástí spolehlivosti systému a chybovosti lidského činitele. Praktická část je zaměřená na systém řízení. Velká část je věnovaná PSA analýze, která je pro tuto problematiku klíčová. Poslední část je věnovaná hodnocení lidského faktoru.

Klíčová slova: Riziko, Lidský faktor, HRA, ETA, FTA, PSA analýza

ABSTRACT

The theoretical part of the bachelor's thesis is devoted to the topic of risks and reliability of the human factor at the nuclear power plant. It identifies the concept of risk, the human factor, reliability in general terms. It describes the methods of risk analysis that are an essential part of the reliability of the system and the error rate of the human agent. The practical part is focused on the management system. Much of it is devoted to PSA analysis, which is crucial to this issue. The final section is devoted to the evaluation of the human factor.

Keywords: Risk, Human factor, HRA, ETA, FTA, PSA analysis

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Oldřichu Machovi PhD. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a věnovaný čas. Byl velice obětavý a trpělivý. Dále bych chtěla poděkovat paní Ing. Slavomíře Vargové, PhD., za její čas, ochotu, a také za cenné rady. Dále chci poděkovat své rodině, která byla trpělivá a byla pro mě oporou během celého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 RIZIKO	10
1.1 ČLENĚNÍ RIZIKA	12
1.2 DALŠÍ POJMY	12
1.2.2 Bezpečnost	13
1.2.3 Jaderná bezpečnost.....	13
1.2.4 Mimořádná událost.....	13
2 LIDSKÝ FAKTOR	14
3 SPOLEHLIVOST	18
3.1 SYSTÉM ČLOVĚK – STROJ	18
3.3 ANALÝZA SPOLEHLIVOSTI LIDSKÉHO ČINITELE	20
4 ANALÝZA RIZIK	22
4.1 ZÁKLADNÍ KROKY HODNOCENÍ RIZIK	22
4.2 TECHNIKY IDENTIFIKACE A ANALÝZY RIZIK	23
4.3 ANALÝZA STROMU UDÁLOSTÍ	24
4.4 ANALÝZA STROMU PORUCHOVÝCH STAVŮ	25
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
5 SYSTÉM ŘÍZENÍ RIZIK	28
6 PSA ANALÝZA	30
6.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ ANALÝZ PRAVDĚPODOBNOSTNÍHO HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI.....	31
6.2 PRINCIPY KONSTRUKCE MODELŮ PSA PRO JE.....	32
6.3 HIERARCHIE VÝSLEDKŮ PSA	32
6.4 MOŽNÉ APLIKACE PSA:	34
6.5 MODELOVÁNÍ HAVARIJNÍCH SEKVENCÍ.....	34
7 HODNOCENÍ LIDSKÉHO FAKTORU	35
7.1 HAVÁRIE ZPŮSOBENÉ LIDSKÝM FAKTOREM.....	35
7.2 PRŮBĚH ZKOUŠKY	36
ZÁVĚR	38
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	42
SEZNAM OBRÁZKŮ	43

ÚVOD

Dnes je trend, aby co nejvíce práce dělal stroj a člověk ho ovládal. Eliminují se tím rizika možných havárií a následků, která s tím souvisí. Člověk je však pořád velikou proměnou a ovlivňuje tak svým chováním a jednáním úplně všechno. Pokud člověk dělá danou věc poprvé, věnuje ji veškerou pozornost. Ovšem pokud se z práce stane rutina, může se stát, že se něco přehlédne nebo zapomene. Tuto problematiku jsem si vybrala, protože jedna taková těžká havárie ovlivní kvalitu života na velmi dlouhou dobu. Takový zásah do životního prostředí má velký negativní dopad pro lidstvo. Cílem této bakalářské práce je představit řízení rizik ve spojení se spolehlivostí lidského činitele. Jaké metody se mohou využívat a zároveň představit metodu PSA využívanou právě pro tento druh problematiky.

Studie havárií a selhání technických zařízení poukazují, že jedním z důležitých faktorů pro zajištění bezpečnosti je jak kvalitní technická obsluha, tak i vysoký stupeň odpovědnosti na různých úrovních zařízení. Lidský faktor je jedním ze základních činitelů při systému řízení ve prospěch bezpečnosti a to na všech úrovních řízení. Z všeobecných poznatků při prevenci havárií a selhání je patrné, že je třeba se vyvarovat velkých chyb v prevenci rizik, tak i výskytu drobných chyb, jejichž aktivace v krátkém časovém horizontu je také nebezpečná.

Proto je důležité klást důraz na řízení rizik v prospěch bezpečnosti u složitějších technologií a dbát na systémové pojetí a zvážení proměnlivosti limitů a podmínek v prostoru a čase. Zvyšování bezpečnosti provozu se nemůže obejít bez detailní analýzy vlivu lidského faktoru na riziko, přijetí a realizace opatření vzniklých na základě analýzy.

Příkladem takové technologie jsou systémy na jaderné elektrárně. Je to nesmírně komplikovaný mechanismus, kde je nutné mít nejen potřebné znalosti, ale i provozní zkušenosti. A i přesto máme příklady toho, že ani dobré zvládnutí všech vytipovaných oblastí zajištění kvality práce, nemusí přinést dostatečnou míru prevence výskytu mimořádných poruchových stavů. Při těchto stavech, může dojít k těžkým potenciálním následkům, na nichž se lidský faktor podílí velmi významně.

O přímé souvislosti stavu zařízení a lidského faktoru svědčí i definice pojmu jaderná bezpečnost dle Atomového zákona, viz. kap. 1,2,3, kde je jako jeden z aspektů uveden nejen stav a schopnost jaderného zařízení, ale i fyzických osob obsluhujících jaderné zařízení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 RIZIKO

Riziko je všude kolem nás a je běžnou součástí našeho života. Jde vždy o kombinaci pravděpodobnosti a následku možné škody. Pojem riziko je úzce spjatý s pravděpodobnosti vzniku nějaké negativní události nebo hrozby. Riziko se udává, že je velikost pravděpodobné ztráty, škody anebo újmy na chráněných aktivech v konkrétním místě, na konkrétní události. Je to možnost vzniku události, kterou považujeme z bezpečnostního hlediska za nežádoucí. Riziko je vždy odvoditelné a odvozené z konkrétní hrozby. Míru rizika, tedy pravděpodobnost škodlivých následků vyplývajících z hrozby a ze zranitelnosti zájmu, je možno posoudit na základě tzv. analýzy rizik.

V (Smejkal a Rais 2013, s. 90) autoři popisují, že pouze jediná definice pro riziko neexistuje a uvádějí, že riziko může být definováno jako: „Pravděpodobnost či možnost vzniku ztráty, obecně nezdaru; Variabilita možných výsledků nebo nejistota jejich dosažení; Odchýlení skutečných a očekávaných výsledků; Pravděpodobnost jakéhokoliv výsledku, odlišného od výsledku očekávaného; Situace, kdy kvantitativní rozsah určitého jevu podléhá jistému rozdělení pravděpodobnosti; Nebezpečí negativní odchylky od cíle (tzv. čisté riziko); Nebezpečí chybného rozhodnutí; Možnost vzniku ztráty nebo zisku (tzv. spekulativní riziko); Neurčitost spojená s vývojem hodnoty aktiva (tzv. investiční riziko; Střední hodnota ztrátové funkce; Možnost, že specifická hrozba využije specifickou zranitelnost systému; Kombinace pravděpodobnosti události a jejího následku.“

Z pohledu dosahování cílů v (Půček 2016, s. 117) definuje riziko jako „nebezpečí vzniku události, která může negativně ovlivnit dosažení stanovených cílů. Jedná se o budoucí událost, která má náhodnou povahu (tj. může, ale nemusí nastat a mít negativní dopad) a není ani nemožná, ani jistá“

Riziko má vždy dva rozměry a to jsou pravděpodobnost jeho vzniku a dále závažnost možného následku.

Riziko je míra ohrožení neboli stupeň ohrožení. Můžeme ho hodnotit kvalitativně, kvantitativně nebo semi-kvantitativně.

Riziko se dá vždy odvodit z konkrétní hrozby. Přijatelné riziko je takové, kdy je vnímáno ohrožení, ale zároveň se připravují aktivity, jejichž cílem je snížení pravděpodobnosti, že nastane.

Posuzování rizika je základní část procesu managementu rizika, jehož postup je popsán v příslušných normách například ČSN ISO 31000:2018.

Při identifikaci rizik se zjišťují zdroje rizik a možných události, které jsou na ně navázány spolu s příčinami a následky. Analýza rizika je procesem, který slouží k pochopení povahy rizika a stanovení úrovně rizika. Hodnocení rizika slouží k porovnání výsledků analýzy s kritérii rizika a porovnává se, zda je riziko přijatelné.

Matematické vyjádření pro výpočet rizik a je:

$$R = \frac{N}{t * M} \quad (1)$$

R = riziko

N = počet poškození na zdraví vlivem určité lidské činnosti

t = celková doba činnosti, při které došlo k poškození na zdraví

M = celkový počet osob provádějící určitou činnost

Kvantitativní vyjádření míry rizika je poměrně jednoduché.

Vyjádření míry rizika na jaderné elektrárně je daleko složitější. V tomto případě je nutné použít určitou analytickou metodu a stanovit rozsah a četnost všech možných havarijních scénářů, které vedou k poškození aktivní zóny a následným únikům radioaktivních (RA) látek a poškození na zdraví.

$$RIZIKO \left[\frac{\text{následky}}{\text{rok}} \right] = \sum_{\text{Havarijní scénář}} \text{ČETNOST} \left[\frac{\text{událost}}{\text{rok}} \right] \times \text{NÁSLEDKY} \left[\frac{\text{následky}}{\text{událost}} \right] \quad (2)$$

Kvantitativní ocenění rizika pro jaderná zařízení je pak také možné vyjádřit vztahem:

$$R = P \times C \times D \quad (\text{úmrtí/rok}) \quad (3)$$

P – četnost havárie jaderného zařízení s poškozením (havárie/rok)

C – množství uvolněných RA látek do okolí jaderného zařízení při havárii (Ci/havárii)

D – následky plynoucí z jednotky vypuštěné RA látky (úmrtí/Ci)

1.1 Členění rizika

- **Bezvýznamné, zanedbatelné riziko**

Nejsou vyžadována žádná zvláštní opatření. Neznamená to však, že riziko neexistuje. I v těchto případech je nutno na existující riziko (i když zanedbatelné) upozornit a zvolit odpovídající opatření.

- **Akceptovatelné, méně významné riziko**

Uvažujeme o případném zlepšení technické bezpečnosti. V případě že se nám nepodaří zmírnit riziko, je nutné provést vhodná organizační opatření.

- **Nežádoucí riziko**

Je nutné realizovat bezpečnostní opatření, i když riziko není tak urgentní. Prostředky ke snížení rizika musí být použity ve stanoveném časovém období. Je-li toto riziko spojené s možnými nebezpečnými následky, musí se provést zhodnocení, pro přesnější stanovení pravděpodobnosti vzniku úrazu a vytvořit podklad z výsledků pro stanovení potřeby ke zlepšení a snížení rizika.

- **Významné riziko**

Toto riziku vyžaduje urychlené provedení odpovídajících bezpečnostních opatření snižující riziko na přijatelnou úroveň.

- **Nepřijatelné riziko**

Toto riziko má katastrofické důsledky. Je vyžadováno okamžité zastavení činnosti, zastavení veškerých činností v provozu, dokud nedojde k eliminaci a zastavení rizik a škod. Dále je potřeba znovu vyhodnotit rizika po provedení opatření a provoz nesmí být spuštěn, dokud nebudou všechna rizika odstraněna.

1.2 Další pojmy

1.2.1 Nebezpečí

Je zdroj možného zranění nebo poškození na zdraví. Je to možná situace nebo činnost, při které může vzniknout poranění člověka nebo poškození na zdraví anebo jejich kombinací. Tato vlastnost je skrytá a nemusí být na první pohled viditelná.

1.2.2 Bezpečnost

Je termín využíván ve všech oblastech potřebných k zajištění ochrany zdraví lidí a škod na jejich majetku. V podmínkách jaderných elektráren je nutné plnit požadavky pro jadernou bezpečnost, radiační ochranu, technickou bezpečnost, monitorování radiační situace, dále zvládání radiační mimořádné události a zabezpečení. (BN JB 1.1 Rev .0.2 Systém řízení)

1.2.3 Jaderná bezpečnost

Jaderná bezpečnost je dle legislativy definována jako „Stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhující jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí (ŽP) a omezovat následky nehod.“ (Atomový zákon)

Technickým bezpečnostním cílem je potom „Zabránit s vysokou pravděpodobností haváriím v jaderných zařízeních. Zajistit pro všechny havárie zahrnuté v projektu jaderné elektrárny, a to i pro havárie s nízkou pravděpodobností výskytu, malé radiační následky a zajistit, že pravděpodobnost nadprojektových havárií s vážnými následky bude extrémně malá.“ (Atomový zákon)

Jaderná bezpečnost jaderných zařízení je zajišťována dle legislativních předpisů, nařízení, norem a opatření, a to především zákonem č. 263/2016 Sb. ze dne 14. července 2016, atomový zákon ve znění zákonů č. 183/2017 Sb., č. 403/2020 Sb. a č. 261/2021 Sb. (Atomový zákon)

1.2.4 Mimořádná událost

Tímto pojmem rozumíme nepříznivou odchylku od žádoucího stavu, je závažná, časově obtížně předvídatelná. Bývá to prostorově ohraničená událost, která je způsobená vlivem antropogenních činností, přírodních vlivů či procesů, ohrožující životy, zdraví, majetek nebo ŽP.

2 LIDSKÝ FAKTOR

Analýza lidské spolehlivosti vychází z hodnocení lidských chyb. Pro jejich modely se nyní používají také bayesovské sítě. Identifikují se různé scénáře a stanovuje se pravděpodobnost jejich výskytu v konkrétních podmínkách. Do systému systémů tak přibývá další systém, a to sociální. Někdy se pro zvážení neurčitostí používá mlhavý bayesovský model. Při nouzových situacích je důležité, aby lidé byli samostatní a aby dostali sebe i ostatní na bezpečné místo. Samostatnost se zvyšuje, když lidé znají obsah varovacích instrukcí a znají, jak se chovat. Efektivitu varovacích instrukcí ovlivňuje mnoho faktorů – osobní charakteristiky, způsob zpracování informace člověkem, chování člověka, sociální vlivy, nepřímé informace aj. Ke zranitelnosti systému systémů přispívá i zranitelnost, kterou představují lidé, tj. sociální systém. (D. Procházková, 2006)

Lidským faktorem se rozumí soubor vlastností a schopností člověka, posuzovaných především z hlediska psychologických, fyziologických a fyzických, které vždy nějakým způsobem v dané situaci ovlivňují výkonnost, efektivnost a spolehlivost pracovního systému. Z definice je vidět, že lidský faktor hraje významnou roli v rámci prevence vzniku různých nežádoucích událostí. Lidský faktor se pojí s účinným a pevným vedením a zavedenou kulturou BOZP.

Heinrich jako první vyslovil, že těžkému zranění předchází tisíce skoronehod. Havárie jsou výsledkem nebezpečných činností a nebezpečných podmínek, přičemž lidé způsobují mnohem více havárií, než nebezpečné podmínky. Heinrich vypočítal, že až 95% z veškerých nehod na pracovišti je způsobeno nebezpečným jednáním, přičemž selhání lidského činitele je přímou příčinou 88% nehod. Lidské chování spolu s výcvikem a bezpečnostními předpisy proto označil za klíčové faktory ovlivňující vznik nehod.



Obrázek 1. Heinrichova pyramida Zdroj: EBOZP

Pro jaderné elektrárny je typický systematický proces hodnotící projevy lidského činitele a reagující na získané poznatky. Tento proces mají na starost specialisti, kteří jsou přímo zodpovědní za provoz elektrárny a jeho bezpečnostní aspekty. Tito specialisti většinou prošli celým provozem a to přes operátora blokové dozorny až po zodpovědné funkce bezprostředně spojené s každodenním řízením provozu na jaderné elektrárně.

Lidský faktor ovlivňuje všechny aspekty bezpečného provozu této technologie. Při hodnocení bezpečnosti provozu se kontroluje přístup k lidskému faktoru a úroveň jeho propojení s dobrou provozní praxí a kulturou bezpečnosti, aby nedošlo k přispění možnému riziku. Hodnocení je orientováno na velké spektrum otázek a témat spojených s projevy lidského faktoru. Mezi tyto otázky se řadí například:

- Podmínky pro správné a spolehlivé provedení plánované i neplánované údržby.
- Důležité akce prováděné zaškolenou obsluhou, které jsou klíčové a velmi důležité pro bezpečnost provozu této technologie.

Pro práci s lidským faktorem existuje celá řada témat a oblastí, které se snaží vytvořit co nejlepší podmínky pro kvalitní a bezpečnost práci obsluhy. Mezi tyto podmínky můžeme zařadit výběr pracovníku, jejich výcvik a vzdělání, rozdělení funkcí a odpovědnosti, tvorba přátelského prostředí pro interakci obsluhy se zařízením a řízení normálních, abnormálních i havarijních procesů v technologii. V poslední době se velmi dobře prokazuje zpětná vazba analýzy provozní historie, kdy jsou existující problémy spojené s lidským faktorem pojmenovány a dále postupně řešeny, aby bylo možné zamezit jejich dalšímu opakování.

Z toho vyplývá, že je relativně dobrá úroveň práce obsluhy z pohledu kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, která je posilována zdokonalováním pracovních podmínek. Tento systém může být však narušovaný impulzy z venčí jako jsou například:

- Silné ekonomické aspekty k omezení nákladů na provoz technologie
- Organizační změny, které probíhají neustále ve struktuře mateřské firmy, každá taková změna narušuje prostředí a stabilitu procesů zavedených na konkrétní technologii.

V těchto případech se jedná o obecné vlivy, u kterých to vypadá, že zásadně neovlivní práci konkrétního jednotlivce, ale v delším horizontu, mohou nepřímo hromadně narušovat zavedené pozitivní trendy práce s lidským faktorem. (D. Procházková, 2006)

LIDSKÁ CHYBA

„Lidská chyba je charakterizována nežádoucím nebo chybným stavem systému, jehož součástí je interakce člověka-stroj. Tato interakce přináší potřebu mentálních nebo fyzické aktivity jedince a vede k situaci, kdy nejsou zcela nebo zčásti plněny požadavky systému.“ (Sträter, 2005)

Lidské chyby vznikají působením několika faktorů. Mezi tyto faktory můžeme zahrnout emocionální stavy, obtížnost prováděného úkolu, podmínky při práci, rušivé elementy atd..

Chyba jako taková není špatná, jde tu spíše o následky a podmínky, které z ní vyplývají a mohou nastat.

Klasifikace podle Swaina a Guttmana:

- **Chyby vynechání (error of omission)** – zde jsou chyby, kdy požadovaný úkol nebyl vykonán. A to z toho důvodu že na něj mohl zapomenout nebo si neuvědomil, že má něco provést.
- **Chyby provedení (error of commission)** – Zde jsou akce provedené nesprávným způsobem. S chybami zde souvisí například nesprávné pořadí provedení, načasování, náhradou a akcemi které nejsou v popisu práce dané osoby.

Chyby jsou způsobené:

- Špatné proškolení nebo špatné pokyny
- Nedostatek motivace anebo úmyslné porušení předpisů
- Nedostatek fyzických a duševních schopností
- Nedostatek pozornosti
- Chybný management

Faktory ovlivňující (lidský) výkon

Jsou označovány také zkratkou PSF (performance shaping factors). Je to charakteristika vnějšího prostředí, úkolů a lidí a vyplývá z toho individuální výkonnost. Dělíme je na vnější a vnitřní prostředí. Vnější vlivy spolu s individualitou jedince, můžeme zařazovat do různých tříd, tak aby posuzování spolehlivosti lidského činitele zahrnovalo škálu nejrůznějších vlivů.

Pravděpodobnost lidské chyby (HEB – Human Error Probability)

Ta se dá vypočítat dle vzorce:

$$HEP = \frac{POČET\ NASTALÝCH\ CHYB}{POČET\ PŘÍLEŽITOSTI\ K\ CHYBĚ} \quad (4)$$

Odhad pravděpodobnosti úspěšného provedení dané úlohy člověkem (**HSP – Human success probability**) se dá dále odvodit:

$$HSP = 1 - HEP \quad (5)$$

Tyto pravděpodobnosti dále vstupují do analýz rizika.

Při řešení krizových situací, zahraniční zkušenosti tvrdí, že je dobré ponechat méně než 10% rozhodnutí na vůli člověka zbytek by mělo být předem připravené.

Spolehlivost lidského jednání závisí na řadě faktorů, které ho ovlivňují, a nejde ho nikdy úplně přesně odhadnout.

3 SPOLEHLIVOST

Dle ČSN IEC 330050 je spolehlivost charakterizována jako obecná vlastnost objektů spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozním ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek.

Tuto definici je možné doplnit:

Spolehlivost je vlastnost, která zahrnuje například bezporuchovost, životnost, udržovatelnost a skladovatelnost a to buď jednotlivě, nebo v kombinaci.

Spolehlivost každého systému není závislá pouze na spolehlivosti jeho technického řešení, ale ovlivňují jí další faktory jako je i lidský faktor.

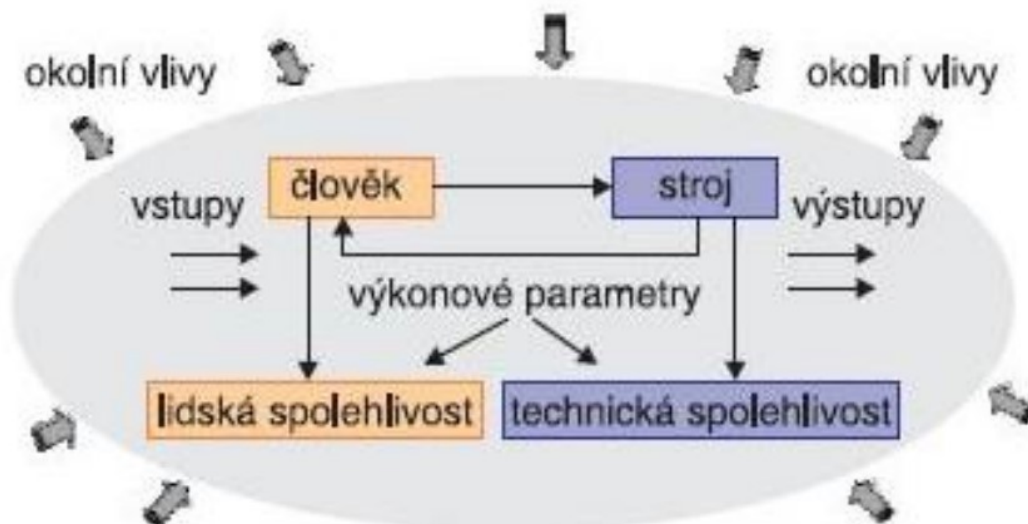
Můžeme jí vypočítat vztahem:

$$R_{SC} = R_C \times R_S$$

(6)

R_C – je spolehlivost lidského faktoru

R_S – je spolehlivost zařízení



Obrázek 2. Člověk – stroj – pracovní systém, Zdroj: VŠB–TUO

3.1 Systém člověk – stroj

Je soustava, kterou tvoří lidský činitel (pracovní skupiny) a pracovní prostředky (stroje, technická zařízení) včetně pracovního předmětu, v níž jsou určitým způsobem rozděleny

funkce mezi lidské a technické komponenty, jejíž cíl je přesně vymezen a realizuje se v daném pracovním prostředí.

"Stroj" je nutno chápat v širším pojetí a to jako pracovní prostředek začínající jednoduchým nástrojem či náradím přes jedno či víceúčelový stroj, technické zařízení, až po řídicí centrum. Spolehlivost výkonu systému je dána spolehlivostí člověka a spolehlivostí stroje.

Ergonomický přístup zdůrazňuje špatný poměr mezi lidskou kapacitou a nároky systému a to jako hlavní zdroj lidských chyb. Z tohoto hlediska je zásadním zlepšením potřeba, aby design systému bral do úvahy fyzické a mentální dovednosti člověka. Proto je třeba reflektovat následující úkoly:

- Přizpůsobovat pracoviště a práci požadavkům pracovníků s rozdílnými fyzickými a mentálními charakteristikami.
- Navrhovat design člověk – stroj, se zaměřením zejména na kontrolní panely tak, aby byla informace o procesu dobře přístupná a předána, a aby mohly být plynule prováděny příslušné ovládací akce.
- Navrhovat design fyzického prostředí tak, aby byly minimalizovány negativní tělesné a psychologické účinky nepříznivých podmínek.
- Optimalizovat mentální a tělesnou zátěž pracovníka.

Ergonomický přístup přinesl do podvědomí projektantů a inženýrů mnoho důkazů, že při analýze nehod se nelze zastavit pouze při konstatování, že jejich příčinou byla lidská chyba. Musí se dále zkoumat, čím byla tato chyba způsobená.

3.2 Faktory ovlivňující výkon

Prostředí pracovního procesu

- Frekvence nasazení pracovníků, složitost událostí v procesu, závislost na čase, vnímané nebezpečí

Fyzické pracovní prostředí

- Hluk, osvětlení, mikroklimatické podmínky

Zdravotní stav

- Únava, narušování tělesných rytmů, spánek

Zdraví a výkonnost

- Zatímco totální zdravotní nezpůsobilost bývá okamžitě rozpoznána, postupné snížení zdravotní způsobilosti, jako je třeba únava, stres, usínání, poruchou biologických rytmů, léků nebo hypoglykemií, mohou zůstat nezaznamenány.

Stresové faktory

- Hluk, horko, rodinné problémy, finanční problémy, stěhování, úmrtí, povýšení, nedostatek zkušeností, nedostatek tréninku, vlhkost, vibrace, chlad, pracovní přetížení atd.

Kumulativní efekt stresorů

- Důležitým faktem je to, že stresory jsou kumulativní. Pokud člověk zažívá drobné podráždění, anebo je vystaven nějakému drobnému stresoru, pak jeho hladina stresu vzroste disproporcionálně, pokud bude vystaven dalšímu malému stresoru.

3.3 Analýza spolehlivosti lidského činitele

Analýza lidské spolehlivosti HRA (Human reliability analysis), je postup na posouzení vlivu lidského činitele na výskyt živelných pohrom, nehod, havárií, útoků apod. či některých jejich dopadů. Koncept analýzy lidské spolehlivosti HRA směřuje k systematickému posouzení lidského faktoru (Human Factors) a lidské chyby (Human Error). Zahrnuje přístupy mikroergonomické (vztah „člověk – stroj“) a makroergonomické (vztah systému „člověk – technologie“). Analýza HRA má těsnou vazbu na aktuálně platné pracovní předpisy především z hlediska bezpečnosti práce. Uplatnění metody HRA musí vždy tvořit integrovaný problém bezpečnosti provozu a lidského faktoru v mezních situacích různých havarijních scénářů, tzn. paralelně a nezávisle s další metodou rizikové analýzy.

Tuto analýzu lze také definovat jako speciální obor, který dokáže začlenit vliv činnosti personálu JE na spolehlivost a bezpečnost provozu systému JE. Proto je člověk jeden z hlavních prvků, který má vliv na spolehlivost činnosti systému. Analýza HRA je důležitá, když se ohlédneme a uvědomíme si že 60% - 80%, rizik může pocházet právě od selhání lidského faktoru. Všeobecné postupy metod HRA je možné charakterizovat dle postupových kroků, ty na sebe navazují v různých rovinách spolehlivosti analýzy lidského jednání.

Mezi nejčastější postupové kroky patří:

Identifikace a stanovení úloh pro člověka zakomponovaného do systému

- Popis zkoumaných a hodnocených lidských jednání, chování a činů
- Stanovení rozsahu, podmínek a kvalitativních parametrů analýzy

Kvantitativní analýza činností a úloh

- Sběr informací o úkolu, roli nebo činnosti člověka v dané situaci
- Analýza jednotlivých elementárních činností, kvantitativní a kvalitativní hodnocení činnosti podle zvoleného modelu
- Hodnocení jednotlivých činností analyzované úkoly se zřetelem na chybné lidské jednání
- Faktory tvořící soubor parametrů modelu, které dovolují přizpůsobování spolehlivostních parametrů
- Chybná chování mohou být kompenzována pomocí systémových nebo procesních charakteristik

HRA zabezpečuje podklady pro modelování a kvantifikaci lidské složky modelu pro PSA analýzu. HRA je dále využívána k přímým aplikacím podporujícím procesy každodenního bezpečnostního a rizikově orientovaného rozhodování, řešení dalších otázek a priorit provozu, výběru z konkrétních alternativ a zajištění podmínek práce obsluhy. Všechny analýzy spolehlivosti lidského faktoru vedou k závěru, že lidskou spolehlivost je možné zlepšovat, až po nějakou prahovou úroveň.

Role analýzy spolehlivosti lidského činitele zahrnuje lidské prvky do pravděpodobnostního modelu systému. Bez toho by byl celý model neúplný a ztratil by vypovídající schopnost.

4 ANALÝZA RIZIK

Analýza rizika je nezbytnou součástí postupu, jak zvládat jakákoli rizika a ochránit tak zdraví lidí, zvířat a životního prostředí. Hodnocení rizik je důležité a poskytuje spoustu poznatků, při prevenci nežádoucí události, tak i při přípravě na její zdolání. Vědomosti a poznatky o rizicích, se dále využívají při vytváření bezpečnostní politiky. Ke zkoumání rizik máme spoustu metod, proto je důležité vybrat vhodnou metodu pro daný problém. Vždy záleží na situaci, cíli a kontextu. Největším nedostatkem při hodnocení rizik je nedostatek dat a informací. Můžeme se s tímto problémem setkat například u selhání lidského činitele. Hodnocení rizik představuje provedení řady kroků, od definování účelů hodnocení, identifikaci nebezpečí, sběr informací, posouzení následků, od pravděpodobnosti vzniku po vyhodnocení závažnosti následků rizika, která mohou nastat. Poznání rizika je klíčovým prvkem pro provádění účinné prevence, dále i systematický přístup je důležitý a nezbytný pro zajištění bezpečnosti.

Analýza rizik se snaží odpovědět na tyto otázky:

- co se může pokazit? (Pomocí identifikace nebezpečí),
- s jakou pravděpodobností se to stane? (Pomocí analýzy četnosti),
- jaké budou následky? (Pomocí analýzy následků).

4.1 Základní kroky hodnocení rizik

a) kategorizace/klasifikace pracovních činností: zpracuje se seznam pracovních činností prováděných v organizaci včetně jejich charakteristik,

b) identifikace nebezpečí: identifikovat všechny závažné zdroje nebezpečí vztahujících se k prováděným činnostem. Musí se zvážit, kdo může být poškozen, nebo co může být poškozeno a jak,

c) stanovení rizik: provede se odhad rizika spojeného s každým identifikovaným nebezpečím. Uvedeme plánované nebo stávající bezpečnostní opatření. Při tom je třeba vzít v úvahu účinnost opatření a možnost případného selhání a další možné následky,

d) rozhodnutí o přijatelnosti rizika: posouzení, zda plánované nebo existující bezpečnostní opatření je dostatečné a zajistí snížení i udržení nebezpečí pod legislativně stanovenými limity a požadavky,

e) **příprava nápravných opatření ke snížení rizika (jsou-li zapotřebí):** přípravu plánu obsahujícího řešení těchto problémů zjištěných v bodech a - c. Organizace by měla zajistit, že nová a existující opatření jsou funkční a efektivní,

f) **posouzení, zda plán nápravných opatření je odpovídající:** opětovné zhodnocení rizik s ohledem na přijatá nápravná opatření a ověření. Po ověření zjistíme, jestli je riziko přijatelné. To znamená, zda riziko bylo sníženo na nejnižší možnou hodnotu.

4.2 Techniky identifikace a analýzy rizik

V rámci identifikaci rizik provádíme identifikaci, stanovení hodnoty, seskupování aktiv a identifikaci konkrétních hrozeb a možných příčin jejich působení.

Cílem tohoto kroku je vytvořit komplexní seznam rizik, které mohou zpomalit nebo zamezit dosažení cílů. Kompletní identifikace je totiž rozhodující, protože když je neidentifikujeme, nemůžeme je zahrnout do analýzy. Proto jsou velmi důležité aktuální informace, které by měly obsahovat vhodná a konkrétní data.

Identifikace aktiv spočívá v soupisu aktiv ležících uvnitř hranice řízení rizik. Stanovené hodnoty se provádí dle velikosti škod způsobených zničením či ztrátou aktiva.

Kvalitativní analýza

Jedná se o slovní hodnocení závažnosti potenciálního dopadu a pravděpodobnosti, které mohou nastat. Cílem je vytvořit stupnici aby vyhovovala daným okolnostem a rizikům. Kvalitativní analýza může být použita jako počáteční při identifikaci rizika, dále u rizik, která požadují podrobnější analýzu, nebo kde je tento typ vhodný pro rozhodování.

Semikvantitativní analýza

Kvalitativní analýza, ke které jsou přiřazeny odpovídající hodnoty, jako je bodová škála. Cílem je vytvořit širší stupnici hodnocení. Realizaci semikvantitativní analýzy je třeba věnovat zvýšenou pozornost, protože vybraná čísla nemusí odpovídat skutečnosti, to může vést k rozporuplným, odchylujícím nebo nepřiměřeným výsledkům.

Kvantitativní analýza

Zde jsou užívány číselné hodnoty. Ty jsou mnohem přesnější než popisné stupnice u předchozích dvou analýz. Pro vyjádření závažnosti dopadu a pravděpodobnosti výskytu se využívají data z různých zdrojů. Pro kvantitativní vyhodnocení závažnosti dopadů se využívá nejčastěji hodnota aktiva nebo náklady na odstranění škod. Kvalita analýzy je

závislá na přesnosti a úplnosti číselných hodnot. Dopady můžeme také určit pomocí modelů a výsledků událostí. Někdy je nutné, aby byla specifikace dopadů pro různé časy, místa, skupiny nebo situace realizovaná více než jednou číselnou hodnotou.

	Kvalitativní analýza	Semikvantitativní analýza	Kvantitativní analýza
Pravděpodobnost výskytu	vysoká	4	83%
Závažnost dopadu	střední	3,5	120.000,- Kč

Obrázek 3. Příklad vyjádření hodnot při jednotlivých typech analýz

4.3 Analýza stromu událostí

EVENT TREE ANALYSIS (ETA)

Je to postup, který sleduje průběh procesů od iniciační události přes konstruování událostí vždy na základě dvou možností – příznivé a nepříznivé.

Jedná se o zobrazení informací o možných průbězích havarijních sekvencí iniciační události. Pořadí událostí je zpravidla dáno časovou posloupností událostí, určenou při sestavování havarijních sekvencí.

Na základě otázky "co se stane, když ...", analytik konstruuje strom možných výstupů. Je tedy velmi důležité, aby byl sestaven vyčerpávající seznam událostí a bylo zajištěno řádné zobrazení všech důležitých posloupností událostí zvažovaného systému. Z kvalitativního hlediska pomáhá ETA identifikovat všechny potenciální scénáře nehod a jeho potenciální návrhy nebo postupy. Větev úspěchu modeluje podmínku, že faktor na zmírnění funguje. Je nutné věnovat zvláštní péči modelování závislosti, přitom je nutné myslet, že pravděpodobnosti používané pro kvalifikování stromů událostí jsou podmíněny posloupností událostí.

Kroky k analýze ETA

- Vymezení systému nebo činnosti, které jsou předmětem zájmu - Specifikují se a jasně se vymezí hranice systému nebo činnosti, pro které se mají provést analýzy ETA.

- Identifikace iniciačních událostí, které jsou předmětem zájmu - Provede se třídění, aby se identifikovaly události, které jsou předmětem zájmu, nebo kategorie událostí, na které se analýza zaměří.
- Identifikace zmírňujících faktorů a fyzických jevů - Identifikují se různé zmírňující faktory, které mohou ovlivnit průběh iniciační události k jejím výstupům. Mezi tyto 24 zmírňující faktory se zahrnují jak technické systémy, tak lidské zásahy/rozhodnutí. Identifikují se též fyzické jevy nebo nahodilé události, jako je vznícení nebo meteorologické podmínky, které ovlivní průběh a nakonec výstup iniciační události.
- Vymezení posloupností a výstupů a jejich kvantifikace - Pro každou iniciační událost se přesně stanoví různé výstupy (např. scénáře nehody), které mohou nastat, a provede se aktuální kvantitativní analýza na základě zkonstruovaného stromu událostí.
- Analýza výstupů - Potom se analyzují různé výstupy s ohledem na jejich následky a jejich dopad na výsledky analýzy.
- Použití výsledků analýzy ETA - Kvalitativní a kvantitativní výsledky analýzy se potom převedou na nutné zásahy.

4.4 Analýza stromu poruchových stavů

FAULT TREE ANALYSIS (FTA) Strom poruch má podobu logického diagramu a znázorňuje logické vztahy mezi potenciální vrcholovou událostí jako kořen stromu a mezi příčinami vzniku tohoto jevu. Příčiny mohou vzniknout v provozních podmínkách, v běžných očekávaných poruchách systému, v chybách obsluhy, v odchylkách provozních parametrů prvku atd. Správně zkonstruovaný strom poruch ukazuje všechny rozumné kombinace poruch prvků a poruchových jevů.

Strom poruch je označována za deduktivní metodu. Rozvíjí se od vrcholové události a postupuje k jevům nižší úrovně, přitom se posuzují možné příčiny vzniku nadřazeného poruchového jevu. Výhodou toho je, že slabá místa jsou včas odhalena již v etapě návrhu a vývoje systému. Vrcholová událost musí být definována jednoznačně. Pokud tomu tak není analýza je omezená ve svých výstupech.

Definice vrcholové události musí být jednoznačně popisovaná událost, přesně vymezená, jakého systému se týká, nebo jaké části a za jakých podmínek v provozu. Cílem kvalitativní

analýzy u stromu poruch je nalezení všech možných kombinací faktorů provozních podmínek, podmínek prostředí, chyb lidského faktoru a poruch prvky systému, které by mohly vést ke vzniku vrcholové události.

Události jsou na nejnižší úrovni vstupů ve stromu poruchových stavů. Do analýzy je nutné zahrnout všechny možné události a to i včetně vlivu prostředí a ostatní podmínky namáhání, které mohou na objekt působit. Jestliže jedna událost je schopna způsobit více poruchových stavů, je nutné tuto událost zaznamenat do stromu poruch na několika místech. Do stromu poruch by měly být zahrnuty všechny události, které mohou nastat.

Kroky při aplikaci FTA analýzy:

- Vymezení rozsahu analýzy
- Seznámení se systémem
- Definice vrcholové události
- Vytvoření stromu poruchových stavů
- Analýza logiky stromu poruchových stavů
- Zpráva o analýze
- Posouzení zlepšení bezporuchovosti

Obě analýzy ETA a FTA jsou nezbytnou součástí analýzy PSA.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 SYSTÉM ŘÍZENÍ RIZIK

Je proces, při kterém organizace nebo subjekt snaží zamezit působení už existujících, nebo předpokládaných hrozeb a navrhuje vhodná řešení. Mezi tyto řešení patří například bezpečnostní opatření, které minimalizují závažnost situace a jejího dopadu, nebo pravděpodobnost výskytu mimořádných událostí.

Proces řízení rizik, musí být nedílnou součástí řízení organizace, je nutné, aby byl ukotvený v kultuře každé organizace, a musí být uzpůsobený všem jejím procesům. Skládá se z pěti základních subprocesů. Mezi ně patří komunikace a konzultace, vymezení souvislostí, posuzování rizik, zvládání rizik, monitorování a přezkoumávání.



Obrázek 4. Proces řízení rizika (ČSN ISO 31000:2018), Zdroj: PECB

Je to systém, který již koordinuje činnosti při plánování, řízení, zajišťování a zlepšování kvality procesů a činností, a také výstupů. Specifickým znakem systému řízení je, že velký důraz je kladen na bezpečnost stanovenou právním předpisem a dalšími předpisy určenými k jeho provedení a tudíž je tento systém kontrolovaný a také regulovaný.

V systému řízení (SŘ) se dále nacházejí všechny záměry, strategie, plány a cíle, které jsou zohledňovány při rozhodovacím procesu a díky tomu umožňují bezpečné, účinné a efektivní dosažení těchto cílů a adekvátní úrovně bezpečnosti. Proto je možné zajišťovat a zvyšovat úroveň bezpečnosti, jelikož se neustále hodnotí a je zlepšována. SŘ by měl integrovat všechny prvky, včetně BOZP, ochrany ŽP, kvality, organizace, sociálních a ekonomických aspektů tak, aby bylo naplněno všech potřeb.

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), je úřadem pro oblast využívání jaderné energie a ionizujícího záření. SÚJB vydává návody, v těch se dále zpracovávají požadavky na zajištění a zvyšování úrovně jaderné bezpečnosti, technické bezpečnosti, radiační ochrany, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné události a dalšího zabezpečení.

„Odstupňovaný přístup při zavádění a udržování systému řízení musí odpovídat

a) složitosti procesů a činností, které ovlivňují jadernou bezpečnost, radiační ochranu, technickou bezpečnost, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné události a zabezpečení (dále jen „procesy a činnosti“), jejich vstupů a výstupů a jejich významu z hlediska jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, technické bezpečnosti, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné události a zabezpečení,

b) možným následkům neshody vykonávaných procesů a činností s dokumentovanými požadavky (dále jen „neshoda“) a jejímu vlivu na jadernou bezpečnost, radiační ochranu, technickou bezpečnost, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné události, zabezpečení a kvalitu výstupu z procesů a činností a

c) potřebnosti a přiměřenosti zdrojů pro procesy a činnosti, jejich vstupů a výstupů.“ (BN-JB-1.1 rev.0.2)

6 PSA ANALÝZA

PSA je zkratka anglického termínu Probabilistic Safety Assessment, neboli Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti. Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti (PSA) je analytickou metodou, vytvořenou k hodnocení bezpečnosti jaderné elektrárny (JE). Tato metoda identifikuje a váže kombinace událostí, které vedou k vážným haváriím, stanovuje pravděpodobnost vzniku každé kombinace havarijního scénáře vedoucím k nežádoucím událostem. Metoda PSA systematicky a realisticky do jednotného rámce všechny aspekty bezpečnosti. Mezi tyto aspekty patří projektové charakteristiky, provozní postupy a zkušenosti, spolehlivost systému, havarijní předpisy, výkonost člověka, fyzikální procesy při haváriích a účinky RA látek uvolněných z jaderného zařízení.

PSA je také dobrým nástrojem pro odvození číselných hodnot odhadu rizika plynoucího z provozu jaderného zařízení a dále i průmyslových zařízení. Díky této metodě můžeme číselně vyjádřit nejistoty a neurčitosti.

Hlavní výhody jsou získání znalostí z oblasti bezpečnosti provozu JE, od projektování, způsobu provozu až po účinky na ŽP.

Na vysoké úrovni se kvantitativní výsledky PSA často používají k ověření souladu s bezpečnostními cíli nebo kritérii, které jsou obvykle formulovány z hlediska kvantitativních odhadů frekvence poškození jádra, četnosti úniků radioaktivních látek různých typů a společenských rizik, a které proto mohou vyžadovat výkon PSA úrovně 1, PSA úrovně 2, resp. úrovně 3 PSA, a které proto mohou vyžadovat výkon PSA úrovně 1.

Pokud se PSA provádí pouze na úrovni 1, pak se analýza obvykle zaměřuje na jádro reaktoru. Je-li PSA prováděna na úrovni 2 nebo 3, kde je nutno posoudit dopad radioaktivních úniků, pak může oblast působnosti PSA zahrnovat příspěvky k riziku vyplývajícímu z jiného radioaktivního materiálu v lokalitě, jako je vyhořelé palivo a radioaktivní odpad. Tyto zdroje radioaktivity mimo jádro by měly být zahrnuty do PSA vždy, když je záměrem řešit celkové riziko, které elektrárna představuje pro veřejnost v blízkosti lokality.

Velkou výhodou PSA je, že poskytuje explicitní rámec pro analýzu nejistot v odhadech rizik. Určení zdrojů nejistoty a pochopení jejich dopadů na model PSA a jeho výsledky by měly být považovány za neodmyslitelnou součást každé PSA, aby bylo možné při použití výsledků PSA na podporu rozhodnutí zohlednit dopad nejistot.

PSA dokáže odpovědět na tyto otázky:

Co může selhat?	→	Rizikové scénáře
Jak je to pravděpodobné?	→	Pravděpodobnost/četnost
Co je důsledkem?	→	Následky

6.1 Základní dělení analýz pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti

Protože riziko havárií jaderné energetických zařízení může být vyvoláno různými událostmi, uvnitř JZ i mimo něj, proto je třeba hodnotit riziko provozu při práci zařízení na plném výkonu, při nižším výkonu nebo při odstávkách. Proto je můžeme rozdělit do těchto úrovní:

1. úroveň: Hodnocení poruch zařízení JE a zjištění četnosti (frekvence) poškození AZ v důsledku takových poruch. Za takový nežádoucí stav JE a následek havarijních scénářů se považuje tavení anebo vážné poškození AZ.

2. úroveň: Hodnocení odezvy kontejnmentu, spolu s výsledky 1. úrovně vede ke zjištění četnosti (frekvence) a rozsahu úniků radioaktivních látek z kontejnmentu. V návaznosti na analýzu 1. úrovně se analyzuje zatížení kontejnmentu a to od havarijních sekvencí v předcházející úrovni. Výsledkem je určení způsobů a okamžiků selhání kontejnmentu, jeho charakteristik úniků radioaktivních látek (zdrojový člen) a další očekávané četnosti výskytu takových událostí.

3. úroveň: Hodnocení následků na okolí JE, které s výsledky analýzy 2. úrovně vedou k odhadům rizik, kterým je dále vystavena veřejnost. V návaznosti na analýzu 2. úrovně jsou zjišťovány následky nehody uvnitř JE. Jako následky se považují zdravotní účinky uvolněných RA látek na obyvatelstvo, a to ve formě pravděpodobnosti okamžitých, nebo pozdějších nádorových úmrtí. Tím je v podstatě dokončeno celkové posouzení rizik jaderného zařízení.

Hodnocení rizika v různých provozních režimech

Toto hodnocení se odvíjí z iniciačních událostí vyskytujících se při provozu JZ na plném výkonu, dále se může vyskytovat při zvyšování i snižování výkonu, či plánovaných odstávkách a překládkách paliva, kdy se provádí revize a údržba zařízení. Zjištění ukazují, že jsou tyto analýzy důležité, mohou totiž tvořit 10% – 50% příspěvku k četnosti poškození AZ při provozu na plném výkonu.

6.2 Principy konstrukce modelů PSA pro JE

6.2.1 Specifické cíle PSA

- Identifikace dominantních havarijních sekvencí
- Identifikace systémů, zařízení a činnosti personálu důležitých z hlediska bezpečnosti
- Hodnocení důležitých závislosti (člověk – stroj)
- Identifikace a hodnocení již existujících i zcela nových bezpečnostních problémů
- Analýza těžkých havárií
- Rozhodnutí o modernizaci jaderného zařízení
- Modifikace projektového řešení jaderného zařízení
- Stanovení priorit v oblasti legislativních požadavků a bezpečnosti
- Hodnocení limitů a podmínek bezpečného provozu jaderného zařízení
- Stanovení priorit kontrolních činností a zkoušek
- Hodnocení provozních událostí
- Řízení havárií

6.2.2 Identifikace iniciačních událostí havárií

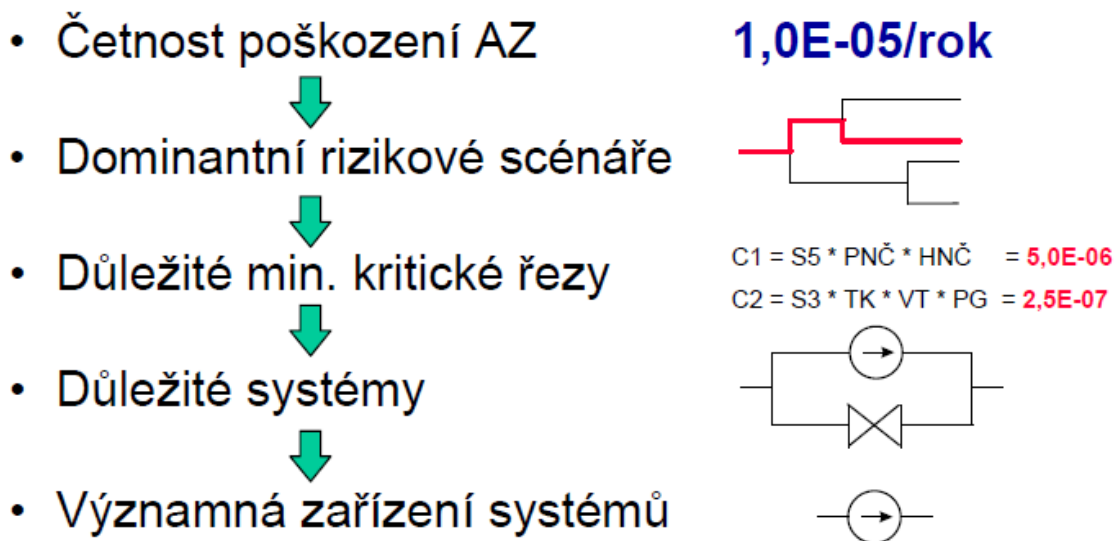
Cílem je analyzovat a určit co možná nejúplnější seznam událostí, které mohou svým rozvojem v případě selhání systému nebo lidského faktoru vést k analyzovanému nežádoucímu stavu tj. poškození AZ.

Iniciační událost

Je každá událost která způsobí narušení normálního provozu JE s následným přechodovým procesem, která může svým rozvojem vést k poškození AZ, v závislosti na úspěšném či neúspěšném zásahu různých systémů bloku, projektovaných pro zvládnutí dané události.

6.3 Hierarchie výsledků PSA

Výsledky modelu PSA jsou výsledky jak kvalitativního, tak kvantitativního hodnocení. Hierarchie výsledných informací z modelu PSA:



Obrázek 5. Hierarchie výsledků PSA, Zdroj: ČEZ

Nejvýše postavenou hodnotou v tomto uspořádání rizikových poznatků je celková četnost poškození AZ, která udává riziko provozu dané JE. Tyto výsledky lze poté porovnávat s dalšími JE. Na druhém místě jsou havarijní scénáře a to jako celkové riziko provozu. Velmi důležité jsou zde minimální kombinace událostí modelů, vedoucích k poškození AZ. Důležité jsou i pouhé kvalitativní výsledky bez číselného vyjádření, protože mohou vypovídat o možných způsobech jednotlivých poruch a kombinací událostí modelu vedoucích k nežádoucímu poškození a následků.

Tyto výsledky zahrnují:

- Celkový soubor minimálních kritických řezů modelů – minimální kombinace iniciačních událostí, poruch prvků, které způsobují nežádoucí poškození a lidských chyb.
- Kvalitativní složení minimálních kritických řezů a prvků podle způsobu přispívání k selhání systému a poškození AZ.
- Vliv poruch se společnou příčinou – identifikace takových minimálních kritických řezů systému, které mohou selhat v důsledku jedné poruchy
- Potenciální významnost selhání lidského faktoru

Díky těmto poznatkům a výsledkům lze dále odvozovat doporučení a úpravy, které mají za cíl účinně směřovat investice pro snížení rizika a zlepšení bezpečnosti provozu JE. Další významnou věcí je využívat modely PSA, jako aplikační nástroj pro zlepšování bezpečnosti.

6.4 Možné aplikace PSA:

Jako příklad lze uvést Monitor rizika, jehož použitím se hodnotí úroveň okamžitého rizika konkrétního bloku jaderné elektrárny v reálném čase, který provádí výpočet okamžitého rizika při neprovoznosti jedné nebo více komponent. Jeho využitím lze provádět i variantní výpočty, na jejichž základě je možno vybrat řešení a nejnižší úrovní rizika dopadů na jadernou bezpečnost.

Výsledky z Monitoru rizik následně slouží pro vyhodnocování provozu a dokladování bezpečnosti JE, ale i jako podpora při rozhodování řízení jaderné bezpečnosti, posouzení možnosti údržby zařízení během provozu a další.

Tento model je využívám personálem elektrárny pro každodenní podporu rozhodnutí týkajících se provozu, aniž by byly nutné nějaké znalosti z oboru PSA.

Jako další příklad můžeme uvést Living PSA (LPSA). Tato analýza se využívá k určování průměrného rizika a to na základě očekávaných nepohotovostí systémů a zařízení. Bývá pravidelně aktualizována tak, aby projektové řešení a provozní vlastnosti JZ byly co nejaktuálnější. LPSA mohou využívat projektanti, personál elektrárny, nebo dozor nad jadernou bezpečností pro plnění dlouhodobých cílů a požadovaných účelů, a to například pro ověření úrovně rizika projektu JZ, hodnocení dopadu požadovaných změn projektu nebo provozních předpisů. Pro další případné zlepšení programu školení personálu a hodnocení změn JZ.

6.5 Modelování Havarijních sekvencí

Při pravděpodobnostním hodnocení rizika provozu JE se doporučuje používat kombinaci metody stromu událostí a stromu poruch. Strom událostí analyzuje, jak iniciační událost působí na jednotlivé systémy a Strom poruch analyzuje pravděpodobnost poruchy jednotlivých systému. Je nutné najít optimální strategii mezi komplikovaným stromem poruch a komplikovaným stromem událostí. Po nalezení a seskupení všech iniciačních událostí, je nutné analyzovat odezvu JE na každou skupinu iniciačních událostí. To se provádí pomocí stromu událostí.

Havarijní sekvence je to kombinace úspěchů a neúspěchů systému, které směřují k definované nežádoucí události a poškození AZ. Havarijní sekvence mohou být analyzovány a zobrazeny dle stromu událostí.

7 HODNOCENÍ LIDSKÉHO FAKTORU

Jedním z nejkompexnějších nástrojů hodnocení bezpečnosti provozovaných jaderných zařízení je Periodické hodnocení bezpečnosti. Cíle, požadovaný rozsah a lhůty hodnocení, definuje především vyhláška SÚJB č. 162/2017 Sb., o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona a návodu BN-JB-2.9 (Rev. 1.0), Periodické hodnocení bezpečnosti, SÚJB 2019.

V oblasti hodnocení lidského faktoru (která je nedílnou částí Periodického hodnocení bezpečnosti) je posouzení, zda lidský faktor nezvyšuje riziko vzniku iniciační události, předepsané činnosti a zásahy pracovníků jsou proveditelné a mají nezbytnou technickou a organizační podporu, zda je počet pracovníků vykonávajících činnosti důležité z hlediska bezpečnosti dostatečný a celková personální politika a její řízení jsou v souladu s požadavky na kulturu bezpečnosti. (viz. § 19 písm. a) vyhlášky č. 162/2017 Sb.).

Tato problematika zkoumá hodnocení, jako stav problematiky lidského faktoru pracovníků majících vliv na jadernou bezpečnost, radiační ochranu, technickou bezpečnost, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné události a zabezpečení. Periodické hodnocení se musí zaměřit nejen na vlastní provoz, ale i na lidský faktor v oblasti údržby a technické podpory.

Periodické hodnocení bezpečnosti lidského faktoru posuzuje dostatečnost lidských zdrojů, jejich kvalifikaci, výběr a způsob přípravy personálu (programy, periodicita a výcviková zařízení), uchování, přenos a sdílení znalostí i zajišťování nástupnictví.

V souvislosti s plněním požadavků na zajištění pracovních činností, které mají přímý vliv na jadernou bezpečnost, je ověřeno, zda příslušné pracovní zatížení a prostředí, jako bloková dozorna, záložní bloková dozorna a další řídicí střediska včetně havarijního řídicího střediska mají náležité uspořádání a technické vybavení, odpovídají i ergonomickým požadavkům v souladu se soudobými požadavky na rozhraní člověk-stroj.

7.1 Havárie způsobené lidským faktorem

Mezi nejvýznamnější havárie zaviněnou lidským faktorem patří jaderná havárie v Černobyli. Ta se stala 26. dubna 1986, kdy se provádělo odstavování 4. bloku na plánovanou opravu. Cílem této zkoušky bylo ověření, jestli bude turbogenerátor po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě pár vteřin napájet čerpadla havarijního chlazení aktivní zóny reaktoru.

7.2 Průběh zkoušky

Zkouška začala už 25. dubna a to snižováním výkonu reaktoru. Když byl výkon snížen na polovinu, byl odstaven první turbogenerátor. Poté byl odpojen systém havarijního chlazení. Další snižování výkonu bylo pozastaveno, protože se střídaly směny a nová směna s touto zkouškou nepočítala a nebyla na ní připravená. Nová směna ale ve zkoušce pokračovala, i když nebyli na to připraveni. Začalo další snižování výkonu a kvůli chybě operátora klesl výkon velmi prudce, až se zastavila štěpná reakce. U takto nízkého výkonu roste koncentrace Xe-135, a nastala tak „xenonová otrava reaktoru“ dle (Havárie Černobylské elektrárny, 35 let poté). V této chvíli už ve zkoušce neměli pokračovat a měli odstavit reaktor. Ve zkoušce ale pořád pokračovali.

Tlak a pára v reaktoru neměly ty správné hodnoty, při normálních okolnostech by zapůsobil systém havarijní ochrany, ten ale operátor předchozí směny zablokoval, aby nedošlo k odstavení reaktoru. Další zjištění bylo, že počet regulačních tyčí v aktivní zóně odpovídal jen necelé polovině povolené hodnoty, přesto operátoři pokračovali ve zkoušce. Zvýšili průtok chladiva a ten způsobil snížení páry v chladivu aktivní zóny a pokles reaktivity a systém reagoval dalším vysunutím regulačních tyčí. Vše bylo v rozporu s předpisy. Kolem pul 2 ráno, operátoři zablokovali havarijní signál, který by po uzavření přívodu páry turbínu automaticky odstavil. Chtěli zajistit podmínky pro budoucí opakování.

Dle (Havárie Černobylské elektrárny, 35 let poté) samotná zkouška začala uzavřením ventilu turbogenerátoru. Došlo ke snížení výkonu 4 hlavních čerpadel, to vedlo ke snížení průtoku chladicí vody reaktorem a tím vzrostla její teplota i tlak. To vedlo ke zvýšení páry a tím i reaktivity a výkonu reaktoru. Systém regulace výkonu bránil nárůstu výkonu zasunutím regulačních tyčí, začal nekontrolovatelně růst výkon. Poklesem průtoku chladiva, dále růstem páry vedlo k přehřátí paliva a destrukci jeho pokrytí.

Operátoři dali signál k havarijnímu odstavení reaktoru zasunutím regulačních tyčí. Tyto tyče však byly skoro všechny vytažené a proto účinek byl velmi pomalý. Grafitové hroty paradoxně podpořily nárůst výkonu reaktoru a došlo ke dvěma výbuchům. Při prvním výbuchu došlo k reakci horkého paliva a vody, tento výbuch způsobil posunutí betonové desky reaktoru (o váze 1000t). O pár vteřin později došlo k druhé explozi. Část aktivní zóny byla rozmetána, střešní část budovy byla zničená a došlo k požáru na střeše turbínové haly a v prostorách reaktorové haly. Po zhruba 4 hodinách byl oheň uhašen, ten však po několika hodinách znovu vzplanul. Přes veškeré úsilí hasičů samovolně dohasl až 14. května.

Oblak z hořícího reaktoru se rozptýlil nad velkou částí Evropy. K největší kontaminaci došlo v rozsáhlých oblastech na území Běloruska, Ruska a Ukrajiny. Únik ovšem zaznamenala celá Evropa.



Obrázek 6. Kontaminace Cs-137 na území Evropy (1998), Zdroj: SÚJB

Mezi další havárii došlo v jaderné elektrárně Fukušima. Tam však havárie byla způsobená živelnou pohromou. Zde je malé srovnání dle (Havárie Černobyl, 35 let poté).

	Černobyl (1986)	Fukušima (2011)
Příčina havárie	Hrubé chyby obsluhy	Živelní pohroma
Poškození reaktorové nádoby	Totální	Roztavené palivo v reaktorech 1, 2, 3
Bezprostřední úmrtí na ozáření	29*)	0
Únik radioaktivních látek do okolí (Bq)	I-131 ~ cca 10 ¹⁸ Cs-137 ~ cca 10 ¹⁷	I-131 ~ cca 10 ¹⁷ Cs-137 ~ cca 10 ¹⁶
Kategorie INES	INES 7 **)	INES 7

Obrázek 7. Srovnání havárii v elektrárnách Černobyl a Fukušima, Zdroj: SÚJB

ZÁVĚR

Základem bezpečného provozu jaderných elektráren je, jak již bylo v práci uvedeno, nejen stav a schopnost zařízení, ale i stav a schopnost personálu, který může ovlivnit jadernou bezpečnost. Ke zjištění reálného stavu je potřeba provedení mimo jiné i analýz rizik.

Všechny dobře provedené analýzy rizik prokazují, že jedním z důležitých, ne-li nejdůležitějších aspektů, které mají vliv jak na četnost (pravděpodobnost), tak na rozsah dopadů odchylek od normálního provozu a nehod, je lidský faktor, který se prolíná všemi fázemi hodnocených procesů. Nekorigovaná lidská chyba zavedená do záměru, projektu, realizace, provozu, či vyřazování jaderného zařízení z provozu může mít až fatální důsledky.

Zkušenosti získané provedením rozborů příčin nehod, havárií či katastrof potvrzují, že prakticky ve všech případech (s výjimkou přírodních katastrof) lze ve větší, či menší míře nalézt příčiny způsobené člověkem, tedy lidský faktor. Bezpečný provoz jaderných elektráren není výjimkou. Právě proto se procesy analyzující zpětně příčiny všech odchylek od normálního provozu zaměřují na detailní hodnocení vlivu lidského faktoru.

Výsledky hodnocení jsou následně zahrnuty do prevence v oblasti předcházení nehod a tím celkovému zvýšení úrovně (nejen) jaderné bezpečnosti. V provozu jaderných elektráren nejen v ČR, ale na celém světě, je kladen důraz na školení a výcvik personálu, jehož činnost má možné dopady do jaderné bezpečnosti.

Veškeré výsledky z hodnocení oblasti Lidský faktor v rámci Periodického hodnocení bezpečnosti spolu se zpětnou vazbou z hodnocení odchylek od normálního provozu dává managementu jaderné elektrárny velmi cenné podklady pro předcházení opakování, případně vzniku dalších obdobných událostí a tím k omezení rizika vzniku nežádoucích provozních událostí

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

BEZPEČNOSTNÍ NÁVODY SÚJB *Bezpečné využívání jaderné energie a ionizujícího záření Systém řízení Jaderná bezpečnost BN-JB-1.1 (Rev. 0.2)*. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2021. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN_JB_1.1_Rev.0.2_System_rizeni.pdf

BEZPEČNOSTNÍ NÁVODY SÚJB *Jaderná bezpečnost BN-JB-1.3 (Rev. 0.0)*. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2020. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN-JB-1.3_Obsah_bezpecnostnich_zprav.pdf

BEZPEČNOSTNÍ NÁVODY SÚJB *Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti, jaderná bezpečnost BN-JB-2.5(Rev. 1.0)*. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2018. Dostupné také z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Navod-BN-JB-2-5-Rev1.pdf>

ČESKO. Zákon č. 263/2016 Sb. (*Atomový zákon*) Sbírka zákonů ČR. Ročník 2016

ČEZ ME 1049, *Periodické hodnocení bezpečnosti (Strategie přístupu k periodickému hodnocení bezpečnosti)*

ČSN ISO 31000:2018, *Management rizik: Principy a směrnice*. 2018.

ČSN IEC 60050-692 (330050) - *Výroba, přenos a rozvod elektrické energie: Spolehlivost a kvalita služby elektrizačních soustav*. 2019.

Fakulta bezpečnostního inženýrství VŠB–TUO, *Spolehlivost lidského činitele* [online] dostupné z: https://fbiweb.vsb.cz/safeteach/images/pdf/prezentace/Spolehlivost_lidskeho_cinitele.pdf

IAEA-SSG-3. *Development and Application od level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants*. IAEA, Vienna, 2010. ISBN 978–92–0–114509–

IAEA *Human and Organizational Aspects of Assuring Nuclear Safety — Exploring 30 Years of Safety Culture. Proceedings of an International Conference Held in Vienna, Austria, 22–26 February 2016* IAEAL 18-01212 | ISBN 978–92–0–103918–7 May 2019

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Human Factors Engineering in Design of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-51*, IAEA, Vienna (2019) [cit. 2023-04-24]. Ke stažení dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1843_Web.pdf

MEZINÁRODNÍ AGENTURA PRO ATOMICKOU ENERGII, *Atributy Full Scope Level 1 Probabilistic Safety Assessment (PSA) pro aplikace v jaderných elektrárnách*, IAEA-TECDOC-1804, IAEA, Vídeň (2016) [cit. 2023-04-24]. Ke stažení dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1804web.pdf>

PROCHÁZKOVÁ, Dana. *Bezpečnost a krizové řízení*. POLICE HISTORY, Praha 2006, 255p. ISBN 80-86477-35-5

PROCHÁZKOVÁ, Dana. *Critical Infrastructure Safety Management*. In: *Reliability, Risk and Safety. Theory and Applications*. ISBN 978-0-415-55509-8, CRC Press / Balkema, Leiden 2009, 1875- 1882, CD ROM ISBN 978-0-203-85975-9.

PROCHÁZKOVÁ, Dana. *Analýza a řízení rizik*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04841-2.

PROCHÁZKOVÁ, Dana. *Řízení rizik procesů a bezpečnost složitých technických děl* V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06786-4.

Prediktivní analýzy spolehlivosti a možnosti jejich využití. 1. Praha: Česká společnost pro jakost, 2015. ISBN 978-80-7231-965-7. Dostupné také z: https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Clenstvi/Centra/Sborniky_spolehlivost/19_2_60CSJ_OSS_SBORNIK_2015_final.pdf

PSA Pravidelnostini hodnoceni bezpecnosti (Ucebni texty pro pripravu personalu JE) Brno, 2000

ŘEHÁK, David, *Úvod do problematiky řízení rizik* [online], Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/David-Rehak/publication/261437852_Uvod_do_problematiky_rizeni_rizik/links/54cfa1280cf298d65664cee0/Uvod-do-problematiky-rizeni-rizik.pdf

SKŘEHOT, P.A. *Identifikace zdrojů nebezpečí a vyhodnocení rizik. Edice Řízení bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v zodpovědné firmě. Personální a sociálně právní kartotéka*. 2016, č. 12. ISBN 1211-9482

SKŘEHOT, Petr...[et.al.]. 2009 *Prevence nehod a havárií; 2.díl:Mimořádné události a prevence nežádoucích následků. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce a T-SOFT*, 2009, 595 s., ISBN 978-80-86973-73-9.

SMEJKAL, V., Rais, K., 2013. *Řízení rizik ve firmách a jiných organizacích. 4. vydání. Praha: Grada Publishing, a. s.* 488 s. ISBN: 978-80-247-4644-9.

STRÄTER, O. 2005. *Cognition and Safety*. 1. vyd. Ashgate. ISBN 0-7546-4325-5.

SWAIN, A. D.; GUTTMANM, E. *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, NUREGKR-1275 (US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC) 222, 1983.

Vyhláška č. 162/2017 *o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona*

35 let od havárie v Černobylu (SÚJB). SÚJB [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/dnes-si-pripominame-35-let-od-havarie-na-cernobylske-jaderne-elektrarne>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AZ Aktivní zóna reaktoru

BOZP Bezpečnost a ochrana zdraví při práci

ČSN Česká státní norma

ETA Event Tree Analysis

FTA Fault Tree Analysis

HRA Analýza lidské spolehlivosti

JE Jaderná elektrárna

LPSA Living Probabilistic Safety Assessment

PSA Probabilistic Safety Assessment (Pravděpodobnost hodnocení bezpečnosti)

RA Radioaktivní

SŘ Systém řízení

SÚJB Státní úřad pro jadernou bezpečnost

ŽP Životní prostředí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Heinrichova pyramida Zdroj: EBOZP	14
Obrázek 2. Člověk – stroj – pracovní systém, Zdroj: VŠB–TUO	18
Obrázek 3. Příklad vyjádření hodnot při jednotlivých typech analýz.....	24
Obrázek 4. Proces řízení rizika (ČSN ISO 31000:2018), Zdroj: PECB	28
Obrázek 5. Hierarchie výsledků PSA, Zdroj: ČEZ.....	33
Obrázek 6. Kontaminace Cs-137 na území Evropy (1998), Zdroj: SÚJB.....	37
Obrázek 7. Srovnání havárií v elektrárnách Černobyl a Fukušima, Zdroj: SÚJB.....	37