

Využití Bayesovských sítí v posuzování rizik závažných havárií

Petr Trávníček¹, Luboš Kotek²

¹ Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky, Zemědělská 1, 613 00 Brno, e-mail: petr.travnicek@mendelu.cz

² Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Odbor výrobních systémů a virtuální reality, Technická 2896/2, 616 69 Brno

Abstrakt

V příspěvku je prezentováno možné využití Bayesovských sítí (BN) v rámci posuzování rizik závažných havárií. Cílem příspěvku je demonstrovat vlastnosti BN a poukázat na výhody a nevýhody využití tohoto nástroje na případové studii. V rámci případové studie byl nejdříve definován posuzovaný systém, včetně iniciační události, která by mohla vést k havarijním scénářům. Tato situace byla analyzována nejdříve pomocí konvenční techniky, konkrétně analýzy stromu událostí (ETA). Následně byla provedena konverze ETA do BN. Po provedení konverze byly zváženy jiné faktory, které mohou ovlivnit výsledek a které je obtížné zahrnout do konvenčních technik posuzování rizik. Tyto faktory byly poté zahrnuty do procesu posuzování rizik s využitím BN. V závěru jsou shrnuty výhody a nevýhody BN.

Klíčová slova: podmíněná pravděpodobnost, Bayesova věta, ETA, konverze

1. Úvod

Bayesovskou síť (BN) je možné definovat jako acyklicky orientovaný graf, který sestává z uzlů, které jsou propojeny hranami. Tyto hrany reprezentují mezi uzly příčinné vztahy (Pasman and Rogers, 2018). BN je možné využít pro stanovení odhadů pravděpodobnosti vybraných jevů. V oblasti posuzování rizik závažných havárií se BN používají již řadu let. Uzly sítě mohou reprezentovat například zařízení pro zabránění nebo zmírnění následků závažné havárie, samotný následek havárie, ale také organizační faktory, které mohou mít na výsledek vliv. Hrany sítě potom směřují od příčiny k následku. Přičemž následek může mít i více příčin.

Při budování sítě je tedy důležité stanovit seznam uvažovaných uzlů, určit kauzální vztahy mezi těmito uzly a stanovit odhady pravděpodobnosti jednotlivých jevů pomocí pravděpodobnostních tabulek. Pro příklad uvažujme jednoduchou síť sestávající z jevu A a z jevu B, přičemž jev A ovlivňuje jev B. Nejdříve je nutné stanovit pravděpodobnost, že jev A nastane. U jevu B je potom nutné stanovit hodnoty pravděpodobnosti, že jev B nastane za předpokladu, že jev A nastal nebo nenastal a hodnoty pravděpodobnosti, že jev B nenastane za předpokladu, že jev A nastal nebo nenastal. V takovém případě, bude pravděpodobnostní tabulka zjevně tvořená maticí o velikosti 2x2.

Silnou stránkou BN je především přehledná grafická reprezentace kauzálních vztahů. To je důležité především při prezentaci výsledků studie posuzování rizik odpovědným osobám, které provádí rozhodnutí.

Tradičně používané techniky jako jsou ETA a FTA sice prezentují rovněž příčinné vztahy, avšak u složitějších systémů mohou vztahy mezi prvky zanikat a prezentaci výsledků studie tak komplikovat. Aby mohly být výsledky v minulosti provedených analýz přehledně prezentovány, je možné využít postupů pro převod FTA nebo ETA do BN. Konverze ETA do BN je provedena například v práci Valeria Villa and Valerio Cozzani (2016), konverze FTA do BN potom v práci Khakzad et al. (2011). Případně provést „výstavbu“ zcela nové BN.

Výhodou BN oproti technikám ETA a FTA je možnost doplnění dalších faktorů, které mohou ovlivňovat výsledné hodnoty odhadů pravděpodobnosti, a které je jinak obtížné zahrnout do ETA či FTA. Tím dosáhneme zvýšení věrohodnosti studie.

V České republice se podle informací dostupných autorům technika BN v oblasti posuzování rizik závažných havárií nepoužívá. Cílem příspěvku je na jednoduché případové studii demonstrovat vlastnosti BN. BN prezentované v práci byly vytvořeny v softwaru AgenaRisk 10 (Agena, 2018).

2. Případová studie

Jedná se o bezpečnostní studii výrobní linky, která sestává z reaktoru, dvou potrubních tras, dvou čerpadel a zásobníků. Každé čerpadlo dopravuje odlišnou látku. Látky jsou označeny jako látka A a látka B. Látka A musí být vždy v přebytku oproti látce B. Pokud tomu tak nebude, dojde v reaktoru k výbuchu. Z textu je patrné, že se jedná o poměrně známý příklad pro studii HAZOP uvedený v příloze B.2 technické normy ČSN EN 61882.

V rámci studie bude dále předpokládáno, že výrobce, aby zabránil výbuchu reaktoru a následným škodám, vybavil výrobní linku akustickým alarmem a zařízením pro nouzové automatické odstavení výrobní linky pro případ, že látka A nebude v přebytku oproti látce B.

2.1 Analýza stromu události

Iniciační událostí je zde situace, kdy látka A nebude v přebytku oproti látce B. Předpokládaná pravděpodobnost této události je $P_1 = 0,01$. Zmírňující faktory jsou: akustický alarm, automatické odstavení výrobní linky. Účelem akustického alarmu je varovat obsluhu reaktoru před havarijní událostí. Při zaznění zvukového signálu musí obsluha opustit vnitřní prostor, kde je reaktor umístěn. Předpokládejme, že selhání akustického alarmu nastane s pravděpodobností $P_2 = 0,1$. Dále uvažujme, že selhání zařízení pro automatické odstavení výrobní linky nastane s pravděpodobností $P_3 = 0,05$. Strom události je graficky prezentován na Obrázku 1.

Iniciační událost	Spuštění alarmu	Automatické odstavení výrobní linky	Pravděpodobnost scénáře	Ozn. scénáře
0,01	0,9	0,95	0,00855	A
		0,05	0,00045	B
	0,1	0,95	0,00095	C
		0,05	0,00005	D

Obrázek 1

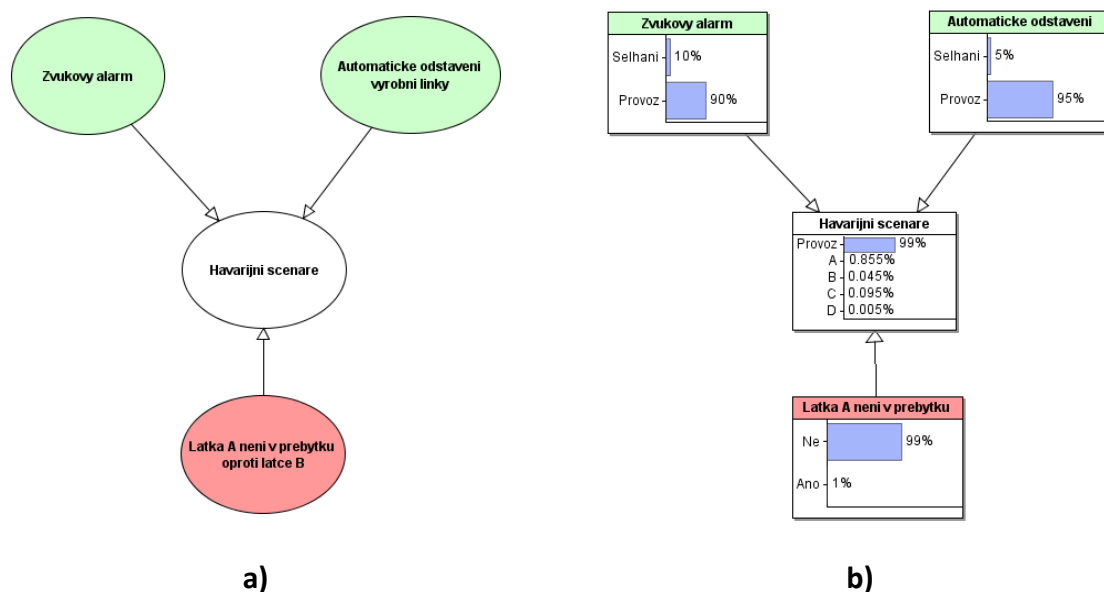
Na základě stromu události je možné identifikovat celkem 4 scénáře, které byly označeny velkými písmeny A až D. Odhadované pravděpodobnosti realizace těchto scénářů jsou uvedeny na Obrázku 1. Popis těchto scénářů je uveden v Tabulce 1.

Tabulka 1: Popis uvažovaných scénářů

Ozn. scénáře	Popis scénáře
A	Znehodnocení vyráběného produktu. Zvýšení tlaku v reaktorové nádobě, možný únik horkých plynů mimo nádobu reaktoru. V prostorách se nevyskytuje obsluha, havárie se tedy obejde bez škod na lidském zdraví. Finanční škody budou způsobené odstavením výrobní linky, náklady na čištění reaktoru a likvidaci znehodnoceného produktu.
B	Výbuch látky v reaktoru, roztržení reaktorové nádoby. V prostorách se nevyskytuje obsluha, havárie se tedy obejde bez škod na lidském zdraví. Finanční škody budou způsobené zničením části výrobní linky a odstavením výrobní linky.
C	Znehodnocení vyráběného produktu. Zvýšení tlaku v reaktorové nádobě, možný únik horkých plynů mimo nádobu reaktoru a popálení obsluhy reaktoru. Finanční škody budou způsobené odstavením výrobní linky, náklady na čištění reaktoru a likvidaci znehodnoceného produktu, případně finančním odškodněním obsluhy.
D	Výbuch látky v reaktoru, roztržení reaktorové nádoby. Usmrcení obsluhy reaktoru. Finanční škody budou způsobené zničením části výrobní linky, odstavením výrobní linky, finančním odškodněním pozůstalých, ztrátou reputace.

2.2 Konverze stromu události do BN

Strom události lze konvertovat do jednoduché Bayesovské sítě. Obecný postup pro konverzi je uveden například v práci Bearfield and Marsh (2005). Výsledek konverze je uveden na Obrázku 2a. Na obrázku 2b jsou poté uvedeny vstupní hodnoty a výsledky odhadu pravděpodobnosti pro jednotlivé scénáře.



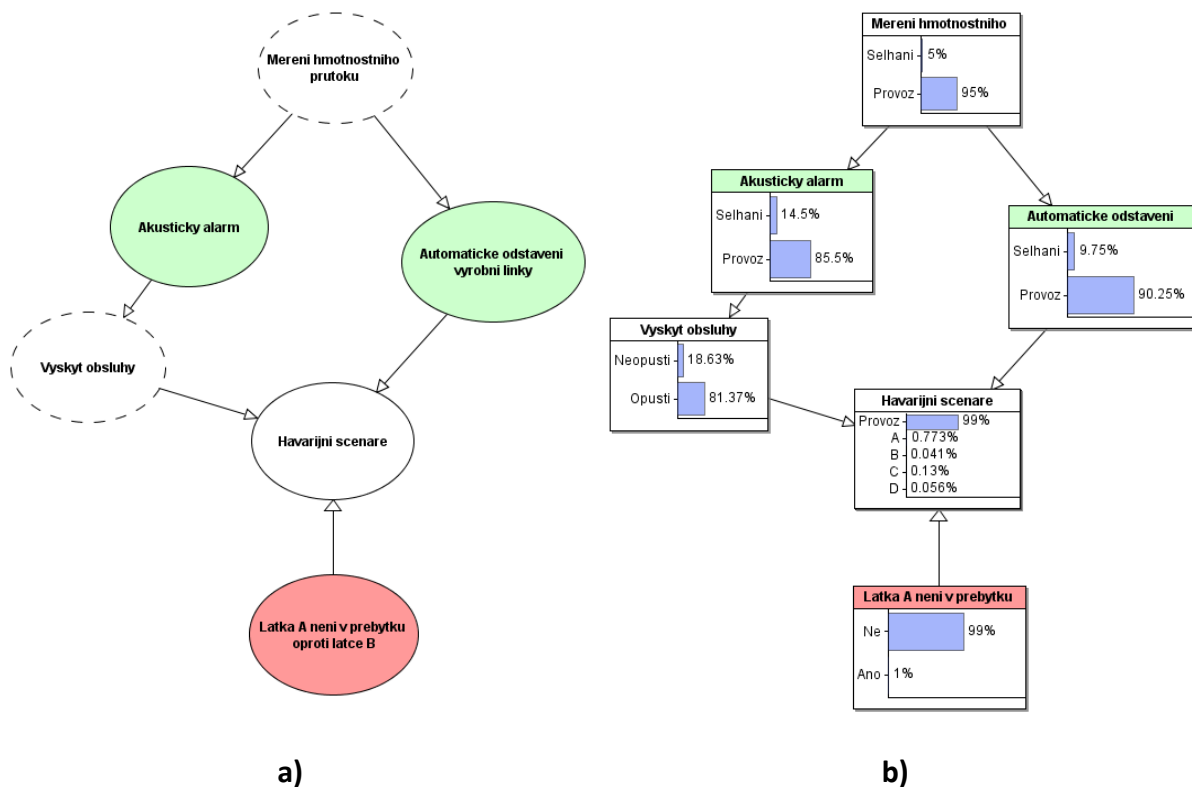
Obrázek 2: Grafická reprezentace Bayesovské sítě

Červeně podbarvený uzel reprezentuje iniciační událost, zeleně podbarvené uzly poté zmírňující faktory. Z obrázku 2 je zřejmé, že uzel „Havarijní scénáře“ je ovlivňován ostatními uzly. Uzel „Akustický alarm“ a uzel „Automatické odstavení linky“ se navzájem neovlivňují. Výsledky výpočtů odhadu pravděpodobností scénářů jsou identické jako v případě použití analýzy stromu událostí (ETA).

2.3 Zahrnutí dalších ovlivňujících faktorů

Jedno z omezení analýzy ETA (uváděno také v ČSN EN 62502) je nutnost pečlivého zvážení závislostí mezi zmírňujícími faktory, případně mezi iniciační událostí a zmírňujícími faktory. Tyto skryté závislosti je nutné identifikovat a zahrnout do odhadu pravděpodobnosti realizace scénáře. Pokud k tomu nedojde, mohou být odhady nepřiměřeně optimistické (viz ČSN EN 62502). Pomocí ETA je někdy obtížné tyto závislosti do výpočtu zahrnout a zejména graficky prezentovat. Zvláště, když jeden jev může ovlivňovat více zmírňujících faktorů zároveň. Například akustický alarm i automatické odstavení výrobní linky může být provedeno na základě měření hmotnostního průtoku látky proudící do reaktoru. V takovém případě může dojít k selhání alarmu nebo zařízení pro automatické odstavení nejen v případě vnitřní poruchy těchto zařízení, ale i v případě poruchy průtokoměru nebo jeho příslušenství. Dále se nelze spoléhat na to, že obsluha vždy opustí prostor při zaznění akustického signálu. Osoba při evakuaci může například zakopnout a upadnout. To jsou všechno faktory, které výsledné hodnoty odhadů pravděpodobností scénářů budou ovlivňovat. Závislosti jednotlivých faktorů lze poměrně snadno graficky prezentovat pomocí BN, viz Obrázek 3.

Předpokládejme, že měření hmotnostního průtoku selže s pravděpodobností $P_4 = 0,05$. Dále předpokládejme, že v případě zaznění zvukového signálu neopustí obsluha prostor s pravděpodobností $P_5 = 0,05$. Pokud alarm selže, bude se nacházet obsluha v prostoru s pravděpodobností $P_6 = 0,99$.



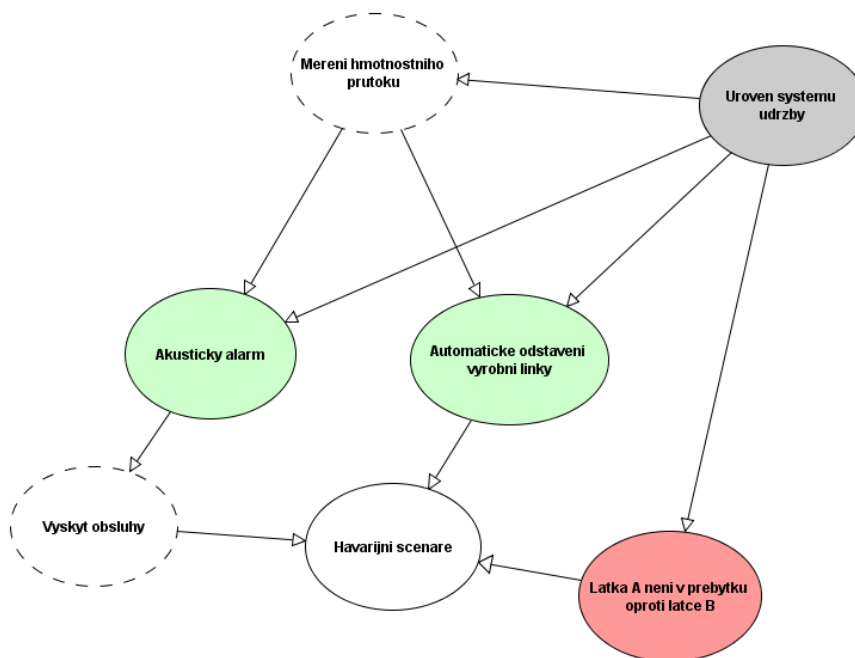
Obrázek 3: Grafická reprezentace Bayesovské sítě

Z obrázku 3a je zřejmé, že uzel „Havarijní scénáře“ neovlivňuje přímo uzel „Akustický alarm“, ale uzel „Vyskyt obsluhy“, což více odpovídá realitě a lze tedy na základě toho lépe definovat havarijní scénáře. Po zahrnutí dalších faktorů do výpočtu je zřejmé, že pravděpodobnosti jednotlivých scénářů se

v některých případech značně změnily. Důležité je zmínit především poměrně významný nárůst hodnoty scénáře D, který má ze všech uvažovaných scénářů největší následky.

Jednotlivé uzly mohou být ovlivněny také organizačními faktory, které lze do BN také zahrnout. Například může být uvažovaným organizačním faktorem úroveň systému údržby. Úroveň systému údržby bude ovlivňovat odhad pravděpodobnosti selhání jak zařízení pro měření hmotnostního průtoku, akustický alarm, zařízení pro automatické odstavení výrobní linky, tak i pravděpodobnost samotné iniciační události. Důvodem například je, že jedním ze scénářů proč může dojít k situaci, že látka A není v přebytku, je například selhání čerpadla dopravující látku A do reaktoru. Může být identifikováno samozřejmě více důvodů, které mohou ovlivnit odhad pravděpodobnosti iniciační události, ty lze do BN doplnit ve formě nových uzlů. Kauzální vztah bude poté směrem od nových uzlů k uzlu reprezentující iniciační událost.

BN reprezentující vztahy mezi uzlem „Úroveň systému údržby“ a ostatními uzly z Obrázku 2 je uveden na obrázku 3. Z něj je zřejmé, že uzel „Úroveň systému údržby“ ovlivňuje všechny uzly reprezentující situace, kde může dojít k selhání technického zařízení.



Obrázek 3: Bayesovská síť zahrnující organizační faktor

2.4 „Šíření důkazu“ v BN

Jednou z významných vlastností BN je schopnost evidovat důkazy a tato zjištění s využitím Bayesovy věty „šířit“ celou sítí. Výsledkem jsou změny hodnot pravděpodobností v jednotlivých uzlech sítě.

Jako příklad pro demonstraci této vlastnosti uvažujme situaci, že kvalitu systému údržby dokážeme měřit a jsme schopni odhadnout vliv kvality systému údržby na selhání jednotlivých zařízení, případně na pravděpodobnost toho, že se uskuteční iniciační událost. Pro jednoduchost si úroveň systému údržby rozdělme do třech tříd: 1) nízká, 2) střední, 3) vysoká úroveň systému údržby. Pokud uvažujeme střední úroveň systému údržby, odhadujeme, že hodnoty selhání zařízení zůstávají stejné, jako jsme uvažovali v předešlém textu. Pokud předpokládáme vysokou úroveň údržby, pak se hodnota odhadu pravděpodobnosti selhání zařízení sníží na polovinu, naopak, pokud uvažujeme nízkou úroveň systému údržby, pak se hodnota odhadu pravděpodobnosti selhání zařízení zvýší dvojnásobně.

Nyní si představme, že ve společnosti proběhl audit, při kterém bylo zjištěno, že úroveň systému údržby je na nízké, střední nebo vysoké úrovni. Máme tedy jakýsi „důkaz“, který můžeme zahrnout do výpočtu a díky Bayesově větě dojde k propagaci v celé síti. Výsledky výpočtů pro jednotlivé úrovně systému údržby jsou uvedeny v Tabulce 2. Z výsledků je zřejmé, že v případě střední úrovně systému údržby jsou podle předpokladu výsledky identické jako v případě výsledků uvedených na obrázku 2b.

Tabulka 2: Výsledky výpočtů

Úroveň systému údržby	Hodnoty odhadu pravděpodobnosti scénářů												
Nízká	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Havarijní scénare</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Provoz</td> <td>98%</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>1.234%</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>0.139%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>0.386%</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>0.241%</td> </tr> </tbody> </table>	Havarijní scénare		Provoz	98%	A	1.234%	B	0.139%	C	0.386%	D	0.241%
Havarijní scénare													
Provoz	98%												
A	1.234%												
B	0.139%												
C	0.386%												
D	0.241%												
Střední	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Havarijní scénare</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Provoz</td> <td>99%</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>0.773%</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>0.041%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>0.13%</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>0.056%</td> </tr> </tbody> </table>	Havarijní scénare		Provoz	99%	A	0.773%	B	0.041%	C	0.13%	D	0.056%
Havarijní scénare													
Provoz	99%												
A	0.773%												
B	0.041%												
C	0.13%												
D	0.056%												
Vysoká	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Havarijní scénare</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Provoz</td> <td>99.5%</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>0.429%</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>0.011%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>0.046%</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>0.014%</td> </tr> </tbody> </table>	Havarijní scénare		Provoz	99.5%	A	0.429%	B	0.011%	C	0.046%	D	0.014%
Havarijní scénare													
Provoz	99.5%												
A	0.429%												
B	0.011%												
C	0.046%												
D	0.014%												

3. Závěrečné shrnutí

Mezi nesporné výhody BN patří jednoduchá grafická prezentace kauzálních vztahů, možnost rychlé aktualizace hodnot odhadů pravděpodobností jednotlivých událostí, které jsou reprezentovány uzly. Dále také možnost evidence důkazů. Poměrně intuitivně lze zahrnout další faktory, které mohou mít vliv na výstup studie. To vše může vést ke zvýšení důvěryhodnosti studie.

Naopak mezi nevýhody patří především to, že je prakticky nemožné provádět výpočty bez příslušného softwarového vybavení. Navíc při budování složitějších sítí je nutné mít určité zkušenosti a dovednosti, jinak čas určený na vytváření sítě a zadávání hodnot do pravděpodobnostních tabulek se neúměrně zvyšuje (viz kombinatorická exploze).

Uvažujme například, že havarijní scénář je pro jednoduchost ovlivněn pouze uzlem „Výskyt osob“ a uzlem „Úroveň systému údržby“. Uzel „Výskyt osob“ má pouze dva stavy: vyskytuje se nebo se nevyskytuje. Uzel „Úroveň systému údržby“ má celkem tři stavy: nízká, střední a vysoká úroveň. Uzel „Havarijní scénář“ má celkem 5 uvažovaných scénářů. Potom v uzlu „Havarijní scénář“ máme 30 různých kombinací. Zkusme rozšířit klasifikaci v uzlu „Úroveň systému údržby“ (například do 5 tříd, tj. na pět stavů), a v uzlu „Výskyt osob“ na tři třídy (například žádný výskyt osoby, výskyt jedné osoby, výskyt dvou osob). Potom vznikne $5 \times 3 \times 5$ kombinací, tj. 75 možných stavů, které je nutné vyplnit v pravděpodobnostní tabulce v rámci uzlu „Havarijní scénář“.

Literární zdroje

Agena, 2018. AgenaRisk – Bayesian Network Software for Risk Analysis and Decision Making. Agena, Ltd., Cambridge, UK.

ČSN EN 62502:2011 - Techniky analýzy spolehlivosti - Analýza stromu událostí (ETA).

ČSN EN 61882:2016 - Studie nebezpečí a provozuschopnosti (studie HAZOP) - Pokyn k použití.

Bearfield, G., Marsh, W., 2005. Generalising Event Trees Using Bayesian Networks with a Case Study of Train Derailment, in: Winther, R., Gran, B.A., Dahll, G. (Eds.), *Computer Safety, Reliability, and Security, Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 52–66. https://doi.org/10.1007/11563228_5

Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., 2011. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 925–932. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.03.012>

Pasman, H., Rogers, W., 2018. How trustworthy are risk assessment results, and what can be done about the uncertainties they are plagued with? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 55, 162–177. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.06.004>

Valeria Villa, Valerio Cozzani, 2016. Application of bayesian networks to quantitative assessment of safety barriers performance in the prevention of major accidents. *Chemical Engineering Transactions* 53, 151–156. <https://doi.org/10.3303/CET1653026>