

# Bayesovské siete - rozšírené možnosti analýzy spoľahlivosti (4)

Aleš Janota

## Leaky noisy-OR

Napriek zovšeobecneniu hradla OR, uzol noisy-OR neumožňuje modelovať skutočnosť, že subsystém  $S_1$  môže zlyhať aj vtedy, ak sú všetky komponenty funkčné, pretože vychádza z predpokladu  $P(S_1 = s_1 | D_1 = -d_1, Pr_1 = -pr_1, M_{12} = -m_{13}) = 0$ .

V spoľahlivostnom modelovaní je však často potrebné zahrnúť do modelu aj také príčiny, ktoré vyvolajú zlyhanie systému napriek funkčnosti všetkých modelovaných komponentov. Ide o príčiny zodpovedajúce združeným poruchám, ktoré sú spoločné pre viaceré, navzájom nezávislé entity, ktoré sme do modelu nezahrnuli. Na rozdiel od stromu poruchových stavov, vo formalizme bayesovskej siete nie je potrebné zasahovať do štruktúry siete (pridávať ďalší uzol), pretože príslušnú pravdepodobnostnú závislosť je možné vyjadriť priamo v CPT. Riešením je rozšírenie binárneho uzla noisy-OR o situácie, ktorých dôsledok môže byť pravdivý aj vtedy, ak všetky príčiny sú nepravdivé [5]. Pravdepodobnosť takej situácie býva v anglickej terminológii označovaná ako leak (diery) alebo background probability (apriórna pravdepodobnosť) a v oblasti spoľahlivostného modelovania zodpovedá výskytu združenej poruchy. Rozšírený model býva označovaný ako leaky noisy-OR („deravé zašumené“ OR hradlo) a vo všeobecnosti je určený pre situácie, keď model nezachytáva všetky možné príčiny  $X_i$  dôsledku  $Y$ . Uvedenú situáciu modelujeme pridaním uzla  $L$  k množine rodičovských uzlov a zavedením dodatočného parametra  $p_l$  („pravdepodobnosti diery“), ktorý reprezentuje účinok všetkých nemodelovaných príčin dôsledku  $Y$ . Pravdepodobnosť  $P(Y = y | X_1 = -x_1, \dots, X_n = -x_n)$  je potom interpretovaná ako  $P(Y = y | X_1 = -x_1, \dots, X_n = -x_n, L = l) = p_l$ , kde  $p_l$  reprezentuje pravdepodobnosť, že pravdivosť dôsledku  $Y$  nastane spontánne, teda pri absencii všetkých explicitne modelovaných príčin. Vzťah (3) sa v dôsledku toho zmení na:

$$P(Y = y | X) = -1(1 - p_l) \prod_{X_i \in \pi_X} (1 - p_i) \quad (4)$$

V našom príklade by sme mohli napríklad podsystému  $S_1$  priradiť pravdepodobnosť výskytu združenej poruchy  $l_{S_1} = 0,02$  pri funkčnosti všetkých ostatných komponentov. Ošetríme tak skutočnosť, že sme nezohľadnili niektoré neznáme príčiny zlyhania systému, či už z dôvodu, že ich presne nepoznáme alebo z dôvodu, že nepokladáme tvorbu dokonalejšej reprezentácie systému za potrebnú. V tomto prípade pri výpočte pravdepodobnosti zlyhania podsystému  $S_1$  pri poruche diskovej jednotky  $D_1$  i procesora  $Pr_1$  a pri fungujúcej pamäťovej jednotke  $M_{13}$  dostaneme:

$$P(S_1 = s_1 | D_1 = d_1, Pr_1 = pr_1, M_{12} = -m_{13}) = 1 - (0,01 \cdot 0,005 \cdot (1 - l_{S_1})) = 0,999951$$

čo predstavuje veľmi mierne zvýšenie pravdepodobnosti zlyhania  $S_1$  oproti predchádzajúcemu prípadu (bez uvažovania vplyvu združenej poruchy). Pre úplnosť je potrebné upozorniť na skutočnosť, že existujú alternatívne prístupy k elicítácii parametrov uzla leaky noisy-OR, ktoré sú však vzájomne konvertibilné [2], [5]. Ak sú parametre hradla noisy-OR získané učením z údajov, prístup podľa [5] je vhodnejší, pretože pozorované početnosti v sebe obsahujú parameter  $p_l$ , ktorý je z definície vždy prítomný.

## Noisy-AND

S podobnými úvahami je možné pristúpiť ku generalizácii logického hradla AND a získaniu uzla nazývaného noisy-AND. V prípade deterministického AND je premenná  $Y$  pravdivá ( $Y = y$ ), ak sú pravdivé všetky príčiny  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, a$ ). V modeli noisy-AND však stav, keď niektorá z príčin  $X_i$  je nepravdivá, ešte nemusí implikovať definitívnu nepravdivosť dôsledku  $Y$ . Každú takú príčinu si opäť môžeme predstaviť ako uzol, ktorý je doplnený o určitý, tentokrát posilňujúci (angl. enabling) vplyv  $q_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  (obr. 5b, publikovaný v *AT&P journali 6/2003*). Tieto vplyvy reprezentujú šumové parametre uzla (duálne účinkom inhibítorov v prípade noisy-OR), ktoré opäť umožňujú zaviesť požadovanú neurčitosť. Ak  $X_i$  je jediná nepravdivá príčina, dôsledok je nepravdivý s pravdepodobnosťou  $p_i = (1 - q_i)$ . To znamená, že pri modelovaní je potrebné špecifikovať parametre  $p_i = P(Y = y | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_i = -x_i, \dots, X_{n-1} = x_{n-1}, X_n = x_n)$  na získanie hodnôt

$$P(Y = y | X) = \prod_{X_i \in \pi_X} p_i \quad (5)$$

Nepravdivosť  $Y$  je monotónnou funkciou počtu nepravdivých príčin. Podsystém diskových jednotiek  $D_1$  v našom príklade zlyhá vtedy, ak zlyhajú obidve diskové jednotky  $D_{11}$  a  $D_{12}$ . Pri podrobnejšom modelovaní môžeme predpokladať, že spojenie zálohovaných diskov nie je dokonalé a existuje malá pravdepodobnosť (napr. 0,001), že diskový podsystém zlyhá napriek tomu, že jeden disk je funkčný (napr.  $P(D_1 = d_1 | D_{11} = -d_{11}, D_{12} = d_{12}) = P(D_1 = d_1 | D_{11} = d_{11}, D_{12} = -d_{12}) = 0,001$ ). Potom môžeme vypočítať pravdepodobnosť poruchy  $D_1$ , ak sú obidva disky funkčné ako  $P(D_1 = d_1 | D_{11} = -d_{11}, D_{12} = -d_{12}) = 0,001 \cdot 0,001 = 0,000001$ . Ak označíme  $p_1 = P(D_1 = d_1 | D_{11} = -d_{11}, D_{12} = d_{12})$  a  $p_2 = P(D_1 = d_1 | D_{11} = d_{11}, D_{12} = -d_{12})$ , potom všeobecné vyjadrenie CPT pre uvažovaný uzol  $D_1$  je podľa tab. 2.

$D_{11}$	$D_{12}$	$P(D_1 = d_1   \dots)$	$P(D_1 = -d_1   \dots)$
$-d_{11}$	$-d_{12}$	$p_1 \cdot p_2$	$1 - p_1 \cdot p_2$
$-d_{11}$	$d_{12}$	$p_1$	$1 - p_1$
$d_{11}$	$-d_{12}$	$p_2$	$1 - p_2$
$d_{11}$	$d_{12}$	1	0

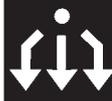
Tab.2 CPT pre uzol  $D_1$  typu noisy-AND

Z posledného riadku tabuľky vyplýva, že podsystém  $D_1$  určite zlyhá pri poruche obidvoch komponentov. Ak by toto tvrdenie nemalo platiť, uvedený predpoklad je možné zmeniť na základe analógie tvorby modelu leaky noisy-OR, a to zavedením modelu leaky noisy-AND.

## Použitie viacstavových premenných

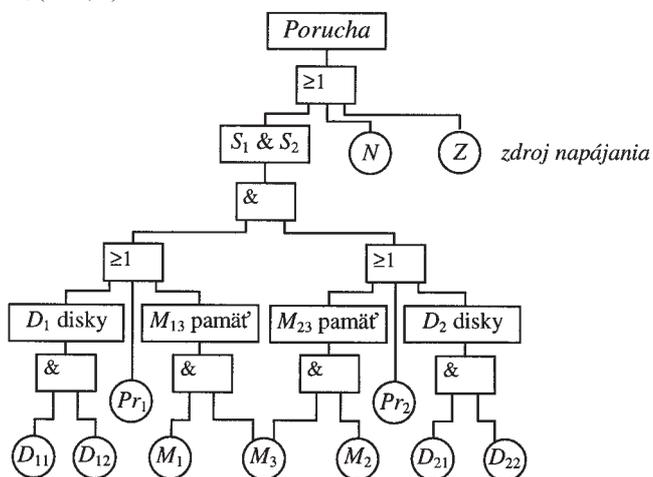
Doteraz sme predpokladali binárnosť všetkých premenných. V mnohých aplikáciách môže byť užitočné použiť viacstavové alebo  $n$ -rozmerné premenné. Typicky ide o situácie, kde je potrebné modelovať výskyt rôznych druhov porúch [3], [4], rôzne dôsledky porúch na fungovanie systému alebo rôzne úrovne činnosti medzi normálnou prevádzkou a poruchou [9]. Bayesovské siete umožňujú prácu s viacstavovými premennými, ktoré reprezentujú jed-





notlivé viacstavové prvky. Na  $n$ -rozmerné premenné je možné aplikovať generalizáciu modelu noisy-OR (nazývanú noisy-MAX) a generalizáciu modelu noisy-AND (nazývanú noisy-MIN). Okrem spomenutých modelov je možné definovať aj ďalšie modely, opisujúce požadované nedeterministické interakcie medzi príčinami a dôsledkom (noisy-XOR, noisy-ADDER atď.).

V analýze stromu poruchových stavov je ďalej problematické zaoberať sa prvkami, ktoré zlyhávajú určitým závislým spôsobom. Napríklad abnormálne fungovanie jedného prvku môže spôsobovať závislé poruchy iných prvkov. Predpokladajme, že v našom príklade zjenníme opis multiprocessorového systému pridaním zdroja napájania  $Z$  tak, že jeho výpadok spôsobí poruchu celého systému. Jeho nesprávne fungovanie však môže napríklad spôsobiť len poruchu procesorov. Pri reprezentácii prostredníctvom stromu poruchových stavov pridáme k vrcholovej udalosti nový vstup predstavujúci novú možnú príčinu zlyhania systému (obr. 6). Vo formalizme stromu poruchových stavov však nie sme schopní modelovať závislosť medzi poruchou  $Z$  a poruchami procesorov  $Pr_i$  ( $i = 1, 2$ ).

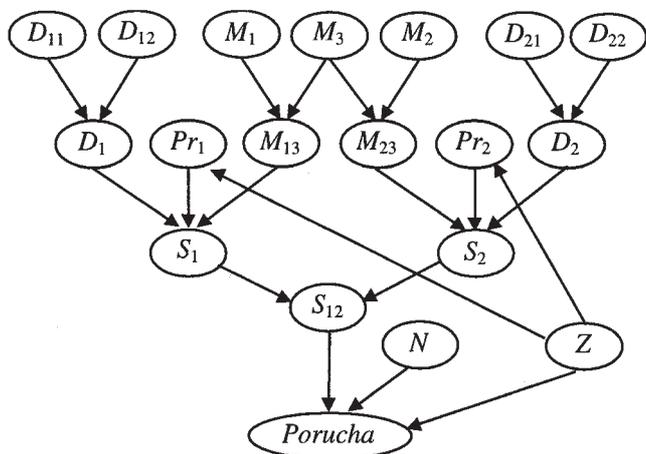


Obr.6 Modifikovaný strom poruchových stavov po zavedení napájacieho zdroja  $Z$

V modeli bayesovskej siete môžeme byť omnoho presnejší. V snahe viac sa priblížiť realite by sme činnosť zdroja napájania  $Z$  mohli predpokladať v 3 rôznych režimoch:

- a) správna činnosť: na výstupe  $Z$  je nominálne napätie;
- b) nesprávna činnosť: na výstupe  $Z$  je abnormálne vysoké napätie;
- c) žiadna činnosť: na výstupe  $Z$  nie je žiadne napätie.

V poslednom režime je, samozrejme, v poruche celý systém. Pre druhý režim však môžeme vďaka možnosti zavedenia 3-stavovej premennej modelovať zvýšenú podmienenú závislosť zlyhania procesorov.



Obr.7 Modifikovaná bayesovská sieť zodpovedajúca obr. 6

### Záver

Na jednoduchom príklade sme naznačili možnosti, ktoré nám v porovnaní s tradičnými metódami analýzy spoľahlivosti ponúka formalizmus bayesovských sietí. Náročné výpočty sú zvládnutelné vhodnými softvérovými nástrojmi, využívajúcimi rôzne odvodené (inferenčné) algoritmy (presné alebo aproximatívne). Z najznámejších nástrojov možno spomenúť napr. Hugin Expert A/S, MSBN (Microsoft Belief Network), BN Toolbox pre Matlab, Java Bayes, Bayes Builder, BN Toolkit, Ergo a iné. Článok vznikol za podpory grantovej agentúry Slovenskej republiky VEGA, č. grantu 1/8261/01 „Uplatnenie umelej inteligencie v riadení kritických procesov“ a grantu 1/8182/01 „Teoretické podklady pre výpočet akceptovateľného rizika v riadení dopravného procesu, najmä železničného“.

### Literatúra

- [1] BOBBIO, A. – PORTINALE, L. – MINICHINO, M. – CIANCAMERLA, E.: Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. Reliability Engineering and System Safety, 71. Elsevier 2001, s. 249 – 260.
- [2] DÍEZ, F. J.: Parameter adjustment in Bayes networks. The generalized Noisy-OR gate. In: Proceedings of the Ninth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-93). Washington, D. C. 1993, s. 99 – 105.
- [3] DOYLE, S. A. – DUGAN, J. B. – PATTERSON-HINE, A.: A combinatorial approach to modeling imperfect coverage. IEEE Trans Reliabil, Vol. 44, 1995, s. 87 – 94.
- [4] GARRIBA, S. – GUAGNINI, E. – MUSSIO, P.: Multiple-valued logic trees: meaning and prime implicants. IEEE Trans Reliabil, R-34, 1985, s. 463 – 472.
- [5] HENRION, M.: Some practical issues in constructing belief networks. Uncertainty in Artificial Intelligence 3. Eds., L. N. Kanal, T.S. Levitt, and J. F. Lemmer. Elsevier Science Publishers B. V., North Holland 1989, s. 161 –173.
- [6] MALHOTRA, M. – TRIVEDI, K.: Dependability modeling using Petri nets. IEEE Trans Reliabil, R-44, 1995, s. 428 – 440.
- [7] PEARL, J.: Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of Plausible Inference. Mathematics and Its Applications. Morgan Kaufmann, San Mateo, California 1988 (Revised in 1997).
- [8] RÁSTOČNÝ, K.: Model for safety analysis of the interlocking system. In: Proc. of 3-rd international scientific conference ELEKTRO '99. Section: Information & safety systems. University of Žilina 1999, s. 13 – 18.
- [9] WOOD, A. P.: Multistate block diagrams and fault trees. IEEE Trans Reliabil, R-34, 1985, s. 236 – 240.

Ing. Aleš Janota, PhD., Eur Ing

Katedra radiacích a informačných systémov  
 Elektrotechnická fakulta Žilinskej univerzity  
 Veľký diel, 010 26 Žilina  
 Tel.: 041/565 55 59  
 e-mail: ales.janota@fel.utc.sk