

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

**AUTOREFERÁT
DIZERTAČNEJ PRÁCE**

Žilina, apríl 2021

Ing. Peter Sedláček

Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky

Ing. Peter Sedláček

Autoreferát dizertačnej práce

Analýza spoľahlivosti nekoherentných systémov založená na metódach štruktúrnej funkcie

na získanie akademického titulu „**philosophiae doctor**“ (v skratke **PhD.**)
v študijnom programe doktorandského štúdia
aplikovaná informatika

v študijnom odbore:
informatika

Žilina, apríl 2021

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na katedre informatiky, Fakulte riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline

- Predkladateľ:** Ing. Peter Sedláček
Katedra informatiky
Fakulta riadenia a informatiky
Žilinská univerzita v Žiline
- Školiteľ:** doc. Ing. Miroslav Kvaššay, PhD.
Katedra informatiky
Fakulta riadenia a informatiky
Žilinská univerzita v Žiline
- Oponent:** prof. Ing. Aleš Janota, PhD., EurIng
Katedra riadiacich a informačných systémov,
Fakulta elektrotechniky a informačných technológií,
Žilinská univerzita v Žiline
- Oponent:** prof. Ing. Radim Briš, CSc.
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
VŠB – Technická univerzita
Ostrava
- Oponent:** Associate Prof. Dr. Nicolae Brinzei
Research Center for Automatic Control of nancy (CRAN) ENSEM
Université de Lorraine
France

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 19.8.2021 o 12:30 h. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou pracovnou skupinou odborovej komisie v študijnom odbore **informatika** v študijnom programe **aplikovaná informatika**, vymenovanou dekanom Fakulty riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline dňa

prof. Ing. Karol Matiaško, PhD.
predseda pracovnej skupiny odborovej komisie
v študijnom odbore **informatika**
v študijnom programe **aplikovaná informatika**

Fakulta riadenia a informatiky
Žilinská univerzita
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Obsah

Úvod	2
1. Základné definície a princípy v spoľahlivostnom inžinierstve	3
Štruktúrna funkcia	4
Reprezentácie štruktúrnej funkcie	4
Logický diferenciálny počet	5
Koherentné a nekoherentné systémy	6
Kvantitatívna analýza	7
2. Nekoherentné systémy	8
Štruktúrna funkcia nekoherentných viacstavových systémov.....	9
Orientovaná parciálna logická derivácia nekoherentných viacstavových systémov.....	10
Viachodnotový rozhodovací diagram	12
Reprezentácia viachodnotového rozhodovacieho diagramu pomocou poľa susedov	12
Neúplne definovaná štruktúrna funkcia viacstavového systému	13
3. Model spoľahlivosti softvéru založený na syntaktickom strome	14
4. Prípadové štúdie	14
Záver.....	14
Summary	16
Použité zdroje.....	17
Zoznam publikovaných prác	20

Úvod

Spôľahlivosť je v súčasnosti dôležitá charakteristika akéhokoľvek systému. Analýza spoľahlivosti je komplexný proces, ktorého prvým krokom je tvorba matematickej reprezentácie skúmaného systému [1]–[3]. Matematický model systému je tvorený s ohľadom na špecifiká analýzy systému a vlastností daného systému. V závislosti od počtu úrovní výkonností môžu byť matematické modely rozdelené na dve skupiny [1]: dvojstavové systémy a viacstavové systémy.

Oba tieto typy môžu byť v závislosti od vplyvu degradácie komponentu na funkčnosť systému koherentné a nekoherentné [4]–[6]. Degradácia alebo zlyhanie komponentu koherentného systému nemôže viesť k zvýšeniu úrovne funkčnosti systému a všetky komponenty koherentného systému sú relevantné pre fungovanie systému [5], [7]. V spoľahlivostnom inžinierstve sú koherentné systémy v porovnaní s nekoherentnými intenzívne študované.

Analýza spoľahlivosti nekoherentných systémov vyžaduje špeciálne metódy. Je to spôsobené nemonotónnym vplyvom zlyhania komponentu na funkčnosť systému. Najčastejší prístup k nekoherentným dvojstavovým systémom je založený na analýze prostých implikantov. Tieto boli použité pri vývoji metód na ohodnotenie nekoherentných systémov v publikáciách [8]–[11]. Primárne implikanty boli navrhnuté v [11] ako analógia k množinám minimálnych rezov na definovanie minimálnych kombinácií zlyhaní komponentov, ktoré spôsobia zlyhanie systému. Stromy poruchových stavov a množiny minimálnych rezov sú efektívnym nástrojom na analýzu koherentných systémov, ale nie sú ekvivalentné s primárnymi implikantami a neberú do úvahy nemonotónny vplyv zlyhania komponentu nekoherentného systému.

Na rozdiel od dvojstavových systémov, nekoherentné viacstavové systémy nie sú intenzívne študované. Existujú štúdie takýchto systémov, kde sa zvažujú niektoré teoretické aspekty [12]–[15], ale metódy analýzy neboli ešte rozvinuté. Je to spôsobené ťažkosťami a nepresnosťami v teoretickej interpretácii nekoherentných viacstavových systémov a taktiež výpočtovej zložitosti analýzy takýchto systémov. Koncept koherencie a nekoherencie dvojstavových systémov bol zovšeobecnený pre viacstavové systémy v publikáciách [13]–[15]. Výpočet charakteristík a ukazovateľov nekoherentných viacstavových systémov bol prezentovaný v publikáciách [16]–[18]. Bossche v publikáciách [16], [17] navrhol frekvenčné ohodnotenie spoľahlivosti nekoherentných viacstavových systémov založené na stromoch poruchových stavov s aplikáciou prostých implikantov. Autor zovšeobecnil koncept prostých implikantov z nekoherentných dvojstavových systémov a upravil prístup dvojhodnotovej logiky pre analýzu viacstavových systémov. Metódy viachodnotovej logiky sa používajú na definovanie ukazovateľov dôležitosti nekoherentných viacstavových systémov v publikácií [18]. Avšak autori navrhli výpočet ukazovateľov dôležitosti intuitívne a neanalyzovali teoretický základ a definície nekoherentných viacstavových systémov.

V rámci práce sme sa preto rozhodli stanoviť si nasledujúce ciele:

1. Preskúmať metódy analýzy spoľahlivosti viacstavových nekoherentných systémov.

2. Preskúmať metódy redukcie výpočtovej zložitosti analýzy štruktúrnej funkcie.
3. Preskúmať metódy tvorby štruktúrnej funkcie založené na neúplne definovaných dátach.

Okrem týchto cieľov sme sa rozhodli rozšíriť náš výskum taktiež na spoľahlivosť softvéru a preskúmať možnosti reprezentácie softvéru vo forme štruktúrnej funkcie.

V rámci práce navrhujeme nový prístup pre analýzu viacstavových nekoherentných systémov založených na matematických metódach viachodnotovej logiky. Tento prístup vychádza zo štúdií koherentných viacstavových systémov, ktoré boli prezentované v publikáciách [19], [20]. Podobne ako v daných štúdiách, skúmaný systém je reprezentovaný pomocou štruktúrnej funkcie, ktorá mapuje všetky možné stavy komponentov na úroveň výkonnosti systému. Podľa [19] štruktúrna funkcia môže byť interpretovaná ako viachodnotová logická funkcia a tento fakt nám umožňuje použitie metód viachodnotovej logiky pri analýze a ohodnotení viacstavového systému. V našej práci navrhujeme prístup pomocou orientovaných parciálnych logických derivácií na výpočet kritických stavov komponentov systému pre nekoherentné systémy. Vývoj tohto prístupu je založený na analýze definícií nekoherentných viacstavových systémov navrhnutých a preskúmaných v publikáciách [12]–[15], [21].

1. Základné definície a princípy v spoľahlivostnom inžinierstve

Ohodnotenie spoľahlivosti systému je komplexný proces, ktorého výsledkom sú informácie o systéme a jeho charakteristiky z pohľadu spoľahlivosti ako spoľahlivosť, ukazovatele dôležitosti, kritické stavy atď. Celá analýza je prispôbená v závislosti od charakteristík, ktoré chceme získať. Toto prispôbenie pozostáva z výberu matematického modelu analyzovaného systému. Existujú viaceré matematické modely používané pri analýze spoľahlivosti a pri jeho výbere sa berú do úvahy 2 kritériá:

- počet stavov systému;
- matematický prístup, ktorý určuje algoritmy a metódy použité na ohodnotenie systému.

Počet stavov systému a jeho komponentov závisí od požiadaviek na analýzu. Podľa počtu stavov systému delíme systémy na dvojstavové a viacstavové.

Dvojstavový systém je matematická reprezentácia systému s dvomi úrovňami výkonnosti, t.j. systém buď funguje alebo zlyhal. Táto matematická reprezentácia sa používa, ak sú systémy prirodzene binárne [22], [23], alebo ak analyzujeme následky zlyhaní [2].

Viacstavový systém nám umožňuje definovať viac ako dve úrovne výkonnosti systému a popísať postupnú degradáciu výkonnosti systému z úplne funkčného na úplne nefunkčný [1], [24], [25]. Viacstavový systém nám umožňuje analyzovať systém detailnejšie, ale výpočtová

zložitosť analýzy sa zvyšuje a sú potrebné špecifické metódy pre kvantitatívnu analýzu systému reprezentovanú takýmto modelom.

Štruktúrna funkcia

V závislosti od matematického základu použitého v analýze systémov existuje viacero modelov. Jedným z nich je štruktúrna funkcia, ktorá vyjadruje závislosť zmeny úrovne výkonnosti systému od zmeny úrovne výkonnosti jeho komponentov.

Majme viacstavový systém s n komponentami. Systém má m úrovní výkonností. i -ty komponent takéhoto systému má m_i stavov. Úrovně výkonnosti systému a jeho komponentov nadobúdajú hodnoty od 0 na reprezentáciu zlyhania systému po $m - 1$ a $m_i - 1$ respektíve na reprezentáciu perfektnej funkčnosti. Závislosť medzi úrovňou výkonnosti systému a jeho komponentov môže byť vyjadrená použitím štruktúrnej funkcie vo forme [19], [26]:

$$\phi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \phi(x): \{0, 1, \dots, m_1 - 1\} \times \{0, 1, \dots, m_2 - 1\} \times \dots \\ \dots \times \{0, 1, \dots, m_n - 1\} \rightarrow \{0, 1, \dots, m - 1\}$$

kde x_i je stav i -teho komponentu systému, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ je stavový vektor komponentov systému.

Pravdepodobnosť, že i -ty komponent je v stave j môže byť definovaná nasledovne:

$$p_{i,j} = \Pr\{x_i = j\} \\ q_i = p_{i,0} = \Pr\{x_i = 0\}$$

Reprezentácie štruktúrnej funkcie

Štruktúrna funkcia môže byť reprezentovaná viacerými spôsobmi:

- tabuľka pravdivostných hodnôt,
- blokový diagram spoľahlivosti,
- dvoj a viachodnotový rozhodovací diagram,
- množina minimálnych rezov a vektor minimálnych rezov.

Mnoho reálnych systémov pozostáva z veľkého množstva komponentov, čo vedie k veľkému rozmeru štruktúrnej funkcie. Preto je potrebné používať efektívne reprezentácie štruktúrnej funkcie, napríklad viachodnotový rozhodovací diagram.

Logický diferenciálny počet

Interpretácia štruktúrnej funkcie ako viachodnotovej logickej funkcie nám umožňuje použitie matematických metód viachodnotovej logiky na analýzu a ohodnotenie viacstavových systémov. Autori publikácií [27], [28] navrhli použitie orientovaných parciálnych logických derivácií na ohodnotenie dôležitosti komponentov systému. V publikácii [20] boli predstavené ukazovatele dôležitosti definované pomocou týchto derivácií. Avšak tento výskum sa zameriaval na koherentné viacstavové systémy. V tejto práci je navrhnuté ich použitie pre ohodnotenie nekoherentných systémov.

Orientované parciálne logické derivácie boli definované pre binárne funkcie a neskôr zovšeobecnené pre viachodnotové logické funkcie v publikácii [29]. Tieto derivácie vo viachodnotovej logike s ohľadom na premennú x_i indikujú zmenu funkcie z j na h v závislosti od zmeny premennej z s na r . V oblasti spoľahlivosti, orientovaná parciálna logická derivácia štruktúrnej funkcie umožňuje definovať zmenu úrovne výkonnosti systému z j na h v závislosti od zmeny stavu i -teho komponentu z s na r [27]:

$$\frac{\partial \phi(j \rightarrow h)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(s, x) = j \text{ and } \phi(r, x) = h \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

pre $s, r \in \{0, 1, \dots, m_i - 1\}, s \neq r, j, h \in \{0, 1, \dots, m - 1\}, j \neq h$.

Všetky možné zmeny úrovne výkonnosti systému môžu byť definované vzhľadom na orientovanú parciálnu logickú deriváciu pre špecifickú zmenu stavu komponentu z s na r , ak je táto derivácia vypočítaná pre všetky možné zmeny úrovne výkonnosti systému definované parametrami j a h . Toto vyžaduje výpočet veľkej množiny derivácií. V publikácii [20] boli definované nové typy derivácií pre analýzu množiny úrovní výkonnosti systému v závislosti od špecifickej zmeny komponentu systému. Tieto derivácie sa nazývajú integrované orientované parciálne logické derivácie. V publikácii [20] boli predstavené 3 typy týchto derivácií definované pre zmenu i -teho komponentu z s na $s - 1$ pre analýzu degradácie systému. Integrované orientované logické derivácie pre zmenu stavu komponentu z s na $s + 1$ nám umožňujú analyzovať zvýšenie úrovne funkčnosti systému [20] a derivácie pre zmenu i -teho komponentu z s na r môžu byť definované podobným spôsobom.

Integrované orientované parciálne logické derivácie I. typu nám umožňujú identifikovať stavové vektory, kedy degradácia i -teho komponentu zo stavu s na r spôsobí degradáciu úrovne výkonnosti systému z j na akýkoľvek stav $h < j$:

$$\frac{\partial \phi(j \downarrow)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \bigvee_{h=0}^{j-1} \frac{\partial \phi(j \rightarrow h)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(s, x) = j \text{ and } \phi(r, x) < j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

pre $j \in \{1, 2, \dots, m - 1\}$.

Ďalšia verzia I. typu tejto derivácie pre koherentné systémy nám umožňuje identifikovať stavové vektory, kde degradácia i -teho komponentu zo stavu s na r vedie k degradácii úrovne výkonnosti systému z akéhokoľvek stavu $h > j$ na j :

$$\frac{\partial \phi(\downarrow j)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \bigvee_{h=j+1}^{m-1} \frac{\partial \phi(h \rightarrow j)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(s, x) > j \text{ and } \phi(r, x) = j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

pre $j \in \{1, 2, \dots, m - 1\}$.

Analýza všetkých možných vplyvov zmeny stavu i -teho komponentu z s na r sa dá vypočítať pomocou derivácie II. typu. Táto derivácia je definovaná ako spojenie derivácií I. typu:

$$\frac{\partial \phi(\downarrow)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \bigvee_{j=1}^{m-1} \frac{\partial \phi(j \downarrow)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \bigvee_{j=0}^{m-2} \frac{\partial \phi(\downarrow j)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(s_i, x) > \phi(r_i, x) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

III. typ integrovaných orientovaných parciálnych logických derivácií pre zmenu úrovne výkonnosti systému j identifikuje všetky stavové vektory, pre ktoré zmena stavu komponentu i z s na r spôsobí zmenu úrovne výkonnosti systému z hodnoty väčšej ako alebo rovnaj j na úroveň menšiu ako j :

$$\frac{\partial \phi(h_{\geq j} \rightarrow h_{< j})}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \bigvee_{h_u=j}^{m-1} \bigvee_{h_d=0}^{j-1} \frac{\partial \phi(h_u \rightarrow h_d)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(s_i, x) \geq j \text{ and } \phi(r_i, x) < j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

kde $j \in \{1, 2, \dots, m - 1\}$ a notácia $h_{\geq j}$ ($h_{< j}$) znamená, že všetky stavy systému väčšie ako alebo rovné (menšie ako) j sa berú do úvahy.

Spomenuté integrované orientované logické parciálne derivácie môžu byť použité na určenie kritických stavov systému.

Pri zovšeobecnení týchto derivácií pre analýzu nekoherentných systémov musíme vziať do úvahy možnosť degradácie a zvýšenia špecifikovanej úrovne výkonnosti systému j v závislosti od zmeny stavu i -teho komponentu systému z s na r [9], [30].

Koherentné a nekoherentné systémy

V závislosti od správania sa môžeme systémy rozdeliť na dve skupiny - **koherentné** a **nekoherentné** [4], [13], [31]. Dominantnou skupinou systémov sú koherentné, pre ktoré zlyhanie akéhokoľvek komponentu môže spôsobiť zlyhanie systému. Nekoherentné systémy

sú preskúmané najmä pre dvojstavové systémy. Nasledujúce kritéria musia platiť, aby bol dvojstavový systém koherentný [4], [9], [13]:

1. štruktúrna funkcia je monotónne neklesajúca: $\phi(1_i, x) \geq \phi(0_i, x)$ pre akýkoľvek komponent i , kde $\phi(1_i, x) = \phi(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ a $\phi(0_i, x) = \phi(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$;
2. Každý komponent systému je pre systém relevantný: $\phi(1_i, x) \neq \phi(0_i, x)$ pre niektoré x .

Väčšina technických systémov je koherentná. Ak aspoň jedna z podmienok neplatí, potom je systém nekoherentný [4], [9]. Príklad nekoherentných systémov môže byť systém dodávky plynu [4], [9], logické obvody a siete [22], systémy s ľudským faktorom [32] alebo softvérové komponenty [33]. Jeden z relevantných problémov pri nekoherentných dvojstavových systémov je výpočet analýzy dôležitosti [4], [9], [34]. Autori publikácie [28] navrhujú použitie logického diferenciálneho počtu pre výpočet ukazovateľov dôležitosti dvojstavových systémov. Ako bolo ukázané v publikáciách [22], [30], tento prístup môže byť použitý aj pre nekoherentné dvojstavové systémy. V rovnakom čase bol zovšeobecnený prístup logického diferenciálneho počtu pre analýzu viachodnotových logických funkcií a stal sa efektívnym nástrojom na analýzu viacstavových systémov. Metódy analýzy koherentných viacstavových systémov založené na logickom diferenciálnom počte boli prezentované napríklad v publikáciách [19], [20].

Kvantitatívna analýza

Štruktúrna funkcia môže byť použitá na analýzu systému z hľadiska spoľahlivosti. Toto zahŕňa výpočet charakteristík systému ako sú spoľahlivosť a dostupnosť. Okrem týchto charakteristík je možné vypočítať charakteristiky jednotlivých komponentov ako sú ukazovatele dôležitosti.

Spoľahlivosť je základná charakteristika systému a môže byť definovaná ako pravdepodobnosť, že systém funguje.

$$R = \Pr\{\phi(x) = 1\}.$$

V prípade viacstavových systémov je možné vyjadriť taktiež pravdepodobnosť ostatných úrovní funkčnosti systému. V tom prípade hovoríme o dostupnosti.

Dostupnosť a nedostupnosť môžu byť definované ako pravdepodobnosť, že systém je aspoň v stave j . Podobne nedostupnosť je pravdepodobnosť, že systém funguje v stave nižšom ako j .

$$A^{\geq j}(p) = \Pr\{\phi(x) \geq j\},$$

$$U^{\geq j}(p) = \Pr\{\phi(x) < j\}$$

kde p je vektor pravdepodobností stavov komponentov [24], [25], [35].

V mnohých prípadoch je potrebné poznať nielen charakteristiky systému, ale taktiež ako je úroveň funkčnosti systému ovplyvnená jednotlivými komponentami. Na to nám slúžia ukazovatele dôležitosti.

Štruktúrna dôležitosť SI_i

Štruktúrna dôležitosť vyjadruje vplyv komponentu systému na úroveň funkčnosti systému z topologického hľadiska. Môže byť vypočítaný nasledovne:

$$SI_i = TD \left(\frac{\partial \phi(j \rightarrow k)}{\partial x_i(r \rightarrow s)} \right)$$

kde TD je funkcia definovaná ako relatívny počet prípadov, kedy funkcia $\frac{\partial \phi(j \rightarrow k)}{\partial x_i(r \rightarrow s)}$ nadobúda hodnotu 1 ku všetkým možným prípadom [36].

Birnbaumova dôležitosť BI_i

BI_i je podobná ako SI_i s jedným zásadným rozdielom a to, že BI_i berie do úvahy pravdepodobnosti stavov jednotlivých komponentov. BI_i môže byť vypočítaná nasledovne [36]–[38]:

$$BI_i = \Pr \left\{ \frac{\partial \phi(j \rightarrow k)}{\partial x_i(r \rightarrow s)} = 1 \right\}.$$

2. Nekoherentné systémy

V predchádzajúcej časti boli predstavené základné termíny zo spoľahlivostného inžinierstva. Táto časť je zameraná na nekoherentné systémy, ktoré sú preskúvané viac do hĺbky, čo je taktiež hlavné zameranie našej práce.

Štruktúrna funkcia nekoherentných viacstavových systémov

Podobne ako pri dvojstavových systémoch, aj viacstavové systémy je možné rozdeliť v závislosti od správania sa systému na dve skupiny: koherentné a nekoherentné. Koncept koherentných a nekoherentných systémov bol naskôr preskúmaný pre analýzu viacstavových systémov v publikáciách [12]–[15]. Tento koncept je zovšeobecnený z konceptu pre dvojstavový systém [7].

Podmienky relevancie majú niekoľko interpretácií pre viacstavové systémy. Publikácie od autorov Barlow & Wu [5], El-Newehi, Proschan, Sethuraman [6] a Natvig [21] sa venujú skúmaniu základných princípov koherencie viacstavových systémov a navrhli niektoré definície relevancie komponentov.

Tabuľka 1 The conceptions of relevance for coherent MSS

Relevance	Homogenous	Non-homogenous	Coherence type
EPS [13]	for $\forall i = 1, \dots, n$ and $\forall j = 0, \dots, m - 1$ $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi(j, \mathbf{x}) = j$ and $\phi(l, \mathbf{x}) \neq j, j \neq l$	for $\forall i = 1, \dots, n$, $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi(s, \mathbf{x}) = j$ and $\phi(r, \mathbf{x}) \neq j$ for $s \neq r$	strong coherent
G1 [14]	for $\forall i = 1, \dots, n$ and $\forall j = 1, \dots, m - 1$, $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi((j - 1), \mathbf{x}) < \phi(j, \mathbf{x})$, $\phi(j) = j, j = 1, \dots, m$	for $\forall i = 1, \dots, n$ and for $\forall s = 1, \dots, m_i - 1$, $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi((s - 1), \mathbf{x}) < \phi(s, \mathbf{x})$	coherent
G2 [14]	for $\forall i = 1, \dots, n$ and $\forall j = 0, \dots, m - 1$, $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi(0, \mathbf{x}) < \phi((m - 1), \mathbf{x})$	for $\forall i = 1, \dots, n$, $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi(0, \mathbf{x}) < \phi((m_i - 1), \mathbf{x})$	weak coherent
N1 [21]	for $\forall i = 1, \dots, n$ and $\forall j = 0, \dots, m$, $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi(j, \mathbf{x}) \geq j$ and $\phi((j - 1), \mathbf{x}) \leq j - 1$	for $\forall i = 1, \dots, n$, $\forall s = 1, \dots, m_i - 1$ $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi(s, \mathbf{x}) \geq j$ and $\phi((s - 1), \mathbf{x}) \leq j$	coherent
BS [39]	for $\forall i = 1, \dots, n$ and $\forall j = 0, \dots, m - 1$, $\exists \phi(\cdot, \mathbf{x})$ such that $\phi(\mathbf{0}) = 0$ and $\phi(\mathbf{m} - \mathbf{1}) = m - 1$	is not defined	weak coherent

Tabuľka 1 sumarizuje definície relevancie komponentov. Predpokladáme, že tieto podmienky sú najužitočnejšie pre analýzu spoľahlivosti systémov, pretože nám umožňujú deklarovat' silnú a slabú relevanciu v nasledujúcom poradí:

$$\begin{aligned}\phi(s_i, x) &> \phi((s - 1)_i, x), \\ \phi((m_i - 1)_i, x) &> \phi(0_i, x),\end{aligned}$$

pre všetky $s \in \{1, \dots, m_i - 1\}$ a niektoré $\phi(\cdot, x)$.

V závislosti od typu relevancie boli definované tri typy viacstavových homogénnych systémov:

1. silno koherentné,
2. koherentné,
3. slabo koherentné.

Orientovaná parciálna logická derivácia nekoherentných viacstavových systémov

Logický diferenciálny počet nám umožňuje analýzu viacstavových systémov založenú na logických výrazoch. Analýza spoľahlivosti viacstavových systémov s využitím viachodnotovej logiky umožňuje priamy výpočet ohodnotenia viacstavových systémov. Avšak väčšina známych metód analýzy viacstavových systémov založených na viachodnotovej logike bola vyvinutá pre koherentné systémy [19], [36], [40]. Takéto metódy sa dajú efektívne použiť pri analýze kritických stavov viacstavových systémov [19] a analýze dôležitosti [20]. V rámci našej práce sme navrhli aplikovanie orientovaných parciálnych logických derivácií pri analýze a ohodnotení nekoherentných viacstavových systémov na definovanie kritických stavov systému.

Analýza nekoherentných viacstavových systémov by mala brať do úvahy rozdielny vplyv zmeny funkčnosti komponentu na úroveň funkčnosti systému. Integrované orientované parciálne logické derivácie predstavené v predchádzajúcej sekcii je možné použiť na analýzu degradácie úrovni funkčnosti systému v závislosti od fixnej zmeny sledovaného komponentu zo stavu s na stav r . Nenulová hodnota týchto derivácií zodpovedá kritickým stavom i -teho komponentu. Vývoj a zovšeobecnenie týchto derivácií pre nekoherentné viacstavové systémy nám umožňuje definovať nové typy integrovaných orientovaných parciálnych logických derivácií pre fixnú zmenu i -teho komponentu zo stavu s na stav r . Analýza nekoherentných viacstavových systémov pomocou týchto derivácií by mala brať do úvahy každú zmenu úroveň výkonnosti systému j (pre $j \in \{0, 1, \dots, m - 1\}$) spôsobenú zmenou stavu komponentu. To môže byť definované nasledovne:

$$\frac{\partial \phi(j \downarrow \uparrow)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(s_i, x) = j \text{ and } \phi(r_i, x) \neq j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Spomenutá derivácia nám umožňuje identifikovať kritické stavy nekoherentného viacstavového systému pre fixnú úroveň funkčnosti systému j v závislosti od zmeny stavu i -teho komponentu z s na r .

Orientovaná parciálna logická derivácia pre nekoherentný viacstavový systém môže byť zovšeobecnená pre všetky možné úrovne funkčnosti systému nasledovne:

$$\frac{\partial \phi(\downarrow \uparrow)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \bigvee_{j=0}^{m-1} \frac{\partial \phi(j \downarrow \uparrow)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(s_i, x) \neq \phi(r_i, x) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Informácie o kritických stavoch získané spomínanými deriváciami nemusia byť postačujúce v niektorých prípadoch, pretože nám umožňujú určiť kritické stavy systému vzhľadom na komponent a jeho špecifickú zmenu a zmena úrovne výkonnosti systému je druhoradá. Preto je vhodné navrhnúť deriváciu, ktorá by brala do úvahy špecifickú zmenu úrovne funkčnosti systému. Túto je možné definovať vzhľadom na komponent i a zmenu úrovne funkčnosti systému z j na h nasledovne:

$$\frac{\partial \phi(j \rightarrow h)}{\partial x_i} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(s_i, x) = j \text{ and } \phi(r_i, x) = h \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases},$$

pre akékoľvek $s, r \in 0, \dots, m_i - 1$, kde $s \neq r$.

Táto derivácia je počítaná pre všetky možné zmeny i -tej premennej, ktoré boli definované hodnotami s a r . Táto derivácia môže byť definovaná aj iným spôsobom s ohľadom na definíciu orientovanej parciálnej logickej derivácie:

$$\frac{\partial \phi(j \rightarrow h)}{\partial x_i} = \frac{\partial \phi(j \rightarrow h)}{\partial x_i \downarrow} + \frac{\partial \phi(j \rightarrow h)}{\partial x_i \uparrow} = \bigvee_{s=1}^{m_i-1} \bigvee_{r=0}^{s-1} \frac{\partial \phi(j \rightarrow h)}{\partial x_i(s \rightarrow r)} + \bigvee_{s=0}^{m_i-2} \bigvee_{r=s+1}^{m_i-1} \frac{\partial \phi(j \rightarrow h)}{\partial x_i(s \rightarrow r)}$$

Táto derivácia pozostáva z dvoch častí. Prvá z nich nám umožňuje identifikovať kritické stavy systému pre ktoré degradácia i -teho komponentu systému vedie k zmene úrovne funkčnosti systému z hodnoty j na hodnotu h . Druhá časť tejto derivácie nám umožňuje získať kritické stavy systému, kde je zmena úrovne funkčnosti systému spôsobená zvýšením funkčnosti i -teho komponentu systému.

Viachodnotový rozhodovací diagram

Keďže štruktúrna funkcia reálnych systémov môže mať veľký rozmer, je potrebné reprezentovať ju efektívnym spôsobom, napríklad vo forme viachodnotového rozhodovacieho diagramu. Tento diagram je acyklický graf, ktorý spĺňa dve podmienky [41], [42]:

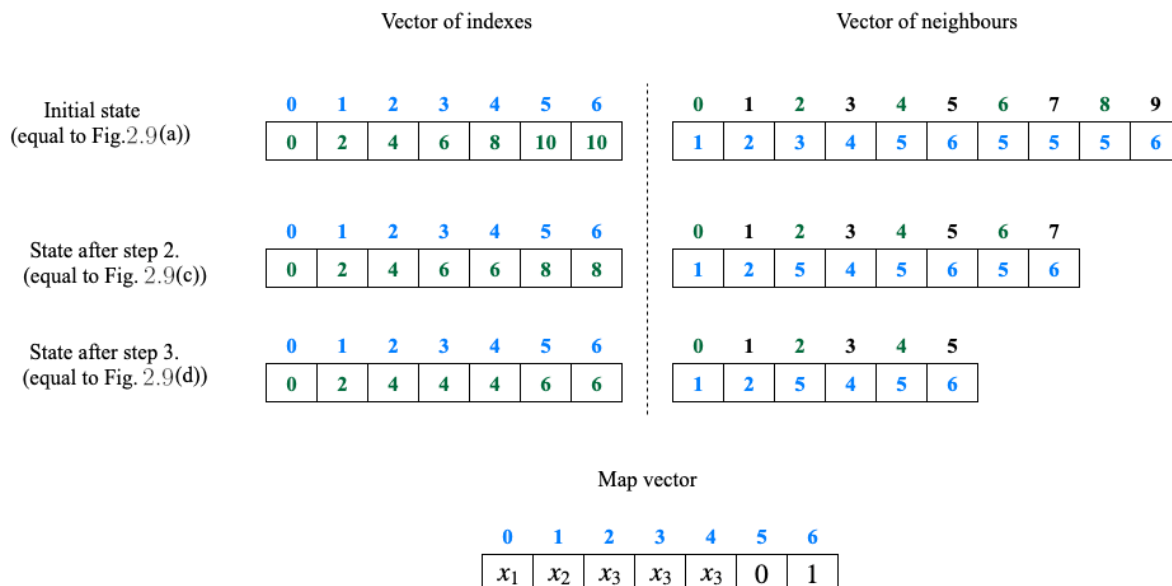
1. graf je kanonický,
2. graf je kompaktný.

Viachodnotový rozhodovací diagram pozostáva z listových vrcholov, ktoré predstavujú úroveň výkonnosti systému a nelistových vrcholov, ktoré predstavujú jednotlivé komponenty systému. Každý z nich má práve m_i výstupných hrán, ktoré je možné interpretovať ako stav komponentu. Cesta z koreňa do listu predstavuje špecifickú kombináciu úrovní funkčnosti komponentov systému a k nim prislúchajúcu úroveň výkonnosti systému.

Keďže tento diagram je ortogonálna forma štruktúrnej funkcie [43], je možné ju použiť aj na pravdepodobnostnú analýzu. V tomto prípade sú hrany vrcholov ohodnotené pravdepodobnosťou jednotlivých stavov.

Reprezentácia viachodnotového rozhodovacieho diagramu pomocou poľa susedov

Grafové štruktúry je možné v počítači reprezentovať rôznymi spôsobmi. Jedným z nich je pole susedov. Táto reprezentácia pozostáva z troch polí, ako je možné vidieť na Obrázok 1, menovite mapovacie pole, pole indexov a pole susedov. Mapovacie pole obsahuje informácie o mapovaní vrcholov rozhodovacieho diagramu na index. Pole indexov obsahuje indexy jednotlivých vrcholov do poľa susedov. Na indexe 0 v poli indexov je zapísaná počiatočná pozícia susedov v poli susedov pre komponent s indexom 0. Na indexe 1 je počiatočná pozícia susedov pre komponent s indexom 1 atď. Pole susedov obsahuje susedné vrcholy jednotlivých vrcholov diagramu.



Obrázok 1 DT to MDD reduction using vector of neighbours

Reprezentácia viachodnotového rozhodovacieho diagramu pomocou poľa susedov má niekoľko výhod. Jednou z nich je jednoduchá redukcia rozhodovacieho stromu na viachodnotový rozhodovací diagram. Algoritmus tejto redukcie pozostáva z 3 krokov:

1. Redukcia počtu listových vrcholov - toto je možné vyriešiť správnym namapovaním vrcholov do mapovacieho poľa.
2. Odstránenie vrcholov, kde všetky výstupné hrany končia v rovnakom vrchole - toto je možné vyriešiť hľadáním rovnakých čísel v poli susedov pre niektorý vrchol.
3. Odstránenie izomorfných podgrafov - toto je možné vyriešiť hľadáním rovnakých sekvencií pre vrcholy reprezentujúce rovnaký komponent systému.

Neúplne definovaná štruktúrna funkcia viacstavového systému

Hlavný problém tradičných metód v analýze spoľahlivosti je nutnosť úplnej informácie o analyzovanom systéme. Túto však v mnohých reálnych systémoch nemáme. Preto je potrebné použiť iný prístup. V našej práci sme nadviazali na práce našich kolegov popísané v publikáciách [27] a [3]. Pomocou metód dolovania dát sa vytvorí rozhodovací strom, ktorý sa následne redukuje na viachodnotový rozhodovací diagram, čo je forma štruktúrnej funkcie a je možné použiť klasické metódy analýzy spoľahlivosti.

3. Model spoľahlivosti softvéru založený na syntaktickom strome

Vývoj metód na ohodnotenie spoľahlivosti softvéru je v súčasnosti relevantný problém spoľahlivostného inžinierstva [44], [45]. Väčšina v súčasnosti používaných modelov na analýzu spoľahlivosti softvéru sú pravdepodobnostné modely. Tieto sa dajú použiť na výpočet charakteristík systému ako sú spoľahlivosť, avšak nie je možné ich použiť na analýzu jednotlivých komponentov softvérových systémov a ich vplyvu na funkčnosť systému. Existuje však niekoľko takých, ktoré berú do úvahy aj štruktúru softvéru, avšak je možné ich použiť len v špecifických prípadoch, napríklad keď je softvérový systém implementovaný pomocou architektúry mikroservisov. Preto sme sa rozhodli navrhnúť vlastný model. Hlavný princíp navrhovanej metódy je použiť zdrojový kód na tvorbu spoľahlivostného modelu. Táto metóda pozostáva z 2 krokov. Prvým z nich je tvorba abstraktného syntaktického stromu zo zdrojového kódu. Syntaktický strom je jazykovo nezávislý, je možné ho jednoducho využiť na vyjadrenie štruktúry softvéru a je možné pomocou neho jednoduchým spôsobom odfiltrovať nepodstatné informácie zo zdrojového kódu. Druhým krokom je tvorba spoľahlivostného modelu zo syntaktického stromu. Syntaktický strom je možné transformovať na strom poruchových stavov.

4. Prípadové štúdie

Použitie všetkých spomenutých metód je demonštrované v kapitole 4 našej práce. Táto kapitola obsahuje 4 prípadové štúdie. Prvá z nich je anestéziologické vyšetrenie. Tento systém je použitý na prezentovanie výpočtu kritických stavov použitím navrhovaných integrovaných logických derivácií nekoherentných viacstavových systémov. Ďalšie dve prípadové štúdie, t.j. prežitie pacientov s hepatítidou a zrážky cyklistov sú použité na demonštrovanie výpočtu analýzy spoľahlivosti spolu s kvantitatívnou analýzou systémov s neúplne definovanými dátami a taktiež použitie štruktúrnej funkcie vo forme viachodnotového rozhodovacieho diagramu na túto analýzu. Posledná prípadová štúdia predstavuje možnosť výpočtu analýzy spoľahlivosti softvérového systému spolu so všetkými krokmi, t.j. tvorba syntaktického stromu zo zdrojového kódu, tvorba matematického modelu z tohto stromu a následná kvantitatívna analýza tohto systému.

Záver

Hlavné zameranie našej práce je na analýzu spoľahlivosti nekoherentných viacstavových systémov. V rámci toho sme si stanovili viacero cieľov, špecificky: 1. Preskúmať metódy analýzy spoľahlivosti viacstavových nekoherentných systémov. 2. Preskúmať metódy redukcie výpočtovej zložitosti štruktúrnej funkcie. 3. Preskúmať metódy tvorby štruktúrnej funkcie založené na neúplne špecifikovaných dátach.

Prvý cieľ sme dosiahli návrhom nového prístupu pre analýzu nekoherentných viacstavových systémov pomocou matematických metód viachodnotovej logiky. Podobne ako v štúdiách [19], [20] sme interpretovali štruktúrnu funkciu ako viachodnotovú logickú funkciu, čo nám umožnilo použiť metódy viachodnotovej logiky na analýzu a ohodnotenie viacstavového systému. Špecificky sme v rámci našej práce navrhli možnosť analýzy kritických stavov takýchto systémov. Aplikáciu tejto metódy sme demonštrovali na prípadovej štúdií anesteziologického vyšetrenia.

Druhý cieľ bol dosiahnutý použitím viachodnotového rozhodovacieho diagramu ako reprezentácie štruktúrnej funkcie. Vďaka tomu, že táto reprezentácia je kompaktná, je možné pomocou nej popísať taktiež systémy veľkých rozmerov. Táto reprezentácia je taktiež vhodná na výpočet kvantitatívnej analýzy - topologickej aj pravdepodobnostnej. V rámci tohto cieľa sme sa taktiež rozhodli reprezentovať tento diagram pomocou poľa susedov. Aplikácia tejto metódy bola prezentovaná na príkladoch prežitia pacientov s hepatítidou a zrážok cyklistov.

Posledný špecifikovaný cieľ sme splnili použitím metód dolovania dát a tvorby rozhodovacieho stromu. V rámci našej práce sme popísali algoritmus redukcie rozhodovacieho stromu na viachodnotový rozhodovací diagram pri použití poľa susedov ako reprezentácie tohto diagramu. Aplikácia tejto metódy je demonštrovaná na príkladoch prežitia pacientov s hepatítidou a zrážok cyklistov.

Posledná časť našej práce bola zameraná na spoľahlivosť softvéru. Hlavná myšlienka nami navrhovanej metódy je použitie zdrojového kódu a syntaktického stromu na tvorbu spoľahlivostného modelu. Táto metóda bola prezentovaná na príklade jednoduchého softvéru.

V rámci našej budúcej práce sa chceme zamerať na preskúmanie nekoherentných viacstavových systémov viac do hĺbky. Preskúame použitie navrhovaných orientovaných parciálnych logických derivácií a kritických stavov na kvantitatívnu analýzu a výpočet ukazovateľov dôležitosti. V ďalšej časti nášho budúceho výskumu preskúame možnosť ďalšej redukcie výpočtovej zložitosti analýzy spoľahlivosti systémov veľkých rozmerov, napríklad použitím metód modulárnej dekompozície [24], [46], [47] pri viachodnotových rozhodovacích diagramoch. Nakoniec plánujeme vylepšiť navrhovaný model spoľahlivosti softvéru, keďže v súčasnosti obsahuje najmä 2 problémy. Prvý z nich je jeho veľký rozmer, čo môžeme vidieť aj na prezentovanom príklade, kedy aj pomerne jednoduchý zdrojový kód vyústil do štruktúrnej funkcie veľkého rozmeru. Existuje viacero spôsobov ako vyriešiť tento problém. Prvým z nich je redukovať veľkosť syntaktického stromu potrebného na tvorbu tohto modelu spájaním a odstraňovaním vrcholov, pokiaľ výsledný syntaktický strom nebude vhodnejšej veľkosti. Takýmto spôsobom bude taktiež vytvorený matematický model menší a celá analýza bude jednoduchšia. Iné riešenie je použiť modulárnu dekompozíciu, ako už bolo spomínané. Použitím tejto metódy môžeme rozdeliť spoľahlivostný model na viacero modulov a každý z nich analyzovať zvlášť. Toto zníži čas potrebný na analýzu spoľahlivosti celého systému s použitím metód ako paralelizácia. Ďalší problém tohto modelu je použitie AND logických operácií, čo vedie k nepresnostiam vo vytvorenom modeli. Na vyriešenie tohto problému bude potrebný ďalší výskum. Toto nám pomôže určiť akým spôsobom majú byť

prepojené jednotlivé udalosti v strome poruchových stavov, aby sme zvýšili presnosť vytvoreného modelu.

Summary

Reliability is one of system characteristics that have great importance in these days as consequences of system failure can be fatal in some cases. In our thesis, we are focusing on analysis of non-coherent multi-state systems represented in a form of structure function. This function allows us to express dependency of system performance on performance of its components. As real systems usually consists of large amount of components, it is necessary to represent structure function in an efficient way. For this purpose, we are using multi-valued decision diagrams. The analysis of a system described in a form of structure function consists of search for critical states and calculation of system characteristics and characteristics of system components. Direct partial logical derivative is one of typical tools used to perform this analysis. In our work, we propose its usage for analysis of non-coherent systems. The other relevant problem in reliability engineering is the problem of incompletely specified structure function, as in many real systems we do not have full information about analysed system. One of the approaches to solve this is the usage of methods of data mining to construct decision tree. It is possible to reduce this tree into structure function in a form of decision diagram. In our work, an algorithm for this reduction is described. The next part of our thesis focuses on software reliability. We decided to analyse source code, represent it in a form of abstract syntax tree and use it to construct reliability model. The usage of the proposed approaches and methods is demonstrated in specific cases, mainly for systems with human factor, as they are typical examples of non-coherent systems.

Použité zdroje

- [1] A. Lisnianski and G. Levitin, *Multi-State System Reliability*. {WORLD} {SCIENTIFIC}, 2003.
- [2] E. Zio, *An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*. World Scientific Publishing Company, 2007.
- [3] E. Zaitseva, V. Levashenko, M. Kvassay, and J. Rabcan, “Application of Ordered Fuzzy Decision Trees in Construction of Structure Function of Multi-State System,” in *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications*, Springer International Publishing, 2017, pp. 56–75.
- [4] H. Aliee, E. Borgonovo, M. Glaša, and J. Teicha, “On the Boolean extension of the Birnbaum importance to non-coherent systems,” *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, vol. 160, pp. 191–200, Apr. 2017, doi: 0.1016/j.ress.2016.12.013.
- [5] R. E. Barlow and A. S. Wu, “Coherent Systems with Multi-State Components,” *Math. Oper. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 275–281, Nov. 1978, doi: 10.1287/moor.3.4.275.
- [6] E. El-Newehi, F. Proschan, and J. Sethuraman, “Multistate coherent systems,” *J. Appl. Probab.*, vol. 15, no. 4, pp. 675–688, Dec. 1978, doi: 10.2307/3213425.
- [7] R. E. Barlow, *Statistical theory of reliability and life testing: probability models*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1974.
- [8] E. Borgonovo, “The reliability importance of components and prime implicants in coherent and non-coherent systems including total-order interactions,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 204, no. 3, pp. 485–495, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.021>.
- [9] S. Beeson and J. D. Andrews, “Importance measures for non-coherent-system analysis,” *{IEEE} Trans. Reliab.*, vol. 52, no. 3, pp. 301–310, Sep. 2003, doi: 10.1109/tr.2003.816397.
- [10] G. Becker and L. Camarinopoulos, “Failure frequencies of non-coherent structures,” *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, vol. 41, no. 3, pp. 209–215, 1993, doi: [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(93\)90071-6](https://doi.org/10.1016/0951-8320(93)90071-6).
- [11] C. Garrett and G. Apostolakis, “Context in the Risk Assessment of Digital Systems,” *Risk Anal.*, vol. 19, no. 1, pp. 23–32, 1999, doi: 10.1023/A:1006998025354.
- [12] A. M. Abouammoh and M. A. Al-Kadi, “Component relevancy in multistate reliability models,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 40, no. 3, pp. 370–374, 1991, doi: 10.1109/24.85459.
- [13] E. El-Newehi and F. Proschan, “Degradable systems: a survey of multistate system theory,” *Commun. Stat. - Theory Methods*, vol. 13, no. 4, pp. 405–432, 1984, doi: 10.1080/03610928408828694.
- [14] W. S. Griffith, “Multistate reliability models,” *J. Appl. Probab.*, vol. 17, no. 3, pp. 735–744, Sep. 1980, doi: 10.2307/3212967.
- [15] P. P. Gupta and S. C. Agarwal, “A boolean algebra method for reliability calculations,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 23, no. 5, pp. 863–865, Jan. 1983, doi: 10.1016/0026-2714(83)91014-4.
- [16] A. Bossche, “The top-event’s failure frequency for non-coherent multi-state fault

- trees,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 24, no. 4, pp. 707–715, 1984, doi: [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(84\)90220-8](https://doi.org/10.1016/0026-2714(84)90220-8).
- [17] A. Bossche, “Calculation of Critical Importance for Multi-State Components,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. R-36, no. 2, pp. 247–249, Jun. 1987, doi: 10.1109/tr.1987.5222356.
- [18] E. Zaitseva, M. Kvassay, V. Levashenko, and J. Kostolny, “Introduction to Knowledge Discovery in Medical Databases and Use of Reliability Analysis in Data Mining,” Oct. 2015, doi: 10.15439/2015f327.
- [19] E. Zaitseva and V. Levashenko, “Reliability analysis of multi-state system with application of multiple-valued logic,” *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 34, no. 6, pp. 862–878, Jun. 2017, doi: 10.1108/ijqrm-06-2016-0081.
- [20] M. Kvassay, E. Zaitseva, and V. Levashenko, “Importance analysis of multi-state systems based on tools of logical differential calculus,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 165, pp. 302–316, 2017, doi: 10.1016/j.res.2017.03.021.
- [21] B. Natvig, “Two suggestions of how to define a multistate coherent systems,” *J. Appl. Probab.*, vol. 15, pp. 675–688, 1978.
- [22] M. Kvassay, E. Zaitseva, V. Levashenko, and J. Kostolny, “Reliability Analysis of Multiple-Outputs Logic Circuits based on Structure Function Approach,” *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, p. 1, 2016, doi: 10.1109/tcad.2016.2586444.
- [23] M. R. Choudhury and K. Mohanram, “Reliability Analysis of Logic Circuits,” *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 392–405, Mar. 2009, doi: 10.1109/tcad.2009.2012530.
- [24] B. Natvig, “Multistate Systems Reliability Theory with Applications,” 2011, doi: 10.1002/9780470977088.
- [25] A. Lisnianski, I. Frenkel, and Y. Ding, *Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers*. Springer London, 2010.
- [26] W. Kuo and X. Zhu, *Importance Measures in Reliability, Risk, and Optimization*. John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [27] E. Zaitseva and V. Levashenko, “Construction of a Reliability Structure Function Based on Uncertain Data,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 65, no. 4, pp. 1710–1723, Dec. 2016, doi: 10.1109/tr.2016.2578948.
- [28] E. Zaitseva and V. Levashenko, “Multiple-Valued Logic mathematical approaches for multi-state system reliability analysis,” *J. Appl. Log.*, vol. 11, no. 3, pp. 350–362, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.jal.2013.05.005.
- [29] M. A. Tapia, T. A. Guima, and A. Katbab, “Calculus for a multivalued-logic algebraic system,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 42, no. 3, pp. 255–285, Apr. 1991, doi: 10.1016/0096-3003(91)90004-7.
- [30] M. Kvassay, E. Zaitseva, J. Kostolny, and V. Levashenko, “Reliability analysis of noncoherent systems based on logical differential calculus,” in *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*, {CRC} Press, 2016, pp. 1367–1374.
- [31] J. D. Andrews and S. Beeson, “Birnbaum’s measure of component importance for noncoherent systems,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 52, no. 2, pp. 213–219, Jun. 2003, doi: 10.1109/tr.2003.809656.
- [32] E. Zaitseva, V. Levashenko, J. Rabcan, and E. Krsak, “Application of the Structure Function in the Evaluation of the Human Factor in Healthcare. 2020, 12, 93.”

- Symmetry (Basel)*., vol. 12, p. 93, 2020, doi: 10.3390/sym12010093.
- [33] V. Jussi, “Ideas and developments in importance measures and fault-tree techniques for reliability and risk analysis,” *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, vol. 95, pp. 99–107, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.res.2009.08.006.
- [34] J. Vaurio, “Importances of components and events in non-coherent systems and risk models,” *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, vol. 147, pp. 117–122, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.res.2015.11.007.
- [35] A. Lisnianski and G. Levitin, “Multi-State System Reliability: Assessment, Optimization and Application,” *Proc. Eng.*, vol. 6, 2003, doi: 10.1142/5221.
- [36] M. Kvassay, E. Zaitseva, V. Levashenko, and J. Kostolny, “Minimal Cut Vectors and Logical Differential Calculus,” May 2014, doi: 10.1109/ismvl.2014.37.
- [37] M. Kvassay, E. Zaitseva, J. Kostolny, and V. Levashenko, “Importance analysis of multi-state systems based on integrated direct partial logic derivatives,” Jul. 2015, doi: 10.1109/dt.2015.7222970.
- [38] M. Kvassay, E. Zaitseva, and V. Levashenko, “Importance analysis of multi-state systems based on tools of logical differential calculus,” *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, vol. 165, pp. 302–316, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.res.2017.03.021.
- [39] T. H. S. Henry W. Block, “A decomposition for multistate monotone systems,” *J. Applied Probab.*, vol. 19, pp. 391–402, 1982.
- [40] P. Sedlacek, J. Rabcan, and J. Kostolny, “Importance Analysis of Multi-State System Based on Incompletely Specified Data by Multi-Valued Decision Diagrams,” 2019, doi: 10.1109/DT.2019.8813385.
- [41] M. D. Miller and R. Drechsler, “Implementing a multiple-valued decision diagram package,” doi: 10.1109/ismvl.1998.679287.
- [42] Y. Mo, L. Xing, and S. V Amari, “A Multiple-Valued Decision Diagram Based Method for Efficient Reliability Analysis of Non-Repairable Phased-Mission Systems,” *{IEEE} Trans. Reliab.*, vol. 63, no. 1, pp. 320–330, Mar. 2014, doi: 10.1109/tr.2014.2299497.
- [43] M. D. Miller and R. Drechsler, “On the construction of multiple-valued decision diagrams,” doi: 10.1109/ismvl.2002.1011095.
- [44] R. D. P. Govindasamy, “Development of software reliability models using a hybrid approach and validation of the proposed models using big data,” *J. Supercomput.*, vol. 76, pp. 2252–2265, Apr. 2020, doi: 10.1007/s11227-018-2457-8.
- [45] S. R. Roberto Pietrantuono Peter Popov, “Reliability assessment of service-based software under operational profile uncertainty,” *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, vol. 204, pp. 1–13, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.res.2020.107193.
- [46] Z. W. Birnbaum and J. D. Esary, “Modules of Coherent Binary Systems,” *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, vol. 13, no. 2, pp. 444–462, Jun. 1965, doi: 10.1137/0113027.
- [47] M. Kvassay, P. Rusnak, and J. Rabcan, “Time-Dependent Analysis of Series-Parallel Multistate Systems Using Structure Function and Markov Processes,” in *Advances in System Reliability Engineering*, Elsevier, 2019, pp. 131–165.

Zoznam publikovaných prác

1. Erik Parso ... [et al.]. FRIMAN. In *Central European researchers journal*, vol. 2, iss. 2, pp. 70-76, 2016
2. Peter Sedlacek. Tool for topological reliability analysis of reversible logic circuits. In *Central European Researchers Journal*, vol. 4, iss. 2, pp 10-16, 2018
3. Peter Sedláček and Monika Václavková. Tool for supporting Education process in Information technology. In *16th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications*, pp. 483-488, 2018
4. Elena Zaitseva, Vitaly Levashenko, and Peter Sedlacek. Reliability analysis based on incompletely specified data. In *Pattern recognition and information processing*, pp. 20-32, 2019
5. Patrik Rusnak ... [et al.]. Structure function based methods in evaluation of availability of healthcare system. In *10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, pp. 13-18, 2019
6. Miroslav Kvassay, Patrik Rusnak, Peter Sedlacek. Computation of Birnbaum's importance using logic differential calculus. In *42nd International conference on telecommunications and signal processing*, pp. 613-616, 2019
7. Patrik Rusnak ... [et al.]. Logic differential calculus in time-dependent importance analysis based on minimal cut vectors. In *TELSIKS 2019*, pp. 74-77, 2019
8. Michal Mrena, Peter Sedlacek and Miroslav Kvassay. Practical applicability of advanced implementations of priority queues in finding shortest paths. In *Information and digital technologies 2019*, pp. 335-344, 2019
9. Peter Sedlacek, Jan Rabcan and Jozef Kostolny. Importance analysis of multi-state system based on incompletely specified data by multi-valued decision diagrams. In *Information and digital technologies 2019*, pp. 409-416, 2019
10. Monika Václavková, Marek Kvet and Peter Sedlacek. Graphical development environment for object programming teaching support. In *15th International Scientific Conference on Informatics*, pp 435-440, 2019
11. Peter Sedlacek, Marek Kmec and Patrik Rusnak. Software Visualization Application for Threads Synchronization Handling in Operating Systems. In *18th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications*, pp. 580-585, 2020
12. Dominik Smalik ... [et al.] Software Tool for Importance Measures Computation Used in Reliability Analysis. In *18th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications*, pp. 620-627, 2020