ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Ústav letecké dopravy

Konceptuální model FTA a jeho využití pro hodnocení spolehlivosti letadel

Bakalářská práce

Filip Drastich

Vedoucí práce: Ing. Andrej Lališ, Ph.D.

Praha 2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621 .....**Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Filip Drastich

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Konceptuální model FTA a jeho využití pro hodnocení spolehlivosti letadel**

Název tématu (anglicky): FTA Conceptual Model and its Utilization for Aircraft Reliability Evaluation

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cíl práce: Návrh hodnocení spolehlivosti letadlových komponent s pomocí konceptuálního modelu metody FTA (Fault Tree Analysis)
- Analýza metody FTA a dostupných ontologických modelů
- Výběr a popis letadlového celku pro hodnocení spolehlivosti
- Návrh konceptuálního modelu pro hodnocení spolehlivosti pomocí metody FTA
- Hodnocení spolehlivosti vybraného letadlového celku s pomocí konceptuálního modelu FTA
- Vyhodnocení celkového řešení

ČVUT FD

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury:

Aerospace Recommended Practice ARP4754A. Guidelines For Development Of Civil Aircraft and Systems. SAE International, 2010

Arlow, J. a Neustadt, I. UML 2 a unifikovaný proces vývoje aplikací: objektově orientovaná analýza a návrh prakticky. 2., Computer Press, 2007.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Andrej Lališ, Ph.D.**
Ing. Oldřich Štumbauer

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **10. srpna 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta dopravní
L. S.

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Filip Drastich
jméno a podpis studenta

V Praze dne 9. října 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných pracích.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu zákona § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10.08.2020

.....

Filip Drastich

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Andreji Lališovi Ph.D. za odborné vedení a konzultování bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Oldřichovi Štumbauerovi za sdílení svých cenných zkušeností a vědomostí potřebných k vytvoření této práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům, kteří při mně stáli a věřili mi nejen po dobu psaní této práce, ale po dobu celého studia.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popsat a analyzovat současný stav hodnocení spolehlivosti pomocí spolehlivostních analýz v letecké dopravě. Tato práce tedy informuje o možnostech hodnocení spolehlivosti pomocí různých spolehlivostních metod, dále o možnostech vytvoření konceptuálního modelu za pomoci současných ontologií. Následuje identifikace současné metody FTA a její nedostatky, na základě kterých je vytvořen konceptuální model FTA, pomocí kterého lze tuto metodu provádět novými způsoby. Navržený konceptuální model FTA je následně validován a připraven jako základ pro budoucí použití v leteckém průmyslu. Závěr práce popisuje aplikaci vytvořené ontologie na palivový systém, který je detailně popsán v jedné z kapitol.

Klíčová slova

spolehlivostní analýza, palivový sytém, ontologie, konceptuální model, FTA

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to describe and analyze the current situation of reliability assessment using reliability analysis in air transport. Thus, this thesis informs about the possibilities of reliability assessment by using various reliability methods, as well as the possibilities of creating a conceptual model by using existing ontologies. Next follows identification of the current FTA method and its deficiencies, based on which the conceptual model of FTA is created, which can be used to apply this method in new ways. The proposed conceptual model of FTA is then validated and prepared as a basis for future use in the aviation industry. The conclusion describes the application of the created ontology on a fuel system, which is described in detail in one of the chapters.

Keywords

reliability analysis, fuel system, ontology, conceptual model, FTA

Obsah

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam zkratek

B	Behavior
C	Component
CE	Cause explanation
ČSN	Česká technická norma
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DM	Detection mechanism
EFTA	Emerging technology and factory automation
FD	Fakulta dopravní
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis
FTA	Fault tree analysis
GE	General Electric
HAZOP	Hazard and operational study
IEC	Převzatá evropská norma
L	Likelihood
M	Mitigation
MI	Mission impact
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OWL	Web Ontology Language
RDF	Resource Description Framework
RPN	Risk Priority Number
UML	Unified Modeling Language
USA	United states of America
VE	Violation explanation
XML	Extensible Markup Language

Úvod

Odhalovat a snaha předcházet veškerá rizika je přirozená lidská vlastnost již od pradávna. Bezpečnost byla vždy jedním z nejdůležitějších faktorů v leteckém průmyslu. V současné době je letecká doprava jednou z nejrychleji expandujících druhů přepravy a pro některé se stala i každodenní součást běžného života. Proto je důležité, aby veškeré letecké komponenty byly co možná nejspolehlivější a nevytvářely potenciální riziko.

Z toho důvodu vznikly spolehlivostní analýzy, které mají za úkol odhalovat potenciální selhání technických systémů a jejich propagaci, již v raném stádiu. Většina spolehlivostních analýz nicméně ale vznikla již na přelomu 50. let 20. století a od té doby nezaznamenaly většího vývoje či úprav. Na druhou stranu je zde letecká technika a systémy, které jsou stále složitější a často tvořeny tisíci, či dokonce miliony součástkami. Rovněž proces samotného vývoje a výroby se stále zdokonaluje, jsou používány modernější technologie a výrobní materiály. Z tohoto důvodu mohou být spolehlivostní analýzy vyvinuty pro leteckou techniku před 70 lety časově náročné a současně méně efektivní.

Tato bakalářská práce bude zaměřena na spolehlivostní analýzu FTA (Fault tree analysis), která se v letectví používá již od 60. let minulého století. Tato analýza je běžně implementována výrobci letecké techniky do procesu odhalování možných rizik a posuzování spolehlivosti konstrukcí letadel.

Vzhledem k současnému způsobu analyzování komplexních leteckých systémů, který je náchylný na lidské chyby právě z důvodu přílišné složitosti systémů, je cílem této práce zdokonalit spolehlivostní analýzy pomocí nových metod a přístupu. Prostřednictvím konceptuálního modelu, který je reprezentací určitého systému za pomoci definice jednotlivých tříd a relací mezi nimi.

Vytvořením konceptuálního modelu spolehlivostní analýzy se zajistí vyšší efektivita analýzy a dále konzistentnost analyzovaných dat, která bude možné dále zpracovávat či sdílet. Proto bude možné vytvářet spolehlivostní analýzu snadněji, rychleji a se zaměřením na větší detaily. Tímto přístupem mohou být rizika odhalena dříve a zmírněna před tím, než budou představovat ohrožení bezpečnosti. Rovněž tento konceptuální model může být v budoucnu využit a implementován k řešení spolehlivosti metodou FTA.

1 Spolehlivost

Účelem této práce je zlepšení analýzy bezpečnosti z pohledu konstrukce letadlových komponent, a proto je důležité si nejprve definovat pojem „Reliability“ neboli spolehlivost a druhy analýz s ní spojených. Pro leteckou dopravu je bezpečnost cestujících na prvním místě, a proto je podstatné tomuto problému věnovat pozornost. V této kapitole bude popsán problém spolehlivosti a představeno několik druhů metod spolehlivostních analýz, věnujících se právě problematice posuzování spolehlivosti, včetně FTA.

Dle ČSN platné do roku 1993, byla spolehlivost definována jako vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených podmínek. [20] Současná definice ČSN IEC 50 uvádí spolehlivost jako: „souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržovatelnost a zajištěnost údržby“. [19]

Pro hodnocení spolehlivosti se v praxi používá nepřeberné množství koeficientů a hodnot, které mají usnadnit uživatelům orientaci mezi jednotlivými komponenty. Právě po hodnocení spolehlivosti všech jednotlivých komponentů je možné určit, zda je celek tvořený těmito komponenty spolehlivý, či nikoliv.

Pojmy spolehlivost a bezpečnost bývají v praxi často zaměňovány, což je způsobeno vzájemnou závislostí. Úroveň bezpečnosti může být zvýšena, pokud se zvýší míra spolehlivosti celku nebo jednotlivých komponent. [6]

Spolehlivost je klíčovým faktorem například při vývoji, údržbě či inovaci letadlových komponent, dále slouží jako ukazatel životnosti letadlových celků a zabezpečení vůči ztrátě jejich funkce. Spolehlivostní analýzou lze předejít rizikům, vylepšit návrh systému, snížit náklady při vývoji komponentů, určit potenciální zdroje nebezpečí a případně snížit jejich dopad na bezpečnost na minimum. Při správně vyhodnocené spolehlivostní analýze by měly být odhalené základní příčiny vzniku rizika v technickém systému. [2]

Podrobně znát daný systém či část celku je pro identifikaci možnosti selhání systému klíčové. Dále jakým způsobem, za jakých podmínek, a jak často se tyto selhání objevují. Pokud jsou shromážděny veškeré dostupné informace, je možné vytvořit hodnotnou spolehlivostní analýzu.

Matematické vyjádření spolehlivosti je následující: [6]

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt$$

Kde:

R(t) je pravděpodobnost bezporuchovosti do daného času t

F(t) je kumulativní pravděpodobnost selhání

f(t) je hustota pravděpodobnosti selhání

1.1 Bezpečnostní analýzy

V dnešní době je stále kladen větší důraz na bezpečnost, spolehlivost a výkonnost komponentů, jak v letecké dopravě, tak i v jiných odvětvích. Zároveň neustálý a zrychlující se vývoj má za příčinu komplikovanější a náchylnější systémy z hlediska selhání. Proto byly vyvinuty bezpečnostní analýzy, které mají za úkol tyto problémy odstranit a zrychlit posuzování bezpečnostních a spolehlivostních vlastností celků či komponent. Mezi ně se řadí například Hazard and operational study (HAZOP), Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Fault tree analysis (FTA) atd. Každá z těchto analýz přistupuje k posuzování jiným způsobem a zároveň má jiné druhy omezení pro použití v praxi, proto se většinou vyžívá více druhů analýz k zajištění co největší přesnosti posouzení spolehlivosti a bezpečnosti zkoumaného celku. [2] [14]

1.2 HAZOP

HAZOP neboli analýza nebezpečí a provozuschopnosti je jednou z nejrozšířenějších bezpečnostních analýz k identifikaci možných rizik tvořících stav nebezpečí. Tato metoda je využitelná od malých technologických celků až po ty větší a složitější, což znamená, že v praxi je tato metoda velmi flexibilní. Metoda vyhledává kritická místa a následně vyhodnocuje možná rizika a nebezpečné stavy. Jedná se o skupinovou expertní analýzu využívající koncepty jako odchylka, možné příčiny, následky či bezpečnostní a požadovaná opatření (viz tabulka 1). Mezi slabé stránky patří časová náročnost, nutnost odborné znalosti systému a současně se zaměřuje spíše na hledání podrobných řešení. [14]

Kroky metody HAZOP:

- Identifikace příčin
- Odhad možných následků a rizik
- Návrhy opatření eliminace rizik
- Odhad možného rizika

Tabulka 1: Příklad konceptů tabulky HAZOP [4]

Tabulka HAZOP					
Prvek	Odchylka	Možné příčiny	Následky	Bezpečnostní opatření	Požadovaná opatření

1.3 FMEA

Metoda FMEA neboli analýza možných vad a následků je metodika vynalezená v 60. letech minulého století v USA za účelem vyhledávání závažných rizik vesmírného programu APOLLO agentury NASA. [5]

Jedná se o tabulku se soupisem prvků, jejich funkcí a možných vad, které danou funkci omezí (viz obrázek 1). Tato metoda také odhaluje rizika již v rané fázi plánování, tj. představuje úsporu času a investic do procesu vývoje produktu. Metoda je relativně jednoduchá, je k ní ale potřeba vysoká zkušenost a znalost zkoumaného produktu. Pokud je FMEA analyzována pouze jedním člověkem, není zaručeno, že byly vzaty v úvahu všechny možné druhy vad a jejich příčiny. Vyhodnocení je možné provádět na základě ohodnocení kritérií výskyt (occurrence), kritičnost (severity) a odhalitelnost (detectability). [2]

Metoda FMEA využívá:

- Soupis jednotlivých částí systémů či komponentů
- Možné vady systému či komponentu
- Možné následky vady
- Význam a kritičnost
- Možné příčiny
- Doporučená opatření

FMEA dále využívá tzv. RPN, což je Risk priority number. Všechna kritéria v tabulce jsou ohodnocena čísly 1-10, přičemž výslednou hodnotu získáme vynásobením všech tří parametrů. Konečná hodnota padne do intervalu <1-1000>. Obecně se stanovuje jako přijatelná hranice hodnota mezi 100 a 125 (viz tabulka 2).

Tabulka 2: Hodnocení kritérií RPN [1]

ÚROVEŇ	VÝSKYT SELHÁNÍ	PRAVDĚPODOBNOST SELHÁNÍ
10	Velmi vysoká pravděpodobnost	>1 z 2
9		1 z 3
8	Vysoká pravděpodobnost	1 z 80
7		1 z 20
6	Středně vysoká pravděpodobnost	1 z 80
5		1 z 400
4		1 z 2 000
3	Nízká pravděpodobnost	1 z 15 000
2		1 z 150 000
1	Téměř žádná pravděpodobnost	<1 z 1 500 000

Prvek -------- Funkce	Možná vada	Možné následky vady	Význam	Kritičnost	Možné Příčiny (mechanismy vady)	Výskyt	Stávající opatření pro prevenci	Stávající řízení procesu	Odhalitelnost	RPN	Doporučená opatření	Odpovědnost --------- Termín	Provedená opatření	Význam	Výskyt	Odhalitelnost	RPN

Obrázek 1: Příklad tabulky FMEA [5]

1.4 FMECA

Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) je rozšířená metoda, která má svůj základ v analýze FMEA. Kromě většiny konceptů, vyjma RPN, převzatých z metody FMEA dále využívá prostředky pro kvalifikaci závažnosti poruch a stanovuje prioritu preventivních opatření. Kritičnost případné poruchy ovlivňují faktory jako míra závažnosti dopadu na systém nebo jeho uživatele, četnost výskytu možné ohrožující situace, a dále odhalitelnost poruchy. [2]

1.5 FTA

FTA (Fault tree analysis) je efektivní metoda analýzy možných poruchových stavů složitých systémů využívající tzv. strom poruchových stavů. Metoda FTA je založená na analýze vrcholové události (negativní nežádoucí jev) a jejích příčin, které vedly k selhání daného systému. To znamená, že princip analyzování systému se odvíjí od

nejvíce závažného problému a postupuje stromem směrem dolů až k selhání základních komponentů. [2] Tato technologie hodnocení spolehlivosti byla poprvé použita v 60. letech minulého století americkou armádou, později byla široce využívána společností Boeing. [7]

Cíl analyzování spočívá v nalezení veškerých příčin vedoucích k dané vrcholové události a pozdějšímu využití těchto poznatků k vylepšení postupů výroby, změně navrhování systému či odstranění zdrojů problémů za účelem snížení rizik vytvářející nebezpečí. Dále lze z analýzy určit, které události musí nastat, aby daný komponent selhal. Za použití hodnot pravděpodobnosti a logických operátorů (AND/OR) umožňuje identifikovat kombinaci faktorů, které s finální pravděpodobností vedou k dané události. [2]

Takto lze určit, který ze scénářů přispěl největší měrou k selhání daného systému, a jak zabránit šíření poruchy.

Metoda FTA využívá základní koncepty, které ale mohou být dále specifikované (viz tabulka 3). Mezi základní koncepty se řadí:

- Základní událost
- Mezilehlá událost
- Vrcholová událost
- Logické hradla

1.5.1 Postup FTA

Metodu FTA zahájíme seznámením se s objektem, který chceme analyzovat, a vymezíme rozsah analýzy. U veškerých systémů je nutné podrobně znát, jak jednotlivé komponenty systému fungují a jaký je mezi nimi vztah, abychom mohli tyto vztahy modelovat do stromu. Na základě těchto znalostí jsme schopni do analýzy zanést veškeré případné možnosti selhání. Při případných nesrovnalostech či odchylkách by vyhodnocení FTA nebylo přesné.

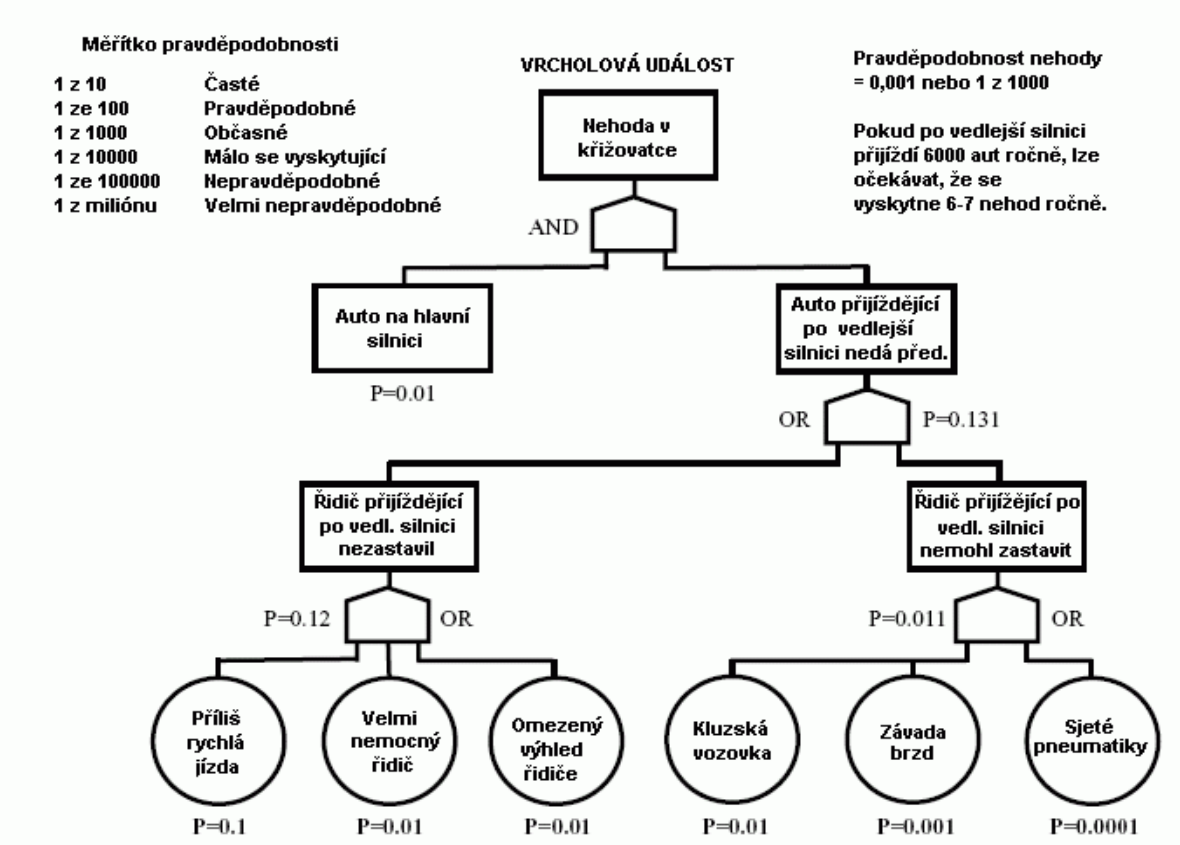
Dalším krokem při modelování FTA je určení vrcholové události. Protože systém může mít více druhů systémového selhání, je nutné si vrcholovou událost předem přesně definovat. Metoda FTA se tvoří ve smyslu směrem dolů, tzn. že tok informací vede od vrcholové události přes mezilehlá selhání až po primární události, které zapříčinily selhání daného systému.

Tabulka 3: Základní symboly FTA [2]

Značka	Název	Popis
	Základní událost	Událost, která vyvolává prvotní selhání vespod stromu. Většinou bývá doplněna o pravděpodobnost selhání.
	Vnější událost	Událost, která nepřímo souvisí s daným analyzovaným systémem.
	Nerozvíjená událost	Událost, která reprezentuje určitou část systému, která doposud nebyla rozvíjena.
	Podmínková událost	Událost, která nastane pouze za splnění určité podmínky.
	Mezilehlá událost	Událost, do které vstupují i vystupují jiné události.
	Logický součin AND	Výstupní událost nastane pouze za předpokladu, že nastanou všechny vstupní událostí.
	Logický součet OR	Výstupní událost nastane, pokud nastane pouze jediná vstupní událost.
	Blokování INHIBIT	Výstupní událost nastane pouze za předpokladu, že nastanou obě vstupní události, z nichž je jedna podmínková.

Pro zobrazení stromu FTA se používají předem definované symboly jako události a hradla. Události v FTA značí selhaní jednotlivých částí systému a hradla zobrazují, jak by se tato selhání propagovala v reálném systému. Každé hradlo musí reprezentovat vztahy mezi událostmi a nabývá hodnoty AND či OR. Hradlo AND představuje selhání za předpokladu, že nastanou všechny vstupní události. Hradlo OR stanovuje poruchu na výstupu, pokud nastane pouze jedna nebo několik vstupních událostí. Dále je

možné událostem i hradlům přiřazovat pravděpodobnost selhání pro lepší orientaci ve složitých stromech FTA.



Obrázek 2: Příklad FTA [13]

Pro příklad stromu FTA byla použita analýza dopravní křižovatky (viz obrázek 2). Zde byla zvolena jako vrcholová událost nehoda v křižovatce. Příčiny této události mohou být v tomto případě dvě: „auto na hlavní silnici“ a „auto přijíždějící po vedlejší silnici nedá přednost“. Události spojuje hradlo AND, což znamená, že tyto dvě události musí nastat zároveň, aby splnily podmínku vrcholové události. Přičemž „auto na hlavní silnici“ je již považováno za základní událost, která není dále rozvíjena, a je jí přiřazena hodnota pravděpodobnosti. Událost „auto přijíždějící po vedlejší silnici nedá přednost“ předchází „řidič přijíždějící po vedl. silnici nezastavil“ a „řidič přijíždějící po vedl. silnici nemohl zastavit“, které jsou tzv. mezilehlou událostí. Tyto dvě události rozvíjí dále pouze základní události, které jsou zároveň prvotním selháním, a jsou jim přiřazeny hodnoty pravděpodobnosti selhání.

1.6 Současný stav

Vzhledem k současné době technického pokroku napříč všemi odvětvími je důležité udržovat hodnotu spolehlivosti na maximu. Proto metody FTA, FMEA, HAZOP atd. vyvinuty před více než půl stoletím nemusí stačit modernímu trendu používání spolehlivostních analýz, kde se klade důraz na rychlost a správnost vyhodnocení. Problematika současného použití metody FTA tkví v jejím použití na soudobé komplexní systémy, tak aby její výsledek byl prakticky použitelný a zároveň, aby vykazovala konzistentní data a minimum chyb. V dnešní době se stále někteří odborníci spoléhají na analytické metody tvořené ručně či v základních grafických editorech. To může při analyzování robustních a komplikovaných systémů způsobovat problémy, jak v ohledu ukládání těchto dat, tak například v pozdější evaluaci či sdílení těchto informací. Moderní ontologie mohou pomáhat vyřešit management těchto obsáhlých dat.

Použití ontologií přispívá k řešení těchto problémů, protože pomáhají definovat vztahy mezi jednotlivými koncepty, pomocí automatizovaných funkcí nacházet nesrovnalosti a v neposlední řadě kontrolovat dané informace. Rovněž je možné ontologické modely dále rozšiřovat a implementovat do nich nové koncepty, proto mohou růst a dále se vyvíjet v průběhu času. Případně lze použít ontologie jak na nestrukturované data, tak na strukturované, což umožňuje snazší integraci dat a rovněž uživatelům usnadňuje práci.

2 Ontologie

Pro vytvoření FTA ontologie v této bakalářské práci, bylo nutné čerpat informace a inspiraci z dostupných ontologií. V praxi jsou ontologie hojně využívány k uchovávání a předávání znalosti týkající se určité problematiky. Proto se v této kapitole budu věnovat významu a historii tohoto pojmu a dále budou analyzovány konkrétní dostupné ontologie pro doménu FTA.

2.1 Historie ontologie

Pojem ontologie pochází ze spojení dvou řeckých slov óv (jsoucí) a logos (slovo, řeč). Jedná se o vědní disciplínu zabývající se bytím a jsoucnem a jejich atributy, zároveň se zaobírá nejobecnějšími otázkami. Ontologie zabývající se filozofií vznikly již ve starověkém Řecku, kde se jimi zabýval Aristoteles a Platón. Ontologie se měly distancovat od nábožensky ovlivněných témat a odpovídat na obecně pojaté základní otázky například: [9]

- Co je svět?
- Co je to věc?
- Co je člověk?
- Jak žít?
- Jak poznávat svět?
- Jak můžeme cokoliv vědět?

Novodobou podobu ontologie poprvé publikovali v 17. století němečtí filozofové Jacob Lorhard [11] a Rudolf Göckel [12]. V dnešní době se ontologie hojně využívají k uchování a předávání znalostí v oborech jako jsou například umělé inteligence, informatika, systémové inženýrství atd. [10]

V doméně FTA existuje řada konceptuálních modelů, ale žádný se nevěnuje konkrétnímu problému hodnocení spolehlivosti konstrukce dopravních letadel, nýbrž se snaží co nejvíce unifikovat FTA pro pozdější konkretizaci dle potřeb uživatele. Proto bylo nutné vyhledat ontologie nejvíce se blížící požadavkům použití v bakalářské práci.

2.2 Ontologie EFTA

Jednou z ontologií, ze které jsem čerpal informace do své bakalářské práce, byla ontologie, vyvinutá na univerzitě v Rio Grande do Norte v Brazílii. Tuto ontologii jsem vybral z důvodu moderního přistupování k FTA, co se týče využívání počítačové techniky, dále z důvodu detailního popisu jednotlivých tříd a vztahů mezi nimi. Rovněž bylo důležité vybírat ontologie, které jsou vhodné pro další úpravu a použití v letecké dopravě.

Tato ontologická analýza vznikla z důvodu zvyšujících se standardů a požadavků na provozní bezpečnost v průmyslových odvětvích jako je letecká doprava, jaderný, plynárenský a ropný průmysl. Klade důraz na automatizované generování stromů FTA, rychlost a snadnější přístup k analyzovaným datům.

Ontologie využívá ručního zadávání počátečních dat a znalostí do předem definovaných tabulek, následně vzniká strom FTA na základě automatizace. Důležité je zmínit, že tato ontologie se výrazně liší od tradičních ontologií FTA [18], [3] využívající pro vyhodnocování grafy, stavové diagramy, či rozhodovací tabulky. [15]

Tato ontologie pro vytvoření stromu FTA využívá koncepty [15]:

- Komponent
- Stavová tabulka (State transition table)
- Tabulka funkcí (Function table)

2.2.1 Stavová tabulka (State transition tables)

Stavové tabulky se používají k popisu funkčnosti, vstupu atd., a mají za úkol mapovat přechodové stavy některých komponentů. Používají se spojení tabulkami funkcí ke sledování, jak se mění stav vzhledem k výstupu, viz tabulka 4.

Tabulka 4: Příklad stavové tabulky

Brzdové válce (levý a pravý)			
Vstup	**Počáteční stav**	**Funkčnost**	**Konečný stav**
zavřít	otevřený	ok	zavřený
otevřít	zavřený	ok	otevřený
zavřít	otevřený	fail	otevřený
otevřít	zavřený	fail	zavřený
no command	zavřený	-	zavřený
no command	otevřený	-	otevřený

2.2.2 Tabulka funkcí (Function tables)

Tabulky funkcí popisují vztahy mezi vstupy a výstupy jednotlivých komponentů systému. Dále můžou obsahovat informaci o stavu daného komponentu, zároveň každý komponent systému musí mít svou tabulku funkcí. Data se zanášejí do předem definované tabulky, viz tabulka 5.

Tabulka 5: Příklad tabulky funkcí

Levý pedál pilota (copilota)		
Vstup	**Stav**	**Výstup**
stlačení pedálu	ok	stlačení hydraulické kapaliny
stlačení pedálu	fail	nestlačení hydraulické kapaliny
nestlačení pedálu	-	nestlačení hydraulické kapaliny

2.2.3 Vytvoření FTA podle EFTA

Pro vytvoření stromu FTA je prvním krokem si zvolit vrcholovou událost. Dalším krokem je zjištění, zda se jedná o výstup či stav daného komponentu. Pokud se jedná o výstup, je analyzována tabulka funkcí, a pokud je to stav, pak se analyzuje stavová tabulka.

Jestliže se jedná o výstup, analýza začne hledat, který řádek tabulky se shoduje s daným výstupem. Pokud se v daném řádku nachází funkčnost komponentu vedoucí k danému výstupu, stává se z něj základní událost. Pokud existuje více řádků v tabulce shodující se s výstupem, je k těmto událostem přiřazeno hradlo OR a každý řádek s daným výstupem je poté nastaven jako vstup. Algoritmus následně postupuje směrem dolů stromem FTA a ke každému vstupu komponentu hledá odpovídající výstup.

Pokud jednomu řádku na výstupu odpovídá více než jeden sloupec, pak se tyto události sčítají a vzniká hradlo AND. Tento postup pokračuje až po dosažení hranic systému.

Jestliže jsou ke všem událostem přiřazená hradla a již není možné události dále rozvíjet, algoritmus se zastaví a vyhodnotí finální verzi stromu FTA. [15]

2.3 Ontologie NASA

Druhou ontologií, ze které jsem čerpal, je metoda vytvořená americkou agenturou NASA. Ta vytvořila tuto ontologii za účelem hodnocení spolehlivosti techniky a systémů použitých na vesmírných misích, proto se v ontologii objevují koncepty, které nesouvisí s leteckou dopravou. Ontologie se věnuje metodě a nástrojům, které umožňují systémovým inženýrům zachytit a zpracovávat informace týkající se selhání. Tato ontologie se věnuje jak FTA, tak analýze FMECA, její část je zobrazena na obrázku 5. [16]

Koncepty, které ontologie využívá jsou následující:

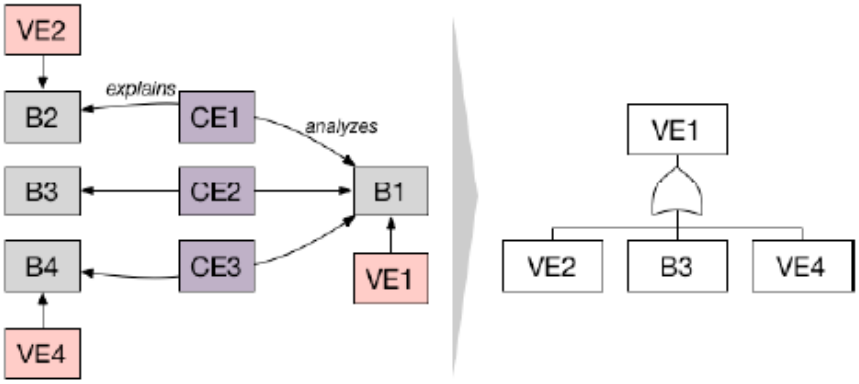
- **Violation explanation** (VE) - Koncept *Violation explanation* v sobě zachycuje informaci vysvětlující selhání a jeho popis. Zároveň definuje vztah mezi funkcí a komponentem.
- **Behavior** (B) - Koncept *Behavior* vysvětluje způsob chování dané časti systému.
- **Component** (C) - Tato třída v sobě nese název určitého komponentu analyzovaného systému.
- **Cause explanation** (CE) – Koncept *Cause explanation* zachycuje příčinu vysvětlující selhání dané části systému.
- **Criticality rating** – Skupina tříd hodnotící pravděpodobnost a odhalitelnost selhání komponentu systému:
    - **Likelihood** (L) – hodnotí pravděpodobnost selhání
    - **Mission impact** (MI) – hodnotí dopad selhání na danou misi
    - **Mitigation** (M) – hodnotí zmírnění dopadů selhání
    - **Detection mechanism** (DM) - popisuje mechanismus, který má za úkol odhalit selhání

2.3.1 Vytvoření FTA podle NASA

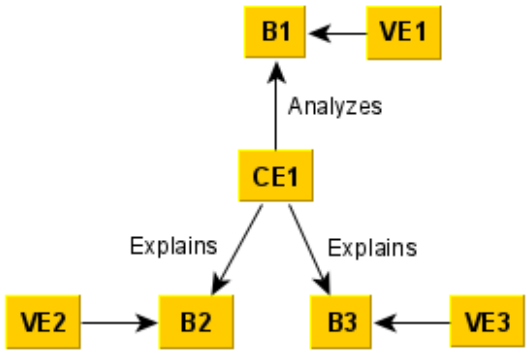
Prvním krokem pro vytvoření stromu FTA je určení rozsahu analýzy. Dále je nutné stanovit způsoby selhání (*Violation Explanation)* jednotlivých komponentů daného systému. Pracovník, který analýzu provádí, vybere selhání jednoho z komponentů, které bude zároveň vrcholovou událostí (*Top Event*).

Poté algoritmus systematicky určuje propagaci selhání stromem směrem k základním událostem, využívající k vytvoření stromu FTA všech výše definovaných konceptů, které byly příčinou ztráty funkce systému. K propagaci selhání metoda používá koncept příčina (*Cause explanation*), pomocí které určuje logická hradla AND či OR (viz

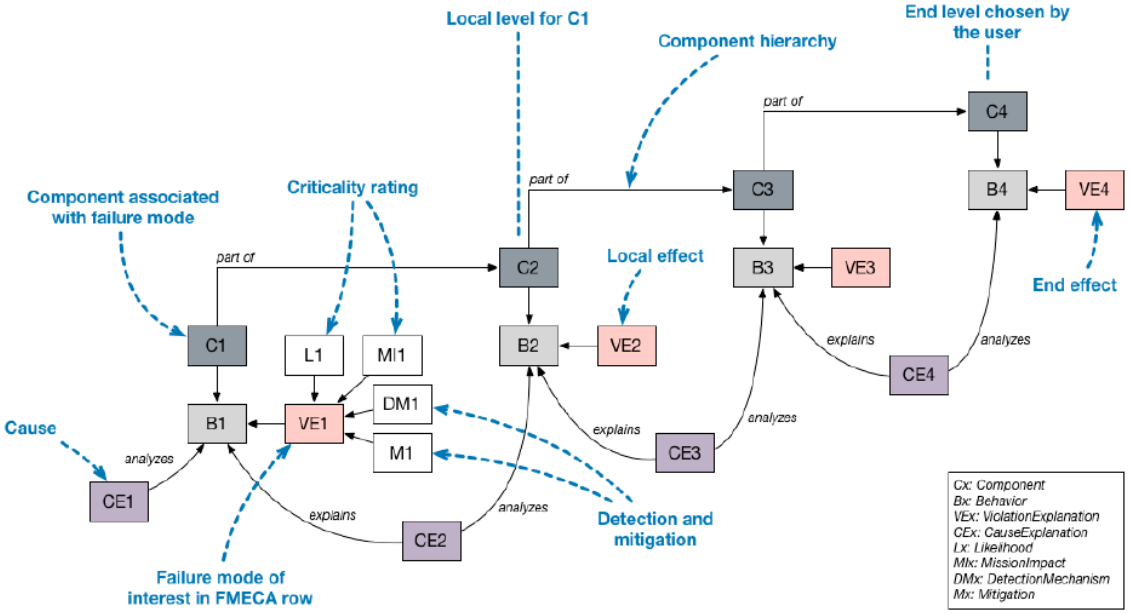
obrázek 3 a obrázek 4). Celý proces tvoří strom FTA a rozvíjí mezilehlé události do doby, kdy je již nelze dále rozvíjet. Logika postupu vytvoření FTA podle ontologie NASA je popsána na obrázku 5. [16]



Obrázek 4: Vytvoření hradla OR dle ontologie NASA [16]



Obrázek 3: Vytvoření hradla AND dle ontologie NASA [16]



Obrázek 5: Ontologie NASA [16]

2.4 Srovnání ontologií

V této kapitole se budu věnovat srovnání ontologií EFTA a NASA, které byly blíže popsány výše a ze kterých jsem čerpal informace do své bakalářské práce.

Dále budu do srovnání uvažovat mnou navržené schématické zobrazení FTA a potřebné koncepty pro spolehlivostní analýzu v letecké dopravě. Pro porovnání ontologií bylo potřeba navrhnout vlastní schématické zobrazení FTA, které by pracovalo pouze s teoretickými koncepty pro kontrolu celistvosti a správnosti již výše zmíněných ontologií. Toto zobrazení FTA využívá pouze základní koncepty teoretické FTA, které jsou navrženy pro co největší obecnost použití.

Pro porovnání ontologií NASA a EFTA je nejprve nutné si uvědomit, že obě ontologie nevznikly za účelem hodnocení spolehlivosti na konkrétní systémy v letecké dopravě. A proto bylo potřeba samotné ontologie vůči sobě porovnat a určit, která se pro tento účel hodí nejlépe. Například u ontologie NASA, která byla původně navržená na hodnocení spolehlivosti vesmírných misí, bylo možné vyloučit koncepty jako například *Mission impact*. Dále u ontologie EFTA bylo poměrně složité přesně definovat vztah mezi jednotlivými komponenty a stanovit, které části ontologie nebudou potřebné.

Po následné evaluaci ontologií bylo potřeba stanovit výhody a nevýhody jednotlivých ontologií pro snazší orientaci a výběr mezi nimi.

2.4.1 Výhody a nevýhody ontologie NASA

Výhody ontologie NASA spočívají především v zadávání vstupních dat, které je pro uživatele snazší a rychlejší v porovnání s ontologií EFTA a schématickým zobrazením FTA, což může v praxi ušetřit čas při vyhodnocování analýzy. Implicitní určování logických ukazatelů (AND/OR) rovněž ušetří uživateli dobu analýzy. Ontologie pro účely FTA využívá pouze minimum tříd, což je důležité v případě počítačového zpracování.

Nevýhodu ontologie NASA z pohledu použití FTA může tvořit skutečnost, že byla původně navržená jako kombinace FTA a FMECA, proto jednotlivé třídy těchto spolehlivostních analýz mohou být od sebe složitěji odlišitelné.

2.4.2 Výhody a nevýhody ontologie EFTA

Ontologie EFTA a NASA jsou v ohledech implicitního určování logických ukazatelů (AND/OR) podobné. Rovněž ontologie EFTA využívá malého počtu potřebných tříd, což také usnadňuje a zrychluje vyhodnocení celé analýzy.

Naopak nevýhody této analýzy mohou spočívat v komplikovanějším zadávání dat do ontologie, dále je potřeba ke každému analyzovanému komponentu vytvořit stavovou tabulku a tabulku funkcí. Ve výsledku je ontologie časově náročnější na zpracování vstupních dat než ontologie NASA.

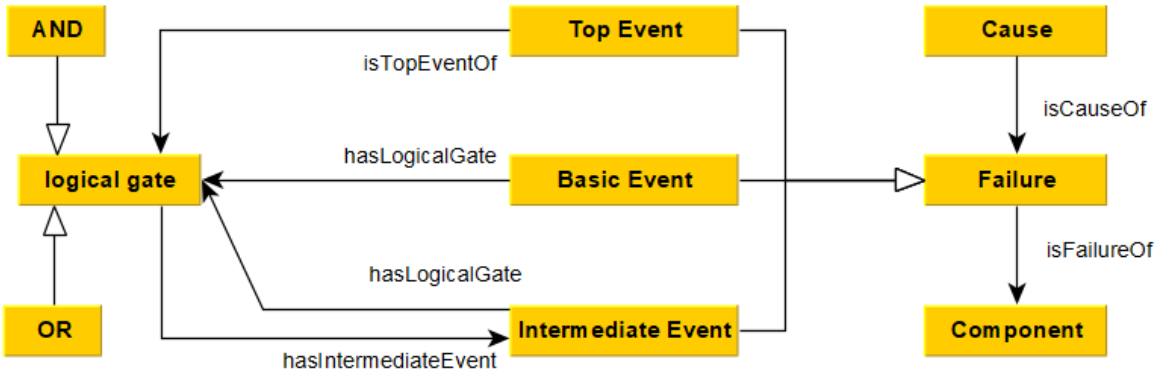
2.5 Základní schéma FTA

Základní schéma FTA vzniklo na bázi požadavků a vědomostí nutných k vytvoření ontologie použitelné za účelem hodnocení spolehlivosti. Výhoda ontologie na obrázku 6 spočívá ve využívání malého počtu tříd, což usnadňuje vyhodnocení FTA. Dále z důvodu obecnosti jednotlivých tříd zde není potřeba uvažovat o vynechání nepotřebných konceptů. Tento fakt může pomoci budoucímu použití nebo případné úpravě a specifikaci jednotlivých tříd pro konkrétní systém.

Na druhou stranu jsou nevýhodou explicitně zadávaná logická hradla, které mají u složitých systémů za následek prodloužení času analýzy. Rovněž rychlost vytvoření FTA na základě této ontologie je, z důvodu nutnosti zadávání všech dodatečných informací o komponentech a vztazích mezi nimi, pomalejší než při tvorbě FTA ručně, z důvodu možnosti přímé volby druhu události a vztahů mezi nimi.

Koncepty, které ontologie využívá, jsou:

- **Top Event** – Koncept, v němž je uchována informace o vrcholové události. *Top event* musí být ručně zvolen.
- **Basic Event** – *Basic event* je koncept, ve kterém je uložena informace o základní události.
- **Intermediate Event** – *Intermediate event* je koncept zastupující mezilehlé události.
- **Logical gate** (AND/OR) – Hradlo AND/OR je voleno ručně. Organizuje výstupní události ve stromu.
- **Cause** – Koncept, který zastupuje příčinu selhání dané části systému.
- **Failure** – Selhání komponentu. Popisuje, jak může určitá část systému selhat.
- **Component** – Uchovává informaci o názvu konkrétního komponentu systému.



Obrázek 6: Schématické zobrazení FTA

Tato ontologie nerozlišuje automaticky hierarchii událostí, tzn. že vrcholové, mezilehlé, či základní události musí být ručně zadány a od sebe odlišeny. Jak *Top Event*, *Intermediate Event*, či *Basic Event* jsou specializacemi („part of“) nadtřídy *Failure*. Jinými slovy je *Failure* třídou nadřazenou těmto třem třídám.

Třída *Failure* je dále provázána s třídou *Cause*, tento vztah je popsán vlastností *isCauseOf*. Dále se váže na třídu *Component* a tento vztah je popsán vlastností *isFailureOf*. Ontologie tak určuje, že příčina je vázaná na módy selhání tak, že každý mód selhání má svoji příčinu. Stejně tak každý komponent má svůj mód selhání.

Třída *Logical gate*, která zastupuje logická hradla, je propojena s třídou *Intermediate Event* pomocí dvou vztahů. Protože mezilehlé události ve stromu FTA rozvádějí vrcholovou událost či mezilehlou událost ležící ve stromu FTA nad ní a zároveň jsou rozváděny základními událostmi či mezilehlými událostmi nacházejícími se ve stromu pod nimi, jsou propojeny dvěma vztahy s třídou *Logical gate*. Pro příklad postupu stromem FTA výše, tzn. z *Intermediate event* do třídy *Logical gate* je tento vztah popsán vlastností *hasLogicalGate*. Pokud je naopak rozváděna třída *Intermediate event* třídou *Logical gate,* tak je tento vztah popsán vlastností *hasIntermediateEvent*. Dále je třída *Logical gate* propojena s třídou *Basic Event* a *Top Event* pomocí jediného vztahu, protože ve stromu FTA jsou buďto rozváděné (*Top Event*), či pouze rozvádějí jiné události (*Basic Event*). Vztah mezi *Logical gate* a *Basic Event* popisuje vlastnost *hasLogicalGate* a vztah mezi *Top Event* a *Logical gate* popisuje vlastnost *isTopEventOf*.

Třídu *Logical gate* rozvádějí třídy *AND* a *OR*, které určují vztahy mezi jednotlivými událostmi ve stromu FTA. Tyto dvě třídy jsou specializacemi nadtřídy *Logical gate*.

3 Palivový systém Tecnam P2002-JF

V této kapitole se budu věnovat palivovému systému letounu od společnosti Tecnam, který jsem si vybral ke spolehlivostní analýze. Pro vyzkoušení jednotlivých ontologií FTA bylo nutné si z praktických důvodů zvolit méně komplexní letadlový systém, na kterém ale současně bude možné provést demonstraci použití jednotlivých ontologií, či případně mé vlastní ontologie.

Letoun Technam 2002-JF je dvoumístný, jednomotorový dolnoplošník využívající vrtulový motor Rotax 912 S2. Palivový systém letounu je tvořen dvěma hliníkovými nádržemi, každá o objemu 50 litrů. Přitékání paliva do motoru je ovládáno z kabiny hlavním přepínačem, který umožňuje pilotovi přepínat mezi levou a pravou nádrží. Hlavní přepínač je možné nastavit do tří různých poloh – LEFT (levá nadrž dodává palivo do motoru), RIGHT (pravá nádrž dodává palivo do motoru) a OFF (zamezuje vstup paliva do motoru), viz obrázek 7. Poloha OFF nemůže být zvolena náhodně během letu. [17]

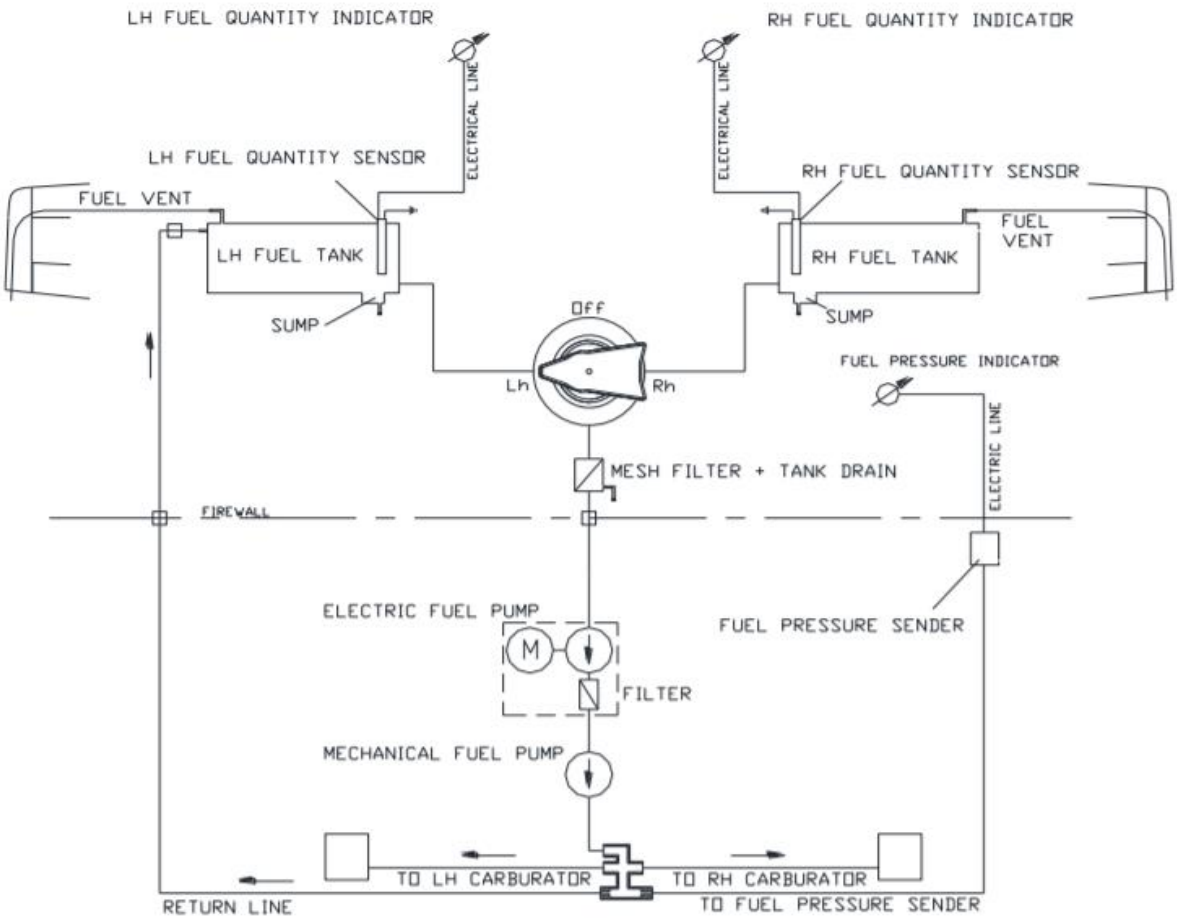
Obě palivové nádrže jsou vybaveny výpustí paliva, palivovým ventilem (v případě přeplnění nádrže) a snímačem množství paliva, který informaci o množství paliva poté přenáší do indikátoru stavu paliva na palubní desce. Dále se v palivovém systému nachází filtr, který má za úkol zamezení vstupu nečistot do motoru. Také je zde elektrická pumpa, která přivádí palivo k mechanické pumpě, ze které putuje palivo do motoru.

Kabina pilota je od motoru oddělena tzv. firewallem, což by mělo v případě požáru posádku ochránit a poskytnout jim dostatek času na provedení nouzového přistání a ochránit je při tomto manévru na nezbytně dlouhou dobu.

Systém je tvořen komponenty dle obrázku 7. Níže pro přehlednost uvádím jejich seznam s českým překladem:

- LH fuel quantity indicator – indikátor stavu paliva v levé nádrži
- LH fuel quantity sensor – senzor stavu paliva v levé nádrži
- Electrical line – elektrické spojení
- Fuel vent – palivový ventil
- LH fuel tank – levá nádrž
- Sump – palivová výpusť
- Firewall – ohnivzdorná zeď
- Mesh filter – filtr pevných částí

- Tank drain – drén
- Electric fuel pump – elektrická pumpa
- Mechanical fuel pump – mechanická pumpa
- RH fuel quantity indicator – indikátor stavu paliva v pravé nádrži
- RH fuel quantity sensor – senzor stavu paliva v pravé nádrži
- RH fuel tank – pravá nádrž
- Fuel pressure sender – vysílač tlaku paliva
- Return line – potrubí vracející přebytečné palivo
- Filter – filtr
- Fuel pressure indicator – indikátor tlaku paliva
- LH/RH carburator – Levý/pravý karburátor



Obrázek 7: Schéma palivového systému Tecnam P2002-JF [17]

3.1 FTA palivového systému

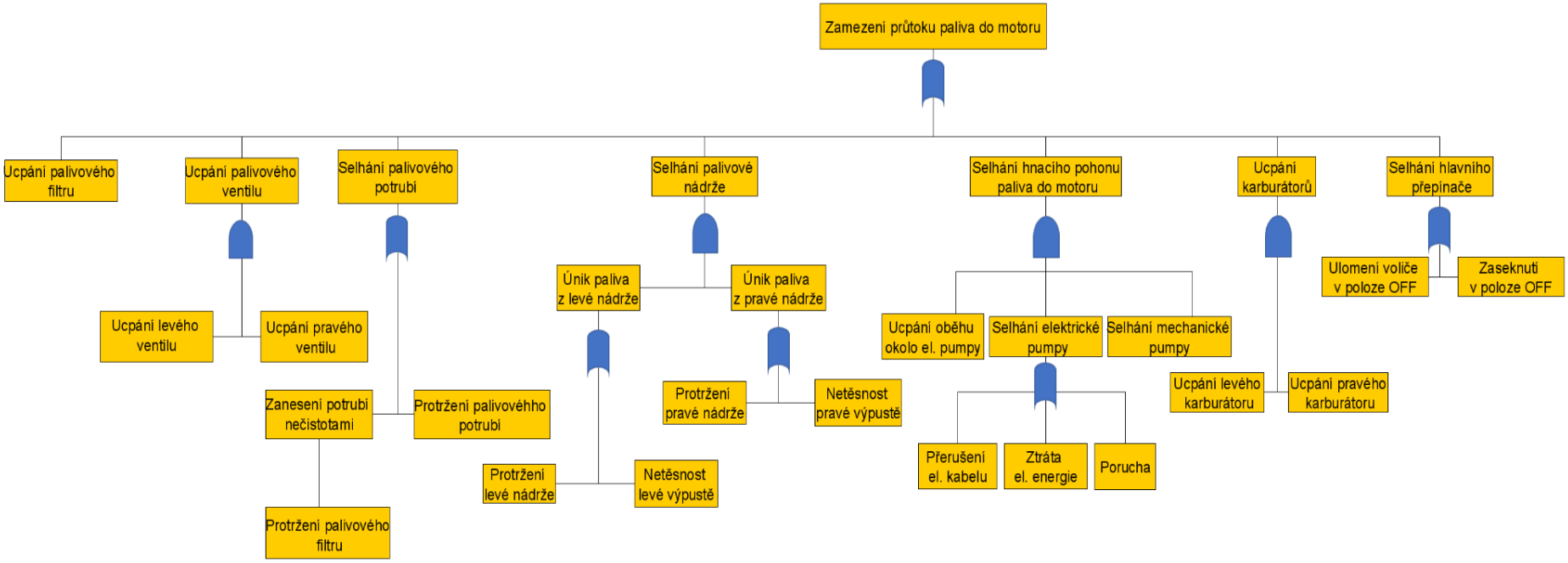
Výsledný strom FTA je zobrazen na obrázku 8, který vznikl na základě informací dostupných z manuálu výrobce a volně dohledatelných detailů o funkci a implementaci komponentů ve smyslu celého palivového systému. Při jeho tvorbě bylo nutné si nejdříve definovat vrcholovou událost u palivového systému. Ten může selhat různými způsoby, ale v tomto případě se jeví jako nejzávažnější selhání „Zamezení průtoku paliva do motoru". Pokud se přeruší dodávka paliva do motoru, je to současně i selhání primární funkce palivového systému.

Události, které mohou zapříčinit selhání celého systému, jsou: „Ucpání palivového filtru", „Selhání palivového ventilu", „Selhání palivového potrubí", „Selhání palivové nádrže", „Selhání hnacího pohonu paliva do motoru", „Ucpání karburátorů" a „Selhání hlavního přepínače".

K události selhání palivového ventilu mohou vést dvě základní události, a to: „Selhání levého ventilu" a „Selhání pravého ventilu". Palivové ventily přivádí vzduch do palivových nádrží, aby nevznikal podtlak při vyčerpávání paliva. Pokud by se ventil ucpal, palivo by nemohlo být odčerpáváno z nádrže. Hradlo AND je přiděleno, protože pokud má nastat vrcholová událost, je nutné, aby selhaly oba palivové ventily současně.

Palivové potrubí rozvádí palivo z nádrží až do motoru, proto je nutné brát v potaz selhání této části systému. Příčiny selhání tohoto komponentu jsou „Zanesení potrubí nečistotami" a „Protržení palivového potrubí", což je současně základní událost. Těmto dvěma událostem je přiděleno hradlo OR, protože postačuje pouze selhání jedné z těchto událostí k zapříčinění „Selhání palivového potrubí". „Zanesení potrubí nečistotami" dále může způsobit základní událost „Protržení palivového filtru".

Událost „Selhání palivové nádrže" zapříčiní mezilehlé události „Selhání levé nádrže" a „Selhání pravé nádrže", které musí nastat současně. Dále „Selhání levé nádrže" „je způsobeno událostmi: „Netěsnost levé výpustě" nebo „Protržení levé nádrže". „Selhání pravé nádrže" způsobují základní události: „Netěsnost pravé výpustě" nebo „Protržení pravé nádrže".



Obrázek 8: FTA palivového systému Tecnam P2002-JF

Událost „Selhání hnacího pohonu paliva do motoru“ mohou zapříčinit události: „Ucpání oběhu okolo el. pumpy“, „Selhání elektrické pumpy“ a „Selhání mechanické pumpy“. Tato tři selhání musí nastat současně. Oběh okolo el. pumpy umožňuje, v případě selhání el. pumpy, proudění paliva dále k mechanické pumpě. „Selhání el. pumpy“ mohou zapříčinit události: „Přerušení el. kabelu“, „Ztráta el. energie“ nebo „Porucha“.

„Ucpání karburátorů“ předchází události: „Ucpání levého karburátoru“ a „Ucpání pravého karburátoru. Tyto dvě události musí selhat najednou, proto je přiřazeno hradlo AND. Karburátor plní funkci mísení správného poměru paliva a vzduchu, proto, pokud se karburátor ucpe, zamezí přívod paliva do motoru.

Příčinou vrcholové události může dále být „Selhání hlavního přepínače“, kterým se volí zdroj přívodu paliva do motoru. Základními událostmi, které mohou zapříčinit toto selhání, jsou: „Ulomení voliče v poloze OFF“ a „Zaseknutí v poloze OFF“. Těmto událostem je přiřazeno hradlo OR.

4 Návrh ontologického modelu FTA

Současné ontologie FTA již byly představeny v kapitole 2 (Ontologie), kde byly analyzovány a následně porovnány. Z kapitoly 2 (Ontologie) jsou tedy patrné výhody a nevýhody použití jednotlivých ontologií v praxi.

Tato kapitola je věnována výběru vhodné ontologie pro využití hodnocení spolehlivosti v letecké dopravě, její úpravě a použití na vybraném palivovém systému. Finální ontologie by měla zajistit, aby vstupní i výstupní data byla konzistentní, organizovaná a významově jednoznačná.

4.1 Proces vývoje konceptuálního modelu FTA

Při výběru budeme postupovat podle základních kroků při výběru či návrhu nové ontologie. [21]

1. Specifikování účelu použití
2. Posouzení možnosti použití současných ontologií
3. Vytvoření tříd a hierarchie ontologie
4. Definování vlastností tříd
5. Určení vztahů mezi třídami
6. Vytvoření instancí

V následujících podkapitolách budou kroky procesu vývoje ontologie detailně popsány.

4.1.1 Specifikování účelu použití

Cílem této práce je navržení konceptuálního modelu FTA, který by měl být aplikovatelný pro hodnocení spolehlivosti v letecké dopravě, případně sloužit jako základ pro další využití v oblasti hodnocení rizik. Tento konceptuální model bude vytvořen na základě technických znalostí a informací obsažených v leteckých manuálech. Protože pro účely této práce nebylo možné získat technické informace přímo od leteckého výrobce, bylo nutné čerpat informace o leteckých komponentech z leteckých příruček dostupných na internetu.

Jedním z požadavků ontologie byla nutnost kompatibility s již existující ontologií spolehlivostní analýzou FMEA [8] určenou pro hodnocení spolehlivosti letadlových systémů. Proto třídy, vztahy mezi nimi a detaily jednotlivých tříd byly záměrně navržené tak, aby byly kompatibilní s touto ontologií. Tato ontologie rovněž vychází

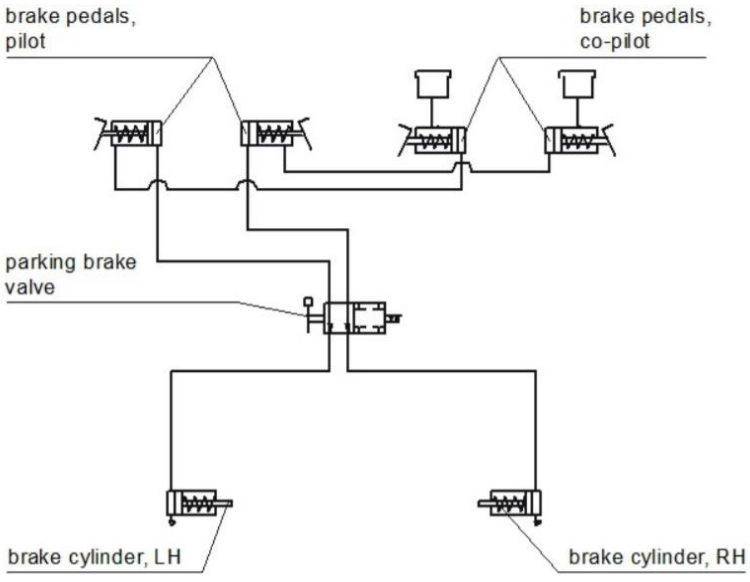
z ontologie NASA a byla vytvořena absolventkou FD ČVUT Ing. Simonou Bolčekovou. Ta pro svou práci využívala reálná data, která ji poskytla firma GE Aviation Czech, s.r.o.

Ontologie představená v této bakalářské práci se věnuje posouzení spolehlivosti na palivovém systému letounu Tecnam, který byl blíže popsán v kapitole 3. Tento systém byl popsán a analyzován pomocí FTA na úrovni selhání jednotlivých komponentů popsaných na obrázku 7.

4.1.2 Posouzení použitelnosti současných ontologií

Při výběru ontologie použitelné pro posuzování spolehlivosti letadlové techniky byly brány v potaz tři ontologické analýzy. Tyto analýzy byly blíže popsány a porovnány v kapitole 2 (Ontologie). Konkrétně bylo důležité, aby ontologie nebyla příliš složitá pro uživatele v ohledu zadávání vstupních dat, dále by měla zlepšit identifikace selhání, proces spolehlivostní analýzy, či ukládání a sdílení analyzovaných dat.

Při zvažování použití současných ontologií, či jejich upravených verzí, bylo nutné ontologie nejdřív ověřit na méně komplikovaném systému, jelikož pouze na základě prostého porovnání tříd a relací nebylo možné vhodnou ontologii vybrat. Proto bylo nutné ontologie porovnat v praxi na letadlovém systému. Pro toto porovnání byl vybrán brzdový systém jednomotorového letounu Diamond DA 42 NG zobrazený na obrázku 9. Z důvodu srozumitelnosti vlastností a funkcí jednotlivých komponentů systému bylo možné identifikovat potřebné třídy jednotlivých ontologií a současně porovnat časovou náročnost vytvoření analýzy. Dále bylo možné odlišit třídy potřebné pro spolehlivostní analýzu letadel.

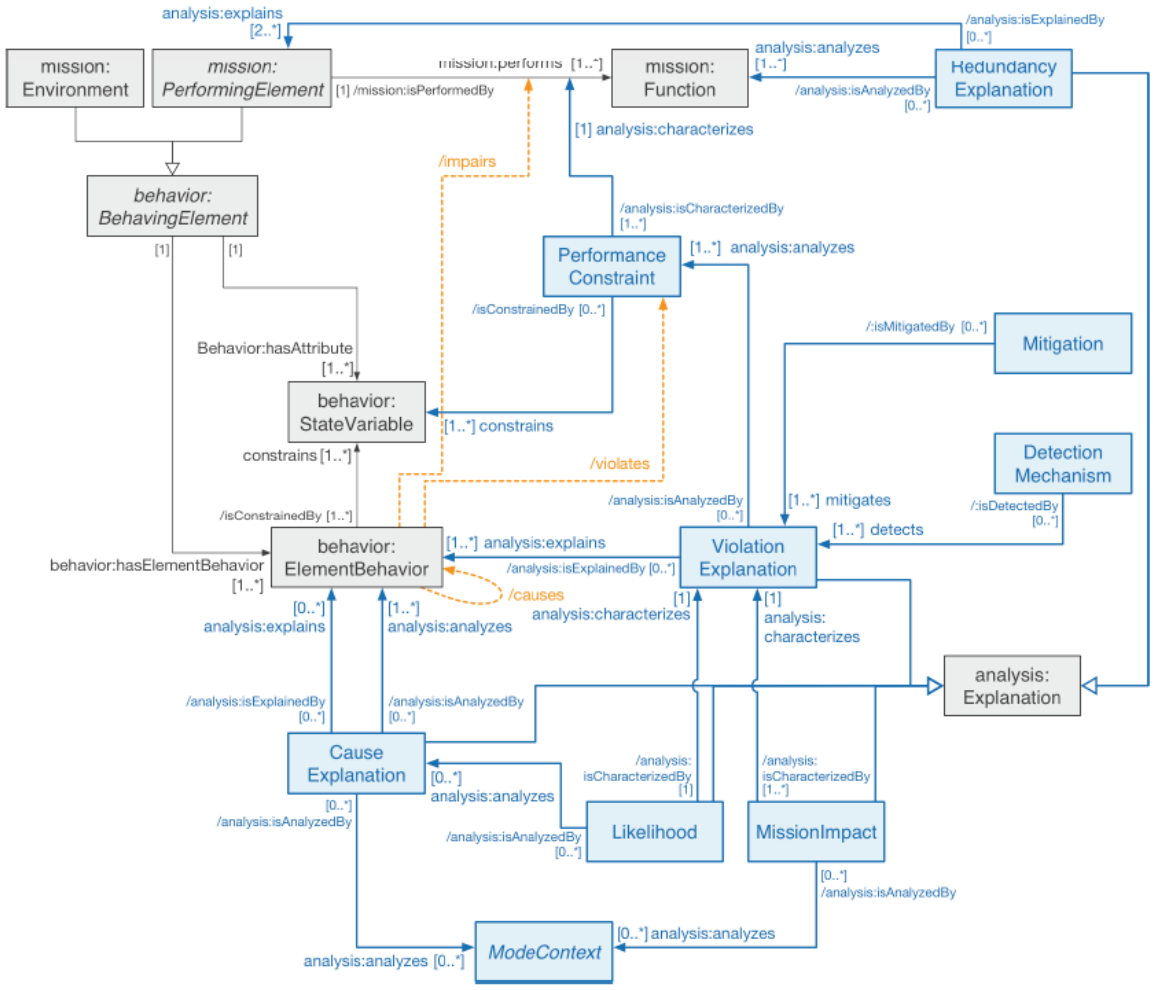


Obrázek 9: Schéma brzdového systému [22]

Níže následuje seznam komponentů brzdového systému a jejich překlad:

- Brake pedals, pilot – brzdové pedály pilota
- Brake pedals, co-pilot – brzdové pedály kopilota
- Parking brake valve – ventil parkovací brzdy
- Brake cylinder, LH – levý brzdový válec
- Brake cylinder, RH – pravý brzdový válec

Po zvážení všech výhod a nevýhod jednotlivých ontologií byla vybrána ontologie vytvořená specialisty z agentury NASA. Jak již bylo zmíněno, tato ontologie využívá koncepty, které slouží k vytvoření spolehlivostních analýz jak pro FMECA, tak FTA. Proto bude možné tuto ontologii upravit a vyčlenit koncepty, které jsou potřebné pouze pro FTA. Z důvodu využití této ontologie pro hodnocení spolehlivosti při vesmírných misích bylo nutné některé části upravit pro možnost použití v letecké dopravě.



Obrázek 10: Koncepty využívající ontologie NASA [16]

Pro ilustraci potřeby úpravy této ontologie jsou na obrázku 10 popsány třídy a vztahy mezi nimi, které ontologie NASA využívá při hodnocení spolehlivosti. Modré obdélníky značí základní třídy, které ontologie využívá pro popis vzniku selhání, propagaci selhání systémem a dopadu na celý systém. Černé obdélníky specifikují chování a, jelikož se jedná o ontologii navrženou agenturou NASA, rovněž popisují podrobnosti dané domény, tedy vesmírných misí. Mezi jednotlivými obdélníky je naznačená kardinalita vztahů doplněná o popis vlastností relací, jako například: *analyzes*, *detects*, *characterizes* atd. V dalších kapitolách následuje popis úpravy této ontologie pro její využití v letectví.

4.1.3 Vytvoření tříd a hierarchie ontologie

Dalším krokem pro vytvoření ontologie FTA bylo vybrat či upravit stávající třídy z ontologie NASA. Protože tato ontologie využívá pro hodnocení spolehlivosti jak třídy patřící do FMECA, tak třídy využívané analýzou FTA, bylo nutné jednotlivé třídy od sebe odlišit.

Jelikož se jednotlivé třídy v ontologii NASA nazývají jinak než teoretické třídy FTA, bylo nutné nejprve vytvořit spolehlivostní analýzu daného brzdového systému v UML, viz obrázek 11. Následně bylo potřeba určit, které třídy odpovídají těm teoretickým (viz tabulka 6). Na základě vědomostí spojené s teoretickými znalostmi o FTA bylo možné vyčlenit a identifikovat třídy potřebné pro vytvoření konceptuálního modelu FTA. Z tabulky 6 je patrné, že třída *ViolationExplanation* odlišuje od sebe vrcholové, mezilehlé a základní události na základě vztahů mezi jednotlivými třídami. O logických hradlech dále rozhoduje třída *CauseExplanation* způsobem patrným z obrázků 3 a 4.

Tabulka 6: Porovnání tříd FTA a ontologie NASA

FTA	NASA
Top Event	ViolationExplanation
Logical gates	CauseExplanation
Basic event	ViolationExplanation
Intermediate events	ViolationExplanation

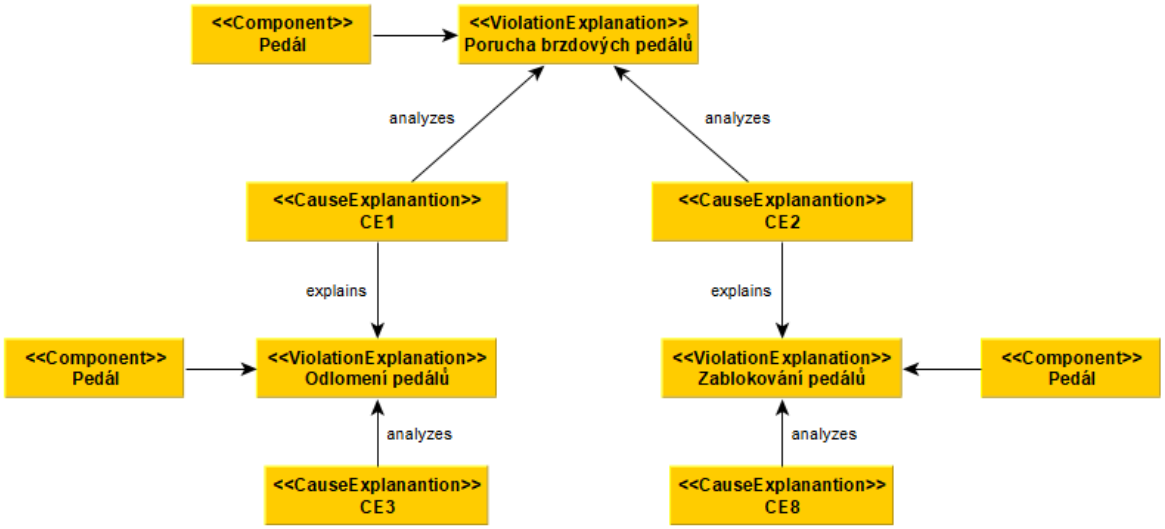
Koncepty, jako například *Performance constraint*, *Redundancy Explanation*, *Mission Impact*, *Detection mechanism,* patří do analýzy FMECA nebo obsahují specifické

informace o vesmírných misích. Tyto koncepty bylo možné z ontologie vyjmout, poněvadž nezastupují žádnou třídu potřebnou pro vytvoření stromu FTA.

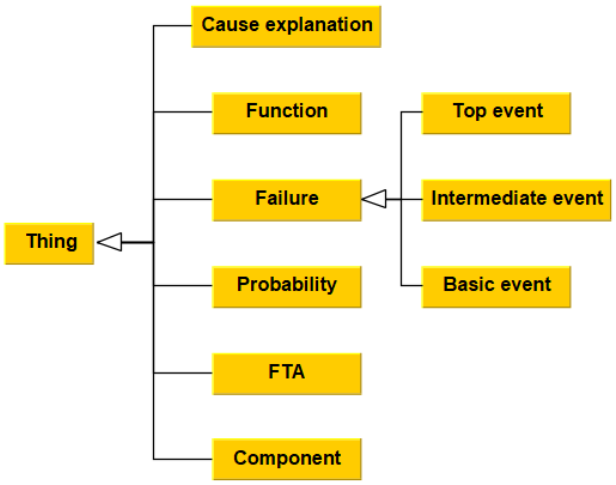
Na základě těchto poznatků již bylo možné navrhnout třídy a jejich vlastnosti do nové ontologie, která bude vycházet ze základu ontologie NASA. Rovněž bylo možné vytvořit hierarchii jednotlivých tříd (viz obrázek 12), ze které je patrné, že třídy jsou specializacemi nadtřídy *Thing* a zároveň jsou si vzájemně „sourozenci", což znamená, že v hierarchii jsou na stejné úrovni. Jediná třída *Failure* má podtřídy *Top Event*, *Intermediate Event* a *Basic Event*. Dále z důvodu kompatibility se zmiňovanou ontologií FMEA Simony Bolčekové [8] bylo nutné většinu tříd přejmenovat či částečně upravit jejich název.

Koncepty potřebné pro vytvoření FTA:

- *Cause Explanation*
- *Failure*
- *Component*
- *Probability*
- *Function*
- *FTA*
- *Top Event*
- *Intermediate Event*
- *Basic Event*



Obrázek 11: Schéma části ontologie v UML



Obrázek 12: Hierarchie tříd v UML

4.1.4 Definování vlastností tříd

Při návrhu ontologie je důležitá definice vlastností jednotlivých tříd. V tabulce 7 jsou ve sloupci třída zobrazeny jednotlivé třídy, které ontologie využívá.

V prostředním sloupci je popis vlastností daných tříd (Class property) do kterých se při analýze ukládají informace o daném systému. Například třída *Component* má vlastnosti „*Component name*" do kterého se ukládá jméno daného komponentu a dále „*Component reference number*", do kterého se ukládá referenční číselná hodnota daného komponentu.

Dále je důležité definovat typy hodnot, které v sobě jednotlivé vlastnosti tříd mohou ukládat. Datový typ „*Integer*" uchovává číselné hodnoty, „*String*" ukládá slovní hodnoty a typ „*Date*" uchovává hodnoty dat. Například u vlastnosti „*Cause explanation description*" třídy *Cause Explanation* je typ hodnoty „*String*", protože tato vlastnost ponese informaci o příčině selhání. Dále vlastnost „*FTA starting date*" je typ „*Date*", poněvadž nese informaci o datu zpracování analýzy FTA. Posledním využívaným typem hodnoty je typ „*Integer*", který je například u vlastnosti „*FTA number*".

Veškeré odborné termíny používané v ontologii FTA (názvy tříd, vlastnosti vztahů atp.) byly ponechány v anglickém jazyce z důvodu možnosti budoucího sdílení ontologie bez nutnosti překladu a dále z důvodu práce s programy pracujících pouze v anglickém jazyce.

Tabulka 7: Vlastnosti tříd

Třída	Vlastnosti třídy (Class property)	Typ hodnoty
FTA	FTA name	String
	FTA number	Integer
	FTA leader	String
	FTA starting date	Date
	FTA ending date	Date
Component	Component name	String
	Component reference number	Integer
Function	Function description	String
	Function reference number	Integer
Probability	Occurrence	Integer
Failure	Failure description	String
	Failure reference number	Integer
Cause Explanation	Cause explanation description	String
Top Event	Top event description	String
Intermediate Event	Intermediate event description	String
Basic Event	Basic event description	String

4.1.5 Určení vztahů mezi třídami

„Object property" definují vlastnosti vtahů mezi dvěma či více třídami. Vlastnosti vztahů mezi jednotlivými třídami definují slovesa v levém sloupci tabulky 8. Tyto logické definice určují v ontologii navázání jednotlivých tříd mezi sebou a zajišťují, aby související instance měly stejné vlastnosti jako třídy, ke které se váží.

Právě definováním vztahů se tato ontologie značně liší od ontologie NASA. V této ontologii jsou používány specifičtější definice vlastností jednotlivých vztahů. Naopak ontologie NASA se snaží vlastnosti vztahů pojmout co nejobecněji, a proto většinu vztahů označuje vlastnostmi *analyzes*, či *explains*.

V prostředním sloupci je popsána doména daného vztahu, což v případě vlastnosti vztahu *IsFunctionOf* značí směr, ze které třídy daný vztah vychází (třída *Function*).

Naopak v pravém sloupci je popis rozsahu, ve které třídě daný vztah končí. To znamená, že právě vlastnost vztahu *IsExaminedBy* vychází ze třídy *Component* a končí ve třídě *FTA*.

Tabulka 8: Vlastnosti vztahů mezi třídami

Object property (Vlastnosti vztahů)	Doména (Domain)	Range (Rozsah)
Is Function Of	Function	Component
Is Examined By	Component	FTA
Is Failure Of	Failure	Component
Examines	FTA	Component
Is Violated By	Function	Failure
Has Function	Component	Function
Has Probability	Failure	Probability
Is Probability Of	Probability	Failure
Has Failure	Component	Failure
Violates	Failure	Function
Analyzes	Cause Explanation	Top Event Intermediate Event
Explains	Cause Explanation	Intermediate Event Basic Event
Is Analyzed By	Top Event Intermediate Event	Cause Explanation
Is Explained By	Intermediate Event Basic Event	Cause Explanation

4.1.6 Vytvoření instancí

Instance v ontologii popisují specifické vlastnosti komponentů, detaily selhání, detail funkce komponentu, či údaj o pravděpodobnosti selhání. V analýze FTA jsou důležitou součástí popisu detailů analyzovaného systému. Při vkládání určité instance musí být nejdříve vybrána určitá třída, dále vlastnost třídy, kterou daná instance rozvádí, a poté je možné danou instanci přiřadit.

Například třída *Function* nese název „Filtrační funkce", která má „*Function reference number*" 8 a „*Function description*" Filtrační funkce. Dále má vlastnosti vztahů

isFunctionOf, což znamená, že „Filtrační funkce" je funkcí konkrétního komponentu, zde filtru. Vlastnost *isViolatedBy* značí, že selhání tohoto komponentu může být například „ucpání palivového filtru".

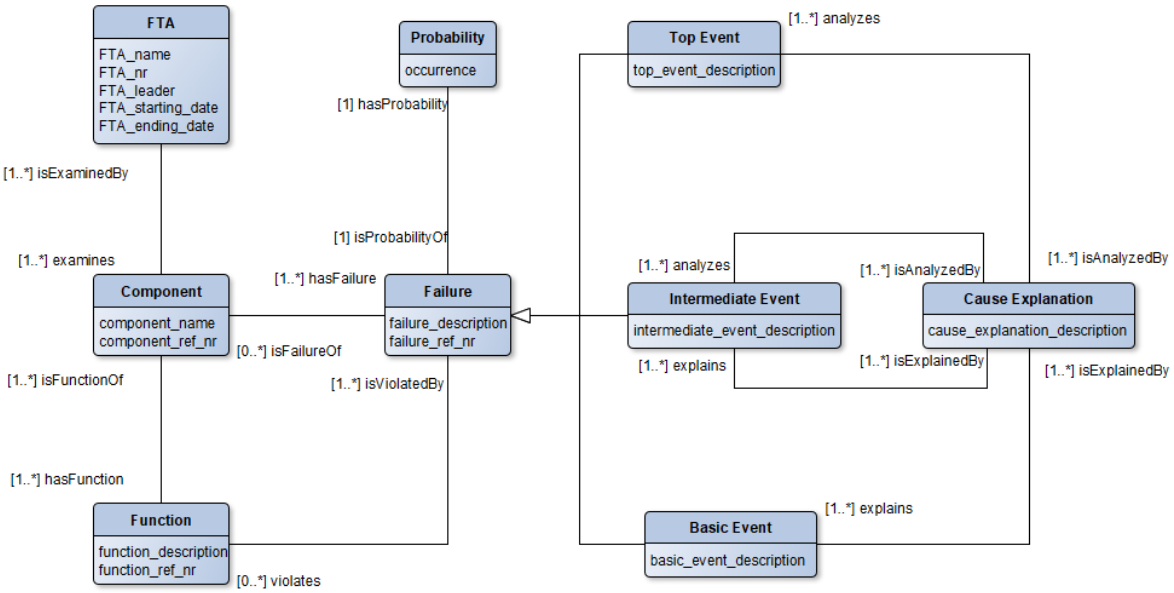
Tímto způsobem je možné přiřazovat instance jednotlivým třídám. Při zadávání instancí do ontologie je ošetřeno redundantní vkládání dat, protože udělit instanci lze v dané chvíli pouze jedné třídě. V tabulce 9 jsou vidět některé instance týkajících se palivového systému Tecnam z ontologie FTA.

Tabulka 9: Příklad instancí ontologie

Třída	Název instance	Vlastnosti dat	Označení instance
Component	Volič	Component name	C1
	Palivový ventil	Component name	C2
	Palivové potrubí	Component name	C3
	Palivový filtr	Component name	C4
	Karburátor	Component name	C5
	Hlavní přepínač	Component name	C6
	Mechanická pumpa	Component name	C7
	Palivová nádrž	Component name	C8
Failure	Zamezení průtoku paliva do motoru	Failure description	FM1
	Selhání elektrické pumpy	Failure description	FM2
	Ucpání palivového filtru	Failure description	FM3
	Ucpání levého karburátoru	Failure description	FM4
	Únik paliva z levé nádrže	Failure description	FM5
	Únik paliva z pravé nádrže	Failure description	FM6
	Protržení pravé nádrže	Failure description	FM7

4.2 Popis vytvořené ontologie

Po dokončení veškerých kroků procesu vytváření ontologie z předešlé kapitoly bylo možné ontologii zobrazit i graficky. V této kapitole se budu věnovat právě tomuto zobrazení a popisu jednotlivých tříd. Pro grafické zobrazení byl použit UML jazyk, protože umožňuje standardní způsob vizualizace ontologických modelů, jako například vzniklé ontologie FTA. Grafické zobrazení je na obrázku 13. Toto zobrazení ontologie usnadňuje představu vztahů mezi jednotlivými třídami, či jejich vlastnostmi.



Obrázek 13: Ontologie FTA v UML

Nově vzniklá ontologie představuje devět tříd, které jsou popsány v následujícím textu.

Function – Třída *Function* uchovává informaci o funkci určitého komponentu. Jeden z atributů této třídy je „*Function descritpion*“, který popisuje funkci komponentu, a druhý atribut je „*Function reference number*“, kterým se určuje referenční číslo funkce. Třída *Function* je propojena s třídou *Component* přes vlastnost *isFunctionOf* a s třídou *Failure* přes vlastnost *isViolatedBy*.

Component – Třída *Component* v ontologii zastupuje určitý komponent zkoumaného systému. Atributy této třídy tvoří „*Component name*“, který uchovává název daného komponentu, a atribut „*Component reference number*“, který označuje referenčním číslem daný komponent. Tato třída je propojena s třídami *Failure* přes vlastnost

hasFailure, dále s třídou *FTA* pomocí vlastnosti *isExaminedBy* a s třídou *Function* přes vlastnost *hasFunction*.

Failure – Třída *Failure* zastupuje v ontologii selhání funkce určitého komponentu. Tato třída má atributy „*Failure description*", což je popis určitého selhání, a atribut „*Failure reference number*", který určuje referenční číslo daného selhání. Dále je tato třída propojena s třídou *Probability* přes vlastnost *hasPropability*, s třídou *Function* přes vlastnost *violates* a s třídou *Component* pomocí vlastnosti *isFailureOf*. Tato třída má rovněž podtřídy *Top Event*, *Intermediate Event* a *Basic Event*.

Cause Explanation – Třída *Cause Explanation* v ontologii zastupuje, jak příčinu selhání komponentu, tak i následný efekt. Jediným atributem této třídy je „*Cause explanation description*", který v sobě nese popis příčiny selhání. Dále je tato třída provázána s třídou *Basic Event*, jejichž vztah popisuje vlastnost *explains*, dále s třídou *Intermediate Event* pomocí vlastností *explains* a *analyzes* a rovněž s třídou *Top Event* pomocí vlastnosti *analyzes*.

Probability – Třída *Probability* v ontologii zastupuje hodnocení pravděpodobnosti selhání jednotlivých komponentů. Tato třída obsahuje atribut „*Occurrence*", neboli výskyt. Třída *Probability* je propojena s třídou *Failure*, jejichž vztah definuje vlastnost *isProbabilityOf*.

FTA – Třída *FTA* zastupuje v ontologii záhlaví celého stromu FTA. Atributy, které tato třída obsahuje, jsou: název FTA („*FTA name*"), číslo FTA („*FTA number*"), vedoucí FTA („*FTA leader*"), datum zahájení FTA („*FTA starting date*") a datum ukončení FTA („*FTA ending date*"). Tato třída je provázána se třídou *Component* pomocí vlastnosti examines.

Top Event – Třída *Top Event* zastupuje v ontologii vrcholovou událost ve stromu FTA a je specializací nadtřídy *Failure*. Atributem této třídy je „*Top event description*" a je provázána se třídou *Cause Explanation*, jejichž vztah definuje vlastnost *isAnalyzedBy*.

Intermediate Event – Třída *Intermediate Event* zastupuje v ontologii mezilehlé události FTA a je také specializací nadtřídy *Failure*. Atributem této třídy je „*Intermediate event description*" a je provázána s třídou *Cause Explanation*, jejichž vztah definují vlastnosti *isAnalyzedBy* a *isExplainedBy*.

Basic Event – Třída *Basic Event* zastupuje v ontologii základní událost stromu FTA a je rovněž specializací nadtřídy *Failure*. Atributem této třídy je „Basic *event description*"

a je provázána s třídou *Cause Explanation*, jejichž vztah definuje vlastnost *isExplainedBy*.

Tento popis tříd a vztahů mezi nimi naznačuje, jakým způsobem třídy mezi sebou spolupracují a jaké vlastnosti vzájemné vztahy mají. Dále je u jednotlivých vztahů doplněná a popsaná kardinalita ve smyslu UML. Například vztah *hasFailure* mezi třídami *Component* a *Failure* má kardinalitu vztahu [1..*], což znamená, že komponent daného systému může mít více typů selhání. Rovněž je patrné, jakým způsobem jsou uchovávány informace potřebné ke vzniku spolehlivostní analýzy ontologií.

4.3 Validace ontologie v Protégé

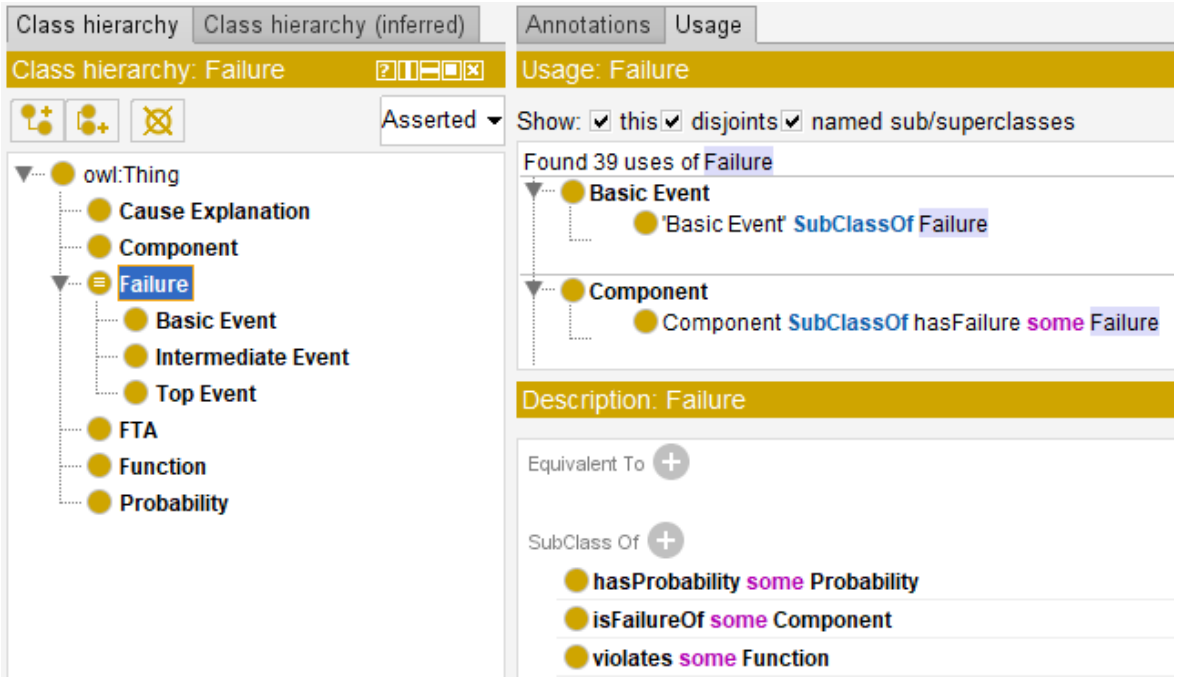
Pro zjištění celistvosti ontologie či korektnosti sémantické stránky ontologie bylo nutné ontologii ověřit pohledu její syntaxe a axiomatizace. Pro tento účel jsem zvolil open-source nástroj Protégé[1], který je navržen pro modelování a ověřování současných ontologií. Dnes tento program využívá přes 300 000 uživatelů po celém světě, čímž se řadí mezi nejvyužívanější programy s tímto využitím. Software byl vytvořen na Stanford University a první verze vyšla již v roce 1999. [23] V mé bakalářské práci pracuji s verzí Protégé 5.5.0.

Protégé pracuje s jazykem OWL (Web Ontology Language), což je jazyk vytvořený za účelem standardizace zpracování a možnosti převedení ontologií do strojové podoby. Pro ukládání a sdílení ontologií se používají syntaxe RDF/XML a OWL/XML. V této práci je použita syntaxe RDF/XML.

Na následujících obrázcích je popsáno, jakým způsobem tento program funguje a na základě jakých informací následně validuje danou ontologii. Dále bude popsáno, jakým způsobem se zadávají vstupní data, jako například třídy ontologie, hierarchie tříd, vlastnosti tříd či samotné instance.

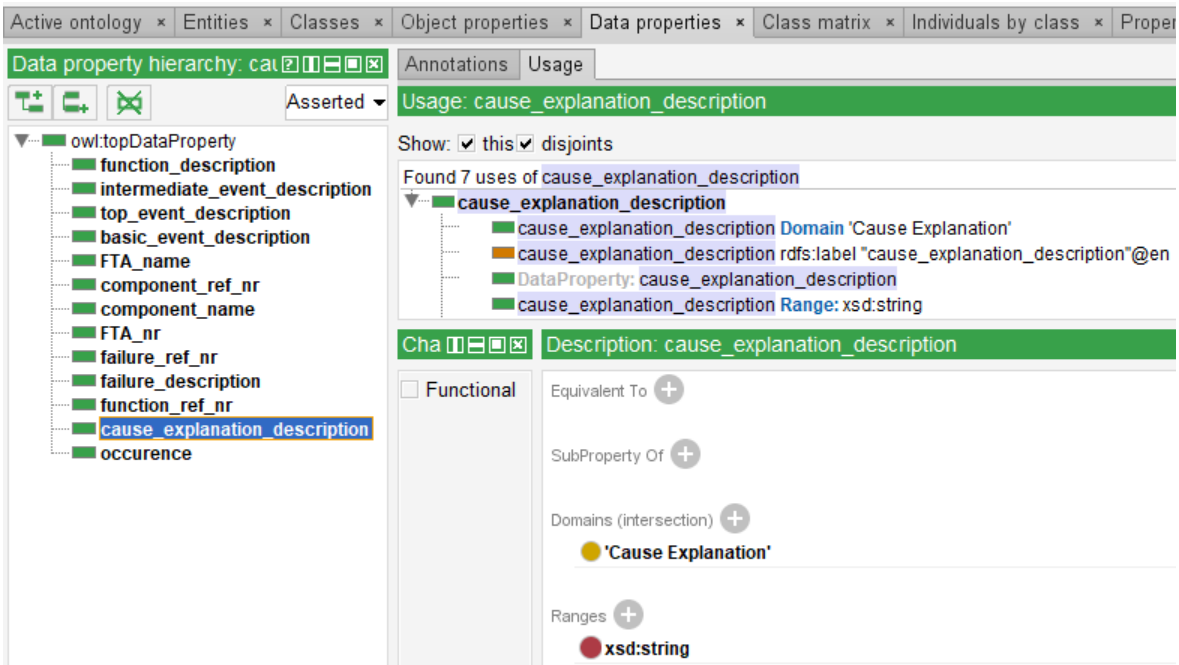
Na obrázku 14 je v levém okně vložená hierarchie tříd popsaná na obrázku 12, v pravém horním okně je bližší popis a detail třídy *Failure*. Zde jsou vidět například detaily dané třídy či jejich vlastnosti. V pravém dolním okně je modelovaný vztah s jinými třídami (axiomy), v tomto případě s třídou *Probability*, *Component* a *Function*.

[1] https://protege.stanford.edu/

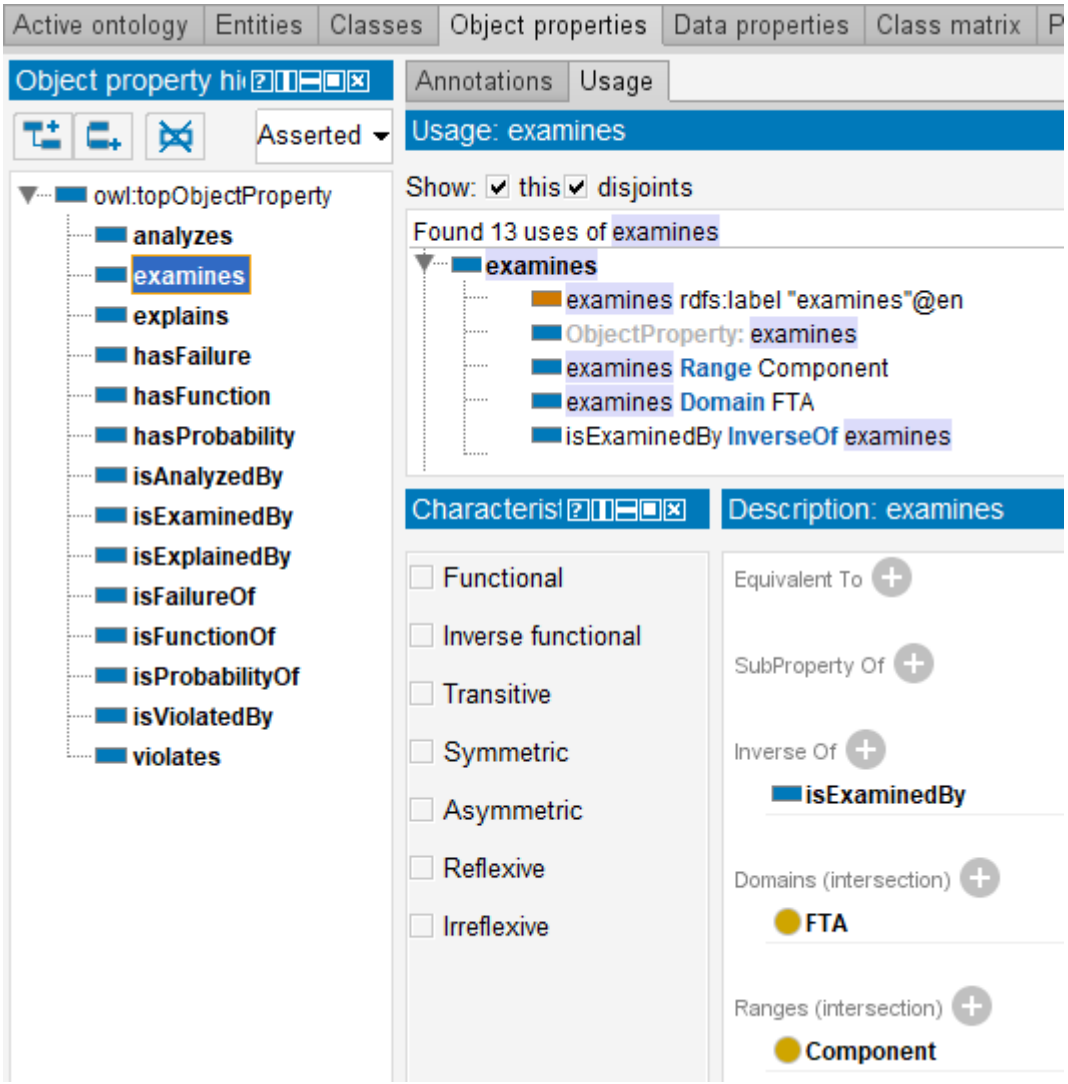


Obrázek 14: Třídy ontologie v Protégé

Dále na obrázku 15 jsou zobrazeny jednotlivé vlastnosti tříd popsané v tabulce 7. V levém okně jsou uloženy veškeré vlastnosti tříd v ontologii FTA. V pravém horním okně jsou vidět detaily vlastnosti „*Cause explanation description*" včetně domény, v tomto případě je to třída *Cause Explanation*. Ve spodním pravém okně jsou dále možnosti volby domény či typu hodnoty, která je u vlastnosti „*Cause explanation descrtiption*" nastavena na hodnotu typu „*String*".



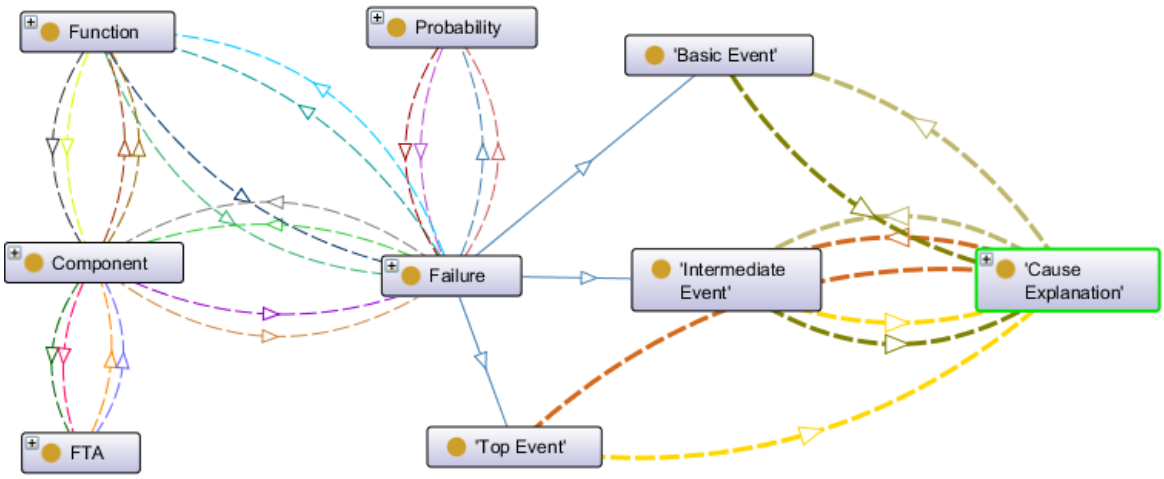
Obrázek 15: Vlastnosti tříd v Protégé



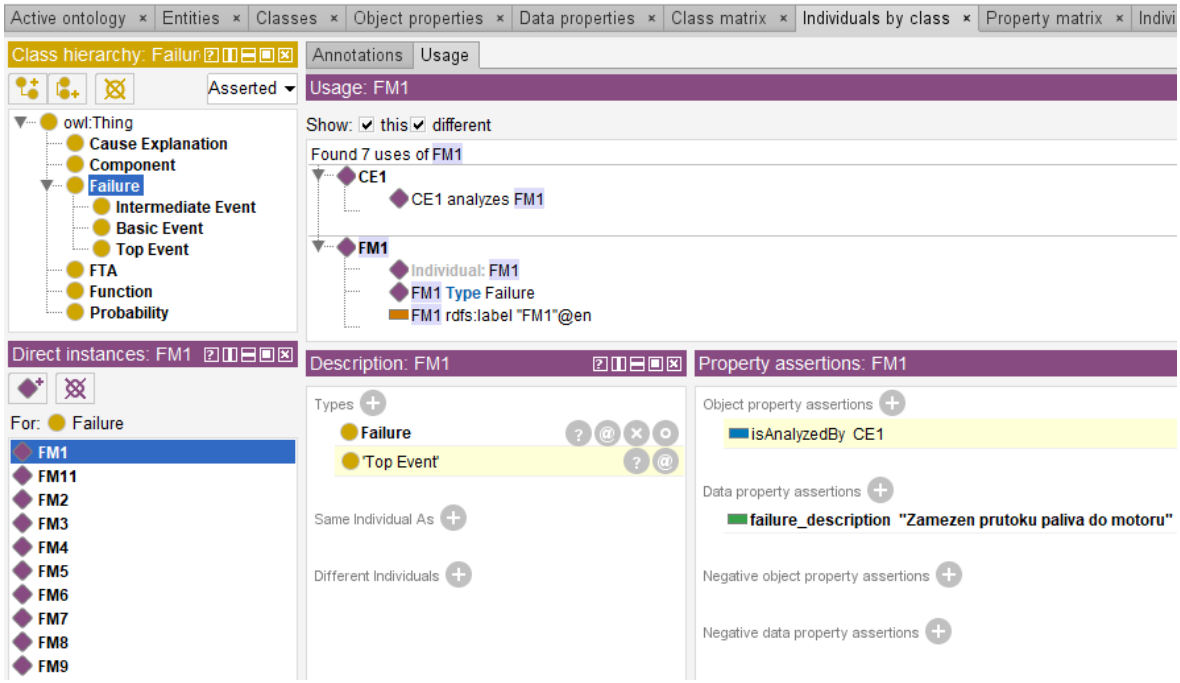
Obrázek 16: Vlastnosti vztahů v Protégé

Na obrázku 16 jsou zobrazeny detaily vlastností jednotlivých vztahů mezi třídami ontologie FTA. V levém okně je seznam vlastností všech vztahů v ontologii, například *violates*. Dále je v pravém horním okně detailně popsána vlastnost vztahu *examines*. V pravém dolním rohu je uveden nejprve inverzní vztah *isExaminedBy* ke vztahu *examines*, dále doména, což je třída *FTA*, a jako poslední rozsah, což je třída *Component*.

Dále jsou na obrázku 17 v nástroji Protégé graficky vyobrazené třídy ontologie a vztahy mezi nimi.



Obrázek 17: Grafické zobrazení ontologie v Protégé



Obrázek 18: Instance ontologie v Protégé

Na obrázku 18 jsou zobrazeny vytvořené instance, blíže definované v tabulce 9 ontologie, v Protégé. V tomto případě je selektována jedna instance třídy *Failure*, konkrétně „Failure FM1“, která má název „Zamezení průtoku paliva do motoru“. Při tvorbě instancí byla využívána funkce „reasoningu“, která je součástí nástroje. V tomto případě funkce správně rozhodla o tom, že FM1 je vrcholovou událostí celého stromu FTA palivového systému. Tato funkce umí na základě matematické logiky doplňovat informace a vlastnosti instancí na základě již vytvořených vztahů ontologie. „Reasoner“ značně šetří čas a rovněž kontroluje správnost zadávání.

Po validaci ontologie v Protégé pomocí „reasoneru“ program nevykazoval žádné sémantické chyby. Proto se tato ontologie dá považovat za celistvou a funkční. Rovněž byly vložené instance správně definovány a popsány.

4.4 Porovnání výsledků

V této podkapitole je nutné porovnat dosažené výsledky za pomocí tradiční metody FTA a ontologického přístupu FTA. Porovnávaná bude časová náročnost, správnost výsledků či konzistence a organizovanost výsledných dat.

Při tvorbě FTA pomocí tradičního způsobu bylo nutné ručně definovat jednotlivé události (vrcholovou, mezilehlé, základní) a mezi nimi logická hradla, což je z hlediska časové náročnosti pomalé, zejména při analýze složitých systémů. Tento způsob vytváření FTA u ontologického přístupu naopak není nutný, protože jednotlivé druhy událostí a logická hradla jsou automaticky přirazeny na základě definovaných syntaxí.

Vytvoření FTA pomocí ontologického přístupu je rovněž časově úspornější z důvodu prostého definování módů selhání, jejich příčin a efektů. Dále použití ontologického přístupu zajišťuje, že jsou vstupní data sémanticky správně definovaná, konzistentní a organizovaná.

Dosažené výsledky pomocí ontologického přístupu se shodovaly s výsledky dosažených pomocí tradičního přístupu FTA. Proto lze výstupní data získaná pomocí ontologického přístupu považovat za správná.

5 Diskuse

Tradiční přístup spolehlivostních analýz v dnešní době již nestačí rychlosti vývoje komplexních a robustních systémů letadel. Protože všichni letečtí výrobci se spoléhají na tyto analýzy, je nutné, aby fungovaly správně, odhalovaly možnosti selhání již v raném stádiu, a tudíž byla možnost jim předcházet.

Přínosem moderních přístupů k hodnocení spolehlivosti na základě ontologií je možnost uložení analyzovaných dat v databázích, což přináší schopnost s těmito daty pracovat v budoucnu, sdílet je s jinými výrobci, či je později porovnávat mezi sebou. Ontologický přístup k řešení problému dále zajišťuje, že vložená data jsou z hlediska sémantiky a konzistence správná. Rovněž z hlediska nemožnosti vložení redundantních instancí, je ontologie méně náchylná na lidskou chybu. Souhrnně lze říct, že analýza spolehlivosti provedená pomocí ontologického přístupu poskytuje lepší, konzistentnější a důvěryhodnější výsledky.

Jednou z největších výhod těchto konceptuálních modelů je skutečnost, že mohou být snadno upraveny nebo rozšířeny bez porušení vnitřní struktury celé ontologie. To dává ontologiím možnost být využívány v praxi pro mnoho cílů. Jedním z účelů je možnost práce se spolehlivostní analýzou ve strojově čitelném prostředí, protože jednotlivé třídy, vtahy mezi nimi, či samotné instance byly modelovány tak, aby mohly být uloženy v systematické struktuře počítačového prostředí.

Pro využití potenciálních přínosů spolehlivostních analýz je základem pochopení jejich fungování. Proto je důležité, aby pracovníci vyhodnocující tyto analýzy byli dostatečně vyškolení jak se systémy, které budou analyzovat, tak s fungováním FTA. Případná analýza prováděna nedostatečně obeznámeným pracovníkem by mohla vést k zavádějícím nebo nesprávným výsledkům.

Pravděpodobně v této skutečnosti bych hledal hlavní nevýhodu. Protože, aby tento konceptuální model mohl být použit v praxi na různých komponentech, bylo by nutné ho nejprve vyzkoušet na více leteckých součástech. Je nutné zmínit, že ontologie byla navržena jako základ pro software, který bude v budoucnu představovat pevnou součást v oboru posuzování spolehlivosti. Závěrem bych připomněl, že implementace těchto konceptuálních modelů tvoří velký potenciál v leteckém průmyslu z hlediska usnadnění a zvýšení přesnosti posuzování spolehlivosti.

Závěr

Cílem této práce bylo navržení konceptuálního modelu FTA, prostřednictvím kterého je možné zlepšit identifikaci selhání a jejich propagaci systémem, dále proces vlastní spolehlivostní analýzy, či ukládání a sdílení analyzovaných dat. Konceptuální model FTA byl navržen na základě informací převzatých z ontologie NASA.

Jednotlivé třídy a vztahy byly z důvodu ověření celistvosti a správnosti ontologie modelovány v programu Protégé, který využívá funkce „reasoningu". Tato funkce programu Protégé umí ověřit, zda třídy a vztahy mezi nimi jsou sémanticky správně navržené a nadefinované. Dále kontroluje vložené instance ontologie, zda jsou náležitě definovány a popsány.

Používání moderních ontologií v praxi má zajistit možnost uchování a předávání znalostí za účelem budoucího využití v různých oborech. Účelem navržení konceptuálního modelu FTA je možnost využití této metody v praxi za účelem posuzování spolehlivosti.

Konceptuální model FTA představený v této bakalářské práci čerpá detaily ohledně sémantiky tříd a vztahů mezi nimi z diplomové práce Simony Bolčekové [8], která vytvořila ontologii spolehlivostní metody FMEA. Ta pro svou práci využívala reálná data, která ji poskytla firma GE Aviation Czech, s.r.o. o olejovém systému turbovrtulového motoru M601. Rovněž detaily vztahů a jednotlivých tříd jsou přizpůsobeny metodám, které společnost GE Aviation Czech, s.r.o. používá při práci s daty.

Možné limitace mnou vytvořené ontologie FTA spočívají v zaměření na spolehlivostní analýzu FTA, proto v případě nutnosti použití jiné spolehlivostní metody, by tato ontologie musela být upravena nebo doplněna o potřebné koncepty. Další limitaci může tvořit skutečnost, že ontologie byla demonstrována pouze na jediném systému, z tohoto důvodu by při implementaci na jiném systému musela být ontologie nejprve ověřena.

Je žádoucí, aby ontologie v budoucnosti usnadnila vyhodnocování spolehlivostních analýz typu FTA při posuzování spolehlivosti letadel. Konceptuální model navržen v této práci může sloužit jako základ pro budoucí vývoj FTA v oblasti letecké techniky. Toho dosahuje prostřednictvím definování tříd, vztahů a popisem vlastností za účelem zajištění konzistence vstupních či výstupních dat, snížení časové náročnosti analýzy nebo usnadnění práce s robustními systémy. Implementací této ontologie

v praxi vede k omezení vzniku možných rizik a zvýšení spolehlivosti, respektive bezpečnosti v letecké dopravě.

Zdroje

1. SELVAN, T.A., C. JEGADHEESAN, P. Ashoka Varthanan VARTHANAN a K.M. SENTHILKUMAR. Failure effects and resolution of modes: a novel FMEA treatise for finalizing mould designs in foundries. South African Journal of Industrial Engineering, 2013. Studie.
2. VESELY, V. E., F. F. GOLDBERG, N. H. ROBERTS a D. F. HAASL. Fault tree handbook. Washington D.C., USA: U.S. Nuclear Regulatory Commision, 1981.
3. LAPP, Steven A. a Gary J. POWERS. Computer-aided Synthesis of Fault-trees. IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, 1977. Ontologie.
4. JAHODA, M. Bezpečnostní inženýrství – HAZOP, FTA, FMEA [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: https://docplayer.cz/7152411-Bezpecnostni-inzenyrstvi-hazop-fta-fmea-m-jahoda.html
5. FMEA – Vyhodnocení rizik [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: https://lean6sigma.cz/fmea/
6. MIL-STD-785B – Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production
7. Fault Tree Analysis [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: https://www.weibull.com/basics/fault-tree/index.htm
8. BOLČEKOVÁ, Simona. Reliability analysis of mechanical and lubrication system of an aircraft engine. Praha, Česká republika, 2019. Diplomová práce. Fakulta dopravní, ČVUT. Vedoucí práce Ing. Andrej Lališ, Ph.D.
9. NOY, Natalya F. a Deborah L. MCGUINNESS. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. Stanford, CA, USA, 2019. Stanford University.
10. DEVAUX, Michaël and LAMANNA, Marco. The Rise and Early History of the Term Ontology (1606–1730). Quaestio.Yearbook of the History of the Metaphysics. 2009. pp. 173-208
11. Jacob Lorhard (1561-1609): The Creator of the Term "Ontologia" (1606) [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: https://www.ontology.co/jacob-lorhard.htm
12. GOCKEL, Rudolph. Lexicon philosophicum quo tanquam clave philosophiae fores aperiuntur. 1915.
13. FTA [online]. 2020 [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: http://www.ikvalita.cz/tools.php?ID=52
14. TAYLOR, J.R. Automated HAZOP revisited. Lyngby, Dánsko, 2017. Technical University of Denmark.

15. VENCESLAU, Allan, Raphaela LIMA, Luiz Affonso GUEDES a Ivanovitch SILVA. Ontology for computer-aided fault tree synthesis. Natal, Brazílie, 2014. Ontologie. Federal University of Rio Grande do Norte
16. CASTET,Jean-Francois; BAREH, Magdy; NUNES, Jeffery; OKON, Shira; GARNER, Larry; CHACKO, Emmy; IZYGON, Michel. Failure Analysis and Products in a Model-Based Environment. 2018 IEEE Aerospace Conference.
17. TECNAM P2002-JF Aircraft Flight Manual [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: http://acjb.net/documents/manuels_vol/manuel_tecnam_p2002_jf.pdf
18. A computerized fault tree construction methodology. Leicestershire, Velká Británie, 1997. Ontologie. Loughborough University of Technology.
19. Spolehlivost. Brno, Česká republika, 2008. FIT VUT v Brně.
20. MYKISKA, A. Spolehlivost technických zařízení. Praha, Česká republika. Česká společnost pro jakost, 1991
21. NOY, Natalya and MCGUINESS, Deborah. Ontology Development 101: A guide to creating your first ontology. Stanford University, Stanford, CA, 94305. 2001.
22. Airplane Flight Manual DA 42 NG [online]. Neustadt, Rakousko, 2012 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: http://support.diamond-air.at/fileadmin/uploads/files/after_sales_support/DA42_New_Generation/Airplane_Flight_Manual_with_MAM42-600_DA42-VI/Basic_Manual/70116e-r4-complete.pdf
23. Musen, M.A. The Protégé project: A look back and a look forward. AI Matters. Association of Computing Machinery Specific Interest Group in Artificial Intelligence, 1(4), June 2015. DOI: 10.1145/2557001.25757003.