

Na tomto místě bude oficiální zadání vaší práce

- Toto zadání je podepsané děkanem a vedoucím katedry,
- musíte si ho vyzvednout na studijním oddělení Katedry počítačů na Karlově náměstí,
- v jedné odevzdané práci bude originál tohoto zadání (originál zůstává po obhajobě na katedře),
- ve druhé bude na stejném místě neověřená kopie tohoto dokumentu (tato se vám vrátí po obhajobě).

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra počítačů



Diplomová práce
Dokončení projektu Migdb

Bc. Martin Lukeš

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Macek

Studijní program: Otevřená informatika, strukturovaný, navazující Magisterský

Obor: Softwarové inženýrství a interakce

15. prosince 2014

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Ondřeji Mackovi za pomoc s vypracováváním této práce. Dále bych chtěl poděkovat svým kolegům z týmu Migdb, obzvláště Martinu Mazanci, kteří svými připomínkami napomáhali ke zkvalitnění této práce a zahlazení některých nepřesností. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat firmě CollectionsPro s.r.o, jež přišla s původní myšlenkou, která vedla k vytvoření Migdb týmu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §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 22. 5. 2014

.....

Abstract

This work is concerned with specifying the contract and implement the transformation changes of the application model into changes of the database model. It also deals with the automation of the derivation of the changes applied to one model leading to another without loss or with minimal loss of stored data.

Abstrakt

Tato práce se zabývá upřesněním kontraktu a realizací transformací změn aplikačního modelu na změny modelu databázového. Dále se zabývá automatizací odvození změn vedoucích z jednoho modelu k druhému bez ztráty či s minimální ztrátou uložených dat.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivace	1
2	Projekt Migdb	3
2.1	Framework Migdb	3
2.2	Moduly frameworku	5
2.3	Metamodely	6
2.4	Aplikační metamodel	9
2.5	Metamodel struktury aplikace	9
2.6	Databázový metamodel struktury	10
2.7	Relační model	13
2.8	Operace nad aplikačním modelem	14
2.8.1	Seznam aplikačních operací	14
2.8.2	Rozdělení aplikačních operací	17
2.8.3	Vlastnosti operací	18
2.9	Databázové operace	20
2.10	QVTo	22
2.10.1	Ukázka kódu	24
2.11	ORMo (ORM operací)	25
3	Dokončení projektu Migdb	29
3.1	Historický vývoj operací	29
4	Popis problému, specifikace cíle	31
4.1	Řešení problému rozpoznávání operací	31
4.1.1	Diff a delta notace	31
4.1.2	Rozpoznávání operací	34
4.1.3	Obecné principy model matching	34
4.1.4	Graph matching	35
5	Vytvořené algoritmy rozpoznávání operací	37
5.1	Stavový algoritmus	37
5.1.1	Energie modelu	39
5.2	Návrh ze studia článků	44
5.3	Základní párovací algoritmus	44
5.4	Rozšířený algoritmus	49

5.4.1	Diff elementy	50
5.4.2	Popis rozšířeného párovacího algoritmu	50
6	Testování projektu Migdb	53
7	Ukázka zdrojového kódu práce	55
8	Závěr	59
9	Seznam použitých zkratk	63
10	UML diagramy	65
11	Instalační a uživatelská příručka	67
12	Obsah přiloženého CD	69
	Literatura	71

Seznam obrázků

2.1	Rozdělení vrstev softwaru - převzato z [Maz14]	4
2.2	Rozdělení vrstev softwaru - převzato z [Tar12] a částečně upraveno	5
2.3	Aplikační metamodel v počátku vývoje obrázek převzat z [Luk11]	7
2.4	Aplikační metamodel v průběhu vývoje obrázek převzat z [Jez12]	8
2.5	Rootové elementy aplikačního modelu	9
2.6	Struktura aplikačního metamodelu	10
2.7	Struktura databázového metamodelu	11
2.8	Struktura databázového metamodelu v průběhu vývoje, obrázek převzat z [Tar12]	12
2.9	Struktura databázového metamodelu v průběhu vývoje, obrázek převzat z [Luk11]	13
2.10	Ukázka operace AddParent	19
4.1	Diff model převzatý dle [Cic08]	33
4.2	Seznam diff elementů	33
4.3	Typy graph matchingu	36
5.1	Počáteční model	41
5.2	Cílový model	41
12.1	Seznam přiloženého CD — příklad	69

Seznam tabulek

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivace

V průběhu poslední dekády je vyvíjeno více nového softwaru než kdy předtím a současně je i stávající software stále více a častěji modifikován, ať už je to zapříčiněno existencí rozsáhlého legacy systému, špatného návrhu či upravováním funkcionality softwaru. Dá se předpokládat, že díky masivnímu rozšíření informačních technologií, obzvláště mobilních tento trend nejenže bude pokračovat, ale bude i dále na vzestupu.

Díky nutnosti zpracování a ukládání velkého množství dat se již od padesátých let dvacátého století prosazovaly myšlenky vedoucí k vytvoření speciálních systémů k těmto účelům určeným - tento software se v české odborné literatuře nazývá systém řízení báze dat (SŘBD).

Kvůli nutnosti dokumentace a komunikace mezi vývojáři vznikají různé typy modelů. Objektový model aplikace popisuje strukturu aplikace a je doplněn modelem databázovým popisujícím stav databáze. Nejrozšířenějším typem databáze jsou v nynější době databáze relační, které uspořádávají data podle relačního modelu.

Aby byla aplikace funkční, je nutné zajistit konzistenci mezi databázovým a aplikačním modelem. Tento problém byl již vyřešen a jeho řešení bývá v odborných kruzích nazýváno objektově relační mapování (ORM) [wc14c]. Dnešní implementace ORM jsou schopny nejen transformovat aplikační model na model databázový, ale také vyjádřit změnu v struktuře aplikace pomocí skriptů Data definition Language (DDL), podmnožiny jazyka SQL. Tyto skripty pozmení model databázový tak aby odpovídal modelu aplikačnímu. Tato konzistence je zaručena automatickou transformací aplikačního modelu na model databázový, což vývojářům softwaru šetří čas strávený vývojem softwaru.

Problém nastává, jakmile zahrneme do zachování nejen strukturu dat, ale i samotná data. Změnit strukturu dat a zároveň transformovat data tak, aby měla stejnou vyjadřovací schopnost jako původní data je zatím problémem nevyřešeným. Považujme změny aplikačního modelu jako smazání třídy, atributu apod za změny zachovávající informaci.

Práce obsahuje tyto kapitoly :

Kapitola 2

Projekt Migdb

Tato diplomová práce byla napsána v rámci projektu Migdb, který vznikl díky spolupraci akademické sféry se sférou komerční v roce 2011. Komerční sféra byla v tomto případě zastoupena firmou CollectionsPro, s.r.o (dále jen CP) a akademická potom Katedrou počítačů fakulty Elektrotechnické na pražském Českém vysokém učení technickém. Ambiciózním cílem tohoto projektu bylo od počátku projektu definování ucelené množiny změn, tj. operací, kterými mohou vývojáři změnit model aplikace a transformovat tyto změny do spustitelného SQL skriptu, který změní strukturu databáze a přesune data do odpovídajících elementů z modelu aplikace.

Tato diplomová práce se zabývá se zkoumáním změn aplikačního modelu, jejich popisem a rozpoznáváním změn vedoucích od jednoho aplikačního modelu k druhému. Dále pak dokončuje a upřesňuje kontrakt takzvaných operací nad aplikačním modelem, popisuje jejich transformaci na změny modelu databázového a následným vygenerováním SQL příkazů spustitelných nad relační databází PostgreSQL. Dalším tématem této diplomové práce je automatizace odvození množiny změn ze vstupních dvou modelů.

V rámci Migdb bylo v posledních letech vytvořeny a obhájeny 4 bakalářské práce a 2 diplomové práce členů Migdb.

Jednalo se o tyto bakalářské práce - bakalářská práce mé osoby [Luk11], jež pojednávala o problematice mapování aplikačního modelu na model databázový, bakalářské práce Jiřího Ježka [Jez12] popisující aplikační model a jeho transformace, bakalářská práce Petra Taranta [Tar12] popisující databázový model a jeho transformace a poslední bakalářskou prací je práce popisující testování projektu [Luk13].

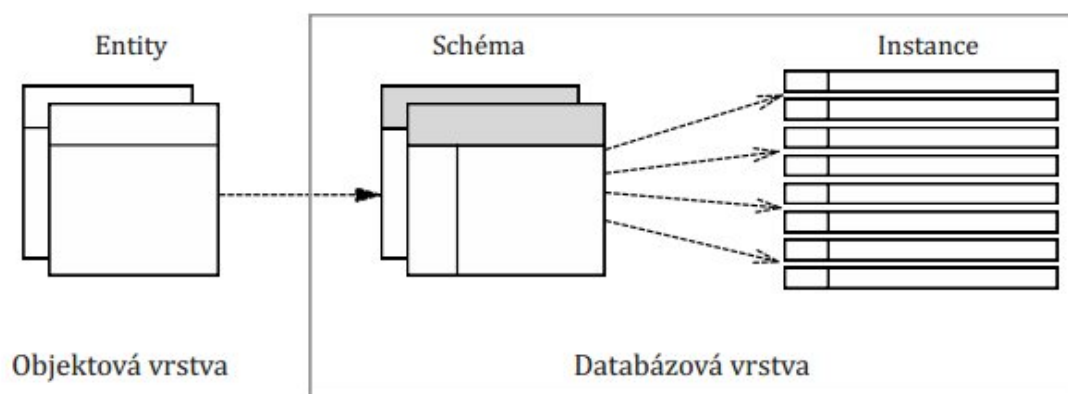
V roce 2014 byla obhájena diplomová práce Petra Taranta [Tar14] formálně specifikující aplikační operace a diplomová práce Martina Mazance [Maz14] definující doménově specifikující jazyk aplikačních operací.

Projekt Migdb byl započat v spolupráci se společností Collections Pro. Výsledky dosavadní práce byly v roce 2012 prezentovány jako case-study na prestižní modelové konferenci Code Generation 2012 [PMH12] v Anglickém Cambridge.

2.1 Framework Migdb

Tato sekce je věnována krátkému představní frameworku Migdb. Projekt Migdb se věnuje evolučnímu procesu v průběhu vývoje software, konkrétně jen dvěma částmi - aplikační

a databázovou vrstvou. Rozdělení vrstev software je zobrazeno na obr. 2.1 převzatého z [Maz14]. Objektová vrstva každé aplikace je reprezentována jejím modelem obsahujícím entity aplikace. Databázová vrstva zajišťující perzistenci dat obsahuje jednak schéma definující strukturu databáze, ale také samotné perzistované instance dat.

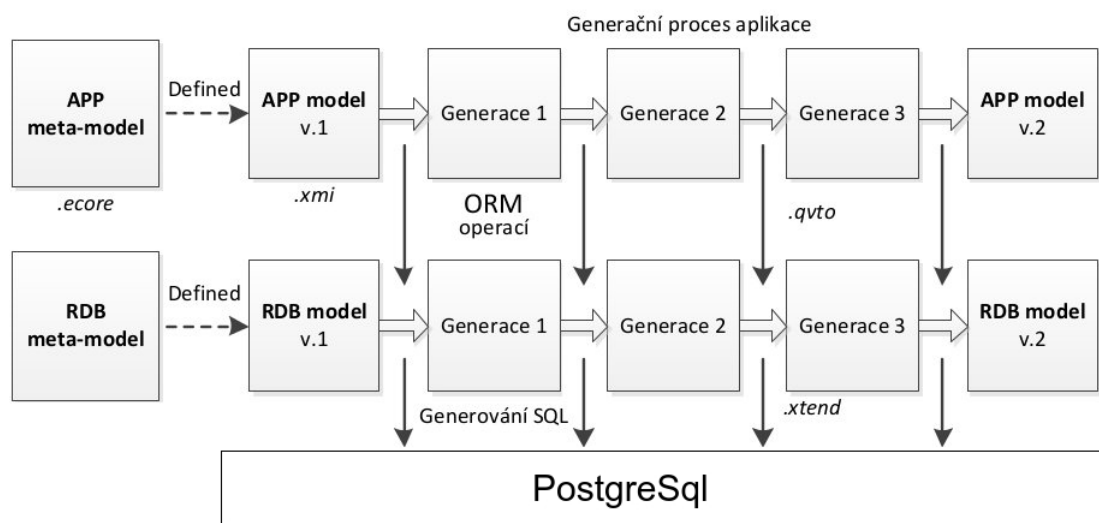


Obrázek 2.1: Rozdělení vrstev softwaru - převzato z [Maz14]

Proces evoluce změn v životním cyklu je definován v [Jez12] následovně:

1. redefinice entit na objektové vrstvě
2. opětovná tvorba databázového schématu dle redefinovaných entit
3. sběr potřebných informací pro migraci dat a příprava migračního skriptu
4. ověření proveditelnosti migračního skriptu
5. migrace dat

Po ověření nadbytečnosti vrstvy ověřující proveditelnost migrovaných skriptů byl tento koncept přepracován do formy zobrazené na obrázku 2.2. Na obrázku vidíme aplikační a databázový metamodel.



Obrázek 2.2: Rozdělení vrstev softwaru - převzato z [Tar12] a částečně upraveno

Instancemi aplikačního APP metamodelu jsou jednotlivé generace aplikačního modelu. Instancemi databázového RDB metamodelu jsou potom generace RDB modelů. Změny, které se provádějí v aplikaci jsou transformovány na databázové operace aplikovatelné na RDB model. Databázové operace jsou potom transformovány na SQL skripty. V původní představě byl do frameworku zapojen i exekutor těchto skriptů nad databází, ale vzhledem ke znovupoužitelnosti SQL souborů byl z frameworku vypuštěn.

V rámci projektu jsem vytvořil ve své bakalářské práci [Luk11] ORM transformaci aplikační struktury na databázovou a následně vygenerování SQL skriptu vytvářející strukturu aplikace. Tento nástroj není ve frameworku použit při nasazení, ale byl použit při testování frameworku - viz kapitola 6. Framework Migdb pracuje oproti původní sekvenční představě iteračně viz obr. 2.1. V první iteraci je první aplikační operace aplikována na aplikační model, transformována do databáze, kde je její obraz (sekvence databázových operací) aplikován na databázový model. Po provedení první iterace prochází tímto cyklem druhá operace, potom třetí ...

2.2 Moduly frameworku

Framework byl od začátku vývoje používán v rámci Eclipse IDE [Fou14a]. Nad vrstvou aplikační byly vytvořeny 2 moduly. Modul Operations a modul aplikační evoluce. Modul Operations umožňující napsat vyjádřit vstupní operace pomocí textového souboru zapsaném v DSL jazyce. Kromě zápisu tento modul transformuje textově zapsané operace do XMI [OMG14b] souboru pomocí model to text transformačního jazyka Xtend [Fou14b]. Tento modul je podrobně popsán v [Maz14] a není v této práci blíže rozebírán. Modul aplikační evoluce definuje pro každou operaci, jaký vliv bude mít provedení této operace na daný apli-

kační model a jaké podmínky musí daný aplikační model splňovat, aby se tato operace dala úspěšně provést. Více v sekci 2.8. Nad databázovou vrstvou je definován modul Databázové evoluce, který pro každou databázovou operaci definuje, jaký bude mít tato operace vliv na databázový model a jaké podmínky musí daný model splňovat, aby se tato operace mohla úspěšně provést. Více v sekci 2.9.

Spojnicí mezi aplikačním a databázovým modulem tvoří dva moduly - modul ORM a modul ORM_o. Modul ORM transformuje model struktury aplikace na model struktury databáze. Tento modul byl prezentován v mé bakalářské práci [Luk11] a není více v této diplomové práci rozebírán. Modul ORM_o transformuje seznam aplikačních operací na seznam operací databázových. Tento modul byl popsán v [Jez12] a [Tar12]. Tento modul tvoří motor celého frameworku a jeho popisu je věnována sekce 2.11.

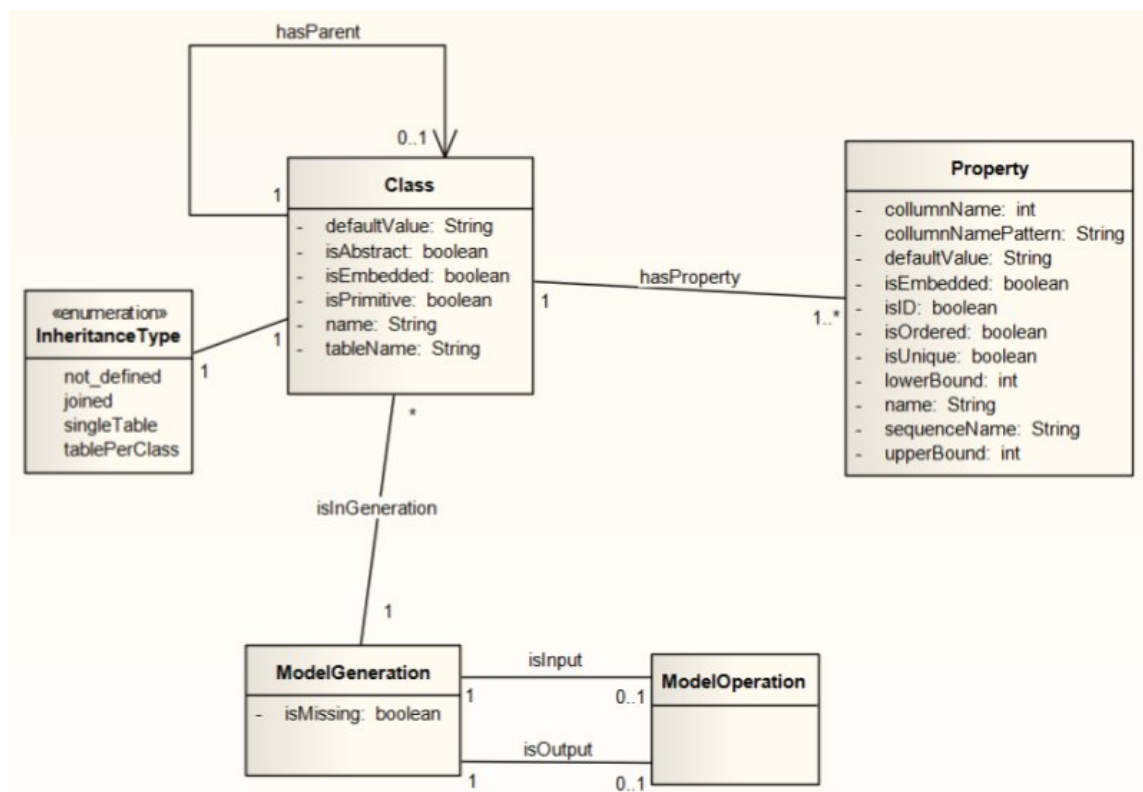
Výstupem frameworku Migdb není databázový model, ale textový soubor s SQL příkazy. Textové výstupy vytvářejí dva moduly generátorů kódu. SQL generátor generuje ze souboru operací výstupní upgrade skript zajišťující samotnou migraci dat. Schema generator potom generuje ze souboru databázové struktury SQL skript vytvářející strukturu databáze. Ani jedním z těchto modulů se nebudu v této práci blíže zabývat. Oba dva generátory byly napsány v jazyce Xtend.

Nejnovějším modulem frameworku je modul OPS recognition. Tento modul se snaží ze dvou vstupních aplikačních modelů odvodit seznam aplikačních operací, které byly provedeny nad zdrojovým modelem a transformovaly ho do modelu výstupního. Tento modul je samostatným nástrojem a pracuje nezávisle na ostatních modulech. Je mu věnována sekce rozpoznávání operací 4.1.

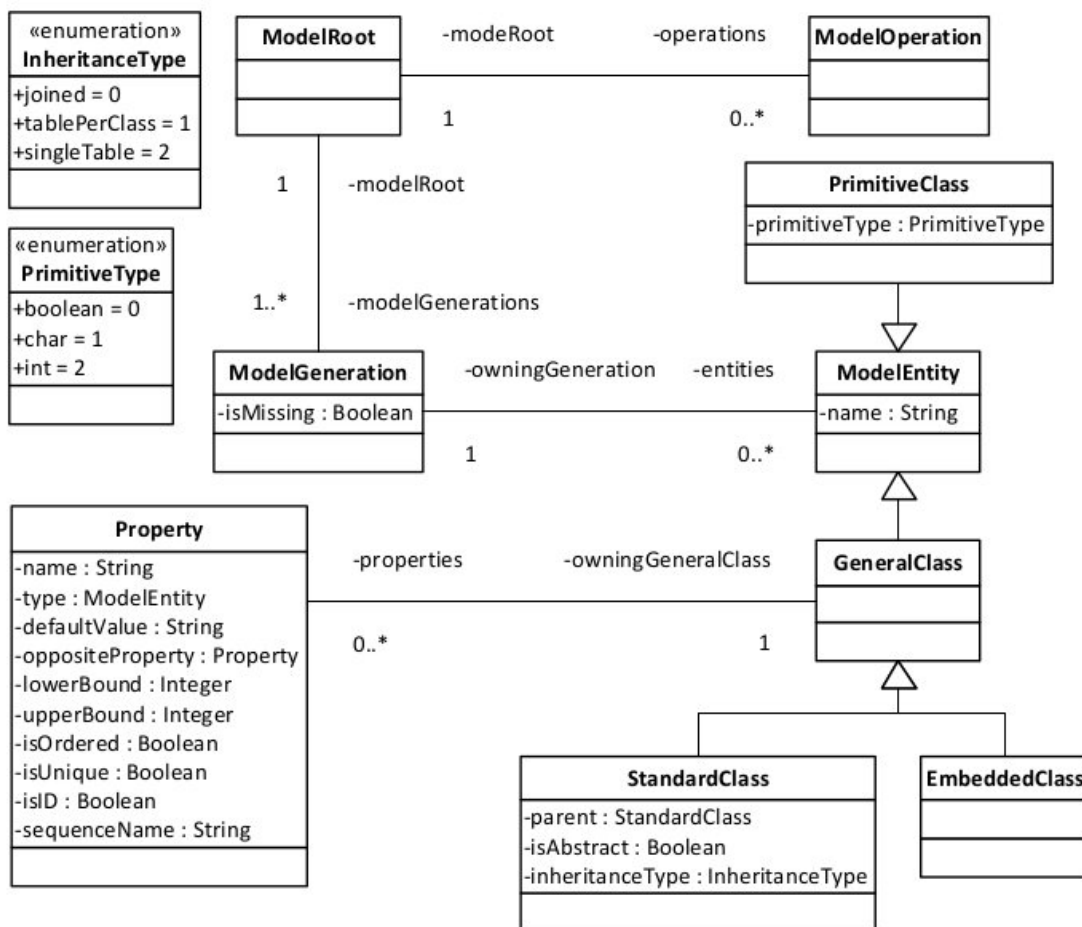
Moduly Aplikační evoluce, databázové evoluce, ORM, ORM_o a OPS recognition byly napsány v jazyce QVT Operational (QVTo) [OMG14a]. Za účelem ověření správné funkcionality byl vytvořen projekt Migdb.testing.run, který je zmíněn v kapitole 6.

2.3 Metamodely

Frameworku MigDb je postaven na konceptu MDA [OMG14c] a pro popsání jednotlivých vrstev software zavádí pojem metamodel. Metamodel definuje strukturu popsaných modelů stejně jako model definuje strukturu dat odpovídajících tomuto modelu. Ve frameworku Migdb jsou popsány dva metamodely - aplikační metamodel a databázový metamodel. Aplikační metamodel definuje elementy tvořící strukturu aplikace, množinu aplikačních operací a diff entity použité při rozpoznávání operací.



Obrázek 2.3: Aplikační metamodel v počátku vývoje obrázek převzat z [Luk11]



Obrázek 2.4: Aplikační metamodel v průběhu vývoje obrázek převzat z [Jez12]

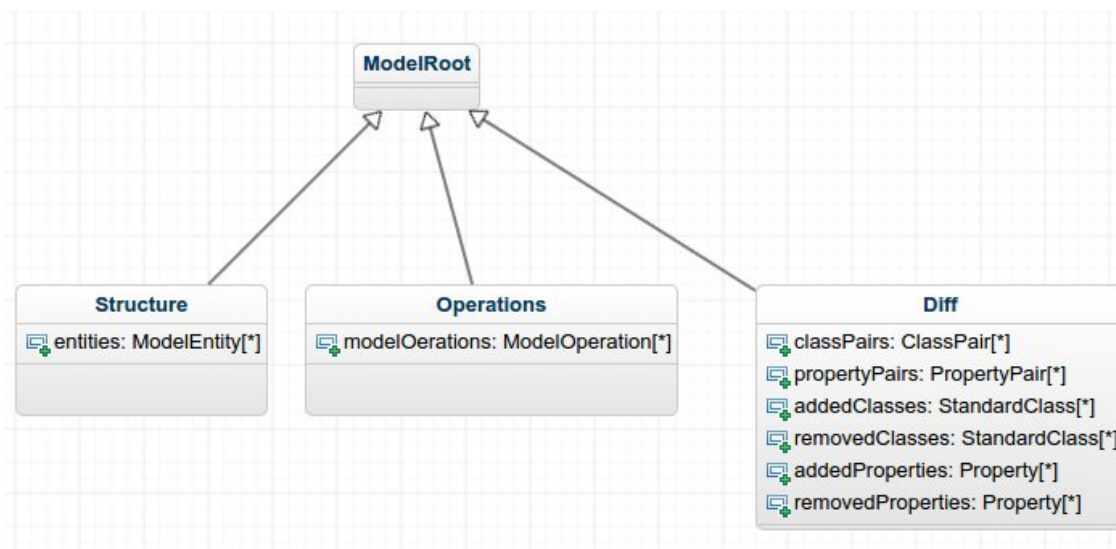
2.4 Aplikační metamodel

Aplikační metamodel byl vytvořen již v ranných fázích projektu Migdb, kdy obsahoval jen elementy tvořící strukturu aplikace a její vztah k aplikačním operacím. Evoluce byla v tehdejší době reprezentována modelově jako sekvence generací. Každá operace měla přiřazenou jednu vstupní generaci a jednu výstupní.

Aplikační metamodel z ranné fáze vývoje je zobrazené na obr. 2.3 viz [Luk11].

Postupem času byl aplikační model měněn viz. 2.4 [Jez12] a dočasně byly přidány entity podporující EmbeddedClass, které v nynější době v modelu již znovu nejsou.

V nynější chvíli došlo k oddělení struktury aplikace od seznamu aplikačních operací a přibyl kořenový element Diff. Na obrázku 2.5 jsou znázorněny kořenové elementy nynějšího aplikačního modelu - každý aplikační model musí obsahovat jeden container - potomka třídy ModelRoot.



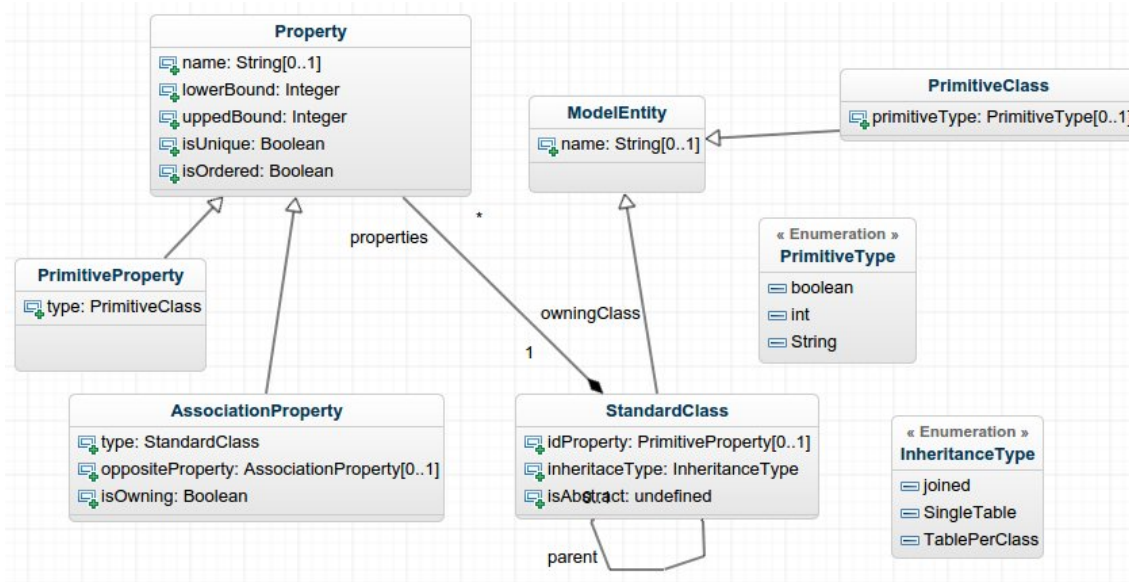
Obrázek 2.5: Rootové elementy aplikačního modelu

2.5 Metamodel struktury aplikace

Metamodel struktury aplikace zachycuje vztahy mezi jednotlivými objekty tvořícími aplikaci. Na obrázku 2.6 jsou zobrazeny elementy patřící do Struktury aplikačního modelu.

Struktura aplikačního modelu obsahuje množinu elementu *ModelEntity* obsahuje svůj identifikátor *name*. Primitivní typy programovacího jazyka jsou reprezentované elementem *PrimitiveClass* potomkem *ModelEntity*. *PrimitiveClass* obsahuje jen *primitiveType*. Druhým potomkem *ModelEntity* je *StandardClass* obsahuje specifikaci svého *inheritanceType*, příznak *isAbstract*, referenci na seznam *Property*, referenci na svou *idProperty* a referenci na *parent* *StandardClass*. Podporujeme pouze jednoduchou dědičnost, proto může mít každá třída maximálně jednu rodičovskou třídu. Element *Property* obsahuje svůj *name*, *lowerBound*

a *upperBound* specifikující svou aritu, pro kolekce důležité atributy *isUnique* a *isOrdered*. Potomek *PrimitiveProperty* rozšiřuje svou rodičovskou třídu jen o svůj *type*. *AssociationProperty*, druhý potomek *Property*, obsahuje také *type* [*StandardClass*], referenci na *oppositeProperty* pro bidirectional vazby a atribut *isOwning*, který je přidán z implementačních důvodů.



Obrázek 2.6: Struktura aplikačního metamodelu

Oproti aplikačnímu metamodelu [Jez12] byly odstraněny entity *EmbeddedClass* a její předek *GeneralClass*, dále byla zjednodušena třída *Property*, u níž ubýly atributy *defaultValue*, *sequenceName* a atribut *isId*. Atribut *isId* byl nahrazen přímou referencí na *idProperty* ve třídě *StandardClass* který byl nahrazen referencí.

Koncept generace modelů byl zachován, ale tyto generace nejsou obsaženy z implementačních a testovacích důvodů v jednom souboru, ale ve více souborech.

2.6 Databázový metamodel struktury

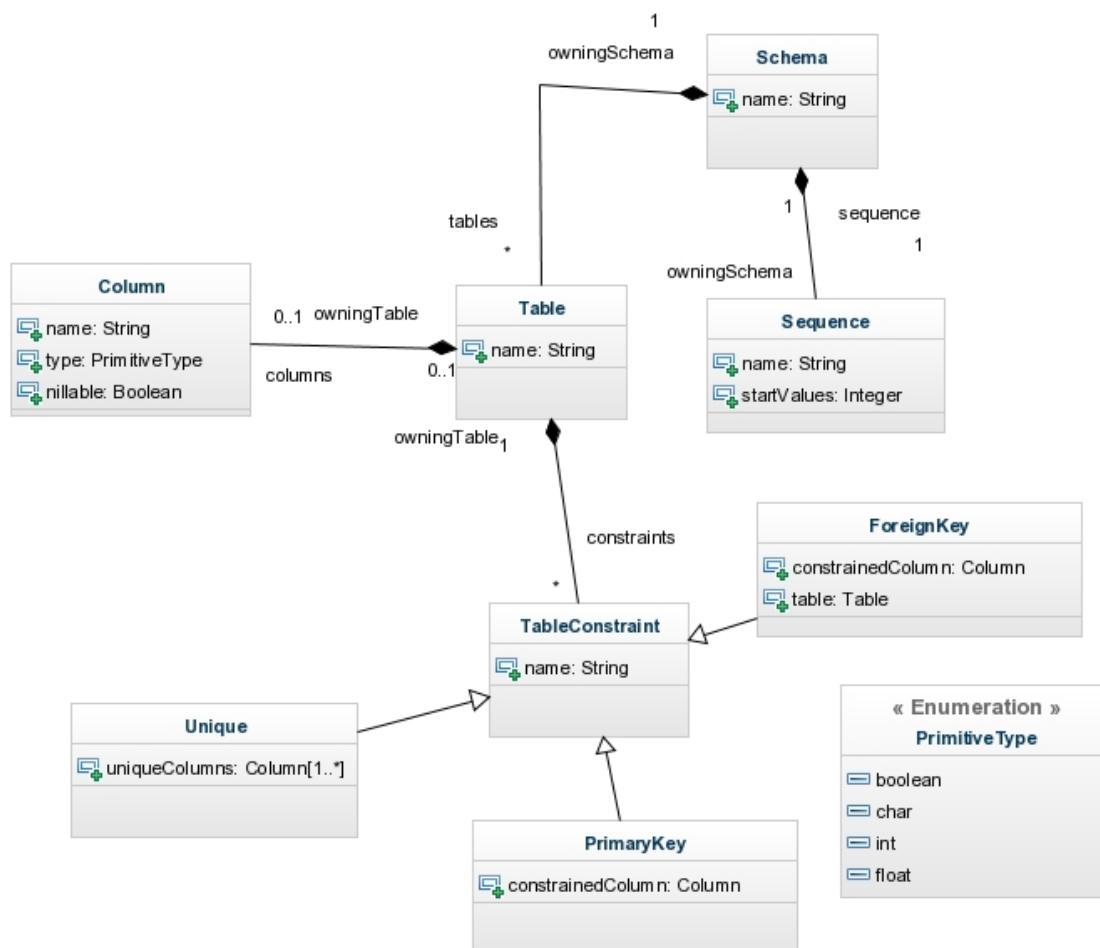
Databázový metamodel od počátku vývoje specifikuje elementy nutné k specifikaci struktury databáze a databázové operace. Základním databázovým konstruktem je *Schema*, které je jednoznačně identifikované svým *name*, obsahuje seznam tabulek a seznam Sequencí. Sekvence je databázový element potřebný k postupnému generování čísel a je identifikovaná pomocí svého *name* a musí obsahovat své *startValue*. Každá *Table* má své *name*, obsahuje seznam *Column* a seznam *TableConstraint*. Každý *Column* má své *jméno*, atribut *nillable*, který povoluje či zakazuje NULL hodnoty v tomto sloupci, *type* [*PrimitiveType*] a odkaz na vlastnickou tabuli *ownintTable*.

Potomci *TableConstraint* jsou jednotlivé IO a mají společné *name* zpřístupňující *Constraint*. *TableConstraint Unique* obsahuje seznam unikátních sloupců a odkaz na vlastnickou

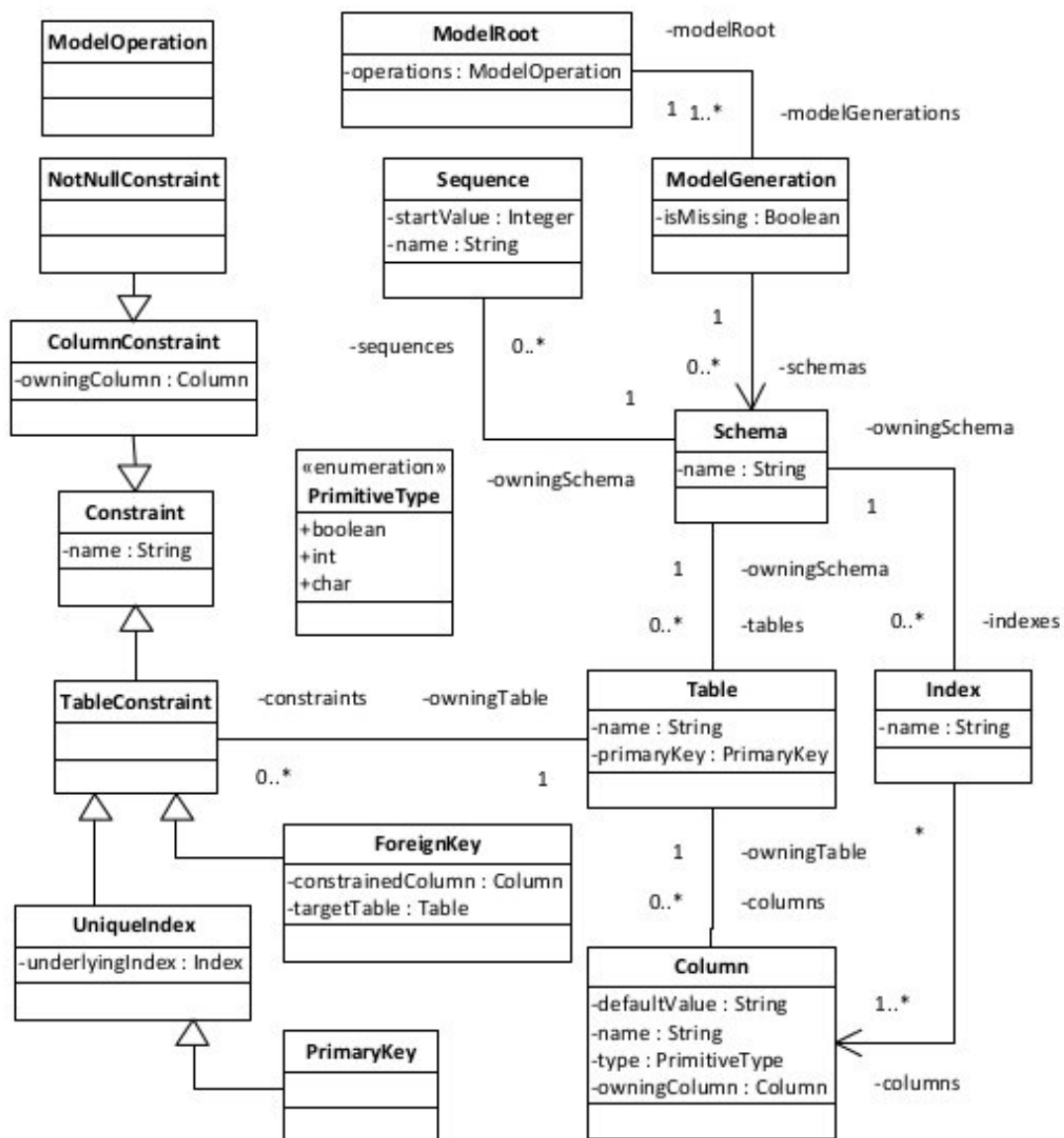
tabulu *ownintTable*. Omezili jsme si *PrimaryKey* tak, aby ho bylo možné definovat jen nad jedním sloupcem *constrainedColumn*. *ForeignKey* je poslední *TableConstraint* a podobně jako *PrimaryKey* má omezen počet *constrainedColumns* na 1 a obsahuje také odkaz na referencovanou tabulku.

Metamodel databázové struktury se ukázal jako celkem dobře definovaný a proto nedocházelo k zásadním změnám.

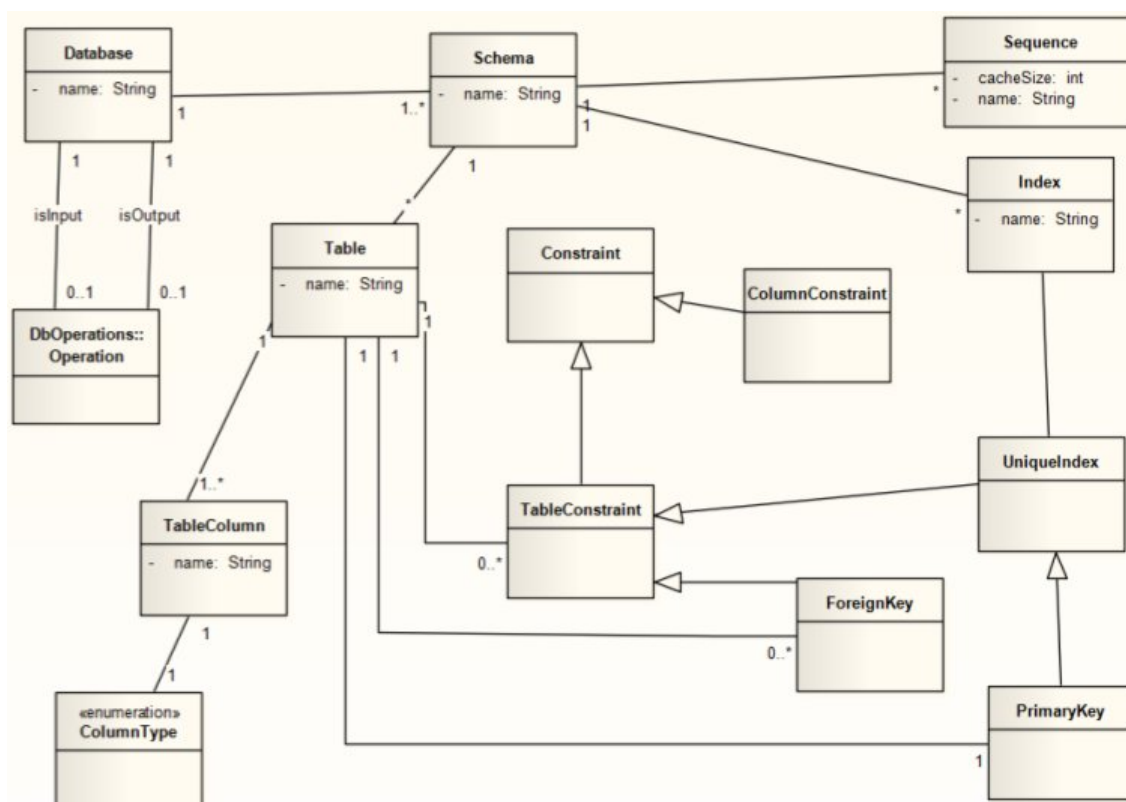
Na obr. 2.7 vidíme aktuální matamodel databázové struktury, na obr. 2.9 vidíme model na počátku vývoje převzatý z [Luk11] a na obrázku 2.8 model v pozdější fázi vývoje převzatý z [Tar12].



Obrázek 2.7: Struktura databázového metamodelu



Obrázek 2.8: Struktura databázového metamodelu v průběhu vývoje, obrázek převzat z [Tar12]



Obrázek 2.9: Struktura databázového metamodelu v průběhu vývoje, obrázek převzat z [Luk11]

Nejvýraznější změnami databázového metamodelu struktury jsou - stejně jako v metamodelu aplikační struktury odstranění generace modelů, odstranění elementu `UnderlyingIndex`, odstranění elementu `ColumnConstraint`, nahrazení elementu `NotNullConstraint` atributem boolean v `Column` a snížení kardinality `Sequence` obsažených ve schématu z `*` na `1`.

Myšlenka generace modelů byla zachována, ale jejich případné uchovávání bylo zvoleno ve více oddělených souborech. Element `UnderlyingIndex` byl shledán nadbytečným, stejně jako element `ColumnConstraint`. Neatributový element `NotNullConstraint` byl shledán příliš informačně chudým a byl nahrazen atributem `isNullable` zachovávajícím stejnou informační hodnotu jako element v původních modelech.

2.7 Relační model

Relační model je dle [Val14a] formální abstrakce využívající relaci jakožto jediný konstrukt. Relace je uspořádaná n -tice souvislých dat $R(A_1:D_1, A_2:D_2, \dots, A_n:D_n)$, přičemž " R " je název relace, A_i jsou názvy atributů a D_i jsou k nim přidružené typy. K zajištění konzistence jsou v SŘDB používána Integritní omezení (IO). IO jsou dle [Val14b] tvrzení vymezující korektnost DB, stupeň souladu datového obrazu s předlohou (jaká data v databázích mohou být a jaká již ne).

Relační algebra definuje pomocí relací a integritních omezení strukturu databáze. Dotazovacím aparátem pro data definovaná pomocí relační algebry je relační algebra. Relační algebra využívá operátorů \cup (sjednocení), \cap (průnik), \setminus (množinový rozdíl), \times (kartézský součin), selekce značená $R(\varphi) = \{ u \mid u \in R \text{ a } \varphi(u) \}$ a projekce značená $R[C] = \{ u[C] \mid u \in R \}$ a operace přirozené spojení $T(C) = R * S = \{ u \mid u[A] \in R \text{ a } u[B] \in S \}$. [Val14a] dále definuje relačně úplný jazyk jako takový, který umožňuje realizovat relační algebru. Takovým jazykem je například jazyk SQL (Structured Query Language). Relační databáze implementuje relaci tabulkou, její atributy A_i jednotlivými sloupci s typy D_i . V dotazovacím jazyce SQL nahrazuje projekci $R[a_1, \dots, a_n]$ operací `SELECT a1, ... an FROM R`, operaci selekce $R[a = 1]$ klauzulí `where` v dotaze `select SELECT * FROM R WHERE a = 1;`

2.8 Operace nad aplikačním modelem

2.8.1 Seznam aplikačních operací

Operace jsou uvedeny v následujícím seznamu. Kromě regulérních operací, které může vytvořit uživatel jsou v tabulce zde uvedeny i virtuální operace `DistributeProperty`, `MergeProperty` a operace `ExportProperty`, které jsou používány jako pomocné v implementaci složitějších reduktivních a expanzivních operací a manipulují s `Property` v rámci dědičné struktury tříd. Tyto operace mohou narozdíl od nevirtuálních operací být aplikovány na model, který je z nějakého hlediska nevalidní. Například operace `MergeProperty` počítá s hierarchií s kolizní property v třídě předka a potomka. Hlavním přínosem virtuálních operací je zabránění duplikace v definici ORMu mapování a zjednodušení kódu.

Operace I: `AddStandardClass(name, isAbstract, inheritanceType)`

- Validační podmínky - neexistuje třída s jménem nově vznikající
- Operace vytvoří novou třídu a její id odvozené z názvu třídy

Operace II: `RenameEntity(name, newName)`

- Validační podmínky - existuje třída s původním jménem, neexistuje třída s novým jménem
- Operace změní název třídy na nový

Operace III: `SetAbstract(name, isAbstract)`

- Validační podmínky - existuje třída s daným jménem
- Operace nastaví třídě atribut `abstract` na danou hodnotu

Operace IV: `RemoveEntity(name)`

- Validační podmínky - existuje třída s daným jménem, neexistuje link na tuto třídu, třída neobsahuje žádné property, neexistuje pro tuto třídu žádný potomek
- Operace odstraní entitu (standardní třídu) z modelu

Operace V: `AddProperty(owningClassName, name, typeName, lowerBound, upperBound, isOrdered, isUnique)`

- Validační podmínky - zadané bounds jsou validní, v hierarchii dědičnosti neexistuje kolizní property se stejným jménem
- Operace vytvoří v dané třídě novou property se zadanou horní mezí, dolní mezí, typem, seřaditelností a unikátností

Operace VI: RenameProperty(owningClassName, name, newName)

- Validační podmínky - existuje přejmenovaná property v dané třídě, neexistuje property v dané třídě nového jména
- Operace změní název property v dané třídě ze starého na nový

Operace VII: RemoveProperty(owningClassName, name)

- Validační podmínky - musí existovat vlastnická třída property a v ní odstraňovaná property
- Operace odstraní property z dané třídy

Operace VIII: SetBounds(upperBound, lowerBound)

- Validační podmínky - bounds musí být validní a musí existovat daná třída a property
- Operace nastaví horní a dolní mez property na nové hodnoty

Operace IX: SetOrdered(owningClassName, name, isOrdered)

- Validační podmínky - musí existovat daná třída a property
- Operace nastaví property seřaditelnost

Operace X: SetUnique(owningClassName, name, isUnique)

- Validační podmínky - musí existovat daná třída a property
- Operace nastaví property unikátnost

Operace XI: AddParent(className, parentClassName)

- Validační podmínky - musí existovat rodičovská třída a třída potomka, třída potomka nesmí mít nastaveného rodiče
- Operace nastaví třídě předka a přesune namerguje kolizní atributy do rodičovské třídy

Operace XII: RemoveParent(className, parentClassName)

- Validační podmínky - musí existovat třída child a mít nastavenou rodičovskou třídu
- Operace odstraní třídě rodičovskou třídu a redistribuje (použije virtuální operaci distribute property) property z rodičovské třídy do třídy původního potomka

Operace XIII: ExtractClass(sourceClassName, extractClassName, associationPropertyName, oppositePropertyName, propertyNames)

- Validační podmínky - musí existovat zdrojová třída, neexistuje property s jménem linku na nově vzniklou třídu, existují exportované property
- Operace vytvoří novou třídu, kterou napojí na původní třídu, exportuje (využije virtuální operaci export property) do nově vzniklé třídy vyjmenované property

Operace XIV: `InlineClass(targetClassName, associationPropertyName)`

- Validační podmínky - musí existovat cílová třída a musí existovat asociační property typu Inlinované třídy, která má upper bound 1
- Operace exportuje všechny property z inlinované třídy do cílové třídy přes specifikovanou unidirectional asociaci

Operace XV: `ChangeUniToBidir(className, associationPropertyName, oppositePropertyName)`

- Validační podmínky - v dané třídě musí existovat asociační property s daným jménem a nesmí mít nastavenou opposite property
- Operace vytvoří nový zpětný link s oppositePropertyName k property targetClassName a nastaví správně data do opositePropertyName

Operace XVI: `ChangeBiToUnidir(className, associationPropertyName)`

- Validační podmínky - v dané třídě musí existovat asociační property s daným jménem a musí mít nastavenou opposite property
- Operace odstraní opoziční property

Operace XVII: `CollapseHierarchy(superClassName, subClassName, isIntoSub)`

- Validační podmínky - musí existovat subclass a superclass, subclass musí mít nastavenou superclass jako parenta
- Operace exportuje (aplikuje virtuální operaci) všechny property z jedné třídy do jejího předka a třídy spojí, upraví dědičné vazby

Operace XVIII: `ExtractSubClass(sourceClassName, extractedClassName, extractedPropertyNames)`

- Validační podmínky - musí existovat třída s name sourceClassName a nesmí existovat třída s jménem extractedClassName, v třídě sourceClass musí existovat property s názvy z kolekce extractedPropertyNames
- Operace vytvoří třídě nového potomka a exportuje (aplikuje virtuální operaci export property) do něj vyjmenované property

Operace XIX: `ExtractSuperClass(sourceClassesName, extractParentName, propertyNames)`

- Validační podmínky - musí existovat třída s name sourceClassName a nesmí existovat třída s jménem extractedParentName, v třídě sourceClass musí existovat property s názvy z kolekce propertyNames
- Operace vytvoří třídě nového předka a přesune do něj vyjmenované property, pokud měla původní třída předka nastaví tohoto předka rodičem nově vzniklé třídy

Operace XX: PullUpProperties(childClassName, pulledPropertiesNames)

- Validační podmínky - musí existovat childClass a mít nastavenou rodičovskou třídu, v třídě potomka musí existovat properties z kolekce pulledPropertiesNames, v okolních subhierarchiích nesmí existovat properties z této kolekce
- Operace exportuje(aplikuje virtuální operaci export property) property do rodičovské třídy

Operace XXI: PushDownProperties(childClassName, pushedPropertiesNames)

- Validační podmínky - musí existovat class s childClassName a mít nastavenou parentClass, v třídě potomka musí existovat properties z kolekce pushedPropertiesNames
- Operace exportuje(aplikuje virtuální operaci export property) vyjmenované property do třídy potomka a přesune JEN data potomka

Operace XXII: ExportProperty(exportedPropertyName, className)

- virtuální operace
- Operace přesune property a data v ní obsažená v rámci hierarchie do cílové třídy

Operace XXIII: DistributeProperty(distributedPropertyName, className)

- virtuální operace
- Operace zduplikuje strukturu v rámci hierarchie dané property do cílové třídy a přesune data přiřazená této třídě

Operace XXIV: MergeProperty(mergedPropertyName, className)

- virtuální operace
- Operace přesune data zdrojové property do cílové property a smaže strukturu původní property

V průběhu vývoje existoval koncept ComposedOperation a AtomicOperation, kdy každá operace byla buď Composed nebo Atomic, každá Composed operace byla na aplikační vrstvě nejdříve dekomponována na set atomických, které se později vykonaly a mapovaly přes ORM o na databázové operace. Tento koncept jsme zavrhnuli, protože jsme nedokázali dekomponovat správně některé operace a obzvláště pořadí ORM obrazů nám dělalo problémy. Nicméně v nynější chvíli by se tento koncept mohl navrátit po přidání konceptu mirrored operations, ale asi by bylo nutné předefinovat či přidat některé aplikační operace.

2.8.2 Rozdělení aplikačních operací

Operace nad aplikačním modelem je možné dělit podle dvou kritérií - 1. nad jakým typem modelové entity pracují, 2. jaký je charakter/význam pro tuto entity daná operace má. Operace byly rozděleny podle obou kritérií spíše formálně. Všechny operace jsou potomkem generické operace ModelOperation. Rozdělení podle druhého kritéria vzniklo až po přidání funkcionality rozpoznávání operací.

První kritérium dělí aplikační operace na operace pracující s třídami a operace pracující pouze s properties daných tříd. Příkladem operací pracujících s třídami jsou operace `AddStandardClass`, `AddParent` a `RemoveEntity`. Příkladem operací pracujících s properties jsou operace `AddProperty`, `RemoveProperty`, `SetAbstract`.

Podle druhého kritéria je možné rozdělit operace nad aplikačním modelem do 5 skupin - konstruktivní, destruktivní, expanzivní, reduktivní a modifikační operace. Konstruktivní operace jsou takové, které po své aplikaci vytvoří 1 novou entitu v výsledném modelu, která nemá žádné vazby na jiné entity. Příklady aditivní operace je operace `AddClass`.

Destruktivní operace je opak konstruktivní, v vstupním modelu existuje entita a ta je aplikací destruktivní operace odstraněna. Příkladem destruktivní operace je operace `RemoveProperty`.

Operace expanzivní přidává do výstupního modelu jednu entitu, čímž se podobá operaci konstruktivní, nicméně zároveň je vázána na jinou entitu stejného typu a zmenšuje její obsah. Příkladem expanzivní operace je `ExtractClass`.

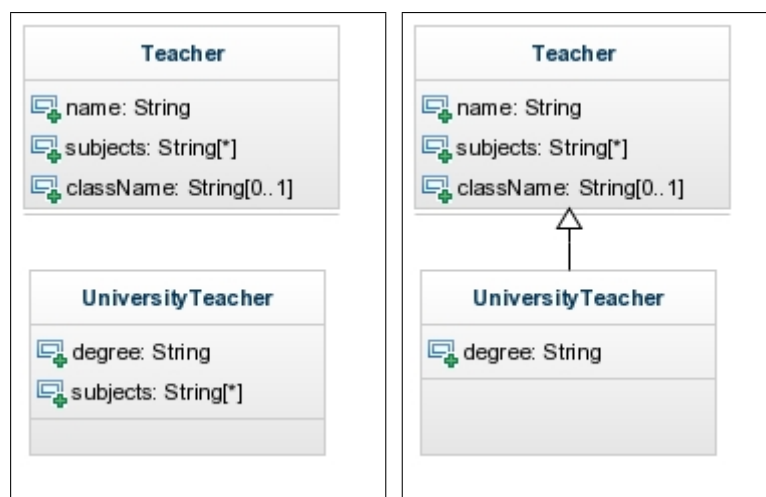
Reduktivní operace entitu z vstupního modelu odstraní a zároveň entitě, která je pro operaci řídicí změny obsah. Příkladem této operace je `InlineClass`. Reduktivní operace jsou inverzní k operacím expanzivním.

2.8.3 Vlastnosti operací

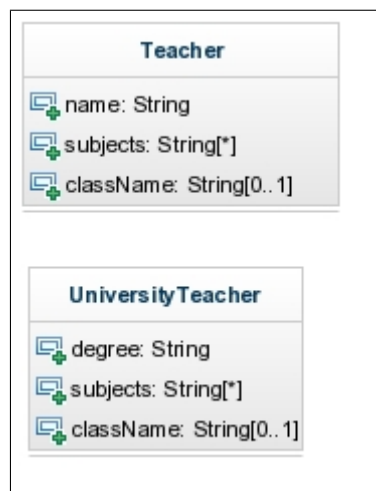
V [Cic08] Antonio Cincetti popisuje některé specifické vlastnosti jako je invertovatelnost a rozložitelnost operací. Je nutné říci, že operace zmiňované v literatuře pracují jen se strukturou dat, nikoliv s daty samotnými a jsou kontextově nezávislé - tyto operace jsou tvořeny téměř výlučně konstruktivními a destruktivními operacemi. Cincetti rozděluje zmiňované, že v minulosti byly operace aplikovatelné na jeden konkrétní model (intensional) a modernější diferenční modely jsou tzv. extensional - je možné je aplikovat na jakýkoliv model, například na paralelní vývojové větve.

V projektu Migdb jsou operace invertovatelné se znalostí původního modelu. Například u operace `RemoveParent(childClass)` nezískáme `parentClass` přímo z operace, ale musíme ho dopočítat ze vstupního modelu.

Problémem je, že i po odvození inverze nemusí vést aplikace operace do stejného vstupního modelu. Pokud například na stav 2.10a aplikujeme operaci `AddParent(Teacher, UniversityTeacher)`, získáme cílový stav 2.10b. Pokud se chceme vrátit zpět z 2.10b do výchozího stavu, měli bychom aplikovat operaci `RemoveParent(UniversityTeacher)`, nicméně aplikace této operace nepovede do výchozího stavu 2.10a, ale do stavu 2.10c. Po aplikaci operace `RemoveParent` bude v třídě `UniversityTeacher` navíc property `class`. Tento stav je zapříčiněn vývojem operace `AddParent` - v původní verzi operace nemohla být použita na jakékoliv třídy s kolizními atributy, ale shledali jsme tuto operaci nepoužitelnou - většinou přidáváme supertyp třídy, pokud je třída potomka speciálním typem třídy rodičovské, což se ale v drtivé většině případů projevuje kolizními atributy. Možným odstraněním tohoto problému by bylo přidání informací o distribuovaných properties do operace `RemoveParent`, čímž bychom se nicméně odklonili od cílu minimalizovat operace.



(a) `AddParent(Teacher, UniversityTeacher)` (b) Výsledek po aplikaci operace `AddParent`



(c) Výsledný stav po aplikaci `RemoveParent`

Obrázek 2.10: Ukázka operace `AddParent`

2.9 Databázové operace

Evoluce na databázové vrstvě nemá vliv na vygenerování SQL kódu a je jen jakousi simulací změn, které se provedou na databázové vrstvě, tudíž se může jevit nadbytečnou. Tato simulace může odhalit chyby ve vygenerovaném SQL skriptu podstatně rychleji oproti generování databáze a aplikaci migračních skriptů, které jak z praxe víme často probíhají v řádu desítek minut až několika hodin.

Databázové operace reprezentují změny proveditelné na úrovni databáze. Mělo by z nich být možné generovat SQL kód jednoduchou Model-to-text transformací zajišťovanou modulem Generator.xtend.

Seznam operací s jejich validačními podmínkami:

Operace I: AddSchema(name)

- Vytvoří nové schéma s zadaným jménem
- Nesmí existovat schéma s zadaným jménem

Operace II: AddSequence(owningSchemaName, name, startValue)

- Vytvoří v cílovém schématu sekvenci s zadanou startovní hodnotou
- Musí existovat schéma, do kterého se vkládá, v něm nesmí existovat sequence s jménem name

Operace III: AddTable(owningSchemaName, name)

- V daném schématu vytvoří tabulku, id sloupec této tabulky a primární klíč odvozený z jména tabulky
- Musí existovat dané schéma, v němž nesmí existovat tabulka s jménem name

Operace IV: AddColumn(owningSchemaName, owningTableName, name, type)

- Vytvoří v daném schématu a tabulce column s zadaným primitivním typem
- Musí existovat daní schéma, tabulka a v dané lokaci nesmí existovat daný sloupec

Operace V: AddPrimaryKey(owningSchemaName, owningTableName, constrainedColumnName, name)

- Vytvoří v daném schématu a tabulce nad constrainedColumn Primární klíč s daným jménem
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka, daná column, nesmí existovat constraint s daným jménem

Operace VI: AddForeignKey(owningSchemaName, owningTableName, constrainedColumnName, name, targetTableName)

- Vytvoří v daném schématu a tabulce cizí klíč s daným jménem, který referencuje IdColumn cílové tabulky
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka, daná column, nesmí existovat constraint s daným jménem, musí existovat targetTable

Operace VII: AddUnique(owningSchemaName, owningTableName, constrainedColumnNames, name)

- Vytvoří v daném schématu a tabulce unique constraint s daným jménem nad zadanými sloupci
- Musí existovat dané schéma, musí existovat daná tabulka, musí existovat dané constrainované sloupce, nesmí existovat constraint s jménem name

Operace VIII: AddNotNull(owningSchemaName, owningTableName, constrainedColumnName)

- Nastaví v daném schématu a tabulce cílové property hodnotu notNull na true
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka, daná column

Operace IX: RemoveNotNull(owningSchemaName, owningTableName, constrainedColumnName)

- Nastaví v daném schématu a tabulce cílové property hodnotu notNull na false
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka, daná column

Operace X: RenameTable(owningSchemaName, name, newName)

- Změní cílové tabulce jméno na nové
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka, nesmí existovat tabulka s novým jménem

Operace XI: RenameColumnowningSchemaName, owningTableName, name, newName

- Přenastaví v daném schématu a tabulce jméno z name na hodnotu newName
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka, daná column

Operace XII: RemoveTableowningSchemaName, name

- Odstraní z daného schématu tabulku s jménem name
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka

Operace XIII: RemoveColumnowningSchemaName, owningTableName, name

- Odstraní v daném schématu a tabulce column s jménem name
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka, daná column, která nesmí na sobě mít constraint PrimaryKey, ForeignKey nebo Unique

Operace XIV: RemoveConstraintowningSchemaName, owningTableName, name

- Přenastaví v daném schématu a tabulce column s jménem name
- Musí existovat dané schéma, tabulka a column

Operace XV: RemoveSequenceowningSchemaName, name

- Odstraní v daném schématu sequence s jménem name

- Musí existovat dané schéma a daná sequence

Operace XVI: UpdateRowsowningSchemaName, sourceTableName, sourceColumnName, targetTableName, targetColumnName, selectionWhereCondition, safeWhereCondition

- v daném schématu updatuje hodnoty z tabulky sourceTable hodnoty z sourceColumns a nastaví je do taragetColumns tabulky targetTable pro instance splňující selectionWhereCondition, pozn. aby nebyly nullovány hodnoty, pro které nebyly vybrány hodnoty z sourceTable byla přidána safeWhereCondition
- Musí existovat dané schéma, v něm sourceTable, v ní sourceColumn, v dále musí v schématu existovat targetTable, v ní targetColumn, sourceColumn musí mít stejný typ jako targetColumn

Operace XVII: NillRowsowningSchemaName, tableName, columnName, whereCondition

- Nastraví sloupce v daném schematu a tabulce hodnoty null instancím splňující whereCondition
- Musí existovat dané schéma, daná tabulka, daná column

Operace XVIII: InsertRowsowningSchemaName, sourceTableName, sourceColumnName, targetTableName, targetColumnName, whereCondition

- v daném schématu zkopíruje z tabulky sourceTable hodnoty z sloupce sourceColumns instance splňující whereCondition a vloží je do taragetColumns tabulky targetTable
- Musí existovat dané schéma, v něm sourceTable, v ní sourceColumn, v dále musí v schématu existovat targetTable, v ní targetColumn, sourceColumn musí mít stejný typ jako targetColumn

Operace XIX: DeleteRowsowningSchemaName, tableName, whereCondition

- Operace smaže instance z daného schematu, dané tableName instance splňující whereCondition
- Musí existovat dané schéma, v něm daná table

2.10 QVTo

QVTo je imperativní jazyk, který je součástí standardu QVT definovaným konsorciem Object Management Group (OMG) viz. [OMG14d]. Součástí QVT je jazyk OCL (Object Constraint Language) [OCL14]. Pomocí tohoto jazyka je možné definovat model to model transformaci.

Základními konstrukty jazyka jsou mapping, helper a query. Mapping je konstrukt měnící pomocí nějakých pravidel vstupní element na výstupní. Query je dotazovací konstrukt, který získá potřebnou výstupní informaci z daného elementu. Helper je konstrukt, který má může narozdíl od query měnit své parametry.

```
import orm;
import queries_app;
```

```

import queries_rdb;
import validator_app;

modeltype APP uses "http://www.collectionspro.eu/jam/mm/app";
modeltype RDB uses "http://www.collectionspro.eu/jam/mm/rdb";
modeltype ERR uses "http://www.collectionspro.eu/jam/mm/errors";

transformation orm_run(in inStr : APP, in inOps : APP, out rdbOutOps : RDB, out errorMod

main(){
    var rdbOps : RDB::Operations := rdbOutOps.rootObjects()[RDB::Operations];
    rdbOps := _rdbOperations();
    var errorLog : ErrorLog := errorModel.rootObjects()[ErrorLog];
    errorLog := object ErrorLog{
        errors:= OrderedSet{};
    };

    var appOps :APP::Operations := inOps.rootObjects()[APP::Operations];
    var appStr :APP::Structure := inStr.rootObjects()[APP::Structure];

    if(canProcessTest(appStr, appOps, errorLog))then{
        appOps.operations->forEach(op){
            op.toRdb(appStr, rdbOps);
        };
        consolidate(rdbOps);
        setApplied(rdbOps);
    }endif;
    log("ending");
}

query canProcessTest(structure : APP::Structure, ops : APP::Operations, inout errorLog :
    if(inOps.rootObjects()[APP::Operations].operations->size() > 1 or
        inOps.rootObjects()[APP::Operations].operations->isEmpty())then{
        log("Unsupported input operations count:" +
            inOps.rootObjects()[APP::Operations].operations->size().repr());
        log("model invalid 1");
        return false;
    }endif;

    if(not inStr.rootObjects()[APP::Structure].isModelValid(errorLog))then{
        log("model invalid 2");
        return false;
    }endif;
    return true;
}

```

Na předchozí stránce je vidět ukázka kódu transformace. Na začátku souboru importujeme knihovny pomocí klíčového slova `import`, následně deklarujeme typy modelů, které bude naše transformace používat. Pomocí klíčového slova `transform` deklarujeme, jaké typy parametrů požaduje naše transformace. Vstupním bodem transformace je metoda `main`. V ní můžeme pomocí klíčového slova `var` deklarovat proměnné, do kterých přiřazujeme data pomocí operátoru `:=`, na ukázce máme také definované query `canProcessTest`, které pro vstupní strukturu zjistí, jestli jsou vstupní data validní či ne, případně vypíše původ chyby.

2.10.1 Ukázka kódu

V následujícím kódu je ukázáno validační query pro validaci operace `AddTable`

```
query RDB::ops::AddTable::isValid(structure : RDB::Structure,
  inout errorLog : ErrorLog, operationIndex : Integer) : Boolean {
  var existSchema : Boolean := checkExistSchema(
    self.owningSchemaName,
    structure,
    errorLog,
    operationIndex,
    getEvolutionRdbTransformationId());
  var notExistTable : Boolean := checkNotExistTable(
    self.owningSchemaName,
    self.name,
    structure,
    errorLog,
    operationIndex,
    getEvolutionRdbTransformationId());
  return existSchema and notExistTable;
}

helper checkExistSchema(schemaName : String, structure : Structure,
  inout errorLog : ErrorLog, operationIndex : Integer,
  transformationId : String) : Boolean{
  var existSchema : Boolean := structure.containsSchema(schemaName);
  if(not existSchema)then{
    var errorMessage : String := "Schema " + schemaName + " doesn't exist";
    errorLog.errors += _evolutionError(
      operationIndex,
      errorMessage,
      transformationId);
  }endif;
  return existSchema;
}

helper checkNotExistTable(owningSchemaName : String, tableName : String,
  structure : Structure, inout errorLog : ErrorLog, operationIndex : Integer,
```



```

transformationId : String) : Boolean{
  if(not structure.containsSchema(owningSchemaName))then{
    return false;
  }endif;
  var notExistTable: Boolean := not
    structure.containsTableInSchema(owningSchemaName, tableName);
  if(not notExistTable)then{
    var errorMessage : String := "Table " + tableName + " exists in schema "
      + owningSchemaName;
    errorLog.errors += _evolutionError(
      operationIndex,
      errorMessage,
      transformationId);
  }endif;
  return notExistTable;
}

```

Je možné zaznamenat, že helpery nejen vrací hodnotu, ale i loggují chyby do errorLogu pro daný index operace a danou transformaci, tudíž není možné volat helper checkExistTable a invertovat navrácenou hodnotu, ale bylo nutné napsat helpery kladné i záporné.

2.11 ORMo (ORM operací)

ORMo mapování je transformace, která mapuje elementy z domény aplikačních operací na elementy z domény operací databázových. Toto mapování mapuje 1 aplikační operaci na 1 až N operací databázových.

Ačkoliv ORM transformace vstupního aplikačního modelu funguje se všemi inheritanceTypy bylo nutné zjednodušit aplikační model tak, aby byla transformace ORMo implementovatelná, proto jsme v rámci týmu Migdb rozhodli o redukci počtu inheritanceTypů na jeden - nejvhodnější typ je joined, který je nejvíce používaným.

Operace I: AddStandardClass(name, isAbstract, inheritanceType)

- Vytvoří tabulku, id sloupec této tabulky a primární klíč

Operace II: AddProperty(owningClassName, name, typeName, lowerBound, upperBound, isOrdered, isUnique)

Primitivní typ a UpperBound = 1 operace přidá do cílové tabulky sloupec pro primitivní property

Primitivní typ a UpperBound != 1 operace přidá tabulku, která je obrazem kolekce, datový sloupec do této tabulky, referenční sloupec a ForeignKey referencující tabulku, která je obrazem vlastnické třídy

Neprimitivní typ a UpperBound = 1 operace přidá do tabulky, která je obrazem vlastnické třídy property a ForeignKey odkazující na tabulku, která je obrazem třídy typu přidávané property

Neprimitivní typ a UpperBound != 1 operace vytvoří vazební tabulku pro neprimitivní property, vloží do ní referenční sloupec na tabulku, která je obrazem vlastnické třídy, a tabulku, která je obrazem třídy typu. Nad vazební tabulkou vytvoří cizí klíče na tabulku, která je obrazem vlastnické třídy, a cizí klíč na tabulku, která je obrazem třídy typu

Operace III: `RenameEntity(owningClassName, name, newName)`

- Operace změní název tabulky na nový, odstraní a vytvoří PK s novým jménem, odstraní všechny `ForeignKey` referencující obraz vlastnické třídy a vytvoří nové `ForeignKey` s pozměněným jménem ,

Operace IV: `SetAbstract(name, isAbstract)`

isAbstract = true maže data, která náležejí pouze dané třídě

Operace V: `RemoveEntity(name)`

- operace smaže primární klíč, id property a tabulka odpovídající dané třídě

Operace VI: `RenameProperty(owningClassName, name, newName)`

primitivní typ a UpperBound = 1 přejmenuje property v tabulce, která je obrazem vlastnické třídy property

primitivní typ a UpperBound != 1 přejmenuje datový sloupec, odstraní a vytvoří `ForeignKey` s novým jménem referencujícím třídu, která je obrazem vlastnické třídy property a přejmenuje tabulku obrazu kolekce

neprimitivní typ a UpperBound = 1 přejmenuje sloupec v tabulce, která je obrazem vlastnické třídy property, odstraní a vytvoří `ForeignKey` referující tabulku, která je obrazem třídy typu

neprimitivní typ a UpperBound != 1 přejmenuje vazební tabulku s referenčními sloupci na tabulku, která je obrazem třídy vlastníka property a tabulku, který je obrazem třídy typu asociace, odstraní a vytvoří `ForeignKey` s novými jmény na obraz třídy vlastníka property a obraz třídy typu

Operace VII: `RemoveProperty(owningClassName, name)`

primitivní typ a UB = 1 odstraní sloupec z dané tabulky

primitivní typ a UB != 1 odstraní referenci na vlastnickou tabulku, sloupec z tabulky dané kolekce, datový sloupec a smaže kolekční tabulku

neprimitivní typ a UB = 1 odstraní referenci na tabulku vlastníka a referenční sloupec

neprimitivní typ a UB != 1 odstraní reference na vlastnickou tabulku a tabulku typu, datový sloupec a sloupec typu a smaže vazební tabulku

Operace VIII: `SetOrdered(owningClassName, name, isOrdered)`

isOrdered = true přidá sloupec ordering, přenastaví data a vytvoří unikátní constraint přes typový, referenční a orgering sloupec

isOrdered = false smaže ordering unique constraint a ordering sloupec

Operace IX: SetUnique(owningClassName, name, isUnique)

isUnique = true vytvoří unikátní constraint přes typový a referenční sloupec

isUnique = false smaže unique constraint

Operace X: AddParent(className, parentClassName)

- Aplikuje obraz operace MergeProperty na všechny kolizní property, přidá cizí klíč na rodičovskou třídu

Operace XI: RemoveParent(className)

- aplikuje obraz operace DistributeProperty na všechny property rodičovské třídy, odstraní cizí klíč, smaže data třídy potomka z tabulky rodiče

Operace XII: ExtractClass(sourceClassName, extractClassName, associationPropertyName, oppositePropertyName, propertyNames)

- vytvoří novou sekvenci, vytvoří novou tabulku a nové sloupce spolu se sloupcem pro opposite referenci na zdrojovou tabulku, aplikuje obraz operací exportProperty pro každou exportovanou property, vytvoří sloupec referencující nově vzniklou tabulku, updatuje mu hodnoty, smaže vygenerovanou sekvenci

Operace XIII: InlineClass(targetClassName, associationPropertyName)

- aplikuje obraz operací exportProperty, smaže association column a Inlinovanou tabulku

Operace XIV: PullUpProperties(childClassName, pulledPropertiesNames)

- aplikuje obraz operace export property do rodičovské třídy pro každou property s name z pulledPropertiesNames

Operace XV: PushDownProperties(childClassName, pushedPropertiesNames)

- aplikuje obraz exportProperty pro každou property s name z p vyjmenované property do třídy potomka a přesune JEN data potomka

Operace XVI: ExportProperty(virtuální operace)

primitivní typ a UB = 1

primitivní typ a UB !=1

neprimitivní typ a UB = 1

neprimitivní typ a UB !=1

Operace XVII: DistributeProperty(virtuální operace)

primitivní typ a UB = 1

primitivní typ a UB !=1

neprimitivní typ a UB = 1

neprimitivní typ a UB !=1

Operace XVIII: MergeProperty(propertyName, targetClassName)

primitivní typ a UB = 1 updatuje column v cílové tabulce smaže column ze zdrojové tabulky

primitivní typ a UB !=1 vloží řádky do tabulky collection, smaže FK z zdrojové collectionTable(případně odstraní UX a ORD constrainty), smaže data, reference column z zdrojové collection table a nakonec i zdrojovou collectionTable

neprimitivní typ a UB = 1 updatuje column v cílové tabulce smaže column ze zdrojové tabulky

neprimitivní typ a UB !=1 vloží řádky do tabulky collection, smaže FK z zdrojové collectionTable(případně odstraní UX a ORD constrainty), smaže data, reference column z zdrojové collection table a nakonec i zdrojovou collectionTable

Kapitola 3

Dokončení projektu Migdb

Tato diplomová práce si klade za první ze svých cílů dokončit vývoj na projektu Migdb. Tj. doimplementovat a otestovat ORM transformace vzniklé v předešlých fázích projektu, upravit a otestovat generátor SQL, případně upravit aplikační a databázový metamodel.

3.1 Historický vývoj operací

V průběhu modelování operací nad aplikačním modelem jsme se snažili, aby tyto operace byly jednoznačné (strojově zpracovatelné) v rámci daného kontextu, dále vzhledem k nutnosti textového zápisu uživatelem o minimalističnost zápisu. Tyto dva koncepty jdou obecně proti sobě, proto jsme došli k jistému jejich kompromisu uživatelské jednoduchosti zápisu a jednoznačnosti.

Operace v aplikačním modelu se vyvíjely a měnily se jejich parametry, ale současně se měnil i seznam dostupných operací nad aplikačním modelem. Z operací v první verzi modelu byly odstraněny operace `MoveProperty`, `AddPrimitiveClass`, `SetOpposite` a `SetType`. Operace `AddPrimitive` byla označena za nadbytečnou, protože není cílem modifikace modelu změna seznamu primitivních tříd, který bývá definován použitým programovacím jazykem a tudíž by měl tento seznam být v vstupní generaci. V průběhu analýzy operace `SetOpposite` bylo zjištěno, že tato operace má smysl na strukturální úrovni, ale není možné ji aplikovat na obecná data, proto byla tato operace nahrazena dvojicí operací `ChangeUniToBidir` a `ChangeBiToUnidir`, které plní nároky kladené na původní operaci a jsou aplikovatelné na datové úrovni. Operace `SetType` byla prozkoumána, ale nebyla exaktně popsána, nebylo nalezeno její mapování na operace v databázi ani validační podmínky nutné k úspěšné aplikaci operace na aplikační model. Předpokládáme, že by tato operace měla souviset s dědičnými hierarchiemi.

Kapitola 4

Popis problému, specifikace cíle

Dalším cílem, který jsem si před vypracováním diplomové práce stanovil bylo vytvoření a zdokumentování algoritmu generující z dvou vstupních modelů sekvenci operací, jejichž aplikací se model zdrojový transformuje na model koncový.

4.1 Řešení problému rozpoznávání operací

4.1.1 Diff a delta notace

Nejznámějším nástrojem používaným při porovnávání a zjišťování změn dvou textových souborů tzv. patchů [wc14d] je nástroj diff [wc14a]. Diff je založen na algoritmu hledání největší společné podsekvence (LCS) viz [wc14b]. Algoritmus LCS byl analyzován a nebyl shledán jako dostatečným pro námi definovaný problém, jelikož nezohledňuje doménu problému. Výstup algoritmu se dá vyjádřit pomocí delta notace.

Příklad Delta notace za pomoci linuxových nástrojů diff dvou souborů najdeme na výpisu 4.3

Listing 4.1: Man1.java

```
class Man {  
    private String name;  
  
    public Man(String name){  
        this.name = name;  
    }  
}
```

Listing 4.2: Man2.java

```
class Man {  
    private String name;  
  
    private String surname;
```

```

    public Man(String name){
        this.name = name;
    }

    public Man(String name, String surname){
        this(name);
        this.surname = surname;
    }
}

```

Listing 4.3: Patch Man1 Man2

```

3a4,5
>     private String surname;
>
5a8,12
>     }
>
>     public Man(String name, String surname){
>         this(name);
>         this.surname = surname;

```

Ukázka kódu 4.1 zobrazuje zdrojový kód třídy Man v první verzi. Ukázka 4.2 potom zdrojový kód třídy Man po první naší editaci, kdy jsme do dané třídy přidali nový atribut a nový konstruktor. Diff v delta notaci těchto dvou souborů je ukázán v 4.3. V delta notaci vidíme, že do prvního souboru byly za 3. řádek vloženy řádky 4-5 z druhého souboru - řádek definující nový atribut surname a oddělovací prázdný řádek, dále za 5. řádek byly vloženy řádky 8-12 z druhého souboru definující nový konstruktor a uzavírací závorka.

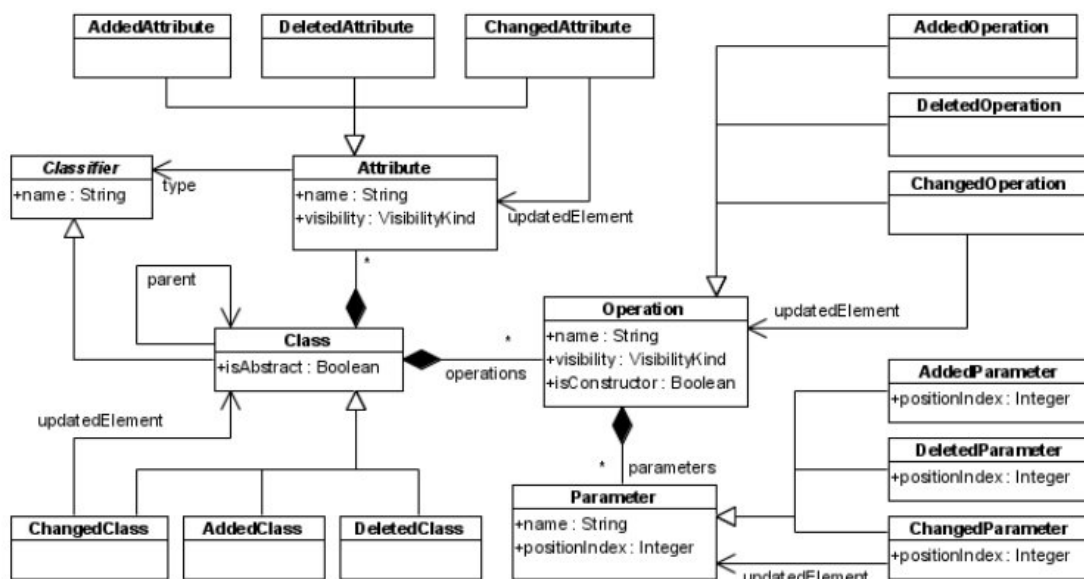
V [Cic08] jsou definovány operace pomocí delta notace. Delta notace ukazuje všechny změny mezi danými dvěma artefakty stejné úrovně abstrakce. Změnami můžeme rozumět přidáním elementu, odstraněním elementu a modifikací elementu.

Delta notace je dle autora výhodná díky snadné rozložitelnosti velkých patchů na více menších patchů. Druhá výhoda je použitelná při paralelním vývoji. Pokud vznikne více verzí souboru v různých větvích, delta notace umožňuje snadné oddělení konfliktních operací od operací nezávislých.

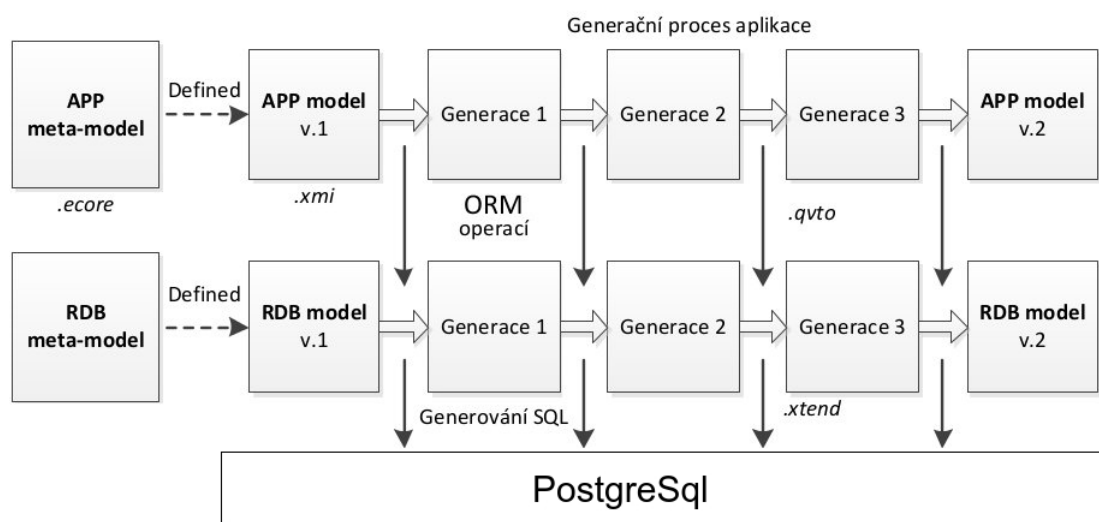
Delta notace vytvořená dle metamodelu na obr. 4.1 definuje add, delete entit a modify atributů jednotlivých entit. V našem modelu existují operace, které se nedají zařadit ani do skupiny add, delete a modify operací. Operace ExtractClass, ExtractSuperClass, InlineClass, CollapseHierarchy, PullUpProperties a PushDownProperties naopak nepatří mezi modifikační, add ani delete operace. proto jsme mohli postupovat jednou z následujících cest

- získat standardní diff dvou modelů a aplikovat na něj algoritmus rozpoznávání jakožto sadu podmínek, které musí platit, aby algoritmus rozpoznal operaci.
- vytvořit vlastní Diff metamodel, který podobně jako v 4.1 odpovídá vlastnímu seznamu operací aplikovatelných na model.

Zvolili jsme si cestu definice vlastního metamodelu.



Obrázek 4.1: Diff model převzatý dle [Cic08]



Obrázek 4.2: Seznam diff elementů

4.1.2 Rozpoznávání operací

Algoritmem pro rozpoznávání operací nazveme každý algoritmus, který nám pro každý vstupní model A a cílový model B najde uspořádaný seznam operací, jejichž postupná aplikace transformuje model A do modelu B. Tento algoritmus nemusí být deterministický.

Jedním z zajímavých faktů je poznatek, že seznam operací nemusí být jednoznačný a to i u jednoduchých změn. Pokud aplikujeme sekvenci operací Inline A, B + Rename B \rightarrow C na model X dostaneme stejný výstup jako aplikací operací Inline B, A + Rename A \rightarrow C, ještě zajímavějším poznatkem je, že nejsme schopni rozeznat rozdíl mezi aplikací sekvence operací Rename A, C + Inline C, B.

Samostatným tématem je pořadí operací a jeho permutace. Je zřejmé, že pořadí transformací v seznamu operací operujících nad hierarchiemi dědičnosti bude možné libovolně prohazovat. Také je samozřejmé, že seznam reduktivních operací stejného typu je také možné libovolně zpermutovat. Stejně tak seznam aditivních operací stejného typu. Obecný princip seřazení kolekce operací není znám.

4.1.3 Obecné principy model matching

Nejtriviálnější implementovatelný algoritmus by mohl smazat zdrojový model pomocí destruktivních operací a následně vytvořit výsledný model pomocí operací konstruktivních, případně upravit atributy jednotlivých elementů pomocí operací modifikačních. Argumentem proti použití takového algoritmu je smazání jakýchkoliv dat, které v původní databázi byla. Takovýto algoritmus tudíž nemigruje žádná data, ale nahrazuje funkci ORM mapování integrované do většiny současných IDE. Proto se jím v této práci nezaobírám.

Jak je diskutováno v [FW14] a [DSK14] existuje několik požadavků na algoritmus řešící problém model matching. Tyto požadavky zahrnují přesnost, vysokou míru abstrakce na které je porovnávání provedeno, nezávislost na konkrétních nástrojích, doménách a jazycích, použitelnost a minimální nutnost adaptace algoritmus pro daný problém. Tyto požadavky jdou proti sobě a je nutné preferovat některé na úkor jiných, proto není možné označit za nejlepší, ale je nutné vybrat si správný algoritmus v závislosti na řešeném problému.

V [DSK14] byly popsány algoritmy pro mapování shodných entit modelů a algoritmy pro získávání rozdílů modelů. Principem těchto modelů je párování elementů vstupního modelu s elementy z modelu cílového. Autor je dělí na 4 obecné skupiny matching algoritmů.

- Párování podle statického identifikátoru páruje elementy podle perzistentního identifikátoru, který je přiřazen každé entitě v době jejího vzniku, je neměnný a unikátní. Nejzákladnějším principem model matchingu je tedy párování entit na základě shodnosti jejich identifikátorů. Tento princip má výhody jednoduchosti implementace a rychlosti. Tento algoritmus není použitelný pro modely vytvořené nezávisle jeden na druhém či u technologií nepodporujících údržba unikátních identifikátorů.
- Algoritmus signature based matching byl navržen kvůli limitaci párování podle statického identifikátoru, tento algoritmus je založen na dynamickém vypočtení nestatické signatury jednotlivých elementů pomocí uživatelem definovaných funkcí specifikovaných pomocí nějakého dotazovacího jazyka. Tento princip tedy může být použit pro modely vzniklé nezávisle na sobě. Nevýhodou je potom nutnost specifikovat query, které dopočítají signaturu.

- Algoritmus Similarity based matching používá podobně jako signature based matching podobnost sublementů jednotlivých elementů, kterou agreguje do skalární hodnoty. Tento princip se řadí mezi podtyp attribute graph [HET14] matchingu. Každá feature modelu může mít jinou váhu pro porovnávání, například u podobnosti tříd má jméno vyšší důležitost nežli abstraktnost dané třídy. Tento algoritmus musí být typicky doplněn o konfiguraci vah jednotlivých features elementů, kterou většinou píše vývojář. Zástupcem tohoto principu je framework EMF Compare, který je doplněn o defaultní konfiguraci vah. Výhodami je větší přesnost, nevýhodou je potom TRIAL ERROR (pokus omyl) metoda získávání vhodné konfigurace vah.
- Algoritmy v kategorii Custom language specific matching jsou vytvořené přímo k využití daného modelovacího jazyka. Hlavní výhodou je, že algoritmus na dané doméně může začlenit do metody similarity based matchingu sémantické detaily, což vede k přesnějším výsledkům a redukuje prohledávaný stavový prostor. Jako příklad je uváděn jazyk UMLDiff, který při porovnávání dvou UML modelů může využít faktu, že dvě třídy nebo dva datové typy stejného jména tvoří po všech praktických stránkách pár(match). Nicméně výhodou začlenění sémantických detailů konkrétní domény je vykoupeno vysokou cenou - všechny ostatní kategorie algoritmů potřebují minimální neb téměř žádné úpravy od vývojáře, pro tuto kategorii vývojáře musí napsat celý matchovací algoritmus sám.

4.1.4 Graph matching

Problém model matching je podproblémem generičtějšího problému graph matching, který studuje [Ben02] a rozděluje a popisuje algoritmy pro graph matching - algoritmus nalezení shody grafů. Problém je definován na obecné struktuře Graf, což je uspořádaná dvojice $G = (V, E)$, kde G je množina uzlů a E je množina hran grafu, přičemž $E \subset V \times V$. Grafy mohou být orientované či neorientované, mohou mít vícenásobné hrany.

Každý graf může přidávat informace do své struktury pomocí labelu (popisku nebo čísla) do hran a vrcholů, pokud je nutné přidat více informací, je možné přidat do hran a/nebo vrcholů atributy, potom hovoříme o vertex-attributed grafech a edge attributed grafech, případně attributed grafech. V některé literatuře jsou attributed grafy označovány jako labeled grafy. Graph matching je aplikován v mnoho oborech jako je počítačové vidění, analýza scény (scene analysis), chemie a molekulární biologie. Pro tyto obory je esenciálním nalézt vzorky nalezeny v daných datech.

Problém shodnosti dvou grafů G_O (grafu originálu) a G_V (grafu vzorku), se dělí na algoritmus nalezení přesné shody vzorku v hledaném grafu či algoritmus hledání podobnosti grafu vzorku v hledaném grafu jak je zobrazeno na obr. 4.3 převzatém z [Ben02].

Algoritmus hledání přesné shody je definován následně: Mějme grafy $G_O = (V_O, E_O)$ a $G_V = (V_V, E_V)$, přičemž $\|V_O\| = \|V_V\|$, úkolem je potom najít takové prosté zobrazení $f : V_O \rightarrow V_V$, takové, že $(u, v) \in E_O$ iff $(f(u), f(v)) \in E_V$. Pokud takové mapování existuje, nazveme ho přesnou shodou.

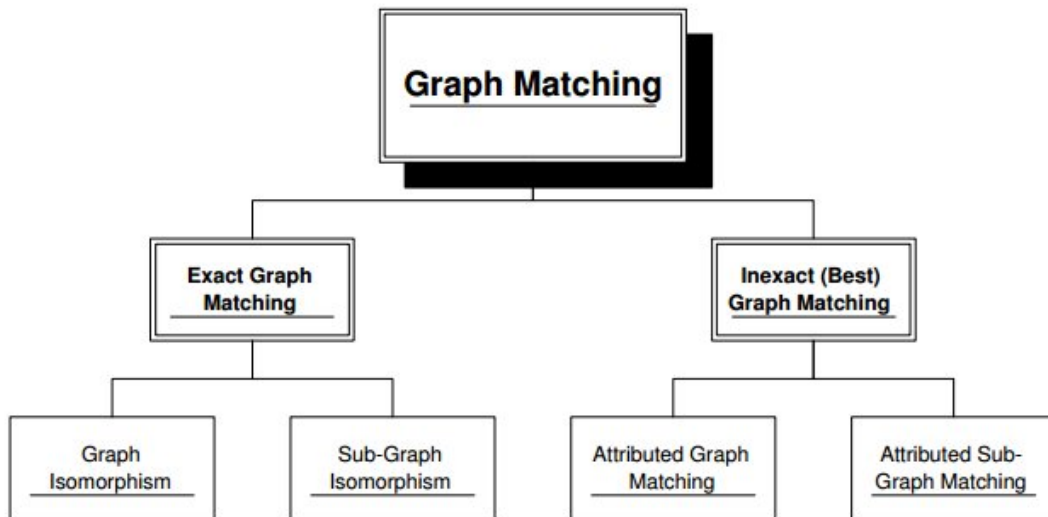
Termín Hledání podobnosti grafů (inexact matching) aplikovaný na některé problémy týkající se shodnosti grafů vyjadřuje, že není možné nalézt izomorfismus mezi dvěma grafy, aby byly shodné. V těchto případech mají grafy rozdílné charakteristiky jako je například jiný

počet vrcholů, jiný počet hran či jiná délka nejdelší kružnice. Tedy není hledán izomorfismus dvou grafů, ale problém je upraven na hledání největší možné shody mezi grafy. Tato transformace mění problém a zařazuje ho do třídy problémů známé jako inexact graph matching. V takovém případě hledáme nebijektivní korespondenci mezi grafem vzorku a grafem originálu. V následujícím textu předpokládejme $\|V_V\| < \|V_O\|$. Inexact matching je používán v oborech kartografie, rozpoznávání znaků a medicíně. Nejlepší korespondence graph matching problému je definována jako optimum nějaké objektivní funkce, která měří podobnost mezi přiřazenými uzly a hranami. Tato funkce je nazývána fitness funkcí, případně funkcí energie.

Formálně je tedy hledání podobnosti grafů definováno takto: mějme dva grafy, G_V a G_O přičemž $\|V_V\| < \|V_O\|$ a cílem je nalezení mapování $f' : V_D \rightarrow V_M$ $(u, v) \in E_P$ iff $(f(u), f(v)) \in E_M$.

Podtypem těchto úloh jsou problémy subgraph matching a subgraph izomorfizmu.

Při hledání složitost uváděných problémů autor [Ben02] řadí hledání přesné shody do P až NP kompletní množiny úloh, přičemž že u problémů této kategorie nebyla dokázána nejvyšší složitost NP complete. Pro problémy subgraph isomorphismu bylo dokázáno, že patří do třídy NP complete. Pro složitost nepřesného graph matchingu bylo dokázáno, že patří do třídy NP-complete.



Obrázek 4.3: Typy graph matchingu

Kapitola 5

Vytvořené algoritmy rozpoznávání operací

5.1 Stavový algoritmus

V ranné fázi jsem napsal prototyp rozpoznávacího algoritmu, který se snaží minimalizovat vzdálenost současného modelu od modelu cílového pomocí rozpoznání operací a jejich následné aplikace. Výhodou tohoto přístupu je možnost nalezení více alternativních cest, nevýhodou je potom velikost stavového prostoru zvětšující se s počtem rozpoznávaných operací. Algoritmus je popsán v pseudokódu viz algoritmus 1

Algoritmus v prvním svém kroku inicializuje hodnoty. Aktuálnímu modelu nastaví hodnotu modelu zdrojového. Množinu rozpoznávaných operací R_{ops} inicializuje prázdnou množinou. Rozpoznanou R operaci nastaví na NULL.

Následně opakuje cyklus repeat začínající na řádce 5, který je ukončen splněním terminální podmínky uvedené v pseudokódu na řádce 20, $R = \text{NULL}$. Tj. algoritmus je ukončen, pokud v těle cyklu nebyla rozpoznána žádná operace.

V těle cyklu Repeat potom algoritmus nastaví hodnotu R na NULL a nastaví na zmíněném řádku 7 hodnotu aktuálního nejlepšího zlepšujícího kroku K na 0, aby zajistil přemazání dat nalezené operace v minulé iteraci cyklu.

Algoritmus spočítá v cyklu na řádcích 8-14 pro každou operaci maximální zlepšující krok této operace K_{op} . Pokud je K_{op} lepší než dosavadní maximum K, aktualizuje K_{op} a R. Následně algoritmus v případě rozpoznání nějaké operace - viz. řádek 15 nalezne parametry params pro operaci R viz metoda getParams(R, A, S) na řádce 16. Tato metoda by například pro operaci AddClass nalezla jméno třídy, která neexistuje v zdrojovém modelu, ale existuje v cílovém modelu. Algoritmus přidá operaci R s aplikovanými(params) do množiny R_{ops} a aplikuje operaci R(params) na aktuální model A.

Základní myšlenkou pro vytvoření algoritmu byla existence vzdálenosti dvou modelů. Vzdálenost dvou modelů je snižována v každém kroku o zlepšující krok a jakmile jsou dva modely shodné (či pro danou množinu operací R_{ops} velmi podobné), algoritmus již žádnou další operaci nerozezná, hodnota vzdálenosti je na minimu a algoritmus končí. Vzdálenost modelu od prázdného modelu nazveme energií modelu.

Algorithm 1 Algoritmus procházení stavů

Input: Zdrojový model S , cílový model T **Output:** Seznam operací R_{ops} , po jejichž aplikaci se model S transformuje na model T

```

1: Inicializace:
2:  $A \leftarrow S$  ▷ Aktuální model
3:  $R_{ops} \leftarrow \{\}$ 
4:  $R \leftarrow NULL$  ▷ Rozpoznaná operace

5: repeat
6:    $R \leftarrow NULL$ 
7:    $K \leftarrow 0$  ▷ Zlepšující krok
8:   for all  $op$  from  $Ops$  do ▷ Pro každou operaci z app metamodelu
9:      $K_{op} \leftarrow getImprovement(op, A, T)$  ▷ Spočítá zlepšení
10:    if  $K < K_{op}$  then ▷
11:       $K \leftarrow K_{op}$ 
12:       $R \leftarrow op$ 
13:    end if
14:  end for
15:  if  $R \neq NULL$  then
16:     $params \leftarrow getParams(R, A, S)$ 
17:     $R_{ops} \leftarrow R_{ops} \cup R(params)$ 
18:     $apply(R(params), A)$ 
19:  end if
20: until  $R = NULL$  ▷ Opakuje cyklus, dokud byla rozpoznána nějaká operace

```

5.1.1 Energie modelu

Pokud se zaměříme na samotnou existenci tříd s daným jménem a properties s daným jménem v modelu a pomineme ostatní atributy properties a tříd můžeme si představit energii modelu jako součet existujících tříd a jejich properties.

Pro jednoduchost si můžeme reprezentovat textově s následujícími pravidly: název třídy budeme reprezentovat velkými písmeny a názvy properties malými písmeny. V zájmu jednoduchosti nereprezentujeme idProperties, která má většinou název jednoznačně odvoditelný od názvu třídy, která ji vlastní. Třída je řetězec obsahující svůj název a seznam properties. Řetězec Abcd tedy reprezentuje třídu A s properties "b", "c" a "d". Řetězec Bef potom reprezentuje třídu B obsahující property "e" a "f". Tuto reprezentaci nazveme Jednoduchovou textovou reprezentací. Model $M_1(Abcd, Bef)$ obsahuje dříve zmíněné třídy. Jeho energie je rovna součtu energie třídy A a třídy B. Energie každé třídy je rovna $1 + \text{sumy energií jednotlivých properties}$. Properties mají v naší demonstrační ukázce bez započítání jiných atributů než name energii 1.

$$E(M_1) = E(A) + E(B) = 1 + \sum_{p \in A} E(p) + 1 + \sum_{p \in B} (E(p)) = 1 + 3 + 1 + 2 = 7$$

Energie je v tomto případě rovna počtu konstruktivních operací nutných k vytvoření tohoto modelu. Energie také vyjadřuje v tomto případě počet destruktivních operací nutných k smazání tohoto modelu. Pokud vytvoříme další model, můžeme si vyjádřit hodnotu změny těchto modelů.

Můžeme vytvořit model M_2 například tak, že z modelu M_1 odebereme z třídy A property "c", přejmenujeme property "d" na "g" a přejmenujeme třídu B na C. Tak získáme model $M_2(Abg, Cef)$, který má energii rovnu hodnotě 6. $\text{Patch}(M_1, M_2)$ můžeme definovat pomocí delta notace. Naši delta notaci můžeme zapsat ve tvaru $+X$ pro přidanou třídu, $+Xyz$ pro přidané atributy "y" a "z" ze třídy X, $-X$ pro odstraněnou třídu a $-Xyz$ pro odstraněné atributy "y" a "z" ze třídy X.

Listing 5.1: Textový diff modelů

+Ag	−Acd
+C	−B
+Cef	−Bef

Pro tento minimalistický přístup můžeme použít výpočet symetrické delty následující vzorce:

$$\text{distance}(M_1, M_2) = E(\Delta(M_1, M_2)) + E(\Delta(M_2, M_1))$$

Vzdálenost dvou modelů M_1, M_2 je potom rovna energii, množinového rozdílu M_1, M_2 , sečtené s energií množinového rozdílu M_2, M_1 .

$$\Delta(M_X, M_Y) = (\Delta C_{XY}, \Delta P_{XY})$$

Delta modelů X a Y je uspořádaná dvojice rozdílu tříd a rozdílu properties.

$$\Delta C_{XY} = \{c : c \in M_X \wedge c \notin M_Y\}$$

Delta tříd modelů X a Y je množina tříd, které jsou v modelu X , ale nejsou v modelu Y .

$$\Delta P_{XY} = \{p : p \in X \wedge p \notin Y \wedge p.owner \notin \Delta C_{XY}\}$$

Delta properties modelů X a Y je množina properties, které patří do modelu X , ale nejsou v modelu Y a jejich vlastnická třída není obsažena v množině ΔC_{XY} . Explicitní podmínka pro vlastnickou třídu property je, že je obsažen v X , protože i p je obsaženo v X .

Předpokládejme dále, že energie dvojice $E(C_{XY}, P_{XY}) = E(C_{XY}) + E(P_{XY})$

Původní rovnice se nám tedy přepíše na :

$$\begin{aligned} distance(M_X, M_Y) &= E(\Delta(M_X, M_Y)) + E(\Delta(M_Y, M_X)) = E(C_{XY}, P_{XY}) + E(C_{YX}, P_{YX}) = \\ &= E(C_{XY}) + E(P_{XY}) + E(C_{YX}) + E(P_{YX}) \end{aligned}$$

Na výpisu 5.1 máme na levé straně zobrazenou $\Delta(M_1, M_2)$ a na pravé straně $\Delta(M_2, M_1)$ pro zadaný příklad. Pro naše konkrétní modely M_1 a M_2 je distance tedy:

$$distance(M_1, M_2) = E(C_{12}) + E_{P_{12}} + E(C_{12}) + E_{P_{12}} = 1 + 3 + 1 + 4 = 9$$

Tento způsob vypočítávání Energie nicméně zanedbává energii, o kterou model obohacují atributy tříd a properties. Atributy properties a tříd dělíme do skupiny primitivních typů a skupiny referencí. Mezi primitivní atributy řadíme třídní atributy `name` a `isAbstract` a atributy `lowerBound`, `upperBound`, `isOrdered`, `isUnique` a `name` vlastněné properties. Mezi referenční atributy patří třídní atribut `parent` a atributy `type` a `oppositeProperty` vlastněné property. Zásadním rozdílem mezi skupinou referenčních a primitivních atributů je způsob jejich změny jednotlivými operacemi. Primitivní atribut můžeme změnit aplikací jedné operace na jinou hodnotu. Například property atribut `isUnique` změníme aplikací operace `SetUnique`. Výjimečné jsou atributy `lowerBound` a `upperBound`, jejichž hodnotu můžeme změnit současně jednou operací `SetBounds`. Hodnotu referenčních atributů nemůžeme změnit jednou operací, ale dvěma. Například na změnu `parent` třídy musíme rodičovskou třídu nejdříve odstranit operací `RemoveParent` a následně operací `AddParent` přidat referenci na novou rodičovskou třídu. Změna referenčních hodnot modelů je započítána dvakrát oproti změně hodnot primitivních atributů. Primitivní hodnoty je nutné do vzorce tedy započítat. Původní vzorec pro vzdálenost dvou modelů se tedy změní na:

$$\begin{aligned} distance(M_X, M_Y) &= E(\Delta(M_X, M_Y)) + E(\Delta(M_Y, M_X)) = E(C_{XY}, P_{XY}) + E(C_{YX}, P_{YX}) + \\ &+ E(P_{XY}) = E(C_{XY}) + E(P_{XY}) + E(C_{YX}) + E(P_{YX}) + \\ &+ E(P_{XY}) \end{aligned}$$

Přičemž $E(P_{XY})$ reprezentuje energii změněných primitivních atributů a γ reprezentuje podmínku pro započítaný atribut:

$$\gamma = A : (A.owner \notin M_X \vee A.owner \notin M_Y) \vee A_X! = A_Y$$

$$E(P_{XY}) = \sum_{\gamma} E(A)$$

Pro rozšířený výpočet energie property $p_{XY} \in P_{XY}$ je zakomponována do vzorce energie referenčních propriet:

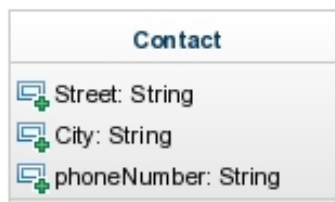
$$E(p_{XY}) = 1 + \sum_{A \in p_X \wedge A_Y = null \vee A_Y! = A_X}$$

Takto definovaný výpočet energie s položením $E(A) = 1$ udává maximální počet konstruktivních, destruktivních a modifikačních operací nutných k transformaci modelu M_X na model M_Y .

Zlepšující krok operace je definován jako vzdálenost, o kterou se přiblíží aktuální model A po aplikaci operace op k modelu cílovému T s nejlepšími možnými parametry. Nejlepší parametry jsou takové, které přibližují aktuální model o takovou vzdálenost, že neexistují parametry, které by zdrojový model přibližovaly k cílovému o vzdálenost větší. Není zaručena jedinečnost nejlepších parametrů. Při neexistenci jakýchkoliv vhodných parametrů vrací operace $-\infty$. Pro zlepšující krok $getImprovement(op, A, T)$ platí:

$$distance(M_A, M_T) = distance(M_X, M_T) + getImprovement(op, A, T)$$

Ilustrujme běh algoritmu na příkladě. Na obrázku 5.1 je zobrazen ukázkový zdrojový a cílový model je zobrazený na obrázku 5.2.



Obrázek 5.1: Počáteční model



Obrázek 5.2: Cílový model

Algoritmus předpokládá, že operace přibližující aktuální stav k cílovému by měly být rozpoznány (a aplikovány) co nejdříve. Například pro počáteční model zobrazený na obrázku 5.1 a cílový model zobrazený na obrázku 5.2. Pokud použijeme základní definici vzdálenosti energie, můžeme počáteční model vyjádřit pomocí jednoduché textové formy se zkrácením názvů na počáteční písmeno a dolním indexem pro property s neunikátním názvem " $M_1(Cscp)$ " a cílový model jako $M_2(Cpc_{on}, Acsa)$ vzdálenost těchto dvou modelů vyjádřit pomocí delta notace zobrazené v seznamu 5.2.

Listing 5.2: Textový patch modelů pro ukázkový příklad v delta notaci

$+C_{con}$ $-C_{sc}$ $+A$

+Asca

$$\text{distance}(M_1, M_2) = E(C_{12}) + E_{P_{12}} + E(C_{12}) + E_{P_{12}} = 0 + 2 + 1 + 4 = 7$$

Algoritmus v prvním průchodu rozpozná, že je možné aplikovat operace AddClass, RemoveProperty a ExtractClass. Nejlepším parametrem pro AddClass je třída Address. AddClass zlepšuje vzdálenost o 1. Nejlepším parametrem pro operaci RemoveProperty je jedna z odstraněných property, takže například Street. RemoveProperty zlepšuje vzdálenost také o 1. Vhodnými parametry pro operaci ExtractClass jsou třídy zdrojová třída Address, extrahovaná třída Contact, referenční property contact, její oppositum address a nějaký seznam properties obsažených v třídě address. Nejlepšími parametry pro ExtractClass jsou dvě zmiňované třídy s asociačními properties a seznam všech properties v nově vzniklé třídě Contact. ExtractClass má hodnotu zlepšujícího kroku 7. Z těchto operací vyhodnotí jako nejlepší ExtractClass a následně algoritmus skončí, protože po aplikaci se současný model dostal do cílového stavu a již nerozpozná další operaci.

Algoritmus dává stejnou váhu atributům jako třídám, což nemusí být správné. Aby algoritmus lépe splňoval požadavky uživatele, tj. priorizoval některé operace, je možné modifikovat výpočet energie a místo konstanty 1 v předešlých vzorcích použít konfiguraci vah jednotlivých atributů. Všechny atributy jsou vyjmenovány v seznamu 5.1.1.

- Váhy atributů třídy

W(classname) jméno třídy

W(parent) reference na rodičovskou třídu

- Váhy atributů všech property

W(propertyName) jméno property

W(type) reference na typ property

W(isOrdered) boolean značící ordered kolekci

W(isUnique) boolean značící unikátní kolekci

W(LowerBound, UpperBound) horní a dolní mez hodnot property

- Váhy atributů asociačních property

W(oppositeProperty) reference na opozitní property u bidirectional vazby

Příklad konfigurace:

- $W(\text{classname}) = 1$
- $W(\text{parent}) = 0$
- $W(\text{propertyName}) = 1$
- $W(\text{type}) = 0$

- $W(\text{isOrdered}) = 0$
- $W(\text{isUnique}) = 0$
- $W(\text{LowerBound}, \text{UpperBound}) = 0$
- $W(\text{oppositeProperty}) = 0$

Tato konfigurace redukuje získávání energie na původně zmiňovaný způsob definice Energie.

Další možnou modifikací je úprava seznamu R_{ops} použitého v algoritmu na řádce 8. Algoritmus je schopen rozpoznat jednotlivé operace, ale může mít problémy s rozpoznáním některých dvojic operací. Problematickým stavem je například, pokud jediným rozdílem je primitivní typ property odlišný ve vstupním a výstupním modelu. Algoritmus vyhodnotí vzdálenost > 0 a musí buď aplikovat operaci `RemoveProperty`, která smaže property a má záporný zlepšovací krok. Bylo by nutné upravit zisk zlepšujícího kroku, značně zesložitit implementaci metody `getImprovement` pro operaci `RemoveParent`, upravit inicializaci zlepšujícího kroku tak, aby se na řádce 7 nainicializovala hodnotou $-\infty$ a upravit terminální condition na řádce 20, tak, aby algoritmus neběžel do nekonečna. Druhou možností vyřešení tohoto problému je definovat seznam R_{ops} nikoliv jako seznam operací v aplikačním metamodelu, ale jako seznam sekvencí operací. Konverze původního seznamu operací na jednoprvkovou sekvenci a rozšíření seznamu R_{ops} o sekvenci operací `RemoveProperty` a `AddProperty`, s metodou `getImprovement` získávání zlepšujícího kroku pouze pro případy, kdy existuje property, která má v výstupním modelu jiný typ než ve vstupním.

Přes počáteční slibné výsledky testované na konstruktivních operacích nebyl tento algoritmus shledán jako příliš efektivní. První nevýhodou je, že algoritmus v každém kroku hledá nejlepší zlepšující krok i pro všechny operace nalezené v iteraci minulé. Rozpoznané operace z minulého kroku by bylo možné zapamatovat, ale nebyl nalezen způsob hledání konfliktních operací vyjma případů, kdy dvě operace pracují nad jinou hierarchickou strukturou. Proto se nedá jednoduše analyzovat, pro které operace je nutné hledat nový zlepšující krok znovu, kterých operací se aplikace rozpoznané operace nedotkla, a které operace již nemusí mít zlepšující krok shodný a mohou mít jiné parametry.

Druhou nevýhodou je šířka prohledávaného stromu - algoritmus testuje v každé iteraci všechny operace, jejichž seznam (či v modifikaci zmiňovaná sekvence operací) R_{ops} může nabývat velkých hodnot. Při všech váhách nastavených na jedna při vzdálenosti dvou modelů $distance(M_1, M_2) = d$, velikosti $R_{ops} = n$, složitosti aplikace operací op_{apply} , složitosti zisku zlepšujícího kroku operace $op_{getImprovement}$ a složitosti zisku parametrů $op_{getParams}$ má algoritmus algoritmickou složitost $O(d) = O((\max(op_{getImprovement})^n * op_{getParams} * op_{apply})^d)$. V každé z maximálně d iterací je nutné v nejhorším případě získat zlepšující krok pro každou operaci a pro operaci s nejvyšším zlepšujícím krokem potom nalézt pro tuto operaci nejlepší parametry a aplikovat ji. Složitost operace $op_{getImprovement}$ se různí v závislosti na typu operace. Pro c tříd ve vstupním modelu a výstupním modelu má složitost hledání parametrů operace `AddClass` $O(\text{AddClass}_{getImprovement}) = c^2$ a, protože hledáme třídu, která není ve vstupním modelu, ale je ve výstupním, tedy procházíme c tříd ve vstupním modelu a c tříd v modelu výstupním. Složitost $O(\text{ExtractClass}_{getImprovement}) = c^2 * p * r * p$ přičemž c je počet tříd ve vstupním a výstupním modelu, p je maximální počet operací ve třídě a r je počet extrahovaných property. Hledáme třídu, ve které existuje asociční property v cílovém modelu, která neexistovala v modelu zdrojovém, jejíž součet energie

properties, které jsou "extrahovány" do třídy typu asociace je největší. Po položení $r = p$ dostáváme $O(ExtractClass_{getImprovement}) = c^2 * p^3$. Vzhledem k standardním modelům, které obsahují hodně malých tříd můžeme za předpokladu $c \gg p$ položit $O(op_{getImprovement}) = c^2$. U většiny operací hledáme třídu ze vstupního modelu, ke které hledáme její protějšek ve výstupním modelu se zadanými vlastnostmi, proto berme $O(op_{getImprovement}) = c^2$. Stejnou složitost získáme ekvivalentním postupem pro funkci `getParams`. Funkce op_{apply}^d) hledá jen třídu z vstupního modelu, na které provede nějaké změny, takže můžeme aproximovat její algoritmickou složitost hodnotou c .

$$O((Max(op_{getImprovement})^n * op_{getParams} * op_{apply})^d) = O(c^2 * c^2 * c)^d = O(c^{5*d})$$

Stavový algoritmus měl definován krok pro operace `AddPrimitiveClass`, `AddStandardClass`, `RenameEntity`, `RemoveEntity`, `RenameProperty`.

5.2 Návrh ze studia článků

Kvůli přílišné obecnosti algoritmů pro graph matching nebyly tyto algoritmy shledány za vhodné k použití pro problém hledání sady aplikačních operací. První 3 popsané algoritmy model matchingu (1 párování podle statického identifikátoru, 2. signature based matching, 3. similarity based matching) nejsou vhodné k použití z důvodu, že k rozpoznání popsaných expanzivních a reduktivních operací je nutné rozpoznat 2 třídy, které se mapují na jednu třídu pro reduktivní operace a naopak jednu operaci, která se mapuje na 2 třídy. Problém rozpoznávání operací je tudíž nadskupinou problému model matchingu, protože matching páruje 1 ku 1, ale algoritmus řešící problém rozpoznávání operací musí řešit matching M entit ku N entitám.

Zmiňované algoritmy mě inspirovaly k vytvoření Custom language specific matching algoritmu pro tento problém, který si z zmiňovaných algoritmů v sekci 4.1.3 bere hlavně poznámku u algoritmu UMLDiff zmiňovaného pod Custom Language skupinou 4.1.3 - ze všech praktických důvodů považujeme třídy se stejným jménem jako shodné.

Vznikly dvě implementace párovacích algoritmů.

5.3 Základní párovací algoritmus

První, jednodušší implementace používá základu z UMLDiffu a očekává, že dvě třídy se stejným jménem jsou shodné, páruje tedy třídy podle jména, podobně předpokládá, že dvě property ve stejné třídě se stejným jménem jsou shodné. Následné rozdíly řeší rozpoznáním konstruktivních a destruktivních, případně některých operací modifikačních, ať už tyto operace pracovali s třídami nebo s property.

Základní algoritmus pracuje podle pseudokódu 2

Algorithm 2 Základní párovací algoritmus

Input: Zdrojový model S , cílový model T **Output:** Seznam operací R_{ops} , po jejichž aplikaci se model S transformuje na model T

```

1: Inicializace:
2:  $SClses \leftarrow S.classes$  ▷ Nenamatchované třídy z vstupního modelu
3:  $TClases \leftarrow T.classes$  ▷ Nenamatchované třídy z cílového modelu
4:  $SProps \leftarrow S.classes.properties$  ▷ Nenamatchované properties z vstupního modelu
5:  $TProps \leftarrow T.classes.properties$  ▷ Nenamatchované properties z cílového modelu
6:  $R_{ops} \leftarrow \{\}$ 

7: for all  $C_S \in S$  do
8:   for all  $C_T \in T$  do
9:     if  $C_T.name = C_S.name$  then
10:      MATCH_EQUAL_PROPS( $S, T$ ) ▷ Aktualizace matchovaných properties
11:       $SClses \leftarrow SClses \setminus \{C_S\}$  ▷ Aktualizace nenamatchovaných tříd ze
        zdrojového modelu
12:       $TClases \leftarrow TClases \setminus \{C_T\}$  ▷ Aktualizace nenamatchovaných tříd z cílového
        modelu
13:     end if
14:   end for
15: end for
16:  $R_{ops} = \text{RECOGNIZE\_OPS}()$  ▷ Rozpoznání operací
17: END\_ALGORITHM

18: procedure MATCH_EQUAL_PROPS( $clsSrcModel, clsTargetModel$ )
19:   for all  $P_S \in clsSrcModel$  do
20:     for all  $P_T \in clsTargetModel$  do
21:       if  $P_S.name = P_T.name$  then
22:          $SProps \leftarrow SProps \setminus \{P_S\}$ 
23:          $TProps \leftarrow TProps \setminus \{P_T\}$ 
24:       end if
25:     end for
26:   end for
27: end procedure

```

Algoritmus inicializuje množiny nespárovaných tříd z vstupního (a výstupního) modelu všemi třídami z vstupního (resp výstupního modelu) a seznam výstupních operací prázdnou množinou. Následně algoritmus zpáruje třídy podle jména, odstraní spárované třídy z množin SClasses a TClasses a zpáruje jejich property podle jména v proceduře MATCH_EQUAL_PROPERTIES. Procedura MATCH_EQUAL_PROPERTIES odstraní v spárovaných třídách property se stejným jménem z množin SProps a TProps.

Algoritmus pokračuje rozpoznáváním operací. V fázi rozpoznávání operací jsou již zpárované všechny třídy, které základní párovací algoritmus dokáže rozpoznat. Základní párovací algoritmus dělí třídy do tří skupin:

1. třídy, které byly v průběhu Evoluce modelu zachovány
2. třídy, které byly v průběhu Evoluce z modelu odstraněny
3. třídy, které byly v průběhu Evoluce do modelu přidány

Základní algoritmus předpokládá, že s třídami z první skupiny bylo manipulováno pouze za pomoci třídních modifikačních operací a s properties těchto tříd mohlo být manipulováno pomocí konstruktivních, destruktivních nebo modifikačních operací. Třídy z druhé skupiny byly z modelu odstraněny pomocí operace RemoveEntity. Aby byly validační podmínky destruktivních operací platné, je nutné před aplikací destruktivních operací RemoveEntity odstranit přebytečné properties operací RemoveProperty a upravit třídy pomocí třídních modifikačních operací RemoveParent. Třídy v třetí skupině je nutné do modelu přidat konstruktivní operací AddClass, následně je možné s třídami manipulovat pomocí třídních modify operací a modifikovat properties pomocí konstruktivních, destruktivních a modifikačních operací. Jediné modifikační třídní operace, které mají vliv na strukturu modelu a byly zařazeny do rozpoznávání jsou operace AddParent a RemoveParent. Operace AddParent může v nynější implementaci odstraňovat z aktuálního modelu kolizní properties, má tedy vliv na seznam nenamapovaných properties SProps a musí předcházet operaci RemoveProperty.

OBRÁZEK BUDE DOPLNĚN.

OBRÁZEK BUDE DOPLNĚN.

OBRÁZEK BUDE DOPLNĚN.

OBRÁZEK BUDE DOPLNĚN.

OBRÁZEK BUDE DOPLNĚN.

OBRÁZEK BUDE DOPLNĚN.

Algoritmus by mohl rozpoznat operace v libovolné přípustné sekvenci. Tato přípustná sekvence operací musí splňovat precedenční vztahy zobrazené na obr. REF DOPLNĚNÉHO obr. Každý model je možné rozdělit na množinu nezávislých hierarchických strukturálních operací. Dvě třídy A, B patří pro základní párovací algoritmus do stejné hierarchické struktury pokud $A.parent = B \vee B.parent = A \vee (\exists X \in M.clses : X \in ancestor(A) \wedge X \in ancestor(B))$, přičemž $ancestor(Z)$ je množina všech předků třídy Z. Sekvence operací op_1, op_2, \dots, op_n je nezávislá, pokud všechny operace z vstupního modelu operují nad třídami třídami z různých hierarchických struktur a žádná z operací op není AddParent.

Pro každou skupinu množinu operací $\{op_1, op_2, \dots, op_n\}$ můžeme najít grupu operací - tj seznam operací operujících nad jedinou hierarchickou strukturou či více hierarchickými strukturami spojenými sjednocenými operací AddParent.

Nejjednodušší implementací zisku validní sekvence je předpoklad existence jediné grupy, tj rozpoznávání operací po skupinách ze seznamu `ref algo:match:ops_seq`. Tato implementace je zobrazena v pseudokódu [3](#)

Základní rozpoznávací algoritmus má schopnost rozeznat jen konstruktivní, destruktivní a modifikační operace. Zachovává data, jejichž identifikátor se nemění. Ostatní data naopak nekompromisně maže. Tento algoritmus není schopný rozpoznat operace `RenameClass`, `RenameProperty`, které jsou dle [\[Luk13\]](#) nejčastěji používanými operacemi. Tento algoritmus není schopný rozpoznat ani žádné expanzivní a reduktivní třídní operace. Výhodou implementace tohoto algoritmu je, že nepotřebuje definovat žádný diff metamodel. Za předpokladu $C_S \gg P_S$ a $C_T \gg P_T$ a $C_S \approx C_T = c$ má tento algoritmus složitost $O(c^2)$, protože prochází všechny třídy v zdrojovém modelu a hledá pro ně třídu se stejným jménem v modelu cílovém.

Algorithm 3 Rozpoznání operací v základním algoritmu

```

1: procedure RECOGNIZE OPS
2:   for all  $C \in TClases$  do
3:      $ops \leftarrow R_{ops} \cup AddCls(C.name)$ 
4:   end for

5:   for all  $C \in TClases$  do                                ▷ Oprava parenchy 1.AddParent pro přidané
   Neimplementováno
6:     if  $C.parent \neq NULL$  then
7:        $ops \leftarrow R_{ops} \cup AddParent$ 
8:       for all  $P \in C.properties$  and  $P \in SProps$  do
9:          $SProps \leftarrow SProps \setminus P$ 
10:      end for
11:    end if
12:  end for

13:  for all  $C \in SClases$  do                                ▷ Oprava parenchy 2. RemoveParent pro smazané.
  Neimplementováno
14:    if  $C.parent \neq NULL$  then
15:       $ops \leftarrow R_{ops} \cup RemoveParent$ 
16:      for all  $P \in C.properties$  and  $P \in C.parent.properties$  do
17:         $TProps \leftarrow TProps \cup P$ 
18:      end for
19:    end if
20:  end for

21:  for all  $C_T \in T.Classes \setminus TClases$  do            ▷ Oprava parenchy 3 a 4 pro namatchované
22:    for all  $C_S \in S.Classes \setminus SClases$  do
23:      if  $C_S.name = C_T.name \wedge C_S.parent = NULL \wedge C_T.parent! = null$  then
24:         $ops \leftarrow R_{ops} \cup AddParent$ 
25:        for all  $P \in C.properties$  and  $P \in SProps$  do
26:           $SProps \leftarrow SProps \setminus P$ 
27:        end for
28:      end if
29:    end for
30:  end for

31:  for all  $P \in TProps$  do
32:     $ops \leftarrow R_{ops} \cup AddProperty(P.owner, P.name)$ 
33:  end for

34:  for all  $P \in SProps$  do
35:     $ops \leftarrow R_{ops} \cup RemoveProperty(P.owner, P.name)$ 
36:  end for

37:  for all  $C \in SClases$  do
38:     $ops \leftarrow R_{ops} \cup RemoveCls(C.name)$ 
39:  end for

40:  ADD_MODIF_PROP_OPS()
41: end procedure

```

5.4 Rozšířený algoritmus

Složitější implementace algoritmu páruje stejně jako jednodušší v první fázi shodné elementy - modely se mění, ale některé třídy jsou zachovány. Oproti základní verzi algoritmu je nutné vytvořit entitu reprezentující shodu - EqualClassPair. Shodné třídy a třídy přejmenované potom tvoří pilíře pro operace reduktivní a expanzivní, které se vážou na rozpoznání páry. Operace expanzivní a reduktivní není tedy možné bez jejich pilířů rozpoznat. V druhé fázi algoritmus páruje již spárované třídy v zdrojovém modelu s třídami nespárovanými z cílového modelu a obráceně třídy nespárované ze zdrojového modelu s třídami spárovanými. V druhé fázi párování musí algoritmus párovat třídy podle jiného kritéria. Tímto mnou zvoleným kritériem je suma properties se shodným jménem. Čím vyšší je tento koeficient, tím jsou si třídy podobnější.

Pro ilustraci si představme, že máme zdrojový model $M_1 = (Abcde)$ a cílový model $M_2 = (Abcf, Bdeg)$. Diff těchto dvou modelů je zobrazen na výpisu 5.3

Listing 5.3: Textový diff pro expanzivní operaci

+B	-Ade
+Bdeg	
+Af	

Vidíme, že třída A byla zachována, třída B, třída B je podobná A s koeficientem podobnosti 2, existují 2 property("e" a "d") ve třídě A ve zdrojovém modelu se shodným jménem jako mají property v modelu cílovém ve třídě B. Třída B byla přidána do modelu a je podobná třídě A, algoritmus očekává rozpoznání expanzivní operace. Pokud je přidána property "f" typu B a property "g" ve třídě B je typu A, algoritmus rozpozná operaci ExtractClass. Pokud v cílovém modelu platí B.parent = A, algoritmus rozpozná operaci ExtractSubClass. V případě nerozpoznaného typu páru algoritmus skončí s matchovací fází, protože neexistuje jiný kandidát pro třídu B na vytvoření páru a třída B bude rozpoznána jako třída přidaná operací AddClass.

V ilustračním příkladě 2 zaměníme M_1 za model M_2 v původním příkladu, tj. $M_2 = (Abcde)$ a $M_1 = (Abcf, Bdeg)$. Textový diff je zobrazen na výpisu 5.4

Listing 5.4: Textový diff pro reduktivní operaci

+Ade	-B
	-Bdeg
	-Af

Algoritmus pro tento příklad zjistí, že třída A byla zachována, třída B byla odstraněna, z třídy B byly odstraněny properties "d", "e" a "g", z třídy A byla odstraněna property f, naopak do třídy A byly přidány property "de". Třída B je podobná s koeficientem 2 (shodnost properties "d" a "e") třídě A. Třída B byla ze zdrojového modelu odstraněna, algoritmus prověřuje reduktivní operace. Pokud platí B.parent = A algoritmus rozpozná operaci CollapseHierarchy, v případě, že property f a g tvoří oboustranně navigabilní vazbu, algoritmus rozpozná operaci InlineClass. V případě, že algoritmus nerozpozná ani jeden z těchto párů bude třída B rozpoznána jako třída odstraněná operací RemoveEntity.

Algoritmus počítá podobnost tříd pomocí počtu properties se stejným jménem. Další možností by byla definice energetické funkce viz sekce 5.1. Aby bylo snazší rozpoznat operace reduktivní a expanzivní, byly zavedeny `ClassPairy` a `PropertyPairy`.

5.4.1 Diff elementy

Kvůli nutnosti rozpoznávat operace vznikly v aplikačním metamodelu nové elementy. Kořenovým elementem diff modelu je `Diff element`. Tento element obsahuje kolekce elementů `classpairs` typů `ClassPair`, `propertyPairs` typu `PropertyPair`, a dále pak `addedClasses` a `removedClasses` typu `DiffClass` a `addedProperties` a `removedProperties` typu `DiffProperty`. Element `ClassPair` shlukuje spárované zdrojové (`source`) a obrazové (`reflection`) třídy, dále pak referenci `owningDiff` na `Diff element`, v kterém jsou obsaženy a která je důležitá pro implementaci algoritmu a v neposlední řadě `underlyingPairs` - shodné páry `Properties` typu `EqualPropertyPair`, které jsou detekované danou operací. Podobně jako operace jsou i páry rozděleny do několika skupin.

Konstruktivní a destruktivní operace nemají svůj obraz v diff metamodelu. Je s nimi v rámci rozšířeného algoritmu zacházeno stejně jako v základním párovacím algoritmu. Konstruktivní ani destruktivní operace nejsou reprezentovány jako `ClassPair` ani `PropertyPair`, protože tyto operace nemapují element ze vstupního modelu na element z výstupního modelu. Konstruktivní operace by jinak mapovaly prázdný vstup na element a destruktivní obráceně element na prázdný výstup.

Oproti jednodušším konstruktivním a destruktivním operacím jsou operace expanzivní a reduktivní a modifikační v Diff modelu zobrazeny jako `ExpansiveClassPair` a `ReductiveClassPair`, které mapují element vstupního modelu na element cílového modelu.

Aby bylo možné rozpoznat specifický pár závislý na jiném páru je nutné při nejd, byla přidána třída `ReplacingClassPair` - nahrazující pár, který se používá jako pivot pro hledání expanzivních, reduktivních a modifikačních párů. Od elementu `ReplacingClassPair` dědí elementy `EqualClassPair` - třída, která si uchovála jméno z původního modelu a element `ReplacingClassPair` - reprezentující třídu, která si neuchovála jméno, ale má změněný název. Podmínky získávání konkrétních typů párů a jejich pořadí specifikuje konkrétní rozpoznávací algoritmus.

Projevem konstruktivních a destruktivních operací jsou elementy `DiffClass` a `DiffProperty`, které zaobalují třídy a property tak, aby bylo možné referencovat na jiný objekt než element `Structure`.

5.4.2 Popis rozšířeného párovacího algoritmu

Algorithm 4 Rozšířený párovací algoritmus

Input: Zdrojový model S, cílový model T**Output:** Seznam operací R_{ops} , po jejichž aplikaci se model S transformuje na model T

```

1: Initalize:
2:  $SClses \leftarrow S.classes$  ▷ Nenamatchované třídy z vstupního modelu
3:  $TClases \leftarrow T.classes$  ▷ Nenamatchované třídy z cílového modelu
4:  $SProps \leftarrow S.classes.properties$  ▷ Nenamatchované properties z vstupního modelu
5:  $TProps \leftarrow T.classes.properties$  ▷ Nenamatchované properties z cílového modelu
6:  $R_{ops} \leftarrow \{\}$ 
7:
8: for all  $C_S \in S$  do
9:   for all  $C_T \in T$  do
10:    if  $C_T.name = C_S.name$  then
11:       $MATCH\_EQUAL\_PROPS(S, T)$  ▷ Aktualizace matchovaných properties
12:       $SClses \leftarrow SClses \setminus \{C_S\}$  ▷ Aktualizace nenamatchovaných tříd ze
        zdrojového modelu
13:       $TClases \leftarrow TClases \setminus \{C_T\}$  ▷ Aktualizace nenamatchovaných tříd z cílového
        modelu
14:    end if
15:  end for
16: end for
17:  $R_{ops} = RECOGNIZE\_OPS()$  ▷ Rozpoznání operací
18: END\_ALGORITHM

19: procedure  $MATCH\_EQUAL\_PROPS(clsSrcModel, clsTargetModel)$ 
20:   for all  $P_S \in clsSrcModel$  do
21:     for all  $P_T \in clsTargetModel$  do
22:       if  $P_S.name = P_T.name$  then
23:          $SProps \leftarrow SProps \setminus \{P_S\}$ 
24:          $TProps \leftarrow TProps \setminus \{P_T\}$ 
25:       end if
26:     end for
27:   end for
28: end procedure

```

Kapitola 6

Testování projektu Migdb

V průběhu vývoje byl za účelem ověření správné funkcionality vytvořen projekt `Migdb.testing.run`, který spouští jednotlivé testy komponent aplikace.

V rámci projektu byly vytvořeny testy komponent Workflow obsažené v `packagi migdb.testing.components.run`, testy aplikační evoluce inkludované do Workflow `test_app_atomic.mwe2` v `packagi migdb.testing.app.atomic.run`, testy databázové evoluce obsažené workflow `test_rdb_atomic.mwe2` v `packagi migdb.testing.rdb.atomic.run`, testy validátorů aplikačního a databázového modelu obsažené v `packagi migdb.testing.validators.run`, test ORM transformace struktury aplikace na DB schema + ORMo transformace obsažené v workflow `migdb.testing.orm.run`, testy generování SQL schématu obsažené v `packagi migdb.testing.generators.run`, integrované testy celého frameworku `migdb` obsažené v `packagi migdb.testing.migdb_executer` a posledními testy jsou testy algoritmů rozpoznávajících operace obsažené v `packagi migdb.testing.app.oracle.run`.

Testy komponent testují správnou funkcionalitu komponenty `Comparator`, která musí správně porovnat očekávaný a reálný výstupní soubor xmi ostatních testů. Tyto testy jsou rozděleny do více workflow, protože některé musí být neúspěšné, jak už napovídá klíčové slovo `fail` v jejich názvu. Dalšími komponentami vzniklými v rámci projektu `Migdb` byly `QVTO-Executor`, `TestWorkflow`, `DirectoryCleaner` a `TestComponent`. Komponenta `TestComponent` vznikla, aby bylo přehlednější a efektivnější psát QVT testy `Migdb`, je složena z několika dalších načítacích, ukládacích a porovnávacích komponent a zkracuje zápis testů ve workflow asi 10 krát. Nebylo jasné, jak vytvořit testy na správnou funkcionalitu ostatních komponent - správné jejich zapojení do jiných testů bylo pro nás dostatečným testem.

Ostatní testy se řadí do xmi kategorie testů, tj testů, které mají jako vstupní model xmi soubor. Po spuštění xmi testů se v projektu `migdb.testing.run` vygeneruje složka `output-tests`, která obsahuje výstupní data jednotlivých testů. Výstupní data mohou obsahovat výstupní xmi soubory porovnávané s očekávaným xmi souborem nebo SQL souborem, který je možné aplikovat na databázi PostgreSQL.

Speciálním testem je `test_code_generator.mwe2`, tento test vygeneruje pro zadaný vstupní aplikační model a sadu aplikačních operací výstupní rdb model, sadu databázových operací, výstupní SQL generující strukturu databáze a SQL reprezentující výstupní databázové operace. Kromě těchto vygenerovaných dat je možné najít ke každému testu v adresáři `test_data` reálná data, s kterými může být test spuštěn. Reálná data jsou vytvořena jen pro testy komplexnějších operací (operace 007 - 010), které jen nemění strukturu databáze, ale i manipulují s daty. Postup testování tohoto testu je - spuštění workflow vedoucí k vygenerování SQL db

schematu a SQL db operací. Spuštění SQL vytvářející strukturu databáze, spuštění SQL s daty uloženými v souboru data.sql z přidružené složky v adresáři test_data, aplikace vygenerovaného souboru transformačních SQL, zobrazení výstupních dat za pomoci souboru check_selects.sql ze složky s daty. Bohužel nebyl nalezen lepší způsob otestování než manuální spuštění a vizuální porovnání selectů s očekávaným výstupem po aplikaci dané operace na data.sql.

Kapitola 7

Ukázka zdrojového kódu práce

Ukázka helperu mergeProperty

```
helper AssociationProperty::ormMergeProperty(appStructure : APP::Structure,
    targetClassName : String, operations : RDB::Operations) : RDB::Operations {
    var defaultSchemaName : String := getDefaultSchemaName();
    var sourceClassName : String := self.owningGeneralClass.name;
    var typeClassName : String := self.type.name;
    var sourceTableName : String := sourceClassName.translate();
    var targetTableName : String := targetClassName.translate();
    var typeTableName : String := typeClassName.translate();
    var mergedColumnName : String := self.name.translate();
    var idSourceTableName : String := getDbIdColumnName(sourceTableName);
    var idTargetTableName : String := getDbIdColumnName(targetTableName);
    var idTypeTableName : String := getDbIdColumnName(typeTableName);

    if(self.upperBound = 1)then{
        var equalWhereCondition : String := getEqualityWhereCondition(
                                                    sourceTableName,
                                                    idSourceTableName,
                                                    targetTableName,
                                                    idTargetTableName);

        var safeUpdateCondition : String := getSafeCondition(
                                                    defaultSchemaName,
                                                    idTargetTableName,
                                                    sourceTableName,
                                                    idSourceTableName);

        var updateRows : RDB::ops::ModelOperation := _updateRows(
                                                    defaultSchemaName,
                                                    sourceTableName,
                                                    mergedColumnName,
                                                    targetTableName,
                                                    mergedColumnName,
                                                    equalWhereCondition,
```

```

safeUpdateCondition);
addOperation(updateRows, operations);
var fkName : String := getFkRefencingOppositeName(
    self.name,
    sourceClassName,
    typeClassName);
var removeFkConstr : RDB::ops::ModelOperation := _removeConstraint(
    defaultSchemaName,
    sourceTableName,
    fkName);

addOperation(removeFkConstr, operations);
var removeMergedColumn : RDB::ops::ModelOperation := _removeColumn(
    defaultSchemaName,
    sourceTableName,
    mergedColumnName);

addOperation(removeMergedColumn, operations);
//M x N association
}else{
    var sourceAssociationTableName : String := getAssociationTableName(
        self.name,
        sourceClassName);
    var targetAssociationTableName : String := getAssociationTableName(
        self.name,
        targetClassName);

    var sourceColumnNames : OrderedSet(String) := OrderedSet{
        idSourceTableName,
        idTypeTableName};
    var destinationColumnNames : OrderedSet(String) := OrderedSet{
        idTargetTableName,
        idTypeTableName};

    if(self.isOrdered)then{
        sourceColumnNames += getDbOrderingColumnName();
        destinationColumnNames += getDbOrderingColumnName();
    }endif;
    var transferData : RDB::ops::ModelOperation := _insertRows(
        defaultSchemaName,
        sourceAssociationTableName,
        sourceColumnNames,
        targetAssociationTableName,
        destinationColumnNames);

    addOperation(transferData, operations);
    if(self.isOrdered)then{
        var ordName : String := getUXOrderingName(sourceAssociationTableName);
        var removeOrdConst : RDB::ops::ModelOperation :=
            _removeConstraint(
                defaultSchemaName,

```



```

sourceAssociationTableName,
ordName);

addOperation(removeOrdConst, operations);
var removeOrdCol : RDB::ops::ModelOperation :=
    _removeColumn(
        defaultSchemaName,
        sourceAssociationTableName,
        getDbOrderingColumnName());

addOperation(removeOrdCol, operations);
}endif;
if(self.isUnique)then{
    var uxName : String := getUXName(sourceClassName, self.name);
    var removeUxConst : RDB::ops::ModelOperation :=
        _removeConstraint(
            defaultSchemaName,
            sourceAssociationTableName,
            uxName);

    addOperation(removeUxConst, operations);
}endif;
var fkSourceName : String :=
    getFKAssociationTableRefName(
        sourceAssociationTableName,
        sourceTableName);
var removeFkSourceConst : RDB::ops::ModelOperation :=
    _removeConstraint(
        defaultSchemaName,
        sourceAssociationTableName,
        fkSourceName);

addOperation(removeFkSourceConst, operations);
var fkTypeName : String :=
    getFKAssociationTableRefName(
        sourceAssociationTableName,
        typeTableName);
var removeFkTypeConst : RDB::ops::ModelOperation :=
    _removeConstraint(
        defaultSchemaName,
        sourceAssociationTableName,
        fkTypeName);

addOperation(removeFkTypeConst, operations);
var removeIdSourceRefCol : RDB::ops::ModelOperation :=
    _removeColumn(
        defaultSchemaName,
        sourceAssociationTableName,
        idSourceTableName);

addOperation(removeIdSourceRefCol, operations);
var removeIdTypeRefCol : RDB::ops::ModelOperation :=

```

```
                                _removeColumn(  
                                defaultSchemaName,  
                                sourceAssociationTableName,  
                                idTypeTableName);  
    addOperation(removeIdTypeRefCol, operations);  
    var removeSourceAssociationTable : RDB::ops::ModelOperation :=  
                                _removeTable(  
                                defaultSchemaName,  
                                sourceAssociationTableName);  
    addOperation(removeSourceAssociationTable, operations);  
}endif;  
return operations;  
}
```

Kapitola 8

Závěr

Po několikaletém teoretickém a praktickém studiu změn v aplikačním modelu a jejich projevu v modelu aplikačním se nám podařilo definovat ucelenou množinu operací, pomocí nichž je možné měnit aplikační model a definovat jejich mapování na operace databázové úrovně.

Nejjednodušším a teoreticky nejzajímavějším tématem našeho projektu je aplikační model, kterému byly věnovány celkově 2 bakalářské a 2 diplomové práce BP - [Tar12] a [Luk11], DP [Tar14], a [Maz14].

Implementačně nejnáročnějším a zároveň nejvíce teoreticky vyčerpaným tématem se stala samotná transformace aplikačních operací na operace databázové, čehož jsem využil a k implementaci, otestování a dospecifikaci tohoto mapování jsem přidal téma čerstvé a velmi málo prozkoumané. Tímto atraktivním tématem vzhledem k verzování modelů je automatické rozpoznávání operací provedených nad aplikačním modelem.

Mrzí mně, že jsem se nemohl více věnovat tématu rozpoznávání operací nad aplikačním modelem, takže jsem se nedostal k tématům jako je sémantické rozpoznávání operací vycházející pravděpodobně z ideí sémantického webu a implementací Resource Description Framework (RDF) a Ontology Web Language (OWL). Implementace sémantického rozpoznávání by mohla v budoucnu odhadnout změny nejen na základě syntaxe (struktury) databáze, ale i na základě významu názvů jednotlivých entit v databázi. Předpokládám, že potom by bylo možné detekovat mnohem jednoznačněji přejmenování entit - pokud by pomocí nějaké ontologie či podobného nástroje bylo jasné specifikováno, že zvíře je nadtypem býložravce a tento je nadtypem entity zebra, potom pokud v původním modelu existuje třída Zebra, která má jako rodičovskou třídu nastavenou třídu Býložravec a v výsledném modelu existuje třída Zebra s nadtřídou Zvíře a neexistuje třída Býložravec, potom by algoritmus měl snadněji detekovat přejmenování třídy Býložravec na třídu Zvíře i přes velkou strukturální podobnost s jinou třídou.

Je otázkou, jak by sémantičtější rozpoznávání operací bylo prospěšné v kontextu stále větších informačních systémech, kdy je občas těžké nazvat smysluplně entity aplikačního modelu, natož sémantiku jejich relace vůči jiným entitám.

V průběhu psaní této diplomové práce jsem si uvědomil, proč pro nás bylo občas obtížné definovat správné mapování aplikačních operací na operace databázové. Čím blíže bylo zaměření daného participanta bližší aplikačnímu modelu, tím více si tento participant přibližoval databázový model aplikačnímu a vznikaly tak entity jako jsou HasNoInstance s názvem rodičovské tabulky bez jakékoliv relace rodičovství existující v databázovém modelu. Druhou

chybou, kterou jsme dělali při zaměření se na aplikační metamodel bylo modelování aplikačních operací, které měly přespříliš složité mapování na databázové operace či někdy až nesmyslný vliv na data v modelu - příkladem bylo modelování operace SetOpposite, která v aplikačním modelu spojí dvě existující property tříd a až při implementaci mapování na databázové operace bylo zjištěno, že tato operace pozbývá smyslu. Tato odlehlost členů Migdb od databázového modelu vytvořila nemalé koncepční problémy, jejichž řešení bylo nutné s nemalým úsilím vymyslet a implementovat ve velmi pozdní fázi projektu. Pokud bych psal Migdb znovu od začátku, zaměřil bych se více na kooperaci jednotlivých částí, aby bylo pro mně psaní transformace ORMo snazší. Tato transformace je esenciální pro chod projektu a proto je její správná implementace alfa omegou na úspěch projektu.

Samotná definice operací aplikovatelných na databázový model není pevná, což vzhledem k malému vzorku sbíraných požadavků vede k nejednoznačným ORMo mapováním. Proto v navazujících pracích by bylo dobré udělat operační výzkum a získat větší množství požadavků na tyto operace.

Věcí, kterou bych udělal znovu jinak při psaní Migdb od začátku by bylo využití jiného jazyka než je QVT. Tento mapovací jazyk se našim potřebám hodil málo, proto jsme časem přestali používat jeho základní koncept - mapování a nahradili ho Java-like programovacím stylem queries a helperů. Naráželi jsme na stále větší problémy a QVT nám nepřinášelo moc užitku, nýbrž některé nevýhody. Jedna z těchto nevýhod je například automatické ukládání jakýchkoliv pomocných entit do výstupních modelů, které bylo nutné vyřešit (za účelem správného otestování) speciální transformací kopírující jen ty části výstupního modelu, které byly opravdovým výstupem, nikoliv meziproduktem. Tato transformace vzhledem ke svojí povaze samozřejmě zpomaluje exekuci Migdb Workflow.

Poslední otázkou, na kterou jsem neměl moc času hledat odpověď je portabilita projektu Migdb funkčního nad relační databází PostgreSQL na jiné relační databáze. Předpokládám, že by nebylo složité změnit generátor kódu pro jiné relační databáze - algoritmus vygenerování SQL kódu je poměrně přímočarý a pro PostgreSQL nebyl dlouhý. Struktura jiných relačních databází není vždy stejná, ale většinově se shoduje, takže ani modifikace databázového metamodelu by neměla být obtížná. Moje minimální zkoumání tohoto tématu odhalilo, že námi používaná databáze PostgreSQL má maximální délku 64 znaků, databáze Oracle má maximální délku identifikátoru 30 znaků a databáze Microsoft SQL server má maximum stanovené na 128 znaků. Z tohoto vyplývá, že převod Migdb na databázi Microsoft SQL server by nebyl z tohoto pohledu problematický. 30 znaků pro Oracle nevypadá jako problematické - vývojáři mají málokdy třídy ukládané do databáze s jmény delšími než 30 znaků, problém nastává při zahrnutí service pro získávání názvů databázových entit k entitám z aplikačního modelu. Získání názvu cizího klíče, kolekce a asociační tabulky spojuje název atributu a tabulky s nějakým prefixem a odděluje tyto položky jména podtržítka.

Tudíž skutečné omezení délky názvu třídy může být základních 30 oslabeno o 3 (prefix FK či kolekce), oslabeno o 3 (podtržítka oddělující jednotlivé tři části jména - prefix a dvě tabulky) děleno 2 (dvě části). Aplikací těchto operací dostaneme horní hranici 12 znaků, která vypadá jako dostatečná, ačkoliv ne tolik komfortní. V této hranici jsme nicméně nezapočítaly Camel-podtržítkovou konverzi velkých písmen na malá předražená podtržítka. Předpokládejme, že každý identifikátor nebude mít víc jak 3 slova, tudíž musíme odečíst další 3 znaky. 9 nemusí být vždy dostatečná hranice vzhledem k velikosti nynějších systémů a nezapočítáváme do toho fakt, že třídy v aplikačním modelu mohou(a často jsou) prefixovány nějakým workspacem či balíčkem. Tudíž délka 9 nemusí být maximální horní hranice

jmen našich tříd a property. Je tedy zřejmé, že potom bude muset uživatel projektu Migdb nad databází Oracle používat krátké a naprosto neintuitivní názvy entit typu Vec102 či je nutné vymyslet jiný způsob překládání jmen do databázového modelu, který bude automatizovaný, jednoznačný, nezávislý na ostatních entitách v modelu a nejlépe pro člověka snadno získatelný bez pomoci nějakého překladače.

Není možné generovat zkrátit názvy entit - vedlo by to u kolizních názvů pomocí indexace, protože bez dalších pravidel jako například očiv případě potřeby odstranit Constraint není možné zjistit, ke které entitě

Kapitola 9

Seznam použitých zkratek

IDE Integrated Development Environment

ORM Object-relational mapping

EMF Eclipse modeling framework

SŘBD Systém řízení báze dat

IO Integritní omezení

LCS Longest common Subsequence

OMG Object Management Group

ORMo Object-relation mapping of operations

QVT Query view transformational

QVTo QVT operational

DDL Data definition Language

SŘBD Systém řízení báze dat

OCL Object Constraint Language

Kapitola 10

UML diagramy

Tato příloha není povinná a zřejmě se neobjeví v každé práci. Máte-li ale větší množství podobných diagramů popisujících systém, není nutné všechny umísťovat do hlavního textu, zvláště pokud by to snižovalo jeho čitelnost.

Kapitola 11

Instalační a uživatelská příručka

Tato příloha velmi žádoucí zejména u softwarových implementačních prací.

Kapitola 12

Obsah příloženého CD

Tato příloha je povinná pro každou práci. Každá práce musí totiž obsahovat příložené CD. Viz dále.

Může vypadat například takto. Váš seznam samozřejmě bude odpovídat typu vaší práce.



Obrázek 12.1: Seznam příloženého CD — příklad

Na GNU/Linuxu si strukturu příloženého CD můžete snadno vyrobit příkazem:
`$ tree . >tree.txt`

Ve vzniklém souboru pak stačí pouze doplnit komentáře.

Z **README.TXT** (případně **index.html** apod.) musí být rovněž zřejmé, jak programy instalovat, spouštět a jaké požadavky mají tyto programy na hardware.

Adresář **text** musí obsahovat soubor s vlastním textem práce v PDF nebo PS formátu, který bude později použit pro prezentaci diplomové práce na WWW.

Literatura

- [Ben02] E. Bengoetxea. *Inexact Graph Matching Using Estimation of Distribution Algorithms*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, Dec 2002.
- [Cic08] Antonio Cicchetti. *Difference Representation and Conflict Management in Model-Driven Engineering*. PhD thesis, Università di L'Aquila, 2008.
- [DSK14] D. Di Ruscio R. F. Paige D. S. Kolovos, Alfonso Pierantonio. Different models for model matching: An analysis of approaches to support model differencing. [online], Citováno 16.11.2014.
- [Fou14a] The Eclipse Foundation. Eclipse. [online], Citováno 16.11.2014.
- [Fou14b] The Eclipse Foundation. Xtend - modernized java. [online], Citováno 16.11.2014.
- [FW14] Sabrina Fortsch and Bernhard Westfechtel. Differencing and merging of software diagrams. [online], Citováno 16.11.2014.
- [HET14] Ulrike Prange Hartmut Ehrig and Gabriele Taentzer. Fundamental theory for typed attributed graph transformation. [online], Citováno 7.12.2014.
- [Jez12] Jiří Jezek. Modelem řízená evoluce objektů, 2012.
- [Luk11] Martin Lukeš. Transformace objektových modelů, 2011.
- [Luk13] David Luksch. Katalog refaktoringu frameworku migdb, 2013.
- [Maz14] Martin Mazanec. Doménově specifický jazyk pro migdb, 2014.
- [OCL14] OCL. Object constraint language. [online], Odkazováno 16.11.2014.
- [OMG14a] OMG. Meta object facility (mof) 2.0 query/view/transformation final adopted specification. [online], Citováno 16.11.2014.
- [OMG14b] OMG. Xmi. [online], Citováno 16.11.2014.
- [OMG14c] OMG. Model driven architecture. [online], Odkazováno 16.11.2014.
- [OMG14d] OMG. Omg. [online], Odkazováno 16.11.2014.

- [PMH12] Jiří Jezek Pavel Moravec, Petr Tarant and David Harmanec. A practical approach to dealing with evolving models and persisted data. [online], [konference], publikováno 15.4.2012.
- [Tar12] Petr Tarant. Modelem řízená evoluce databáze, 2012.
- [Tar14] Petr Tarant. Migdb - formální specifikace, 2014.
- [Val14a] Michal Valenta. Relační algebra. [online], Citováno 16.11.2014.
- [Val14b] Michal Valenta. Integritní omezení. [online], Citováno 22.11.2014.
- [wc14a] wiki community. Diff definice. [online], Citováno 16.11.2014.
- [wc14b] wiki community. Longest common subsequence problem. [online], Citováno 16.11.2014.
- [wc14c] wiki community. Orm definice. [online], Citováno 16.11.2014.
- [wc14d] wiki community. Patch. [online], Citováno 16.11.2014.