

Sem vložte zadání Vaší práce.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
KATEDRA SOFTWAREVÉHO INŽENÝRSTVÍ



Diplomová práce

Adaptibilní systém pro doporučování obsahu

Bc. Jan Bouchner

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Kuchař

7. května 2014

Poděkování

Chci upřímně poděkovat všem, kteří mi věnovali čas, když jsem potřeboval pomoc při psaní této diplomové práce. Především vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Kuchaři za správné směrování, celkový vhled do technologií a cenné rady. Děkuji také své rodině a všem přátelům za bezvýhradnou podporu během celých mých studií.

Prohlášení

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

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 7. května 2014

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2014 Jan Bouchner. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Bouchner, Jan. *Adaptibilní systém pro doporučování obsahu*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2014.

Abstract

Sem doplňte ekvivalent abstraktu Vaší práce v angličtině.

Keywords Nahradte seznamem klíčových slov v angličtině oddělených čárkou.

Abstrakt

V několika větách shrňte obsah a přínos této práce v češtině. Po přečtení abstraktu by se čtenář měl mít čtenář dost informací pro rozhodnutí, zda chce Vaši práci číst.

Klíčová slova Nahradte seznamem klíčových slov v češtině oddělených čárkou.

Obsah

Úvod	1
Motivace	2
Cíle práce	2
Struktura práce	3
1 Teoretická část	5
1.1 Doporučování obsahu	5
1.2 Teorie adaptibilního systému	14
2 Praktická část	29
2.1 Analýza a návrh řešení	29
2.2 Principy a technologie	42
2.3 Realizace doporučovací platformy	49
3 Experimentální část	71
3.1 Testování různých způsobů chování	71
3.2 Experimenty	71
4 Zhodnocení aplikace a budoucí práce	73
Závěr	75
Literatura	77
A Dokumentace RESTful API	81
B Seznam použitých zkratk	83
C Obsah příloženého CD	85

Seznam obrázků

1.1	Abstraktní pohled na systém společnosti plista	11
1.2	Abstraktní model open source systému easyrec	12
1.3	Vizualizace sekvenčního učení řešení od jedné do tisíce her.	23
1.4	Hustota pravděpodobnosti <i>Beta</i> rozdělení pro vizualizaci 4 úspěchů ze 4 pokusů.	25
1.5	Hustota pravděpodobnosti <i>Beta</i> rozdělení pro vizualizaci 1 úspěchu ze 4 pokusů.	26
2.1	Abstraktní návrh architektury a komponent adaptibilního systému	32
2.2	Příklad MQ systému s producentem zpráv a konzumenty	33
2.3	Zjednodušený návrh tříd pro RESTful API endpoint pro komunikaci s Recommeng systémem.	37
2.4	Zjednodušený návrh tříd pro RESTful API endpointy pro komunikaci s jádrem Solr a s doporučovacími algoritmy.	38
2.5	Ukázka některých REST endpointů navrhovaného adaptibilního systému	39
2.6	Zjednodušený návrh tříd v adaptibilním systému a ukázka API. . .	40
2.7	Vícevláknový asynchronní server s využitím ROUTER a DEALER.	53

Seznam tabulek

1.1	Shrnutí poznatků o jednotlivých systémech vyplývající z provedené analýzy.	13
-----	--	----

Úvod

We are leaving the age of information and entering the age of recommendation.

—CHRIS ANDERSON, 2004 [15]

Když se člověk před nástupem digitálního věku snažil mezi množstvím nabízených informací nalézt takové, které by pro něj byly nějakým způsobem užitečné, musel se často spíše než na vlastní úsudek spolehnout na doporučení svých známých a přátel nebo na obecnou oblibu. Tu ale více než cokoli jiného určoval aktuální společenský trend. Tato situace úzce souvisela s nedostatečným množstvím dat.

S rozvojem internetu začalo narůstat i množství dostupných informací¹. Nová data jsou produkována takřka každou sekundu, což vede k opačnému extrému - k jejich setřídění nám nyní nevybývá čas. Ceněným uměním je tak schopnost vytěžit maximum užitečných informací a ty posléze využít k nabytí nových znalostí.

K těmto účelům přispěl velkou měrou rozvoj disciplíny zvané jako informační filtrování, čímž je myšlenka selekce a redukce informací. Odtud už je jen krok k personalizovanému doporučování obsahu, které se v posledních několika letech rozmáhá se zaváděním *doporučovacích systémů*.

Hned na začátku práce jsem dovolit citovat bývalého šéfredaktora časopisu Wired Chrise Andersona (článek *The Long Tail* [15], který shrnul nastalou situaci týkající se vývoje informací do jedné stručné věty. Je důležité vzít v potaz, že Anderson toto prohlášení učinil v roce 2004.

Vývoj v oblasti informačních technologií je neúprosný a každý další rok je ve znamení výrazných pokroků ve vývoji všech oborů, těch zaměřených na doporučování nevyjímaje. Od vstupu do *doporučovací éry* uplynulo deset let a situace je nyní taková, že s pouhou znalostí ověřených doporučovacích algoritmů lze sice ještě stále dosáhnout měřitelných úspěchů, například nasazením

¹Organizace IDC došla v článku *Extracting Value from Chaos* k závěru, že objem světových dat se každé dva roky zdvojnásobuje. [27]

na malý e-shop zabývající se prodejem zboží, pro globálnější potřeby je to však již poněkud málo.

Tajemstvím úspěšných systémů, jakými disponují například společnosti Google či Amazon, je aplikovaný výzkum a vývoj opírající se nejčastěji o teorii pravděpodobnosti a statistiky, strojové učení a další oblasti umělé inteligence.

Budoucnost je tedy v systémech, které dokáží sestavovat svá doporučení na základě pokročilejší analýzy, a které jsou schopny přizpůsobit doporučení svým uživatelům na míru.

Jedním takovým přístupem je kombinování více doporučovacích metod dohromady a sestavování výsledků na základě zaznamenávaného vývoje.

Motivace

Představme si nyní podobný systém jako rádce, který je schopen v každém okamžiku rozhodnout, co je pro uživatele žádající ho o radu nejvhodnější. Rádce těmto uživatelům sděluje informace o typu doporučení (doporučovacím algoritmu), jehož použití by v *danou chvíli* mohlo vést k maximalizaci užítku z doporučeného obsahu.

Za *danou chvíli* je považována kombinace několika vstupních proměnných, například denní doba, zařízení, ze kterého je žádáno o obsah, den v týdnu či geografická lokace uživatele.

Pokud bude uživatel dbát rádcových rad, s největší pravděpodobností obdrží doporučení, se kterým bude spokojen, a svou spokojenost vyjádří například tím, že u jedné z doporučených položek zažádá o bližší detaily nebo ji nějakým dalším způsobem ohodnotí.

Jinými slovy, uživatel zašle rádcovi zpětnou vazbu týkající se toho, jak kvalitní bylo dané doporučení.

Rádce sám neprovádí žádné operace, dokud k nim není explicitně vyzván. V paměti si uchovává pouze vnitřní stav, na základě kterého rozhoduje o doporučeních. Díky průběžné analýze a přepočítávání zpětné vazby je schopen pružně reagovat na situace, kdy dojde k náhlé a hromadnější změně preferencí nebo vyvstanou jiné události, jež by měly za následek dlouhodobější doporučování nevhodného obsahu.

Cíle práce

Nejdůležitějším cílem této práce je návrh a implementace rádce, neboli adaptibilního systému, který by byl schopen automaticky a vhodně kombinovat metody pro doporučování obsahu, rozdávat rady a přizpůsobovat se podmínkám. Součástí práce je také výběr a implementace vhodné sady algoritmů, které budou použity pro kombinování.

Vzniklý systém bude schopen zpracovávat zpětnou vazbu od uživatelů týkající se kvality jimi zvoleného doporučení. Zpětná vazba by měla fungovat

na principu odměny za dobré doporučení či trestu za špatné, což povede k ovlivňování preferencí při kombinování v čase.

Nezbytnou součástí diplomové práce je osvojení základních pojmů a pravidel z oblasti strojového učení, teorie pravděpodobnosti a statistiky. Těchto znalostí je využíváno zejména v části práce týkající se predikce vhodného algoritmu a dopadu zpětné vazby na vývoj systému.

Vzhledem k povaze projektu je nutné navrhnout obecné rozhraní jak pro manipulaci s doporučovacími algoritmy, tak pro adaptibilní systém a jeho součásti.

Funkčnost vyvinutého řešení bude na závěr ověřena implementací modelové úlohy simulující interakci více uživatelů s adaptibilním systémem.

K dosažení těchto cílů bude zapotřebí navrhnout a vyvinout následující části:

- **Adaptibilní systém pro doporučování obsahu.**
- **Sada základních algoritmů určených k doporučování.**
- **RESTful API pro manipulaci s doporučovacími algoritmy a systémem.**
- **Klientská aplikace pro simulaci modelové úlohy.**

Struktura práce

Tato práce je strukturována do 3 různých kapitol. Kapitoly jsou řazeny v pořadí, v jakém probíhaly jednotlivé fáze vývoje.

Kapitola Teoretická část Popisuje trendy používané současnými doporučovacími systémy a zkoumá algoritmické a matematické postupy, které by mohly být použity při návrhu strategie adaptibilního systému.

Kapitola Praktická část Shromažďuje veškeré požadavky kladené na systém, dále se zabývá návrhem architektury, detailními návrhy serverové i klientské části, rozhraním zastřešujícím komunikaci těchto částí a výběrem základní sady algoritmů, které budou využity k doporučování obsahu. Popisuje též postupy užití při vývoji aplikace na základě provedené analýzy a návrhu.

Kapitola Experimentální část Shrnuje poznatky nabyté z prováděných experimentů se systémem a stanovuje pravidla pro nejlepší použití.

Kapitola Zhodnocení aplikace a budoucí práce Hodnotí vzniklou aplikaci a zamýšlí se nad dalšími kroky ve vývoji aplikace.

Teoretická část

1.1 Doporučování obsahu

Všechna doporučení sdílejí stejnou myšlenku – zaujmout či upozornit na něco (či někoho) konkrétního, co by pro nás jako uživatele mohlo být nějakým způsobem zajímavé. Spousta elektronických obchodů, renomovaných aukčních domů, ale též serverů se zábavou na doporučování doslova staví své podnikání.

1.1.1 Analýza vybraných systémů

Na internetu lze narazit na desítky, ba i stovky systémů zapojených do reálného provozu. Záměrně jsem se snažil vybrat pouze zlomek, jenž by ale zároveň pokrýval většinu typů doporučovaného obsahu (produkty, články, zábava apod.).

U těchto systémů jsem se snažil identifikovat, jaké postupy jsou prováděny na pozadí jejich doporučování, jaké k tomu využívají metody a vzhledem k povaze řešeného problému jsem zkoumal též znaky týkající se kombinování metod, kterými bych se mohl nechat inspirovat při návrhu svého systému.

1.1.1.1 Amazon.com

Amazon.com, Inc.² je jedním z největších a nejstarších internetových prodejců. Společnost začínala jako online knihkupectví, postupem let však zařadila do své prodejní nabídky též hudební a filmové nosiče, software, elektroniku, nábytek a spoustu dalšího zboží včetně vlastní spotřební elektroniky v podobě čtečky elektronických knih a tabletů Kindle či poskytování služeb z oblasti cloud computingu.

Firmu lze řadit mezi průkopníky doporučování na internetu. Jako jeden z prvních internetových prodejců začala svým zákazníkům doporučovat výrobky na základě nákupů jiných uživatelů.

²<http://www.amazon.com>

Doporučovací systém společnosti je založen na více zdrojích informací:

- Porovnávání uživatelem prohlížených položek a položek umístěných uvnitř nákupního košíku s položkami, které se společně s těmito prohlíženými položkami v minulosti často prodávaly³.
- Uchovávání informací ohledně hodnocení položek uživateli.
- Zaznamenávání nákupní historie.
- Sledování spousty dalších postupů, jako například vyhodnocování demografických informací (dle doručovací adresy), zaznamenávání pohybu po stránce (jaké všechny položky si uživatel prohlédl, než vložil jednu konkrétní do nákupního košíku) nebo sledování prokliků⁴ z marketingových e-mailů s odkazy na zboží [3] a jejich vzájemná kombinace.

Kromě výše uvedeného využívá společnost strategii *item-to-item kolaborativní filtrování*.

Díky vzájemné kombinaci všech těchto pravidel a metod nalezne fanoušek moderních technologií při návštěvě stránek především odkazy na technologické novinky všeho druhu, zatímco mladá matka bude mít v nabídce té samé stránky ve větší míře zastoupeno dětské zboží.

Výše jsou samozřejmě popsány pouze základní principy. Doporučovací systém společnosti jako takový je velmi komplexní a detaily algoritmu jsou drženy jako obchodní tajemství. K nahlédnutí jsou ale patenty, např. *Personalized recommendations of items represented within a database* [25] nebo *Collaborative recommendations using item-to-item similarity mappings* [28].

1.1.1.2 Netflix

Netflix, Inc.⁵ je společnost, poskytující v začátcích své služby jako internetová videopůjčovna, jež se v průběhu posledních několika let rozrostla v obrovskou mediální společnost. Strategicky významným byl pro ni rok 2007. Tehdy byla nabídka jejích služeb rozšířena o filmy přenášené přes stream⁶ [7]. Nyní společnost nabízí obsah v podobě filmů a seriálů pro většinu v dnešní době používaných platforem jako PC, Mac, PlayStation3, Wii, Xbox a také pro mobilní telefony a tablety.

Vzhledem k tomu, že firma staví své podnikání na tom, že její zákazníci ji platí za konzumaci zábavy, je v jejím vlastním zájmu, aby těmto uživatelům sledujícím filmy a seriály nabízela automaticky další obsahově či žánrově

³affinity analysis – nacházení spojení mezi odlišnými položkami. Základním příkladem budiž vztah mezi šamponem a kondicionérem. Kupující je většinou používá v ten samý čas [12]. Při nákupu jednoho by mohl mít tedy zájem i o druhý.

⁴Jako proklik se označuje takové kliknutí na odkaz, které uživatele dovede na cílovou stránku [9].

⁵<https://www.netflix.com>

⁶Snímek se fyzicky nenachází na koncovém zařízení, ale přehrává se přímo ze serveru poskytovatele .

podobné, zkrátka takové, jenž budou co možná nejvíce lahodit jejich vkusu (dle [6] pochází $\frac{2}{3}$ zapůjčených filmů na Netflix z předchozího doporučení). Úspěšné podnikání společnosti je tak přímo závislé na tom, jak kvalitním doporučovacím systémem společnost disponuje.

Netflix Prize Za tímto účelem vyvinula společnost vlastní systém *Cinematch* napomáhající svým zákazníkům objevit pro ně zajímavé filmy. Postupný vývoj na poli doporučovacích systémů však přivedl společnost na otázku, zda není možné vyvinout systém, jenž by dokázal Cinematch v oblasti předpovídání filmového vkusu porazit. Společnost tak vypsala začátkem října 2006 soutěž známou jako *Netflix Prize*. Týmu, kterému by se podařilo zlepšit dosavadní výsledky systému Cinematch alespoň o 10 procent, by byla přirknuta odměna ve výši 1 milion amerických dolarů.

Do soutěže byla uvolněna sada testovacích dat obsahující:

- ID uživatele
- ID filmu
- hodnocení na intervalu $\langle 1, 5 \rangle$
- datum uskutečnění hodnocení

Data obsahovala 100 480 507 takových hodnocení pro 17 770 filmů od 480 189 uživatelů. Uvolněna byla ještě další sada testovacích dat obsahující stejné informace, jen s vynecháním uživatelských hodnocení. Cílem pak bylo predikovat tato chybějící hodnocení opět na intervalu $\langle 1, 5 \rangle$ [31].

Celková výhra byla udělena až v roce 2009 (do té doby sice docházelo k průběžnému zlepšování výsledků, nikdy však nebylo dosaženo požadovaného zlepšení 10 procent) týmu *BellKor's Pragmatic Chaos*, vzniklého spojením tří do té doby samostatně soutěžících týmů.

Vítězný tým dosáhl cíle pomocí *pokročilých technik strojového učení*. Zjistil přitom především to, že hodnocení každého filmu je silně subjektivní záležitostí, kterou je velmi obtížné programově předpovědět. Ukázalo se také, že ve větší míře záleží na tom, zda uživatel hodnotí právě dosledovaný film nebo film, který zhlédl již před delší dobou. Velkou roli hraje i nálada uživatele v průběhu dne, zda film sleduje například o víkendu, kdy má volno a tak podobně [1].

Výsledný algoritmus, jenž získal cenu, vznikl kombinováním zhruba stovky menších algoritmů. S trochou nadsázky lze tedy prohlásit, že jednou z hlavních taktik pro kvalitní doporučení je *použití tolika algoritmů, kolik je jen možné*.

1.1.1.3 Mendeley

Mendeley⁷ je systém určený k doporučování vědeckých článků využívající jako svou výpočetní vrstvu technologii Apache Mahout⁸. Cílem systému je spojovat dohromady výzkumníky a jejich data. Svým uživatelům napomáhá v organizaci výzkumu, umožňuje jim navázat potenciální spolupráci s dalšími uživateli aplikace a napomáhá též k objevení nových podnětů pro vlastní práci. Uživatelé této aplikace jsou přední světové university jako University of Cambridge, Stanford University, MIT či University of Michigan. Data pro aplikaci pocházejí z vlastních importů uživateli i z externích importů skrze různé katalogy vědeckých prací.

Projekt samotný se v jedné ze svých prezentací [5] přirovnává k největší hudební databázi na internetu – last.fm⁹. Ta funguje na principu, že potenciální uživatel provede na svém počítači instalaci desktopové aplikace, následně s již instalovanou aplikací začne poslouchat hudbu a tím je zahájeno automatické odesílání informace o skladbě (interpret, žánr) na server last.fm. Podle dat odeslaných na server jsou uživatelé v budoucnu doporučováni další skladby.

Mendeley tuto analogii vysvětluje tak, že hudební knihovny jsou v jeho případě výzkumné knihovny, role interpretů zastávají jednotliví výzkumníci, hudební skladby jsou pak jimi publikované články a jednotlivé hudební žánry reprezentují vědecké disciplíny.

Doporučení jsou dle dostupných informací [5] generována dvojím způsobem.

Kolaborativní filtrování Používá se pro personalizované doporučení. Podporována je jak user-based, tak item-based varianta.

Filtrování založené na obsahu Používá se k nalezení souvisejících výzkumů, například pro nalezení článku ze stejné výzkumné kategorie nebo článku majícího podobný název.

Uživatelé vyjadřují svůj zájem či nezájem o každou z doporučených položek zpětnou vazbou, která je dvojího typu:

Accept vyjadřuje, že uživatel s daným doporučením souhlasí nebo pro něj bylo nějakým způsobem užitečné.

Remove vyjadřuje nevhodné doporučení. Uživatel touto volbou dává najevo, že podobné doporučení by příště již raději nedostal.

⁷<http://www.mendeley.com>

⁸<https://mahout.apache.org>

⁹<http://www.last.fm>

1.1.1.4 Google News

Vlastní platformu pro doporučování obsahu vytvořila v rámci svého vývoje též společnost **Google, Inc.** ¹⁰. Její výzkumníci se v práci [29] zabývali vývojem prediktivního systému pro personalizované doporučování zpráv na webu Google News ¹¹.

Přihlášeným uživatelům, majícím v prohlížeči explicitně povolen záznam historie prohlížení, jsou generována doporučení založená na zájmu těchto uživatelů, která vycházejí z různých profilů sestavených pozorováním chování uživatelů na stránce.

K porozumění, jak se mění zájem uživatelů o zprávy v čase, napomohla výzkumníkům analýza logů (záznamy chování anonymních uživatelů na stránce). Na základě této analýzy byl vyvinut Bayesovský framework pro předvídání zájmu uživatelů o zveřejňované novinky.

Kombinace mechanismu pro filtraci informací vzešlého z nashromážděných uživatelských profilů a již existujícího mechanismu využívajícího principů kolaborativního filtrování vedla ke vzniku systému generujícího personalisované zprávy. Vzniklá kombinace byla nasazena do reálného provozu a následné experimenty prokázaly, že kombinováním metod došlo ke zlepšení kvality doporučování.

1.1.1.5 Výzkum

Také současný výzkum v oblasti doporučovacích systémů, zdá se, nezahálí. Zde uvádím příklad dvou populárních akcí, jejichž náplní či součástí je problematika doporučování a doporučovacích systémů.

- **ACM RecSys conference.** ¹² Konference je předním mezinárodním fórem pro prezentaci nových výsledků výzkumu a postupů na poli doporučovacích systémů. RecSys sdružuje hlavní mezinárodní výzkumné skupiny a též mnoho předních světových společností na trhu e-commerce. Nabízí také doprovodný program v podobě zvaných přednášek, konzultace týkající se problematiky RecSys a sympózium studentů doktorských programů.

Zajímavé prezentace jsou volně dostupné na internetu, dá se tedy načerpat spousta inspirace do vlastního výzkumu. Mě osobně velmi zaujala prezentace ¹³ z posledního ročníku konference (Hong Kong, 2013), se kterou vystoupil Torben Brodt, jeden z klíčových řečníků. V prezentaci popisuje tzv. *Open Recommendation Platform* 1.1.1.6.

¹⁰<http://www.google.com/about/company>

¹¹<http://news.google.com>

¹²<http://recsys.acm.org>

¹³<http://www.slideshare.net/d0nut/open-recommendation-platform>

- **ICWSM: Weblog and Social Media.** ¹⁴ The International AAAI Conference on Weblogs and Social Media je mezinárodní konference, na které se střetávají výzkumní pracovníci z oblasti počítačových a společenských věd. Konference je pořádána za účelem sdílení znalostí, diskutování o nápadech a výměny informací. Probíranými body jsou psychologické a sociální teorie, výpočetní algoritmy pro analýzu sociálních médií a jedním z mnoha témat jsou též doporučovací systémy.

O tématu se též píše spousta článků a každým rokem vzniká několik disertačních prací. Dle dostupných informací z ACM RecSys Wiki ¹⁵ jich jen za poslední 4 roky bylo přes 50.

1.1.1.6 Open Recommendation Platform

Open recommendation Platform (zkr. ORP) je projekt společnosti **plista**¹⁶ prezentovaný na posledním ročníku konference ACM RecSys 2013 v Hong Kongu.

Motivací ORP bylo dosáhnout lepších výsledků kombinací více metod doporučování obsahu společně se zapojením kontextu uživatele (informacemi čerpanými převážně z HTTP hlaviček). Informacemi, které využívají, jsou například:

- IP adresa, která může prozradit geologickou lokaci uživatele,
- denní doba, kdy uživatel přistupuje ke stránce,
- user agent prohlížeče informující o zařízení, ze kterého bylo k obsahu přistoupeno (mobilní telefon, PC),
- referer pro zjištění způsobu přístupu (přístup z vyhledávání nebo přímý přístup).

Řešení spočívá v utvoření databáze kontextových atributů (jeden atribut pro každou hodinu dne, pro každou kategorii, stát atd.), kdy je u každého atributu udržován seřazený seznam doporučovacích metod dle jejich úspěchu dosahovaném pro daný atribut. Tyto atributy lze kombinovat a dosáhnout tak nejlepšího doporučení v daném kontextu.

Abstraktní pohled na ORP znázorňuje obrázek 1.1, na kterém je systém zachycen jako *Ensemble*. Ensemble je schopen pro příchozího uživatele (kombinace kontextových atributů) vybírat z kolekce doporučovacích algoritmů ten nejvhodnější, jenž pak použije k publikování obsahu pro tohoto uživatele (uživatelé jsou značeni jako *Visitors*). Po obdržení doporučení zasílá uživatel

¹⁴<http://www.icwsml.org/2014>

¹⁵http://www.recsyswiki.com/wiki/List_of_recommender_system_dissertations

¹⁶<https://www.plista.com>



Obrázek 1.1: Abstraktní pohled na systém společnosti plista. Zdroj: [18]

systému zpětnou vazbu, díky které dochází k rekalkulaci preferencí (a přepočítání úspěšnosti metod v jednotlivých použitých attributech), což ovlivní výběr nejlepšího algoritmu pro další doporučení.

V prezentaci bylo zmíněno několik užitečných rad ohledně toho, co všechno by měl systém podobného typu umět. Zmíněna je potřeba rychlého síťového protokolu a rychlé fronty zpráv. Padla zde též potřeba rychlého úložiště pro data.

K dosažení správné funkcionality pro výběr nejlepšího algoritmu společnost používá tzv. *multi-armed bayesian bandit* 1.2.1.15 v bayesovské variantě, což je i jedna ze strategií, kterou mi na úvodní schůzce doporučil vedoucí této práce.

1.1.1.7 easyrec

Technická knihovna společnosti IBM obsahuje přehledný seznam [10] několika doporučovací systémů, z nichž převážná část vznikla jakou součástí univerzitního výzkumu.

Z tohoto seznamu se mi jako velmi zajímavý jeví systém **easyrec**¹⁷. Jedná se o open source webovou aplikaci napsanou v programovacím jazyce Java nabízející personalizovaná doporučení prostřednictvím RESTful webových služeb. Díky vystavenému REST API¹⁸ je vývojáři umožněno napojit svou aplikaci psanou v libovolném jazyce na systém a využívat jejích funkcionalit. Lze tak zasílat uživatelské akce typu prohlížení, provedení nákupu či hodnocení

¹⁷<http://easyrec.org/recommendation-engine>

¹⁸REST API systému easyrec: <http://easyrec.org/implementation>



Obrázek 1.2: Abstraktní model open source systému easyrec. Zdroj: [2]

položky a žádat o doporučení. Tyto uživatelské akce jsou ukládány do databáze easyrec.

K doporučování lze přistupovat prostřednictvím specifických endpointů, například *zboží související s danou položkou*, dále *ostatní uživatelé prohlíželi též tyto položky* nebo lze dostávat *specifická doporučení pro daného uživatele* [10].

Systém provádí na pozadí analytické operace, obsahuje též databázi asocičních pravidel a podporu online i offline doporučování. Uživatelským aplikacím připojujícím se k systému generuje v odpovědích žádaná doporučení (viz obrázek 1.2).

1.1.2 Shrnutí poznatků z analýzy

Z výše uvedených příkladů v sekci 1.1.1 lze vypožorovat určité vlastnosti (shrnutí v tabulce 1.1) a zformulovat několik závěrů:

- O uživateli je vedena spousta záznamů, především historie jeho chování na stránkách.
- Velký důraz je kladen na zpětnou vazbu (vyjádření zájmu uživatele o doporučený obsah), ať už formou přečtení článku, ohodnocení položky apod.
- Stále je využíváno osvědčených metod kolaborativního filtrování a filtrování na základě obsahu.
- Síla není v použití jednoho konkrétního algoritmu, ale v kombinaci více metod a přístupů dohromady.

Systém	Vlastnosti
Amazon.com	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kolaborativní filtrování uživající podobnostní mapování item-to-item [28]. 2. Personalizovaná doporučení získávaná z databáze informací o uživatelích [25]. Informace jsou mezi sebou kombinovány za účelem vytvoření nejlepšího doporučení.
Netflix	<ol style="list-style-type: none"> 1. Predikce uživatelských hodnocení založená na technikách strojového učení 1.2.2. 2. Pro doporučování je využíváno více jednotlivých algoritmů a jejich kombinování. Velmi záleží na tom, zda uživatel hodnotí film ráno, večer, o víkendu, kdy má volno a podobně.
Mendeley	<ol style="list-style-type: none"> 1. Doporučení založená na kolaborativním filtrování ve variantách user-based i item-based. 2. Doporučení založená na podobnosti obsahu (podobnost článků, nadpisů, klíčových slov apod.) 3. Důraz na pozitivní a negativní zpětnou vazbu. 4. Výpočetní vrstva pro doporučování postavená nad Apache Mahout 2.2.4.1.
Google News	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kombinování informací získaných z předchozího chování na stránce s technikami kolaborativního filtrování.
ORP	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kombinování více doporučovacích metod společně s kontextem uživatele. 2. Přítomnost mezivrstvy v podobě rádce starajícího se o obsluhu uživatelů a jejich doporučení. 3. Silný důraz na zpětnou vazbu a následné přepočítávání budoucích šancí doporučení. 4. Ke kombinaci je využíváno strategie Multi-armed bandit 1.2.3 v bayesovské variantě 1.2.4.
easyrec	<ol style="list-style-type: none"> 1. Veškeré uživatelské akce (provedení akce, zpětná vazba, žádost o doporučení konkrétním algoritmem) s doporučovacím systémem probíhají skrze komunikaci s RESTful API.

Tabulka 1.1: Shrnutí poznatků o jednotlivých systémech vyplývajících z provedené analýzy.

- Většina systémových výpočtů běží na pozadí v tom samém čase, co uživatel tráví prohlížením stránky. Systém je schopna rychle se přizpůsobit okolnostem.
- Problematika kombinování metod má silnou závislost na strojovém učení a teorii pravděpodobnosti a statistiky (především bayesovské).
- Realizace RESTful API je poměrně vhodný způsob komunikace s doporučovacím systémem ověřeným v praxi.

Existujících řešení je tedy celá řada. Každé z těchto řešení je přitom využíváno k vlastnímu účelu a není snadno přenositelné.

Potvrdila se domněnka, že dobře, kdy obchodníkům stačilo na svůj elektronický obchod nasadit jednoduchý algoritmus kolaborativního filtrování, odzvonilo a budoucnost patří systémům schopným predikce a přizpůsobení svého vývoje, a to vše v reálném čase.

1.2 Teorie adaptibilního systému

1.2.1 Minimální teoretický základ

Ještě předtím, než se pustím do popisu navrhované strategie, zopakuji zde některé pojmy týkající se strojového učení, teorie pravděpodobnosti a statistiky. Jedná se o minimální základ potřebný k pochopení postupů popisovaných dále v této sekci.

1.2.1.1 Strojové učení

Strojové učení je vědecká disciplína (jedna z větví oboru umělé inteligence), jež se zabývá tím, jak se má počítač přizpůsobit určité situaci, aniž by byl pro danou situaci explicitně naprogramován. Detailněji v sekci 1.2.2.

1.2.1.2 Agent

Agent je speciální autonomní program, který jedná samostatně a nezávisle bez vedení uživatele. Jeho úkolem je komunikovat s okolím a interagovat v závislosti na okolních podnětech. Dalšími důležitými vlastnostmi jsou schopnost příhodně reagovat na danou situaci a též proaktivně vykonávat činnost a dosahovat cíle prostřednictvím vlastní iniciativy. Jedná se o definici obecnou, ale pro naše potřeby zcela dostačující.

Problematika agentů a agentních systémů je jinak samostatný obor spadající do oblasti umělé inteligence a jeho zkoumání by vydalo na další závěrečnou práci.

1.2.1.3 Zpětná vazba

Zpětnou vazbou je označován proces, ve kterém na základě obdržených informací (například při komunikaci s nějakým systémem) a reakcí na ně ovlivňujeme jejich budoucí podobu – část systémového výstupu lze tedy použít jako vstup pro další činnost systému.

Rozlišujeme dva typy reakcí, a to kladnou zpětnou vazbu a zápornou zpětnou vazbu. Téma má blízko k psychologickému zkoumání toho, jakým způsobem dokáže ovlivnit zapojení odměny a trestu lidské chování.

1.2.1.4 Explorace vs. exploatace

Explorace Nacházení nových oblastí hledání, kdy agent nevyužívá předchozích znalostí (agent stále zkouší nové akce, jejichž výsledek nezná).

Exploatace Využívání stávajících znalostí. Hrozí uvážnutí v lokálních extrémech. (agent provádí akce, o kterých ví, že mu přinášejí užitek).

Optimální strategie nemůže být ani čistě explorační, ani čistě exploatační. Hledá se vyvážený kompromis.

1.2.1.5 Základy teorie pravděpodobnosti

Nejprve uvedu několik pojmů z teorie pravděpodobnosti, se kterými budu v následujícím textu pracovat.

Pravděpodobnostní prostor Pravděpodobnostní prostor prováděného náhodného pokusu je tvořen trojicí (Ω, \mathcal{F}, P) , kde:

- Ω je prostor elementárních jevů (např. čísla od jedné do šesti na šestistranné hrací kostce), kde elementárním jevem nazýváme libovolný možný výsledek $\omega \in \Omega$
- \mathcal{F} je množina náhodných jevů (potenční množina¹⁹ množiny Ω)
- P je přiřazení pravděpodobnosti jednotlivým jevům z Ω ($P(\Omega) = 1$)

Náhodný jev Náhodný jev A výsledek náhodného pokusu. Příkladem jevu může být například hod mincí a pozorování, zda padla panna nebo orel. V tomto jevovém prostoru jsou zahrnuty celkem dva elementární jevy (hodnota panna a hodnota orel), které souvisejí s pokusem (pozorování výskytu elementárních jevů během házení).

¹⁹Potenční množina množiny X je množina obsahující všechny podmnožiny množiny X

Náhodná veličina Výsledkem náhodného pokusu nemusí být číslo (v příkladu výše jsme měli dvě hodnoty po stranách mince), proto je vhodné těmto výsledkům kvůli matematickému zpracování čísla přiřazovat. Způsob přiřazení čísla výsledku náhodného pokusu se označuje jako *náhodná veličina* X [17]. Pro počítání padlých panen při opakovaném házení mincí by mohlo přiřazení vypadat například takto:

- $X(\textit{panna}) = 1$
- $X(\textit{orel}) = 0$

Náhodná veličina na pravděpodobnostním prostoru (Ω, \mathcal{F}, P) je tedy funkce $X : \Omega \rightarrow R$, která každému $\omega \in \Omega$ přiřadí $X(\omega)$ a pro kterou platí podmínka měřitelnosti:

$$\{X \leq x\} = \{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq x\} \in \mathcal{F}, \forall x \in R$$

Dle typu se rozlišují náhodné veličiny diskrétní a spojité. Diskrétní náhodné veličiny mohou nabývat pouze konečného počtu hodnot z R (například ročník studia), zatímco spojité náhodné veličiny nabývají v určitém intervalu libovolné reálné hodnoty (například čas potřebný k dokončení diplomové práce).

Pravděpodobnostní rozdělení náhodné veličiny určuje její distribuční funkce.

1.2.1.6 Distribuční funkce

Distribuční funkce náhodné veličiny X je funkce $F : R \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$ definovaná vztahem

$$F(x) = P(X \leq x) = P(\{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq x\}).$$

Vyjadřuje tedy pravděpodobnost, že hodnota náhodné veličiny X nabude hodnoty menší nebo rovné zadané hodnotě (libovolnému $x \in R$). Distribuční funkce určuje rozdělení pravděpodobnosti.

1.2.1.7 Kvantilová funkce

[4] Podobně jako distribuční funkce, i kvantilová funkce se týká rozdělení pravděpodobnosti. Lze ji považovat za funkci inverzní k distribuční funkci, neboť zatímco distribuční funkce $y = F(x)$ vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou bude hodnota náhodné veličiny X menší nebo rovna $x \in R$, výsledkem kvantilové funkce $x = F(y)^{-1}$ je hodnota x , pro kterou je výsledek náhodného pokusu se zadanou pravděpodobností y menší nebo roven x . Jinými slovy hledáme taková x , kterým odpovídá určitá hodnota distribuční funkce $F(x)$. Hodnoty této funkce jsou tedy *kvantily*.

1.2.1.8 Rozdělení pravděpodobnosti

Někdy se též označuje jako distribuce pravděpodobnosti náhodné veličiny X . Rozdělení pravděpodobnosti každému jevu popsanému veličinou X přiřazuje určitou pravděpodobnost. V diskrétním případě přiřazujeme pravděpodobnosti jednotlivým hodnotám (lze si představit jako samostatné body v grafu), ve spojitém případě pak intervalu hodnot náhodné veličiny.

Rozdělení pravděpodobnosti je celá řada, z diskrétních je známé například *binomické* (n pokusů s rovnocennou pravděpodobností) či *geometrické* rozdělení. Ze spojitých například *normální rozdělení*, *exponenciální rozdělení* nebo *beta rozdělení*.

1.2.1.9 Beta rozdělení

Beta rozdělení $Beta(\alpha, \beta)$ je spojitě pravděpodobnostní rozdělení definované na intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Rozdělení má dva vstupní parametry α a β určující tvar. Rozdělení se používá k modelování chování náhodných veličin, které jsou omezené na konečné intervaly.

1.2.1.10 Bayesovská statistika

Jedná se o moderní větev statistiky pracující s podmíněnou pravděpodobností. Základem bayesovské statistiky je známý *Bayesův teorém* (často označovaný jako Bayesova věta) vyjadřující pravděpodobnost hypotézy (H_j) v závislosti na datech (D) a případně modelu (M). Lze pomocí ni stanovit pravděpodobnost, aniž bychom měli k dispozici známá fakta z minulosti. Oproti klasické statistice taktéž netestujeme hypotézy, ale provádíme *odhady*.

1.2.1.11 Apriorní pravděpodobnost (prior)

Pravděpodobnost $P(H_j|M)$, označována jako *prior*. Značí to, co víme nebo si myslíme předem, ještě před získáním dat (např. výsledky předchozích experimentů) [38]. Lze jí vyjádřit určitou míru nejistoty, například podíl voličů, kteří budou v budoucích volbách hlasovat pro nějakého konkrétního politika.

1.2.1.12 Aposteriorní pravděpodobnost (posterior)

Pravděpodobnost $P(H_j|D, M)$, označována jako *posterior*. Udává výsledek celého snažení, tedy pravděpodobnost naší hypotézy v závislosti na předchozích znalostech (prior) a současně nových datech [38].

Díky uvedeným pravidlům je možné s každou další objevenou skutečností zpřesňovat pravděpodobnost výchozí hypotézy.

1.2.1.13 Náhodný výběr

Náhodného výběru se využívá k rozpoznání charakteru rozdělení (opakované pokusy dávají za stejných podmínek různé výsledky, které odpovídají hodnotám jednotlivých realizací náhodné veličiny). Jedná se o uspořádanou n -tici (X_1, X_2, \dots, X_n) náhodných veličin X_i , $1 \leq i \leq n$, které jsou nezávislé a mají stejné rozdělení pravděpodobnosti [8].

Zatímco **náhodným výběrem** označujeme n -prvkovou posloupnost nezávislých náhodných veličin X_1, X_2, \dots, X_n , pojmem **výběr** budeme značit n -prvkovou posloupnost reálných čísel x_1, x_2, \dots, x_n [34].

1.2.1.14 Statistická inference

[34] Uvažujme pojem *populace*, kdy populací myslíme náhodnou veličinu s jejím rozdělením pravděpodobnosti. Úkolem statistické inference je pak s použitím **výběru** z populace *odhadnout parametr*, neboli číselnou hodnotu platící pro celou populaci (tou může být například střední hodnota rozdělení, rozptyl a tak podobně).

Odhadem je myšleno získání číselné hodnoty nebo intervalu hodnot z výběru. Cílem je, aby měl takový odhad blízko skutečné hodnotě parametru.

Rozlišujeme dva typy odhadů, a to bodový, kdy odhadem je jedna hodnota, a intervalový, kdy je odhadem interval hodnot.

1.2.1.15 Multi-armed Bandits

Jeden z klasických učicích problémů zasahující do teorie pravděpodobnosti. Herní strategie je podobná filosofii tradičního výherního automatu (představujícího *one-armed strategii*) s tím rozdílem, že multi-armed varianta má více herních pák, a proto lze v každém kole pro jednu hru volit mezi více automaty. Strategii se detailněji zabývá sekce 1.2.3.

S pojmy vysvětlenými výše souvisí strategie v tom smyslu, že použitím bayesovské varianty provádíme opakovaný výběr z konečného počtu rozdělení, čímž se snažíme maximalizovat průměrnou hodnotu.

Toho lze využít například k cílenému doporučování reklamy nebo výběru personalizované úvodní stránky pro uživatele vstupujícího na naše stránky. Což je vlastně analogie k problému řešeného v této práci.

1.2.2 Význam strojového učení

Jak vyplynulo z rešerše 1.1 existujících řešení, vzhledem k povaze řešeného problému je nutné zaměřit se na metody *strojového učení*.

Těmito metodami lze dosáhnout generalizace vstupních instancí na správné výsledky nebo adaptovat existující systém na změny a reakce okolí.

Typickým příkladem je vytvořit z dostupných dat model, jenž například dokáže:

- predikovat cenu akcií za 6 měsíců (z aktuální výkonnosti společnosti a dostupných ekonomických dat),
- rozpoznat spam od regulérního e-mailu,
- u pacienta hospitalizovaného s infarktem predikovat riziko dalšího infarktu,
- napomoci společností zabývajících se internetovou reklamou v rozhodování se, kterou reklamní strategii použít k maximalizaci zisku.

Algoritmy strojového učení dělíme do taxonomie (nadtríd a podtríd) založené na požadovaném výsledku nebo typu vstupu, jenž máme k dispozici během trénování stroje. Algoritmů je celá řada, zmíním zde alespoň ty nejtypičtější.

Supervised learning ²⁰ je typ učení, které se používá v případě, že máme k našim trénovacím instancím na vstupu korektní výsledky. Pomocí kombinace trénovacích vstupních instancí a jejich požadovaných výsledků lze systém adaptovat na situaci, že dokáže sám předpovídat výsledky pro každé další platné vstupní instance [37].

Využití nachází například v oblastech rozpoznávání řeči či detekci spamu.

Unsupervised learning ²¹ je již ze samotné podstaty absence učitele obtížným problémem. Učení bez učitele se používá k analýze dat, když nemáme k dispozici informace od učitele (trénovací množinu). Pozorovaná data se mají vysvětlit pomocí matematických modelů.

Používá se v oblasti rozpoznávání vzorů [24].

Reinforcement learning ²² je oblast informatiky týkající se chování agentů 1.2.1.2.

Jedná se o metodu, při které se agent učí, jakým způsobem má volit akce, aby našel optimální strategii pro dané prostředí.

Jedná se o učení bez učitele. Agent sice dostává odezvu, ale přímo z prostředí, takže musí experimentovat a zjišťovat, které stavy jsou nějakým způsobem dobré, a kterým stavům je lepší se vyhnout.

Průzkum probíhá na principu zpětné vazby 1.2.1.3 v podobě odměny za akce dosahující cíle nebo trestu v opačném případě. Řeší se zde problém *explorace* vs. *exploatace* 1.2.1.4.

Rozlišujeme několik typů zpětnovazebního učení, například tzv. *single-stage* (agent se snaží uplatňovat zpětnou vazbu ihned po každé provedené akci), oproti kterému stojí typ *sekvenční* (agent uplatňuje zpětnou vazbu po

²⁰učení s učitelem

²¹učení bez učitele

²²zpětnovazební učení nebo též učení posilováním

obdržení série akcí). Dalšími typy jsou pak například *pasivní* a *aktivní* zpětnovazební učení přizpůsobující svůj vývoj na základě pevně dané strategie, respektive učení se a rozhodování o prováděných akcích za chodu systému [26].

Algoritmus zpětnovazebního učení začíná při svém spuštění ve stavu nevědomí, kdy neví nic o daných okolnostech a začíná nabývat své vědomosti postupným testováním systému. Postupující dobou běhu (a tím, jak vstřebává data a vyhodnocuje výsledky) se učí rozpoznat, jaké chování je nejlepší.

1.2.2.1 Zvolená strategie učení

Za nejvhodnější strategii, která by byla schopna plnit požadavky definované na tuto práci, jsem zvolil *algoritmus zpětnovazebního učení*.

O strategii lze též mluvit jako o *online učení*. Nutno zmínit, že slovem online zde není míněno něco ve smyslu internetu, ale ve smyslu neustále se vyvíjející aktualizace dat. Učící algoritmus v každém kole vykoná nějakou akci, přijme zpětnou vazbu a přičítá si daný zisk či ztrátu.

Z matematického hlediska má online učení propojení na klasické online algoritmy, teorii (opakovaných) her a teorii pravděpodobnosti.

Díky těmto znalostem tak můžeme navrhovat pravděpodobností dynamické systémy, kterými lze modelovat složitá průmyslová zařízení nebo třeba výherní automat známý jako *Multi-Armed Bandit*.

1.2.3 Multi-armed Bandits algoritmus

1.2.3.1 Princip algoritmu

Základ algoritmu si lze představit tak, že hráč stojí před N výherními automaty (ty jsou podle dle strategie nazývány jako bandité) a v každém kole má možnost vybrat si jeden, na kterém bude hrát.

Strategie je formálně popsána jako skupina výnosových distribučních funkcí $B = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$, kde N je počet banditů (každý z banditů má tedy přiřazenu právě jednu distribuční funkci vyjadřující pravděpodobnost úspěchu).

Hráč zpočátku nedisponuje žádnou informací o průběhu hry, ani o rozložení pravděpodobnosti úspěchu mezi bandity, a maximalizace výhry může dosáhnout pouze tím, že v každém kole vhodně vybere vždy jednoho z banditů.

Kdyby hráč věděl, u kterého z banditů je největší pravděpodobnost výhry, samozřejmě by vždy vybíral právě tohoto. Pravděpodobnosti výher u jednotlivých automatů jsou ale neznámé.

Přizpůsobení algoritmu pro potřeby adaptibilního systému Tradiční varianta pracuje s předem definovaným počtem tahů, kterými je celá hra omezena. Úkolem hráče tedy je nalézt nejlepšího banditu, a to tak rychle, jak jen to je možné, aby jej stihl využít co nejvíce [20].

Vzhledem k povaze mnou řešeného problému, kdy je cílem navrhnout a vyvinout rádce, jenž naslouchá a odpovídá pouze tedy, kdy je vyzván uživatelem, je chování systému zhruba takové:

- Rádce může udělovat rady klidně až do nekonečna. Pokud ale nebude dostávat pravidelnou zpětnou vazbu o výsledcích svých rad, budou jeho rady čistě náhodné.
- Zpětnou vazbu mu poskytují uživatelé, kteří u něj žádají o radu. Uživatelé poskytují informace dvojího typu – zda se *řídili při volbě algoritmu jeho radou* a zda byli *po doporučení obsahu s výsledkem spokojeni či nikoliv*.

Popisu toho, jaký vliv má zpětná vazba na vývoj samotného systému, se věnuje příslušná podkapitola 1.2.4.1.

Návrh strategie učení Návrh strategie spočívá v tom, že systém (rádce) jednotlivé bandity nejdříve testuje 1.2.1.14 za účelem získání znalostí nutných pro další vývoj. Jakmile nabude více znalostí, je možné zaměřit se na bandity, kteří poskytují díky zužitkovaným znalostem největší odměnu.

Úkol je komplikován stochastickou povahou banditů. Suboptimální bandita může přinášet spoustu výher, což by nás mohlo přimět uvěřit, že právě tento bandita je tím nejlepším. Podobně ale uvažovat i naopak – nejlepší bandita totiž může zpočátku přinášet spoustu proher.

Na místě jsou dvě otázky:

- Měli bychom dávat stále šanci i banditům, u kterých často prohráváme, nebo na ně zanevřít a štěstí zkoušet u jiných?
- Pokud nalezneme banditu, který nám přináší *docela dobré* výsledky, měli bychom se s ním spokojit a nadále maximalizovat svou výhru pouze u něj? Nebo se vyplatí zkoušet i nadále další bandity v naději, že se povede nalézt ještě lepšího?

Tato dilemata jsou odborně nazývána jako *explorace a exploatace* 1.2.1.4.

1.2.4 Bayesian Bandits

Nalézt optimální řešení tedy nepatří k triviálním problémům. Systému může trvat léta, než se k němu dopracuje. Naštěstí existuje spousta *přibližně optimálních* řešení.

Jedním z řešení je algoritmus zvaný *Bayesian Bandits*. Algoritmus přímo souvisí s učením založeným na zpětné vazbě 1.2.1.3.

Bayesovské řešení začíná prior 1.2.1.11 stanovením pravděpodobností výhry pro každého banditu. Hodnoty jsou v rozmezí $(0, 1)$. Jak již bylo řečeno, každého banditu reprezentuje jedna distribuční funkce.

V každém kole, kterých je v případě mnou vytvářeného systému nekonečně (neboť kola jsou závislá na žádostech uživatelů, kteří přistupují k systému – standardní použití Multi-armed Bandits pracuje s konečným počtem stavů), probíhá následující proces:

1. pro každého z N banditů proved' prior 1.2.1.11 (počty pokusů, výher, ...) výběr z náhodné veličiny X_b 1.2.1.5 bandity b
2. ze získaných dat vyber 1.2.1.13 banditu s největší hodnotou předchozího výběru, například $B = \operatorname{argmax} X_b$
3. pozoruj výsledek vrácený banditou B a proved' prior aktualizaci tohoto bandity.
4. vrať se na krok 1

Počáteční prior pravděpodobnost je u každého bandity Beta rozdělení 1.2.1.9 $Beta(\alpha = 1, \beta = 1)$ (uniformní rozdělení).

Pozorovaná náhodná veličina X (výhra či prohra, tedy 1 nebo 0) je binomická. Posterior 1.2.1.12 pravděpodobnost se po provedení pokusu přizpůsobuje novému rozdělení:

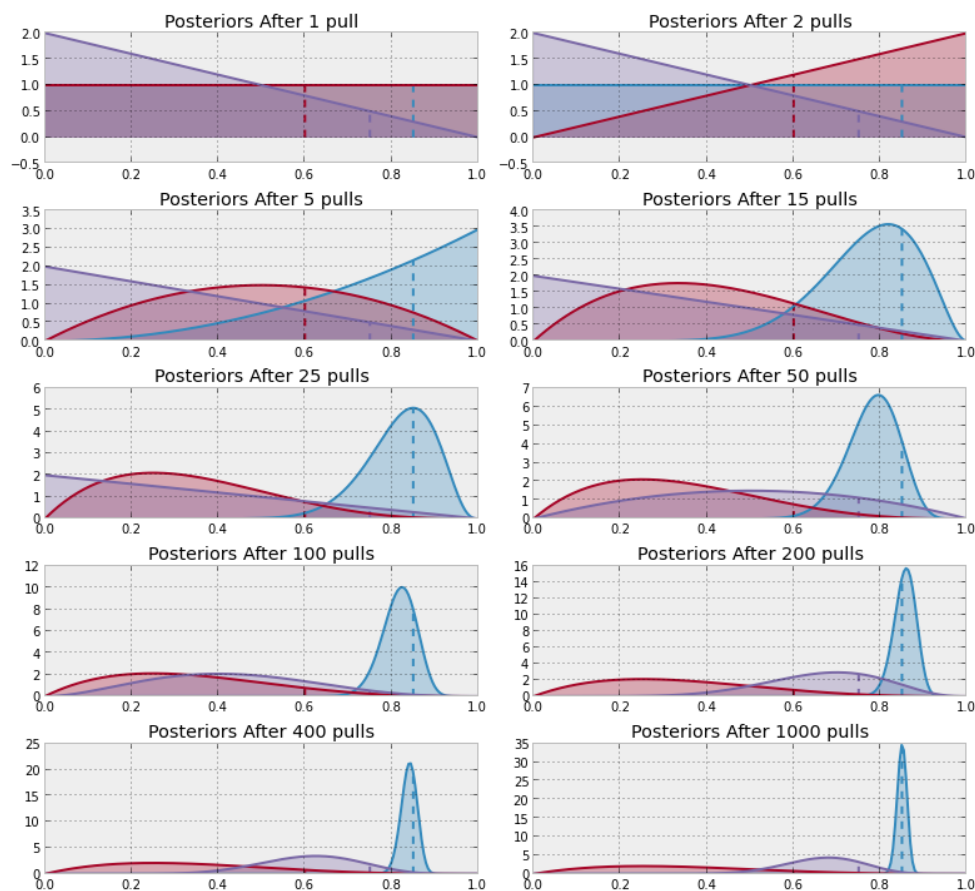
$$Beta(\alpha = 1 + X, \beta = 1 + 1 - X).$$

V případě jakéhokoliv úspěchu se provádí navýšení pravděpodobnosti, se kterou bude algoritmus znovu vybrán. V případě neúspěchu se tato pravděpodobnost exponenciálně snižuje. V každé další hře se již systém rozhoduje s touto pravděpodobností (mezi explorací a exploatací).

Pokud tedy chceme odpovědět na dřívější otázku, zda bychom měli dávat stále šanci i banditům, u kterých často prohráváme, nebo na ně zanevřít a zkoušet štěstí u jiných, tento algoritmus nám navrhuje to, abychom prohrávající bandity přímo nevyřazovali, ale vybírali je stále méně často, jakmile získáme dostatek jistoty, že existují i lepší bandité.

Existuje tu nenulová šance, že prohrávající bandita dosáhne statusu B , pravděpodobnost této šance se ale snižuje s rostoucím počtem odehraných kol.

Obrázek 1.3 znázorňuje postup pro problém tří banditů ($N = 3$), jakým se algoritmus učí s rostoucím počtem her. Přerušované čáry pod grafy hustoty každého rozdělení reprezentují skryté reálné pravděpodobnosti (v obrázku mají hodnoty 0.85, 0.60, 0.75). Z uvedeného příkladu vyplývá, že o skryté pravděpodobnosti se až tolik nestaráme. Daleko větší význam pro nás má výběr nejlepšího bandity, což je vidět na distribuci červeného bandity. Ta je velice široká, což představuje skutečnou neznalost o tom, jak velkou skrytou pravděpodobností bandita disponuje. O pravděpodobnosti tedy nemáme nejmenší tušení, jsme si ale docela jistí tím, že bandita není nejlepší. Algoritmus se proto rozhodne ignorovat jej.



Obrázek 1.3: Vizualizace sekvenčního učení řešení od jedné do tisíce her. Zdroj: [20]

1.2.4.1 Zpětná vazba a její vliv na vývoj adaptibilního systému

Pojem zpětné vazby 1.2.1.3 již v předchozím textu zazněl. Pro účely této práce je nutné uzpůsobit její význam tak, aby měla přímý vliv na pružný vývoj adaptibilního systému.

Vzhledem k tomu, že rádce bude plnit svůj úkol pomocí algoritmu Bayesian Bandits využívající *Beta* rozdělení pravděpodobnosti (navíc operuje s pravděpodobnostmi *prior* a *posterior*), zpětná vazba bude mít vliv na oba parametry vstupující do rozdělení, což má ve finále vliv na tvar celé distribuce 1.2.1.8 (k vidění na obrázku 1.3).

Jak již bylo řečeno, zpětná vazba je dvojího typu:

- Informace o zvolení rádce navrženého algoritmu pro vlastní doporučení (rádci sdělujeme, že jsme se **pokusili** řídit jeho radou).

- Zpětná vazba týkající se spokojenosti doporučení (zda byl tento algoritmus při doporučení **úspěšný** či nikoliv).

Do *Beta* rozdělení vstupují dva parametry – α a β .

Při každé žádosti na rádce je tedy pro každého banditu B_i provedeno posterior (značením $B_i(success)$ se snažím naznačit dosavadní míru úspěchů bandity B_i , pomocí $B_i(trials)$ zase dosavadní míru pokusů téhož bandity):

$$Beta(\alpha = 1 + B_i(success), \beta = 1 + B_i(trials) - B_i(success)).$$

Na ukázkou jsem připravil dva příklady posterior hustoty rozdělení pravděpodobnosti dle různých vstupních parametrů vstupujících do rozdělení *Beta*. Obrázek 1.4 znázorňuje situaci 4 úspěchů ze 4 pokusů, zatímco obrázek 1.5 1 úspěch ze 4 pokusů. Na druhém obrázku lze vidět, že distribuce je širší.

Typy zpětné vazby pro adaptibilní systém

- Informace o zvolení algoritmu přičte k míře pokusů tohoto algoritmu (bandity) hodnotu. Ostatním algoritmům se nic přičítat ani odečítat nebude.
- V případě pozitivní zpětné vazby bude zvolenému algoritmu přičtena hodnota k míře jeho úspěchu. Ostatním algoritmům bude od této míry v poměru odečteno nebo bude poměr zachován.
- V případě negativní zpětné vazby bude zvolenému algoritmu odečtena hodnota z míry jeho úspěchu. Ostatním algoritmům bude hodnota přičtena nebo nezměněna.

Stanovení nejvhodnějších hodnot a konkrétního přístupu bude provedeno na základě experimentů.

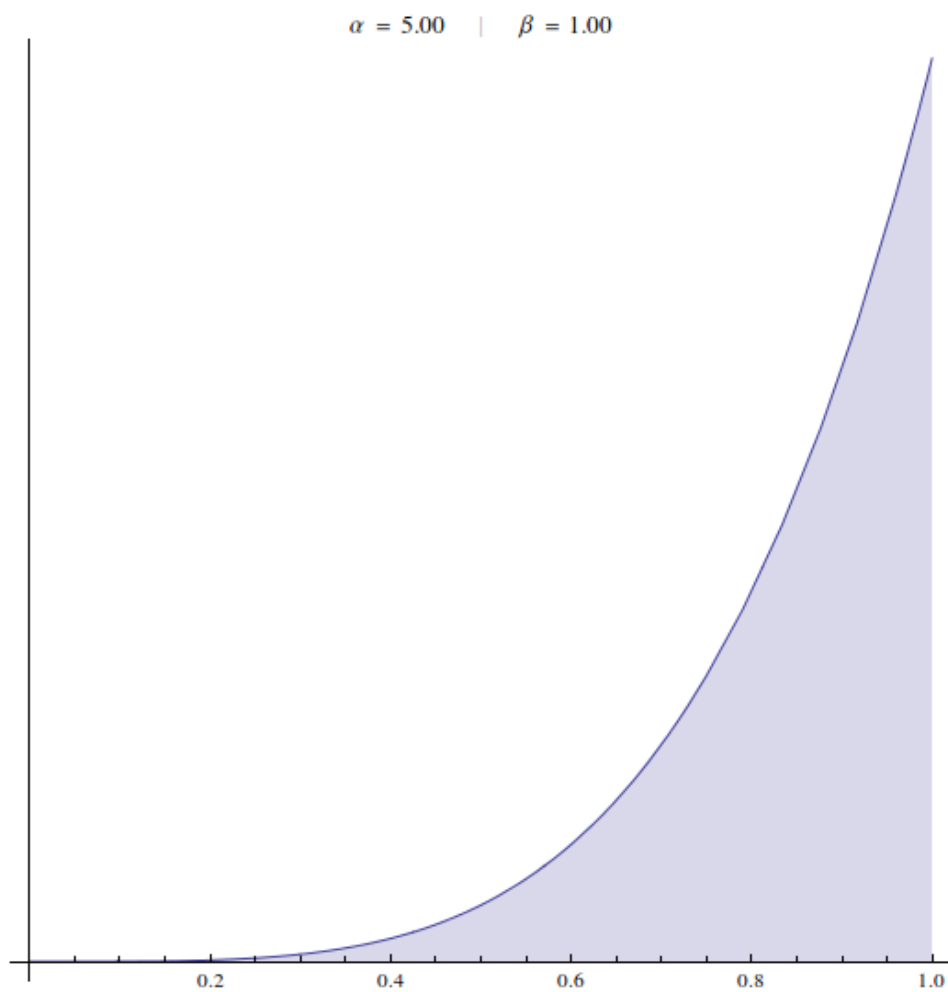
1.2.4.2 Stanovení míry učení

Vzhledem k tomu, že prostředí se mění velmi rychle v čase, je nutné stanovit nějakou míru učení. Technicky vzato je standardní Bayesian Bandits algoritmus schopen vyvíjet se sám díky neustálé aktualizaci parametrů vstupujících po každé provedené akci do *Beta* rozdělení.

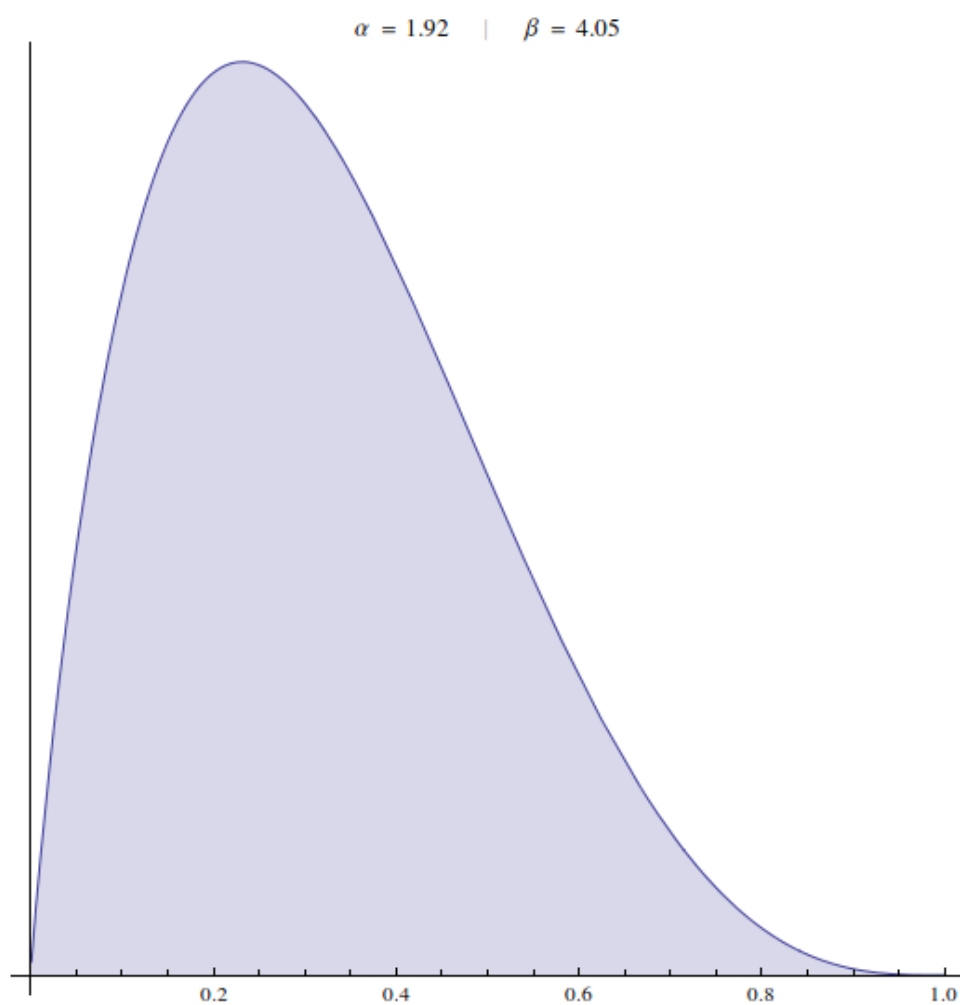
Stanovením vhodné míry učení lze ale docílit toho, že algoritmus se bude přizpůsobovat měnícímu se prostředí rychleji a bude fungovat též jako prevence proti vyčerpání hodnot datových typů programu.

Pokud stanovíme míru < 1 , algoritmus bude předchozí výsledky zapomínat rychleji a častěji bude zkoumat nové možnosti. Míra > 1 implikuje naopak to, že algoritmus bude sázet na časnější dřívější výhry, čímž ale riskuje to, že se nedokáže rychle adaptovat na náhlé změny (je více imunní vůči rychle se měnícímu prostředí).

Míra < 1 bude pro potřeby adaptibilního systému vhodnější. Konkrétní hodnotu se opět pokusím stanovit v závislosti na provedených experimentech.



Obrázek 1.4: Hustota pravděpodobnosti *Beta* rozdělení pro vizualizaci 4 úspěchů ze 4 pokusů.



Obrázek 1.5: Hustota pravděpodobnosti *Beta* rozdělení pro vizualizaci 1 úspěchu ze 4 pokusů.

1.2.5 Význam pro kombinování

Význam bayesovské strategie pro kombinování spočívá ve výběru správné metody, která bude přidána do množiny ostatních vybraných metod. Z této množiny metod je dále nutné vybrat nejvhodnější a tu použít.

Jako nejefektivnější a zároveň nejjednodušší postup se jeví výběr metody s největší četností výskytu.

V případě shody, kdy bude mít více metod stejnou četnost výskytu, bude učiněna volba jedné konkrétní pseudonáhodně.

Praktická část

2.1 Analýza a návrh řešení

Náplní této sekce je sepsání požadavků na systém, které vyplynuly z úvodních konzultací s vedoucím práce a též vlastním zkoumáním řešeného problému. Se znalostí těchto požadavků pak bude možné provést hrubý návrh architektury systému včetně technického řešení komponent, kterými bude systém disponovat.

S ohledem na výstupy získané v této kapitole by mělo být možné provést implementaci systému.

2.1.1 Požadavky

Za účelem vyšší přehlednosti jsem se rozhodl související požadavky strukturovat do zastřešujících skupin dle části aplikace, která bude mít jejich obsluhu na starosti.

Vyvíjenými částmi jsou:

- **Adaptibilní systém pro doporučování obsahu,**
- **Sada základních algoritmů určených k doporučování,**
- **RESTful API pro manipulaci s doporučovacími algoritmy a systémem.**
- **Klientská aplikace pro simulaci modelové úlohy.**

2.1.1.1 Požadavky na adaptibilní systém

- Systém poklade důraz na zpětnou vazbu, pomocí které bude přizpůsobovat své chování.
- Systém bude přijímat zpětnou vazbu v podobě informace o tom, že uživatel se rozhodl využít jeho rad.

2. PRAKTICKÁ ČÁST

- Systém bude přijímat pozitivní (v případě dobrého doporučení) a negativní (v případě nevhodného doporučení) zpětnou vazbu.
- Systém bude v pravidelných intervalech ukládat do databáze svůj aktuální vnitřní stav.
- Systém bude schopen v případě pádu aplikace a po jejím opětovném spuštění načíst naposledy uložený vnitřní stav.
- Systém bude veškeré své operace týkající se rad a doporučování provádět a vyhodnocovat v reálném čase.
- Systém bude schopen automaticky se přizpůsobovat vývoji v čase normalizováním ukládaných hodnoty.
- Systém bude na každou klientskou žádost vracet příslušnou odpověď (i chybovou) – neexistuje nic jako odpověď *null*.
- Systém bude umožňovat vytváření a uchovávání kontextových kolekcí určených pro kombinování.
- Systém bude umožňovat vytváření a uchovávání kolekcí složených z existujících kontextových kolekcí určených pro kombinování.
- Systém bude schopen odpovídat na žádosti uživatelů poptávajících způsob doporučení.
- Systém bude schopen odpovídat na další dotazy týkající se kolekcí (jejich existence apod.).
- Systém bude umožňovat asynchronní komunikaci s klienty.

2.1.1.2 Požadavky na sadu základních algoritmů

- Algoritmus bude dle typu přijímat parametry (uživatel, limit navrácených položek atd.), a ty využívat pro svá doporučení.
- Algoritmus bude komunikovat s daty uložených v Apache Solr a nad těmito daty provádět doporučovací operace.

2.1.1.3 Požadavky na RESTful API

- Skrze rozhraní bude možné vytvářet kontextové kolekce se seznamem algoritmů určených pro kombinování a následnou predikci.
- Skrze rozhraní bude možné vytvářet kolekce složené z existujících kontextových kolekcí určených pro kombinování a následnou predikci.
- Skrze rozhraní bude možné vypsát existující kolekce v systému.
- Skrze rozhraní bude možné zaslat systému žádost o radu a obdržet informaci o nejvhodnější metodě pro doporučení.
- Skrze rozhraní bude možné zaslat systému informaci o zvolené metodě pro doporučení.

- Skrze rozhraní bude možné zaslat systému žádost o doporučení zvolenou metodou.
- Skrze rozhraní bude možné zaslat systému zpětnou vazbu týkající se spokojenosti s metodou, kterou jim byl doporučen obsah.
- Skrze rozhraní bude možné zaslat systému zpětnou vazbu týkající se hodnocení doporučených položek (informace, že jeden konkrétní uživatel dělá něco s jedním konkrétním dokumentem).
- Skrze rozhraní bude možné vytvářet v úložišti dat položky určené k doporučování.
- Skrze rozhraní bude možné mazat v úložišti dat položky již nerelevantní pro doporučování.

2.1.1.4 Klientská aplikace

- Klientská aplikace se bude připojovat k výše uvedeným funkcím systému a zpracovávat získané výsledky.
- Klientská aplikace bude umožňovat přístup více uživatelů k systému.

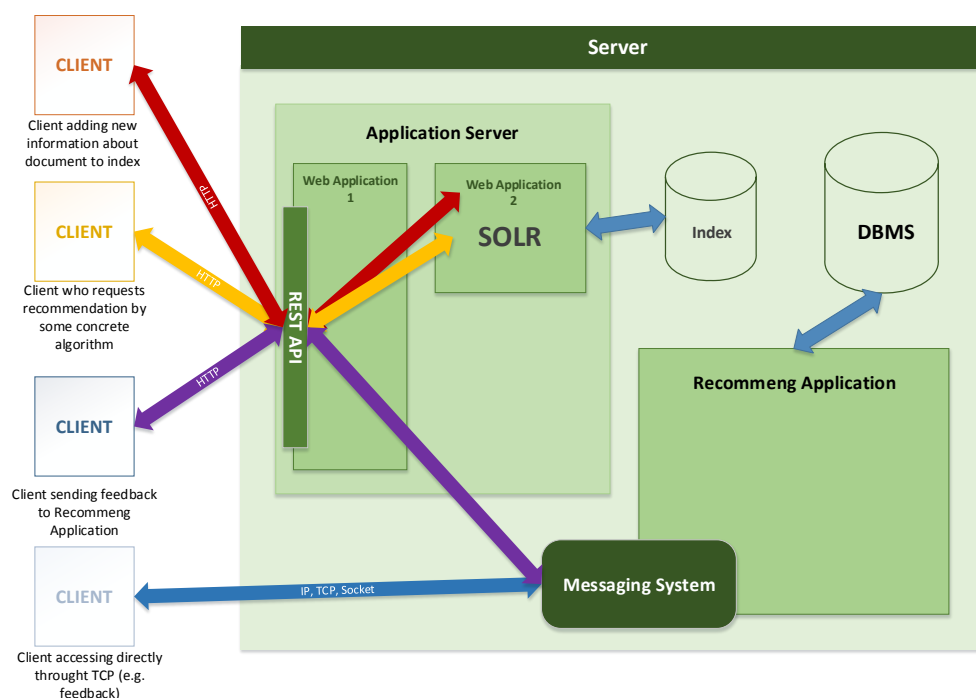
Dle disciplín softwarového inženýrství lze výčet uvedený výše označit za **funkční požadavky**.

Definujme nyní i tzv. **nefunkční požadavky**, které specifikují vlastnosti a omezující podmínky kladené na systém:

- Systém bude postaven na platformě Java.
- Pro uchování informací o uživateli, položkách a jejich vzájemné interakci bude využita platforma pro vyhledávání v textu Apache Solr.
- Systém bude umožňovat přístup aplikacím třetích stran prostřednictvím RESTful webových služeb.
- Systém bude postaven tak, aby se dal snadno parametrizovat.
- Systém bude připraven na situaci, že jej bude využívat více uživatelů současně.
- Systém poběží jako samostatná aplikace na serveru naslouchající na TCP portu. Veškerá komunikace s ním bude probíhat formou zasílání zpráv a volání procedur.
- Pro snadné nasazení a testování systému na libovolné pracovní stanici bude nutné vytvořit Chef cookbook/recipe²³.

²³<http://community.opscode.com/>

2. PRAKTICKÁ ČÁST



Obrázek 2.1: Abstraktní návrh architektury a komponent adaptibilního systému, ve kterém je též vidět základní interakce uživatele se systémem.

2.1.2 Architektura doporučovací platformy

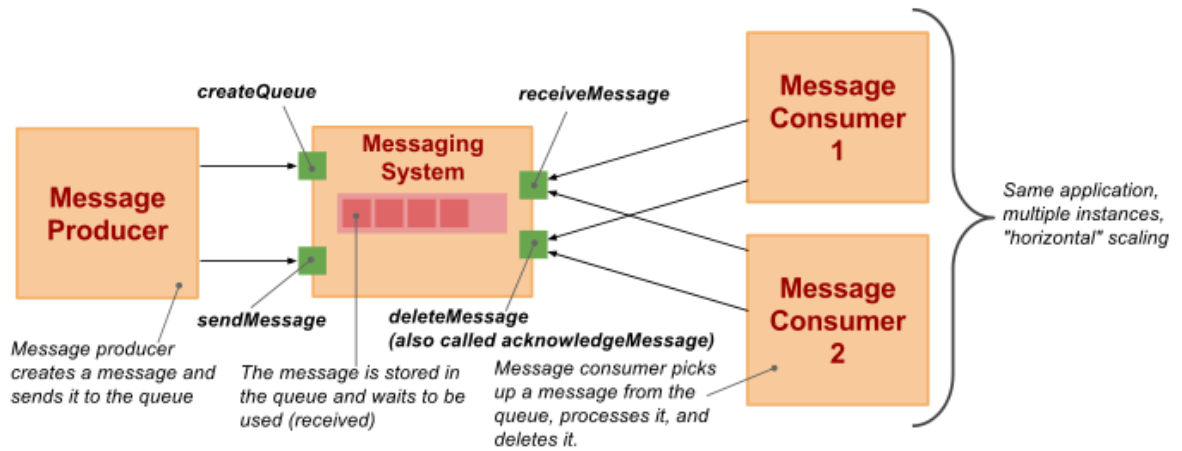
Pro zdárnou implementaci platformy splňující všechny požadavky vzešlé z analýzy výše je třeba důkladně zvážit, jaké komponenty bude obsahovat.

Diagram 2.1 znázorňuje abstraktní návrh architektury takové platformy. Mou snahou bylo zachytit přítomnost jednotlivých komponent v systému, formu jejich vzájemné komunikace a spolupráce a též základní interakci uživatele se systémem.

2.1.2.1 Server

Navrhovanými komponentami pro spuštění a běh na serveru jsou:

Webová aplikace s rozhraním pro komunikaci s klienty. Viz diagram 2.1, komponenta *Web Application 1*. Aplikace bude mít na starosti obsluhu klientských požadavků na systém prováděných prostřednictvím protokolu HTTP. Zároveň bude disponovat sadou algoritmů, které lze použít pro doporučení obsahu. Dále bude aplikace obstarávat komunikační režii s druhou aplikací běžící na aplikačním serveru (*Web Application 2*), kterou je platforma pro vyhledávání v textu – Apache Solr.



Obrázek 2.2: Příklad MQ systému s producentem zpráv a konzumenty. Zdroj: [32]

Apache Solr Viz diagram 2.1, komponenta *Web Application 2*. Přítomnost této aplikace vychází z nefunkčních požadavků. Apache Solr funguje jako samostatná komponenta umožňující fulltextové vyhledávání (detaily v kapitole 2.3).

Databáze Kvůli potřebě ukládat uživatelem vytvářené kolekce, průběžný stav aplikace (časové snímky), a také nutnosti snadného obnovení načerpaných znalostí systému v případě přerušení běhu, je nutné zapojit do návrhu Database Management System (DBMS).

Volba DBMS hraje důležitou roli i při škálování aplikací. V minulosti tolik používané standardní relační DBMS mohou způsobovat zpoždění při provádění čtení/zápisu a v některých případech hrát roli úzkého hrdla aplikace.

Kvůli tomuto problému stojí za úvahu prozkoumat možnost použití jedné z NoSQL databází, které jsou již ze svého principu navrženy pro spolupráci s aplikacemi zaměřenými na výkon a škálovatelnost.

Recommeng systém Stěžejní serverovou komponentou je adaptibilní systém 2.1.3. Ten jsem pracovně nazval jako **Recommeng** (zkratka pro recommendation engine), abych o něm nemusel již nadále mluvit jako o *adaptibilním systému* či *systému pro kombinování metod*.

Komunikaci bude umožňovat systém pro zasílání zpráv (Messaging System) s využitím fronty zpráv (Message Queue). Toto řešení je zde nasnadě kvůli očekávání většího množství žádostí směřujících na systém a snadnější škálovatelnosti aplikace. Obecný příklad takového MQ systému znázorňuje obrázek 2.2

2. PRAKTICKÁ ČÁST

Recommeng systém bude taktéž komunikovat s databází kvůli nutnosti průběžného ukládání informací o stavu, respektive kvůli možnosti načíst poslední uložený stav při novém startu aplikace.

Veškerá data pro výpočet a predikci budou jinak udržována přímo ve vnitřní paměti (uvnitř JVM).

2.1.2.2 Klient

Klientská strana není nikterak složitá. Potenciální uživatel aplikace má v zásadě dvě možnosti, jak s platformou komunikovat:

- Jen a pouze zasíláním žádostí na REST API.
- Kombinací zasílání žádostí na REST API společně s přímou komunikací s Recommeng systémem prostřednictvím fronty zpráv.

Některé ze systémových funkcionalit nelze bez komunikace s REST API využívat. Do této kategorie spadá například přidání nového vztahu k položce ve fulltextovém indexu nebo zaslání žádosti o doporučení obsahu některým z podporovaných algoritmů.

Přímé spojení s platformou skrze frontu zpráv bez nutnosti zapojení prostředníka v podobě REST API by ale měly umožňovat všechny možnosti použití Recommeng systému. Jmenovitě jde především o vytváření kolekcí se seznamem algoritmů, dále zasílání žádostí o radu pro výběr algoritmu a též metody informující systém o uživatelském chování jako zvolení konkrétního algoritmu nebo zaslání zpětné vazby o doporučení.

V diagramu 2.1 jsem se snažil zachytit různé formy komunikace klienta se systémem. Pro lepší názornost jsou jednotlivé žádosti barevně odlišeny. Ty lze považovat za modelové případy užití inspirované systémovými požadavky.

Zaslání zpětné vazby k doporučené položce Pozn. V diagramu 2.1 je klient odlišen červenou barvou.

Jedná se o klienta přidávajícího nový vztah mezi položkou a jejím uživatelem do úložiště.

- klient zašle žádost na rozhraní
- aplikace (Web Application 1) za rozhraním se spojí s indexem
- v případě zdárného průběhu se přidá do indexu informace o tom, že 1 uživatel dělá něco s 1 dokumentem
- klient obdrží odpověď s výsledkem žádosti

Žádost o radu při výběru metody pro doporučení obsahu *Pozn.* V diagramu 2.1 je klient odlišen fialovou barvou.

V diagramu je znázorněna situace, kdy klient zasílá platformě zpětnou vazbu ohledně doporučení, které dostal. Tato varianta může ale též představovat situaci, kdy klient žádá systém o radu, kterou metodou si má nechat doporučit obsah ve své budoucí žádosti o doporučení (viz varianta 2.1.2.2).

- klient zašle žádost na rozhraní
- aplikace (Web Application 1) za rozhraním se pokusí přistoupit k frontě zpráv
- pokud fronta existuje, žádost je přidána do fronty pro zpracování konzumentem (Recommeng systém)
- konzument zpracuje žádost a zasílá odpověď, kterou systém zpráv předá zpět do aplikace
- klient obdrží odpověď s výsledkem žádosti

Žádost o doporučení konkrétním algoritmem *Pozn.* V diagramu 2.1 je klient odlišen žlutou barvou.

Situace znázorňuje situaci, kdy klient poptává doporučení obsahu konkrétním algoritmem. Toto doporučení klient poptává na základě odpovědi na žádost, která mu byla udělena systémem (viz varianta 2.1.2.2)).

- klient zašle žádost na rozhraní
- aplikace (Web Application 1) za rozhraním zvolí vybraný algoritmus pro doporučení
- algoritmus přistoupí k datům v indexu, nad kterými se provede doporučení
- klient obdrží odpověď s výsledkem žádosti

Komunikace bez využití RESTful API *Pozn.* V diagramu 2.1 je klient odlišen modrou barvou.

Tento klient se rozhodl nevyužít možnosti komunikovat prostřednictvím REST API. Svou žádost zasílá přímo do fronty zpráv.

- klient zašle žádost do fronty
- pokud fronta existuje, žádost je přidána do fronty pro zpracování konzumentem (aplikace Recommeng)
- konzument zpracuje žádost a zasílá klientovi odpověď

2.1.3 Obecný návrh rozhraní

2.1.3.1 Rozhraní REST

Dle zadání má platforma poskytovat API pro interakci se systémem a daty formou RESTful (HTTP implementace REST 2.2.1). Každý uživatel tak bude moci interagovat s rozhraním prostřednictvím zveřejněných endpointů.

Z prováděné analýzy vyplynuly požadavky na aplikační rozhraní takové, že je lze rozdělit do tří skupin dle podstaty úkolu, který mají plnit.

- Ensemble alias Recommeng systém
- Algorithms
- Articles

Návrh tříd na zjednodušených²⁴ diagramech 2.3 a 2.4 ilustruje metody běžícím za poskytovaným API.

V případě prvního diagramu 2.3 jsou prostřednictvím API metod volány metody třídy **EnsembleZeroMqHelper**, která bude realizovat spojení s frontou zpráv Recommeng systému (třída **AsynchronousServer** na diagramu 2.6).

Druhým zjednodušeným diagramem 2.4 si lze utvořit představu o způsobu komunikace metod pro RESTful API se serverem Apache Solr (třída **SolrService**) a dále s jednotlivými doporučovacími algoritmy (skrze API **IAlgorithm**).

Z hlediska pohledu na část zdrojů je k dispozici diagram 2.5, který by měl celou věc pomoci osvětlit.

Ensemble Komunikace s rozhraním by měla umožňovat vytvářet v Recommeng aplikaci kolekce s identifikátory algoritmů a kolekce složené z těchto kolekcí (dále je budu označovat jako super kolekce), jenž budou zapojeny do kombinování a predikce.

K tomu účelu budou sloužit endpointy:

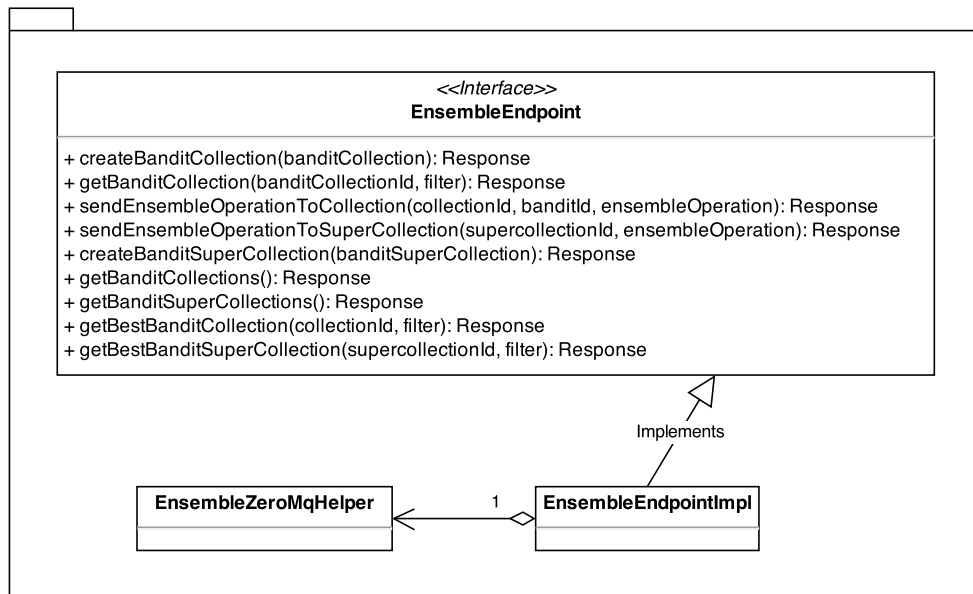
```
/recommeng/ensemble/collection
```

```
/recommeng/ensemble/supercollection
```

Pokud uživatel zašle metodou POST žádost na tyto endpointy (obsahující jméno kolekce a seznam příslušných položek v těle požadavku), v případě dosavadní neexistence v systému budou kolekce vytvořeny a připraveny k užití systémem.

Dále by měla existovat možnost zaslat na kolekci či super kolekci prosbu o predikci nejlepšího jejího algoritmu pro doporučení.

²⁴Pro větší srozumitelnost neuvádím v parametrech metod typy, ale spíše sémantické významy parametrů. Není též přítomna spousta dalších, s uvedenými třídami spolupracujících tříd.



Obrázek 2.3: Zjednodušený návrh tříd pro RESTful API endpoint pro komunikaci s Recommeng systémem.

```
/recommeng/ensemble/collection/{collection-id}
```

```
/recommeng/ensemble/supercollection/{collection-id}
```

Toho dosáhneme žádostí metodou GET, uvedením identifikátoru kolekce a případným specifikováním požadovaného výstupu (zda chceme vrátit jen nejlepší možnost či více možností seřazených sestupně od nejlepšího) v parametru dotazu.

Žádostí metodou GET bez specifikace ID bude navrácen seznam existujících kolekcí a super kolekcí v systému (existují-li v něm nějaké).

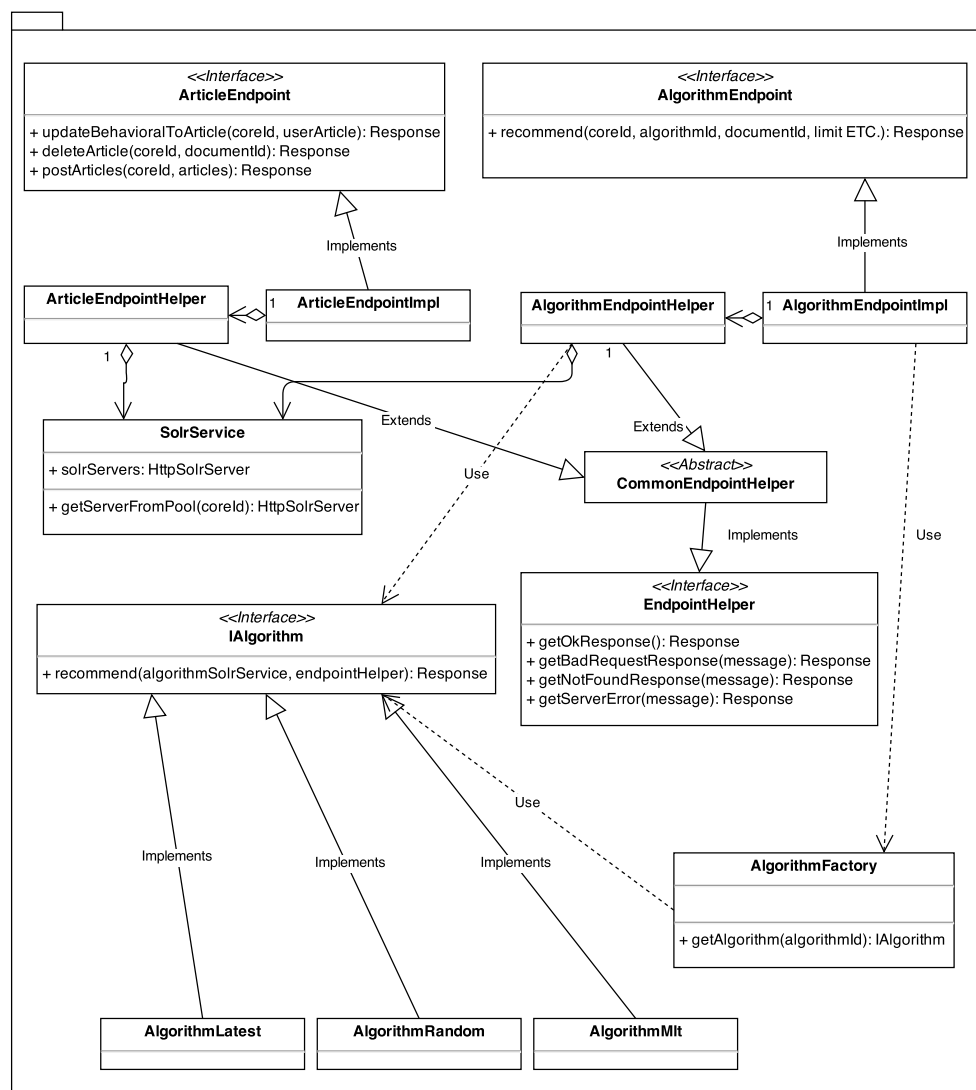
Kvůli učení a vývoji znalostí systému je nezbytné mít možnost zaslat systému informaci o výběru konkrétního algoritmu a též zpětnou vazbu vyjadřující, jak byl žádající uživatel s navrhovanou variantou spokojen. Toho bude dosaženo zasláním žádosti metodou PUT s informacemi uvedenými v těle požadavku.

Rozhraní pro sadu základních algoritmů Bude se jednat o jednoduchý endpoint, který si při žádosti vystačí s metodou GET.

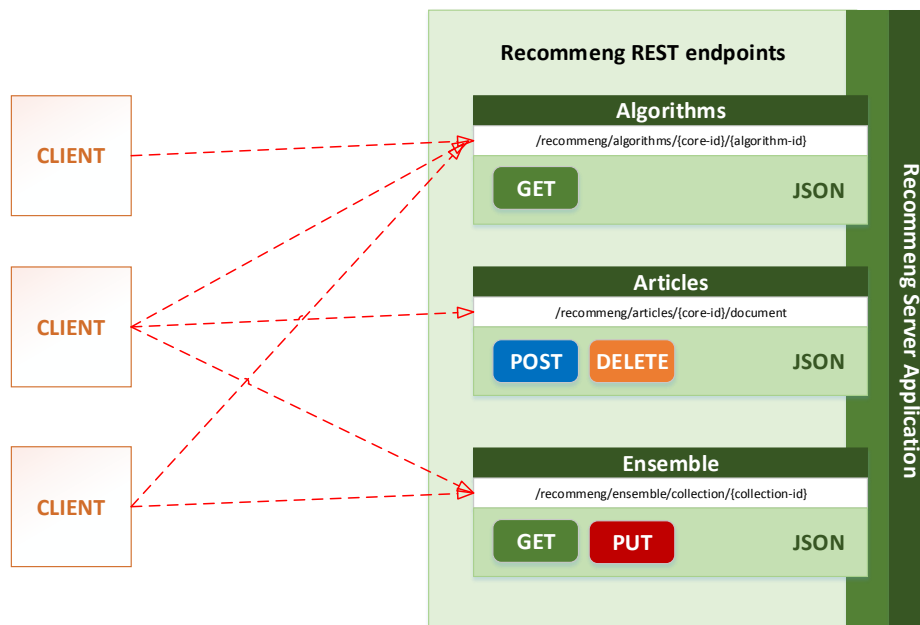
```
/recommeng/algorithms/{core-id}/{algorithm-id}
```

Úkolem je zpracovat žádost uživatele o doporučení algoritmem, jehož identifikátor je uveden v cestě.

2. PRAKTICKÁ ČÁST



Obrázek 2.4: Zjednodušený návrh tříd pro RESTful API endpointy pro komunikaci s jádrem Solr a s doporučovacími algoritmy.



Obrázek 2.5: Ukázka některých REST endpointů navrhovaného adaptibilního systému

Hledání doporučení bude provedeno nad dokumenty ze specifikovaného indexu (identifikátor indexu je nutno uvést). V parametrech dotazu lze specifikovat další vstupy pro doporučení jako limit vrácených výsledků, identifikátor pro doporučení článků z jedné skupiny a další.

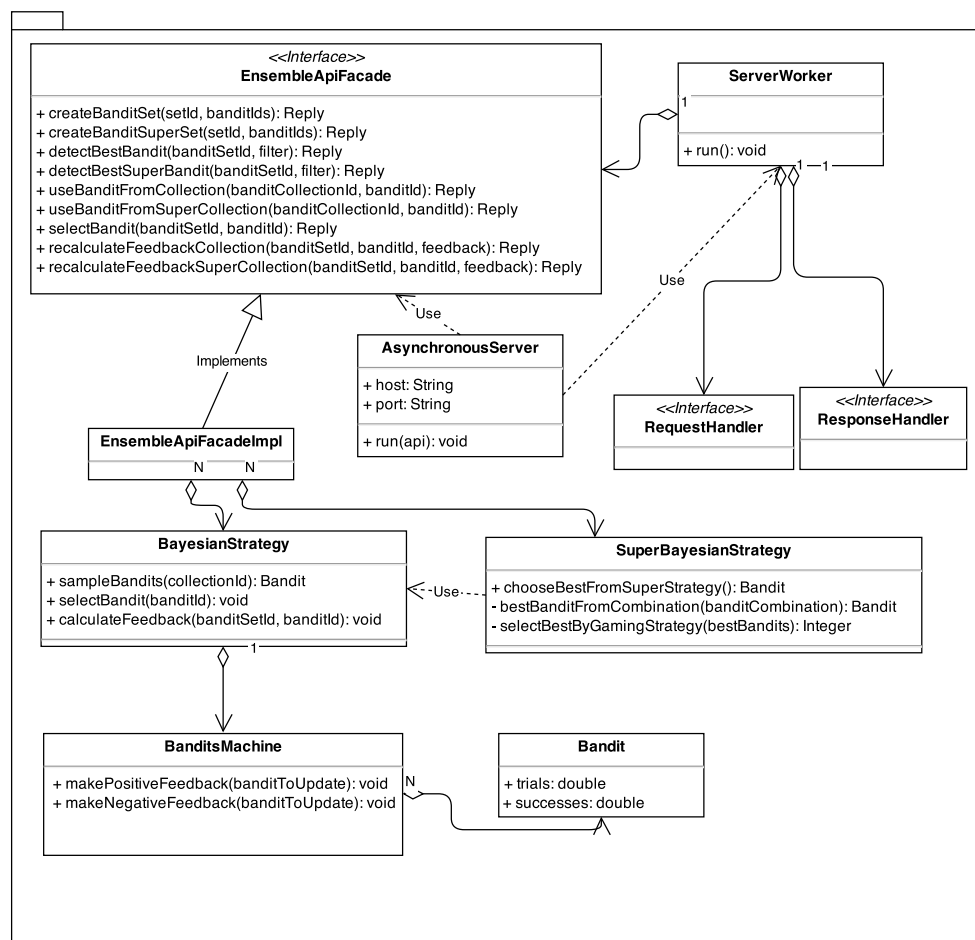
Rozhraní pro úložiště dat Důležité rozhraní umožňující zaznamenat například chování uživatele vzhledem ke sledovaným položkám.

```
/recommeng/articles/{core-id}/document
```

```
/recommeng/articles/{core-id}/articles
```

Prostřednictvím metody POST budou zasílány veškeré informace o položkách (u článku např. identifikátor, text, skupina, datum publikace) a jejím uživateli (identifikátor), které mají být uloženy do fulltextového indexu. Druhou podporovanou metodou je metoda DELETE pro vyřazení položky z doporučování. Metoda je použita v žádosti na též endpoint jako metoda POST, pouze je nutné v parametru dotazu specifikovat identifikátor článku (z toho důvodu, že identifikátorem článku může být cokoliv, například URL adresa).

2. PRAKTICKÁ ČÁST



Obrázek 2.6: Zjednodušený návrh tříd v adaptibilním systému a ukázka API.

Metody a endpointy uvedené výše se dají považovat za hrubý přehled budoucí funkcionality systému. Kompletní dokumentace navrženého REST API je k nahlédnutí v příloze A na konci práce.

2.1.3.2 Rozhraní Recommeng systému

Znázorňuje jej třídní diagram 2.6. V případě úspěšně navázaného spojení se systémem jsou pomocí pracovních vláken **ServerWorker** volány jednotlivé procedury systému. Tyto žádosti obsluhuje API **EnsembleApiFacade**.

Stejně jako v případě diagramů 2.3 a 2.4 se jedná o zjednodušený návrh, kde chybí spousta dalších tříd zapojených do systému. Diagram slouží pouze k ilustraci metod rozhraní a jejich funkcí pro daný systém.

2.1.3.3 Komunikace s frontou zpráv Recommeng systému

Dle návrhu bude komunikace uživatele s Recommeng systémem, ať už komunikuje přímo či pomocí RESTful API, řešena prostřednictvím fronty zpráv.

Dalším úkolem tedy je navrhnout formát, jakým si budou vyměňovat producent s konzumentem data prostřednictvím volání vzdálených procedur Recommeng systému.

Vzhledem k obecné známosti protokolu HTTP jsem se rozhodl napodobit jeho chování a zachovat sémantiku:

- metoda (method)
- cesta (path)
- tělo zprávy (body)

Podobně jako v HTTP, i v případě mnou navrhované komunikace bude na každou žádost ve tvaru *method*, *path* a *body* přicházet odpověď ve tvaru *status* a *body* s využitím různých návratových kódů pro stav (status). Všechny tyto informace budou ale prezentovány ve formátu JSON.

2.1.4 Identifikace sady algoritmů

Uživatel žádající o radu pro výběr nejlepšího algoritmu obdrží od systému identifikátor reprezentující tento algoritmus.

Algoritmy pro doporučování vyhodnocují především informace o uživateli, položkách a hodnocení. Ukládány jsou ale i další údaje, například datum zveřejnění položky či její popis (u článku se může jednat o text zprávy). Také s těmito informacemi mohou doporučovací algoritmy pracovat.

2.1.4.1 Algoritmus náhodného výběru

Jak je patrné již z názvu, tento algoritmus vybírá položky pro doporučení naprosto náhodným způsobem. Jeho hlavním úkolem je být zde pro srovnání s ostatními algoritmy.

2.1.4.2 Algoritmus výběru dle nejnovějších položek

Doporučování dle nejnovějších položek je dalším z algoritmů s naivním přístupem k problému. Položky budou v tomto případě doporučovány sestupně dle zveřejněného data.

2.1.4.3 Algoritmus výběru nejlépe hodnocených položek

Jedná se o první algoritmus založený na složitějším výpočtu. Položky vzešlé z doporučení budou dle určitých parametrů nějakým způsobem lepší než ostatní, které se v doporučení neobjevily. Takovým parametrem může být například

hodnocení na škále od 1 do 5, počet pozitivních hodnocení, souhrnné číslo udávající počet přečtení článku nebo jiný z mnoha způsobů vyjádření zájmu o položku.

2.1.4.4 Algoritmus výběru dle podobnosti obsahu

Algoritmus se snaží na základě podobnosti obsahu nalézt pro položku několik jí podobných položek z databáze. Podobnost se určuje porovnáním jednotlivých parametrů, například tagů, nadpisů nebo celého textu článku.

2.1.4.5 Algoritmus kolaborativního filtrování

Algoritmus je založen na modelu dřívějšího chování uživatele v systému. Model je většinou konstruován z chování většího množství uživatelů s podobným vkusem. V podstatě lze říci, že doporučení jsou založena na automatické spolupráci více uživatelů a výběru těch, kteří mají co nejpodobnější preference či chování.

Rozlišují se dva hlavní způsoby filtrování.

User-based “*You may like it because your friends liked it.*” [22]

Aneb filtrování založené na uživatelích. Jedná se o starší variantu kolaborativního filtrování. Podstatou je vzít na základě určité podobnosti skupinu uživatelů (zdroj [22] udává cca 20 až 50) s podobným vkusem jako má uživatel, pro něhož je doporučení konstruováno, a poté předpovědět, jak moc zajímavá by pro uživatele byla pro něj dosud neznámá položka, se kterou jsou spojení uživatelé se stejným vkusem.

Item-based “*You tend to like that item because you have liked those items.*” [22]

Aneb filtrování založené na položkách, které použila v roce 2001 jako první společnost Amazon. Myšlenka je taková, že uživatel, který si v minulosti zakoupil nějakou položku, bude v budoucnu při dalším nákupu vyhledávat položku podobnou. Například předpověď toho, co si uživatel zakoupí v budoucnu, lze uskutečnit analýzou historie nákupů uživatele [14].

2.2 Principy a technologie

2.2.1 RESTful API

2.2.1.1 REST

REpresentational State Transfer (REST) je architektonický styl definující určitá pravidla a vlastnosti návrhu API webových služeb orientovaných na zdroje. REST je silně založen na architektuře Klient-Server (server poskytuje přístup ke zdrojům, klient k nim může přistupovat a modifikovat je) a k jeho realizaci je možné využít protokolu HTTP (takovou realizaci pak nazýváme

jako RESTful). Role tohoto protokolu zde není nikterak náhodná, neboť autorem REST není nikdo jiný než Roy Fielding, jenž je u protokolu HTTP podepsaný jako spoluautor [23].

Díky protokolu HTTP lze následovat mnoho pravidel návrhu RESTful API, například přítomnost adresovatelných zdrojů, kdy je každý zdroj adresovatelný pomocí Uniform Resource Identifier (URI). RESTful pro manipulaci se svými zdroji používá též HTTP metody (GET, POST, PUT, DELETE, ale i další, například OPTIONS či PATCH). Další vlastností je užívání standardních stavových kódů²⁵ HTTP (typicky 2xx, 3xx, 4xx, 5xx) v odpovědi na žádost či bezstavová komunikace.

Data mohou být reprezentována v rozličných formátech jako XML, JSON či YAML.

Padla zde zmínka o bezstavosti. V případě REST k vyjádření přechodů mezi stavy aplikace používáme odkazy. Tento princip je nazýván jako *Hyper-text as the Engine of Application State* (HATEOAS).

2.2.1.2 Jersey (JAX-RS)

Java API for RESTful Web Services (JAX-RS)²⁶ je standard definovaný v Java Specification Request 311²⁷. Jedná se o specifikaci pro RESTful webové služby implementované v programovacím jazyce Java.

Pomocí JAX-RS lze s využíváním anotací jednoduše a přehledně definovat sémantiku jednotlivých tříd a jejich metod z hlediska využití v architektuře REST. Příklady anotací jsou `@Path(relativni_cesta)` pro specifikaci relativní cesty zdroje, `@GET` či `@POST` specifikující typ žádosti nebo třeba `@QueryParam` pro přiřazení parametru HTTP dotazu k hodnotě parametru příslušné metody třídy.

Pro účely implementace rozhraní systému Recommeng jsem zvolil vzhledem k předchozím zkušenostem referenční implementaci tohoto standardu v podobě frameworku **Jersey 2.x**.

2.2.1.3 JSON

JSON²⁸ je jednoduchý a univerzální formát pro výměnu dat. Zkratka skrývá význam *JavaScript Object Notation*. Jeho MIME (Internet media type) je `application/json`. V současné době se jedná o jeden z nejpoužívanějších formátů pro výměnu dat se službami REST. Výhodami jsou rychlost zpracování a snadnost použití.

Formát je postaven na dvou strukturách.

²⁵Definici všech stavových kódů viz <http://www.w3.org/Protocols/rfc2616/rfc2616-sec10.html>.

²⁶<https://jax-rs-spec.java.net>

²⁷<https://jcp.org/en/jsr/detail?id=311>

²⁸<http://www.json.org>

Array je seřazený seznam hodnot, který je ohraničen závorkami

Object je neseřazená kolekce dvojic klíč:hodnota ohraničený dvěma závorkami

Obě struktury lze do sebe zanořovat a vytvářet tak složitější struktury.

2.2.2 Fronta zpráv a síťová komunikace

2.2.2.1 ØMQ

ØMQ (ZeroMQ)²⁹ je vysoce výkonná³⁰ síťová knihovna napsaná v programovacím jazyce C++ vhodná k nasazení v distribuovaných a vícevláknových aplikacích, které vyžadují velkou škálovatelnost. S jejím využitím lze poměrně snadno navrhnout komplexní komunikační systém. Ke komunikaci užívá socketů³¹. Duchovním otcem a spoluautorem knihovny je slovenský expert na oblast messaging middleware Martin Sústrik³².

Hned na úvod je nutné sdělit, že se nejedná o klasický messaging system (message-oriented middleware) takového typu, jakým je například Apache ActiveMQ³³ a jemu podobné systémy. Takové systémy jsou většinou hotová řešení připravená k okamžitému nasazení a integraci s dalšími službami.

Filosofie ZeroMQ je jiná, neboť jde především o multiplatformní knihovnu určenou k programovému využití (nabízí podporu více než 30 programovacích jazyků³⁴). Pomocí jednoduchého socketového API umožňuje programátorovi sestavit si vlastní messaging system dle svého nejlepšího uvážení. Programátor využívá ze strany API veškerou podporu usnadňující práci se sítí a s trochou nadsázky lze prohlásit, že se stará pouze o zasílání zpráv. Sama socketová komunikace je výrazně zjednodušena.

Knihovna nám navíc dává kompletní svobodu v tom, jakým způsobem zakódujeme naši zprávu (JSON, BSON nebo jakýkoliv vlastní navržený formát).

Podporovány jsou čtyři protokoly pro komunikaci [21]:

tcp jako model síťově založeného přenosu (procesy na jedné síti)

inproc jako model komunikace vláken uvnitř jednoho procesu

ipc jako model komunikace mezi procesy (procesy out-of-box)

multicast komunikující skrze PGM³⁵.

²⁹<http://zeromq.org>

³⁰Viz výkonnostní testy na oficiální stránce http://zeromq.org/results:_start.

³¹Socket je mechanismus, kterým je možno zprostředkovat lokální či vzdálenou komunikaci dvou uzlů, která má charakter klient/server [33].

³²<http://250bpm.com/contact>

³³<http://activemq.apache.org>

³⁴TODO

³⁵<http://tools.ietf.org/html/rfc3208>

Knihovna také definuje základní vzory zasílání zpráv, ať už se jedná o doručování zpráv na jednotlivé uzly, mapování uzlů na vlákna, procesy či umisťování zpráv do fronty³⁶. Každý vzor zároveň určuje jinou síťovou topologii.

Základními vzory jsou:

- Request-reply
- Pub-sub
- Pipeline
- Exclusive pair

Nejvhodnějším vzorem pro mou práci je díky nátuře navrhovaného systému (zasílání zpráv a odpovědi na ně) vzor Request-reply, jehož konkrétní použití následuje záhy v sekci Recommeng systém. Ostatní vzory nemá smysl v rámci této práce popisovat.

Pro účely Recommeng systému jsem se rozhodl využít čistou Java implementaci knihovny ZeroMQ v podobě knihovny **jeroMQ**³⁷. Z výkonnostního hlediska za původním řešením zaostává jen nepatrně³⁸ a navíc je mnohem jednodušší integrovat ji do vyvíjené aplikace prostým přidáním knihovny do projektu.

2.2.3 Úložiště dat

2.2.3.1 Apache Solr

Apache Solr³⁹ je populární⁴⁰ open-source platforma pro vyhledávání napsaná v programovacím jazyce Java. Jejími charakteristickými vlastnostmi jsou podpora pro fulltextové vyhledávání, fasetové vyhledávání (analogie ke konstrukci GROUP BY v RDBMS), dobrá škálovatelnost pomocí kešování a distribuovaného vyhledávání, využívání vyhledávací konstrukce *more like this*, o které bude řeč v sekci 2.3.3, a také například tzv. *near real-time indexing*⁴¹ (dokumenty je možné vyhledávat téměř ihned po jejich zaindexování).

Z hlediska architektury programu jde o samostatný server pro fulltextové vyhledávání běžící v servletovém kontejneru (například Apache Tomcat). K indexaci a fulltextovému vyhledávání využívá ve svém jádru knihovnu Apache Lucene.

³⁶<http://zguide.zeromq.org/page:all#Messaging-Patterns>

³⁷<https://github.com/zeromq/jeromq>

³⁸Viz srovnávací testy <https://github.com/zeromq/jeromq/wiki/Performance>.

³⁹<https://lucene.apache.org/solr>

⁴⁰Viz seznam serverů využívajících služeb Solr <https://wiki.apache.org/solr/PublicServers>

⁴¹<https://cwiki.apache.org/confluence/display/solr/Near+Real+Time+Searching>

2. PRAKTICKÁ ČÁST

Apache Lucene⁴² je vysoce výkonná knihovna pro účely vyhledávání v textu a indexování.

Vstupem pro indexaci jsou dokumenty. Každý takový dokument obsahuje množinu elementů, kde je tento element nazvaný jako *field*). Každý field má své jméno, datový typ a případně další atributy.

Vstupem pro vyhledávání jsou textové řetězce (viz syntax⁴³, případně dotazované objekty).

Index je uložen na disku ve formě souborů ve struktuře invertovaného indexu dokumentů [36].

Ukázka definice několika field dokumentu ve schématu Solr:

```
<field name="userId" type="int" indexed="true" stored="true"
  multiValued="true"/>
<field name="time" type="date" indexed="true" stored="true"/>
```

Ukázka reprezentace dokumentu ve výsledku vyhledávání pomocí Apache Solr ve formátu XML:

```
<doc>
  <int name="id">1</int>
  <str name="articleId">http://somedomain.org/somearticle.html</str>
  <str name="articleText">Hello Bob and Alice!</str>
  <int name="group">123</int>
  <long name="_version_">1465487644804775936</long>
</doc>
```

Formu jejich spolupráce lze popsat tak, že Apache Solr poskytuje pro vyhledávání RESTful API, za kterým je skryto a voláno JAVA API knihovny Lucene. Díky tomu je možné pomocí protokolu HTTP komunikovat s Apache Solr z jakékoliv platformy napsané v jakémkoliv programovacím jazyce.

K integraci Apache Solr s dalšími aplikacemi je možné vybírat ze spousty nástrojů a knihoven⁴⁴. Pro účely mé aplikace psané v programovacím jazyce Java jsem zvolil knihovnu **SolrJ**⁴⁵ s klientským rozhraním pro vyhledávání, přidávání a aktualizaci indexu.

2.2.3.2 Apache Cassandra 2.0

Apache Cassandra 2.0⁴⁶ je open-source distribuovaný DBMS navržený pro obsluhu velkého množství dat. Z hlediska datového modelu je Cassandra jakýmsi hybridem mezi key-value (pod 1 klíčem je uložena 1 hodnota) a column-oriented databázemi. V dokumentaci [19] se lze dočíst, že jde o row-oriented databázi.

⁴²<http://lucene.apache.org/core>

⁴³http://lucene.apache.org/core/2_9_4/queryparsersyntax.html

⁴⁴<http://wiki.apache.org/solr/IntegratingSolr>

⁴⁵<http://wiki.apache.org/solr/SolrJ>

⁴⁶<http://cassandra.apache.org>

Základem modelu je *column family* (analogie tabulky v RDBMS), jež je složena z řádků a sloupců. Každý řádek má unikátní identifikátor ve formě klíče – každý řádek obsahuje více sloupců. Sloupce mají jméno, hodnotu a časovou značku. Výhodou proti RDBMS přístupu je to, že rozdílné řádky ze stejné column family nemusí sdílet stejnou množinu sloupců – do jedné nebo více řádek lze v libovolný čas zapsat jakýkoliv sloupec.

Vzhledem k tomu, že jedním z vyždvihovaných případů užití databáze je uchovávání časových snímků, rozhodl jsem se ji experimentálně zapojit do vytvářeného Recommeng systému. Ještě předtím jsem však detailněji zkoumal možnost použití jiné NoSQL databáze, a to **Redis**.

Redis je klasickou key-value databází uchovávající data primárně v paměti. Postupným vývojem se jeho funkcionalita propracovala k tomu, že pod jeden klíč je nyní možné uložit několik datových struktur (např. množiny a asociativní pole). Vzhledem k ukládání dat do paměti disponuje značnou rychlostí, navíc jej lze dle konfigurace nastavit tak, aby se obsah paměti průběžně ukládal na disk pro potřeby snadného obnovení dat v případě pádu aplikace.

Jeho zapojení do aplikace jsem zvažoval ve fázi zkoumání, jakým způsobem bude v adaptibilním systému řešen failover dat. Po následném návrhu datového modelu pro ukládání časových snímků stavu aplikace jsem však sáhl po použití Apache Cassandra jako po lepší z nabízených variant pro budoucí potřeby práce (rozsahové dotazy, vizualizace vývoje systému apod.).

Velkým benefitem je podpora Cassandra Query Language (CQL), dotazovacího jazyka umožňujícího vytvářet podobné konstrukty, jaké nabízí jazyk SQL. CQL je nyní k dispozici ve verzi 3.1 a s pomocí **DataStax Java Driver 2.0** mohu snadno manipulovat s databází přímo ze své aplikace.

2.2.4 Ostatní použité technologie

2.2.4.1 Apache Mahout

Apache Mahout⁴⁷ je knihovna napsaná v programovacím jazyce Java, jež poskytuje implementaci rozličných technik z oblasti strojového učení:

- **shlukování (clustering)** – položky nacházejících se v určitých třídách (například webové stránky či novinové články) jsou organizovány do skupin tak, že položky nacházející se v těchto skupinách jsou si vzájemně podobné
- **klasifikace (classification)** – učení se ze stávajících kategorizací a zařazování neklasifikovaných položek do nejvhodnější kategorie
- **doporučování (recommendation)**
- **často se vyskytující skupiny položek (frequent itemset mining)**
 - analýza položek v rámci nějaké skupiny (například nákupní košík) a identifikace, které položky se nejčastěji vyskytují pohromadě

⁴⁷<https://mahout.apache.org>

Pro tyto techniky realizuje příslušné algoritmy jako například kolaborativní filtrování, k-means, náhodné lesy, skryté markovské modely a další. Některé algoritmy jsou připraveny pro běh v distribuovaném módu s využitím paradigmatu Map/Reduce, některé pak v lokálním módu (samotný Mahout je založen na Apache Hadoop, ale lze jej pohodlně využívat i bez něj) [30]. Mahout poskytuje též knihovny pro obecné matematické operace (zaměřené hlavně na oblast statistiky) a kolekce⁴⁸.

Využít jej pro potřeby své práce jsem se rozhodl poté, co jsem na něj narazil v projektu Mendeley 1.1.1.3 během zkoumání existujících řešení doporučovací systémů.

2.2.4.2 Spring Framework

Při tvorbě každého nového Java projektu od základu je dobré zamyslet se nad možností využít některý z mnoha frameworků a dalších užitečných nástrojů, s jejichž pomocí si lze do značné míry usnadnit proces vývoje. Díky dobrým zkušenostem z dřívějších projektů jsem zvolil open-source framework pro tvorbu moderních enterprise aplikací **Spring**⁴⁹.

Jeho výhodami jsou snadná konfigurovatelnost, podpora dependency injection, rozšiřitelnost a také integrace s jinými frameworky. V mém případě to byla integrace s frameworkem Jersey, kterou jsem využil při implementaci RESTful API.

2.2.4.3 Apache Tomcat

Apache Tomcat je známý open-source webový server a servletový kontejner. Jedná se o oficiální referenční implementaci technologií Java Servlet a Java Server Pages (JSP). Na serveru mohou běžet uživatelské servlety (programy napsané v Javě), které umí zpracovávat požadavky zasílané pomocí HTTP protokolu a tímtéž protokolem na ně odpovídat. Apache Tomcat zde slouží jako zásobník servletů starajících se o jejich spouštění, běh, ukončování a podobně.

2.2.4.4 Správa závislostí

Často slýchaným pojmem z úst mnoha vývojářů v programovacím jazyce Java je tzv. *classpath hell*. V podstatě jde o problémy spojené s načítáním programových tříd. V dnešní době existuje spousta nástrojů schopných tento problém efektivně řešit používáním správně projektové struktury, sestavovacích nástrojů a nástrojů pro správu závislostí. Jmenujme například Apache Ant společně s Apache Ivy, Gradle nebo třeba Apache Maven.

Apache Maven jsem použil při implementaci všech komponent aplikace.

⁴⁸<https://mahout.apache.org/users/basics/mahout-collections.html>

⁴⁹<http://projects.spring.io/spring-framework>

2.3 Realizace doporučovací platformy

Následující kapitola se zaměřuje na popis programátorských postupů, které jsem použil při implementaci systému.

2.3.1 Recommeng systém

Adaptibilní systém poběží na serveru jako samostatná *Java Application* s názvem **Ensemble**.

2.3.1.1 Zavedení systému

Poté, co je aplikace spuštěna voláním metody `main()` třídy **EnsembleApp**, je v této metodě následně volána metoda `loadEnsembleApplication()` abstraktní rodičovské třídy **EnsembleAppBase**.

Metoda `loadConsoleApplication()` hraje roli zavaděče aplikace, neboť postupným voláním v sobě obsažených metod zavádí do provozu celý systém (vytvoření instance řídicí třídy, napojení na databázi, inicializace API a spuštění asynchronního serveru). Hlavní řídicí třídou aplikace je třída **ApplicationBean**. Jejím prostřednictvím je zavedena vrstva pro obsluhu zpráv i komponenty pro komunikaci s datovým úložištěm. Třída je zavedena z aplikačního kontextu frameworku Spring.

Ten je možné velice jednoduše konfigurovat pomocí anotací ve třídě **AppConfig**:

```
@Configuration
@EnableScheduling
@ComponentScan(basePackages = {
    "cz.cvut.bouchjal.ensemble.spring"
})
@PropertySource("classpath:application.properties")
public class AppConfig {
    ...
}
```

Anotace `@EnableScheduling` a `@ComponentScan` využijeme pro pravidelné ukládání stavu aplikace 2.3.1.7, anotaci `@PropertySource` zase pro možnosti parametrizace systému 2.3.1.2.

2.3.1.2 Parametrizace

Pro účely experimentování se systémem, volbu databázového úložiště a testování funkčnosti s různě volenou konfigurací je nutné načítat konfiguraci z editovatelného *properties* souboru. K tomu jsem využil Spring bean **PropertySourcesPlaceholderConfigurer**.

Konfigurační vlastnosti jsou do souboru *application.properties* přidávány ve formátu:

```
storage=cassandra
```

2. PRAKTICKÁ ČÁST

```
#storage=jvm

ensemble.machine.rate=0.5
ensemble.feedback.possitive.best=1.0
```

Konkrétní načítání v programu je pak díky použití `PropertySourcesPlaceholderConfigurer` velice jednoduché:

```
this.rate = Double.parseDouble(env.getProperty("ensemble.machine.
    rate"));
this.possitiveFeedback = Double.parseDouble(env.getProperty("
    ensemble.feedback.possitive.best"));
```

2.3.1.3 Vrstva pro obsluhu zpráv

Následující text popisuje postup, jakým jsem realizoval vrstvu pro obsluhu zpráv pomocí síťové knihovny ZeroMQ.

Většinová funkcionalita je řešena třídou `AsynchronousServer` (obsahující též vnitřní třídu **ServerWorker**) v programovém balíčku:

```
cz.cvut.fit.bouchjal.ensemble.socket
```

Postup tvorby by se dal shrnout do tří kroků:

1. rozhodnutí o komunikačním protokolu
2. definice síťové infrastruktury
3. realizace vzoru pro zasílání asynchronních zpráv REQ/REP

Rozhodnutí o komunikačním protokolu V prvním kroku bylo nutné rozhodnout o tom, jakým způsobem bude probíhat přenos dat směrem k Recommeng systému a naopak. Ze čtyř protokolů, jimiž disponuje ZeroMQ, jsem pro přenos dat zvolil síťový protokol **TCP**, a to z toho důvodu, že dle návrhu architektury by měl adaptibilní systém naslouchat na serveru a uživatelé s ním mít možnost navazovat spojení zvenčí mimo server.

Mezi komunikujícími klienty a Recommeng aplikací na serveru jsou vytvářena jednotlivá spojení a data jsou z jednoho koncového bodu na druhý přenášena ve formě bajtů.

Díky ZeroMQ API stačí připravit kontext, socket a metodě `bind()` nastavit adresu serveru s příslušným portem. Sama metoda se pak postará o zbylou práci (vytvoření endpointu pro příjem jednotlivých spojení a navázání na socket).

```
ZContext ctx = new ZContext();
// Frontend socket talks to clients over TCP
Socket frontend = ctx.createSocket(ZMQ.ROUTER);
frontend.bind("tcp://" + host + ":" + port);
```

Definice síťové infrastruktury Propojení jednotlivých síťových komponent vychází z nativní povahy architektury Klient-Server. Server zastává roli stabilnější komponenty v síti, bude tedy přijímat spojení (viz ukázka s metodou `bind()` výše). Zároveň bude nutné umístit mezi server a připojující se klienty prostředníka, jehož úkolem obsluha všech žádostí na server a zasílání odpovědí zpět klientům.

V případě více připojených klientů bude ZeroMQ automaticky obstarávat obsluhu všech příchozích žádostí.

Realizace vzoru pro zasílání zpráv REQ/REP Pro zasílání zpráv jsem nejprve zvolil obousměrně komunikující vzor *Request Reply*. Toto paradigma je známé z většiny serverových typů⁵⁰. Klient používá vlastní socket typu **ZMQ.REQ** k inicializaci žádosti, kterou následně odesílá na server. Server též užívá vlastního socketu **ZMQ.REP** ke čtení příchozí žádosti, po které zasílá odpověď.

Problém je, že vzor Request-Reply toho v základní variantě mnoho neumožňuje, proto bylo nutné umožnit asynchronní komunikaci implementací rozšíření v podobě socketů **ROUTER** a **DEALER** (dříve nazývány jako XREP a XREQ).

Řešení spočívá ve vytvoření více pracovních vláken (*workers*) souběžně řešících příchozí požadavky. Za tímto účelem je nutné vytvořit v serverovém vlákně socket typu DEALER, kterému přiřadíme komunikační protokol *inproc://*.

Na serverové straně probíhá komunikace následovně:

```
// Frontend socket talks to clients over TCP
Socket frontend = ctx.createSocket(ZMQ.ROUTER);
frontend.bind("tcp://" + host + ":" + port);

// Backend socket talks to workers over inproc
Socket backend = ctx.createSocket(ZMQ.DEALER);
backend.bind("inproc://backend");

// Launch pool of worker threads, precise number is not critical
for (int threadNbr = 0; threadNbr < 5; threadNbr++) {
    new Thread(new ServerWorker(threadNbr, ctx, api, new
        RequestHandlerJson(), new ResponseHandlerJson())).start();
}

// Connect backend to frontend via a proxy
ZMQ.proxy(frontend, backend, null);
```

Kvůli podpoře více TCP spojení utvářených vůči serveru je nutné předřadit před socket typu DEALER ještě další typ socketu, kterým je ROUTER (byl vidět již v ukázce 2.3.1.3) hrající roli frontend socketu.

⁵⁰HTTP, POP či IMAP

ROUTER přiřazuje vnitřní identifikátor každému k němu se připojujícímu socketu a následně obdrženou zprávu předává dále prostřednictvím socketu typu DEALER (backend socket) na jedno ze svých pracovních vláken.

Pracovním vláknům jsou přes parametry předány instance třídy **RequestHandlerJson** a **ResponseHandlerJson()**, takže jsou schopny obsluhovat příchozí žádosti v tomto formátu.

O obsluhu požadavků a správnou komunikaci frontend socketů s backend sockety se stará *ZMQ.proxy*, který hraje roli prostředníka zmíněného výše 2.3.1.3.

Pracovní vlákna (ServerWorker) používají též komunikační protokol inproc a socket typu DEALER.

```
Socket worker = ctx.createSocket(ZMQ.DEALER);  
worker.connect("inproc://backend");
```

Komunikace probíhá tak, že DEALER komunikuje s DEALEREM. Oproti serverovému vlákně, který ale používal pro inproc spojení metodu *bind()*, využívají pracovní vlákna metodu *connect()*, čili se k němu připojují, přijímají zprávy a starají se o jejich vyřízení.

Po navázání spojení je v těle metody *run()* pracovních vláken realizována veškerá komunikace s logikou systému. Dochází zde k předávání zpráv jednotlivým metodám systémového API. Bližším popisem se zabývá 2.3.1.3.

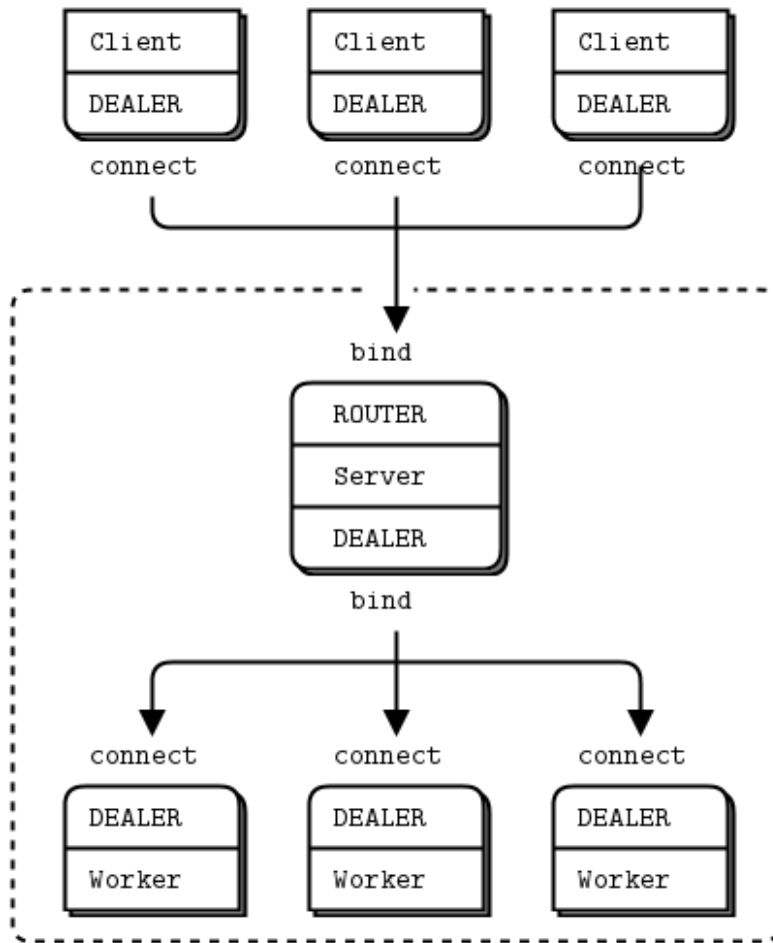
Obsloužené zprávy jsou poté zasílány zpět na serverové vlákno, které je přeposílá komunikujícím klientům

Správnou synchronizaci vláken má na starosti již zmíněná *ZMQ.proxy*. To je jedna z pokročilých vlastností ZeroMQ – pro vývoj vícevláknových aplikací nejsou potřeba žádné mutexy, zámky, ani jakékoliv další formy komunikace [13].

Technika zasílání zpráv a ServerWorker O několik řádků výše bylo vysvětleno, jakým způsobem jsou na serveru obsluhovány příchozí žádosti klientů. Nyní již víme, že tuto funkcionalitu mají na starosti pracovní vlákna typu **ServerWorker** a řekneme si, jakým způsobem jsou žádosti zpracovávány.

Vláknová metoda *run()* má na svědomí veškerou obsluhu žádosti. Každý jednotlivý *worker* tak v sobě udržuje kontext komunikace a pokud je na vstupu validní žádost, pro její zpracování je vyvolána příslušná operace rozhraní systému Recommeng. Sestavená odpověď je zaslána zpět klientovi.

```
try {  
    Operation op = requestHandler.handleMessage(request);  
    if (op.validateOperation()) {  
        try {  
            Reply reply = op.executeOperation(api);  
            responseHandler.setReply(reply);  
        } catch (Exception ex) {  
            responseHandler.createInternalErrorReply("Internal_error  
                .");  
        }  
    }  
}
```



Obrázek 2.7: Vícevláknový asynchronní server s využitím ROUTER a DEALER. Zdroj: [13]

```

    } else {
        responseHandler.createErrorReply(op.getErrorMessage());
    }
} catch (MessageFormatException | IOException ex) {
    responseHandler.createErrorReply(ex.getMessage());
} catch (NullPointerException ex) {
    responseHandler.createErrorReply("Unrecognized_operation.");
}

```

Výsledkem zpracování zprávy je operace. Spuštění vhodné operace je realizováno návrhovým vzorem Command. **Operation** je rozhraní deklarující metody pro validaci operace (`validateOperation()`) a její vykonání (`executeOperation()`).

Každá třída implementující toto rozhraní je pak konkrétní operací zasíla-

2. PRAKTICKÁ ČÁST

nou na rozhraní systému.

Všechny typy podporovaných operací se nacházejí v aplikaci Ensemble v balíčku:

```
cz.cvut.fit.bouchjal.ensemble.operation
```

Jedná se o třídy splňující funkcionalitu dle funkčních požadavků 2.1.1. Jsou jimi například:

- `OperationCreateBanditCollection`
- `OperationCreateBanditSuperCollection`
- `OperationDetectBestBandit`
- `OperationFeedbackSupercollectionBandit`
- `OperationUseSupercollectionBandit`

Výsledkem vykonání operace je vždy odpověď (třída **Reply** obsahující stavový kód, tělo zprávy, případně další hodnoty jako seznam algoritmů apod.), která je pomocí třídy **ResponseHandlerDefault** prezentována zpět klientovi.

2.3.1.4 API

API systému Recommeng reprezentuje interface **EnsembleApiFacade**. Podporované metody jsou vidět na obrázku 2.6.

Tyto metody jsou volány prostřednictvím operací z vrstvy pro obsluhu zpráv 2.3.1.3. Metody jsou přímo napojeny na bayesovské strategie, které jsou jedněmi ze stěžejních součástí systému.

Ukázkovou metodou je například metoda zprostředkovávající detekci nejlepšího algoritmu ze zadané kolekce. Nejprve proběhne ověření, zda v systému opravdu taková kolekce, vůči které je žádost směřována, existuje. Následně dojde k provedení žádosti a vytvoření odpovědi.

```
@Override
public Reply detectBestBandit(String banditCollectionId, String
    filter) {
    ResponseHandler responseHandler = new ResponseHandlerJson();
    Reply reply;

    if (existBanditSetId(banditCollectionId)) {
        BayesianStrategy strategyToUse = getStrategyByCollectionId(
            banditCollectionId);
        if ("best".equals(filter)) {
            Bandit banditToChoose = strategyToUse.sampleBandits();
            responseHandler.createSuccessReplyDetection("You_should_
                choose_bandit_with_name_" + banditToChoose.getName()
                + "_now._He_is_the_best_for_this_context.",
                banditToChoose.getId(), banditToChoose.getName(),
                strategyToUse.getId());
        }
    }
}
```

```

    } else {
        List<Bandit> banditsByOrder = strategyToUse.
            sampleBanditsAll(banditCollectionId);
        responseHandler.createSuccessReply("Bandit_IDS_by_order:
            _" + banditsByOrder.toString());
    }
    reply = responseHandler.returnReply();
} else {
    responseHandler.createNotFoundReply("There_is_no_collection_
        with_ID_" + banditCollectionId + "_in_application.");
    reply = responseHandler.returnReply();
}
return reply;
}

```

Klient, který žádal systém o takovéto doporučení, obdrží zprávu ve tvaru:

```

{"message":"You should choose bandit with name: latest. He is the
    best for this context.", "status":200, "collection":1, "banditId":"
    latest", "bestBandit":2}

```

Tento výstup lze použít jako parametry pro další dotaz (například pro zaslání zpětné vazby o zvolení algoritmu a posléze žádosti o doporučení obsahu navrácenou metodou).

2.3.1.5 Bayesovská strategie pro kombinování metod

Strategii mají na starosti třídy nacházející se v balíčku:

```
cz.cvut.fit.bouchja1.ensemble.bandits
```

Bandit Bandit je třída reprezentující jednoho konkrétní banditu. Každý bandita má svůj identifikátor a atributy pro zaznamenávání výher a pokusů během jednotlivých her. Ty reprezentují jeho dosavadní znalosti.

BanditsMachine BanditsMachine je třída reprezentující herní automat. Každá samostatná bayesovská strategie (BayesianStrategy) má právě jeden herní automat. Automat obsahuje seznam banditů a číselné konfigurace pro výpočty zpětné vazby a míry učení. Konfigurace se nastavuje ve vnějším soubor (viz 2.3.1.2).

SuperBayesianStrategy SuperBayesianStrategy je třída reprezentující super kolekci více bayesovských strategií. V případě přítomnosti dvou bayesovských strategií, například kontextových atributů „ráno“ a „Evropa“, může z těchto strategií vytvořit super strategii „ráno v Evropě“.

BayesianStrategy BayesianStrategy je třída reprezentující online učící strategii k řešení strategie Multi-Armed Bandit 1.2.1.15. Vzhledem k přítomnosti super strategií je již jasné, že v systému může nezávisle na sobě fungovat více bayesovských strategií.

2.3.1.6 Důležité metody bayesovské strategie pro kombinování metod

Důležitou metodou třídy BayesianStrategy je metoda `sampleBandits()` starající se jednak o výběr z prior pravděpodobností distribucí banditů a následně o volbu nejlepšího z nich. Jedná se o implementaci teorie probírané v 1.2.4.

```
public Bandit sampleBandits() {
    //sample from the bandits's priors, and select the largest
    sample
    for (Integer bandit : banditsMachine.getBanditList().keySet()) {
        BetaDistribution beta = new BetaDistribution(1 +
            banditsMachine.getBanditAtIndex(bandit).getSuccesses(),
            1 + banditsMachine.getBanditAtIndex(bandit).getTrials()
            - banditsMachine.getBanditAtIndex(bandit).getSuccesses()
        );
        double inverseDistribution = beta.inverseCumulativeProbability(
            Math.random());
        roundInverseDistributions.add(inverseDistribution);
    }
    int banditIndexChoice = MathUtil.argmax(
        roundInverseDistributions);
    roundInverseDistributions.clear();
    return banditsMachine.getBanditAtIndex(banditIndexChoice);
}
```

Do rozdělení vstupují jako parametry dosavadní výsledky jednotlivých algoritmů z kolekce a dochází k výpočtu kvantilových funkcí 1.2.1.7 pro každý algoritmus, kdy je nakonec vybrán algoritmus s největší hodnotou a navrácen jako nejlepší možnost.

Dalšími metodami jsou pak *`selectBandit(String banditId)`* zpracovávající zpětnou vazbu o zvolení doporučeného algoritmu uživatelem a *`calculateFeedback(String banditCollectionId, String banditId, String feedbackValue)`*.

```
public void selectBandit(String banditId) {
    Bandit banditToUpdate = banditsMachine.getBanditAtIndex(Integer.
        parseInt(banditId));
    banditsMachine.updateTrials(banditToUpdate,
        totalTrialsCountsToBoost);
}

public void calculateFeedback(String banditCollectionId, String
    banditId, String feedbackValue) {
    Bandit banditToUpdate = banditsMachine.getBanditAtIndex(Integer.
        parseInt(banditId));
}
```



```

banditsMachine.updateAllStatsInRound(banditToUpdate,
    feedbackValue);
}

```

Těmito metodami je zajištěn přepočítání hodnot, které si uchovávají jednotlivými algoritmy (trials, successes) jako svůj vnitřní stav vyjadřující dosud načerpané znalosti. Při každém přepočtu jsou tyto hodnoty ještě navíc násobeny konstantou určující míru učení 1.2.4.2.

V případě super strategie (třída `SuperBayesianStrategy`) je poměrně důležitou metodou `chooseBestFromSuperStrategy()`. Ze zadané super kolekce je na základě odhadů vybrán vždy jeden nejlepší algoritmus z jejích kolekcí a pomocnou metodou `bestBanditFromCombination(List<Bandit> banditsCombination)` je spočtena četnost výskytů jednotlivých algoritmů (navracených jako nejlepší) z kolekcí. V případě shody stejného výskytu dvou a více algoritmů je na základě náhodného výběru zvolena jedna, která je doporučena uživateli.

2.3.1.7 Pravidelné ukládání časových snímků

Pravidelné ukládání časových snímků jsem realizoval Spring démonem (*cron*). Četnost jeho spouštění je možné volit přes parametr 2.3.1.2 v konfiguračním souboru aplikace. K tomuto účelu jsem vytvořil třídu **ScheduledJob** spouštějící pravidelný časový úkol, který zprostředkuje persistenci aktuálního stavu aplikace (tedy všech běžících bayesovských strategií), který je v té době v paměti, do databáze.

Samozřejmě za předpokladu, že je použití databáze v konfiguračním souboru nastaveno. V opačném případě by tovární metoda třídy **StorageFactory** zvolila k použití jinou formu práce s daty.

```

public static IStorage getStorage(Environment env) {
    switch (env.getProperty("storage")) {
        case "cassandra" :
            return new CassandraStorage(env.getProperty("cassandra.
                host"), env.getProperty("cassandra.keyspace"));
        default :
            return new JvmStorage();
    }
}

```

Tento přístup vede k rozšiřitelnosti o další typy databází, které by mohl systém v budoucnu podporovat.

2.3.1.8 Spojení s databází

Úložiště je realizováno třídou **CassandraStorage**. Během jejího zavádění do systému při startu aplikace jsou v konstruktoru volány dvě metody – `connect()` a `createSchema()`. V prvním případě dochází ke spojení s databázovým klastrem, pomocí kterého je následně získána *session*.

2. PRAKTICKÁ ČÁST

Pomocí session a její metody *execute()* lze vykonávat jednotlivé dotazy.

Použita je hned v metodě *createSchema()*, která je zodpovědná za vytvoření datového modelu navrženého pro systém Recommeng.

Ukázka vytvoření keyspace pro všechny column families aplikace:

```
private void createSchema() {
    session.execute("CREATE_KEYSPACE_IF_NOT_EXISTS_" + keyspace + "_"
        WITH_replication_"
        + "={'class':'SimpleStrategy','replication_factor':3};
    ");
```

Column families jsem pro účely aplikace vytvořil tři – *collection*, *super-collection* a *algorithm*.

Třída implementuje několik metod svého rozhraní *IStorage* pro uložení aktuálního stavu aplikace, načtení poslední známé konfigurace a vytvoření kolekce banditů. Při realizaci funkcionality metod je bohatě využíváno možností, které nabízí DataStax driver pomocí CQL, například tvorba předpřipravených dotazů konstrukcí **PreparedStatement**.

Následuje příklad ukládání aktuálního stavu z paměti systému do databáze.

```
@Override
public void saveCurrentState(LastEnsembleConfiguration strategies) {
    if (strategies != null) {
        for (BayesianStrategy strategy : strategies.getStrategies().
            values()) {
            Map<Integer, Bandit> bandits = strategy.
                getBanditsMachine().getBanditList();
            if (bandits.size() > 0) {
                PreparedStatement statement = session.prepare(
                    "INSERT INTO_" + keyspace + ".algorithm_"
                    + "(collection_id,algorithm_id,
                        algorithm_name,event_time,
                        trials_rate,
                        successes_rate)"
                    + "VALUES_(?,_,_,_,_,_,_?);");

                Date actualDate = Calendar.getInstance().getTime();

                for (Map.Entry<Integer, Bandit> entry : bandits.
                    entrySet()) {
                    BoundStatement boundStatement = new
                        BoundStatement(statement);
                    session.execute(boundStatement.bind(
                        strategy.getId(),
                        entry.getValue().getId(),
                        entry.getValue().getName(),
                        actualDate,
                        entry.getValue().getSuccesses()));
                    logger.info("Time:_" + actualDate + "Saving_
                        bandit_with_ID_" + entry.getValue().getName()
                        + "_into_collection:__" + strategy.
                            getCollectionId());
                }
            }
        }
    }
}
```

```

        ...
        ...
    }

```

2.3.2 RESTful API

RESTful API je realizováno jako *Java Web Application* s názvem **ensemble-RestApi**.

Důležitou roli v modulu hraje přítomnost a správná konfigurace tzv. *Web Application Deployment Descriptor* (soubor **/WEB-INF/web.xml**). V tomto souboru je definováno vše, co by měl server, na kterém aplikace poběží, o aplikaci vědět (informace o příslušných servletech, filtrech apod.).

Pro potřeby modulu RESTful API jsem v tomto souboru definoval *listener*⁵¹ pro *Spring*. Dále *servlet* pro *Jersey*, jemuž jsem parametrem předal třídu **RecommengApplication**, a nastavil příslušné mapování servletu na specifickou URL.

```

<servlet>
  <servlet-name>jersey-servlet</servlet-name>
  <servlet-class>
    org.glassfish.jersey.servlet.ServletContainer
  </servlet-class>
  <init-param>
    <param-name>javax.ws.rs.Application</param-name>
    <param-value>cz.cvut.fit.bouchjal.mi_dip.rest.client.service
      .RecommengApplication</param-value>
  </init-param>
  <load-on-startup>1</load-on-startup>
</servlet>

<servlet-mapping>
  <servlet-name>jersey-servlet</servlet-name>
  <url-pattern>/recommeng/*</url-pattern>
</servlet-mapping>

```

Pomocí třídy **RecommengApplication**, rozšiřující třídu **ResourceConfig** frameworku *Jersey*, jsem zaregistroval všechny aplikační komponenty, které budou použity JAX-RS aplikací, tedy vytvářeným RESTful API.

```

public RecommengApplication() {
    register(RequestContextFilter.class);
    register(AlgorithmEndpointImpl.class);
    register(ArticleEndpointImpl.class);
    register(EnsembleEndpointImpl.class);
    register(JacksonFeature.class);
}

```

Třída registruje následující komponenty:

⁵¹Listener je aplikace, jež vyčkává na vznik nějaké události. Jakmile událost nastane, listener zareaguje a převezme její řízení.

2. PRAKTICKÁ ČÁST

- `org.glassfish.jersey.server.spring.scope.RequestContextFilter`

Jedná se o Spring filter, který poskytuje propojení mezi JAX-RS a Spring žádostmi.

- `cz.cvut.fit.bouchja1.mi_dip.rest.client.endpoint.AlgorithmEndpointImpl`
- `cz.cvut.fit.bouchja1.mi_dip.rest.client.endpoint.ArticleEndpointImpl`
- `cz.cvut.fit.bouchja1.mi_dip.rest.client.endpoint.EnsembleEndpointImpl`

Tyto tři třídy jsou služby REST API.

- `org.glassfish.jersey.jackson.JacksonFeature`

Registruje Jackson JSON poskytovatele pro zpracování příchozích dat ve formátu JSON.

Nakonec jsem definoval filtr *CharacterEncodingFilter* s UTF-8 kódováním pro všechny URL splňující vzor:

```
<filter-mapping>
  <filter-name>CharacterEncodingFilter</filter-name>
  <url-pattern>/*</url-pattern>
</filter-mapping>
```

2.3.2.1 Realizace endpointů

Třídy z balíčku:

`cz.cvut.fit.bouchja1.mi_dip.rest.client.endpoint`

jsou služby typu REST obsluhující všechny žádosti směřující na jimi mapované zdroje. Programově má každá tato třída anotaci definující její relativní URI cestu. V případě třídy **ArticleEndpointImpl** vypadá definice následovně:

```
@Component
@Path(ArticleEndpointImpl.ENDPOINT_PATH)
public class ArticleEndpointImpl implements ArticleEndpoint {

    public static final String ENDPOINT_PATH = "/articles";
    public static final String USER_ARTICLE_PATH = "{coreId}/document";

    @Autowired
    private ArticleEndpointHelper articleEndpointHelper;
    ...
}
```

Anotace `@Path` v tomto případě značí, že třída se bude nacházet na URI `/recommeng/articles`.

Jedna z jejích služeb umožňující vytvářet či aktualizovat informace o zpětné vazbě u dokumentu v indexu (zasíláním žádostí na URI zdroje `/recommeng/articles/{coreId}/document`) je definována takto:

```
@Path(USER_ARTICLE_PATH)
@Consumes({MediaType.APPLICATION_JSON})
@Produces({MediaType.APPLICATION_JSON, MediaType.APPLICATION_XML})
@POST
@Override
public Response updateBehavioralToArticle(@PathParam("coreId")
    String coreId, UserArticleDocument userArticle) {
    return articleEndpointHelper.updateBehavioralToArticle(coreId,
        userArticle);
}
```

O samotné reprezentaci zdroje referuje příslušná podpodsekcce 2.3.2.2.

Provádění má na starosti v tomto případě **ArticleEndpointHelper**. Ostatní služby mají též své helpery – třídy pomáhající jim v obsluze žádosti zodpovědné za vytváření odpovědí, které rozšiřují rodičovskou třídu **CommonEndpointHelper** implementující rozhraní **EndpointHelper**.

Rozhraní deklaruje více metod souvisejících s odpovědí, například metody pro vytvoření odpovědi dle typu návratového kódu a sestavení odpovědi.

```
public Response getNotFoundResponse(String message);
public Response build(ResponseBuilder builder, String message);
```

Proces tvorby odpovědi pak vypadá tak, že konkrétní helper volá ve své metodě službu zajišťující komunikaci s indexem. V případě metody `updateBehavioralToArticle(String coreId, UserArticleDocument userArticle)` pro vkládání vztahu uživatel-hodnocení-článek do indexu je po provedení příslušných kontrol, kterými jsou validace vstupních dat a podobně, vytvořena odpověď.

```
public Response updateBehavioralToArticle(String coreId,
    UserArticleDocument userArticle) {
    Response resp = null;
    if (solrService.isServerCoreFromPool(coreId)) {
        String message = UserArticleValidator.validateUserArticle(
            userArticle);
        if ("success".equals(message)) {
            try {
                solrService.putUserArticle(coreId, userArticle);
                resp = getOkResponse("User-rating-item_successfully_
                    added_into_Solr_core.");
            } catch (SolrServerException ex) {
                logger.error(ex);
                resp = getServerError(ex.getMessage());
            } catch (IOException ex) {
                logger.error(ex);
                resp = getServerError(ex.getMessage());
            }
        }
        ...
    }
```

2. PRAKTICKÁ ČÁST

```
        ...  
        return resp;  
    }
```

Helper tedy volá dle výsledků programu jednu z metod své rodičovské třídy (například *getBadRequestResponse(message)*) s příslušnou zprávou v parametru. Metodou *build(ResponseBuilder builder, String message)* je pak vytvářena samotná odpověď.

```
@Override  
public Response getNotFoundResponse(String message) {  
    return build(Response.status(Response.Status.NOT_FOUND), message  
    );  
}  
  
@Override  
public Response build(ResponseBuilder builder, String message) {  
    return builder.entity(message).build();  
}
```

2.3.2.2 Reprezentace zdrojů

Zdroje jsou jedním ze stěžejních konceptů architektury REST. Kromě toho, že jsou adresovány příslušnými globálními identifikátory (v HTTP realizaci např. pomocí URI), mají též jednu nebo více reprezentací, ve které jsou vystaveny okolnímu světu, a pomocí které je možné s těmito zdroji manipulovat.

V modulu pro RESTful API reprezentují zdroje jako třídy v Javě. Například při tvorbě zdroje */recommeng/articles/coreId/document* je vytvářena třída **UserArticleDocument**.

```
@XmlRootElement  
public class UserArticleDocument implements Serializable {  
  
    private static final long serialVersionUID =  
        -8039686696076337053L;  
    private String articleId;  
    private int userId;  
    private double rating;  
    private int groupId;  
    ...  
}
```

Reprezentace tohoto zdroje ve formátu JSON by pak mohla vypadat například takto:

```
{  
    "articleId":"http://somedomain.org/somearticle.html",  
    "group":123,  
    "userId":42,  
    "userRating":5.0  
}
```

2.3.2.3 Komunikace s Recommeng systémem

Vytvořil jsem též službu **EnsembleEndpointImpl** pro komunikaci s Recommeng systémem. Rozdíl oproti zbylým dvou službám (**AlgorithmEndpointImpl** a **ArticlesEndpointImpl**) je v rozdílném chování a funkčnosti její pomocné třídy **EnsembleZeroMqHelper**.

Tato služba, ač běžící jako součást serverové aplikace, hraje vůči Recommeng systému roli klientskou. Pro vnější uživatele zastává tradiční roli serveru.

EnsembleZeroMqHelper zpracovává příchozí žádosti od uživatelů prostřednictvím RESTful API. Poté transformuje do JSON formátu žádost, kterou umí Recommeng systém zpracovat.

```
EnsembleRequest req = new EnsembleRequest();
req.setMethod("POST");
req.setPath("/ensemble/services/collection");
req.setBody("collectionId=" + banditCollection.getName() + "&bandits=" + formatBanditIds(banditCollection.getBanditIds()));
```

Pro spojení se systémem je vytvořeno vlákno **ClientTask**, jemuž je parametrem předána zpráva ve formátu JSON, a které volá metodu *call()*.

```
ExecutorService executor = Executors.newSingleThreadExecutor();
Future<String> result = executor.submit(new ClientTask(req.toString()));

try {
    resp = buildResponse(result.get());
} catch (Exception ex) {
    resp = getServerError(ex.getMessage());
}
```

V těle metody *call* se vytvoří klientský socket prostřednictvím *tcp* a předřazená žádost je odeslána do systému. **ClientTask** pak vyčkává na odpověď (*resp*). Poté, co ji obdrží a zpracuje do formátu HTTP odpovědi (*buildResponse()*), ji vrací zpět žádajícímu klientovi.

```
ZContext ctx = new ZContext();
Socket client = ctx.createSocket(ZMQ.DEALER);
client.connect("tcp://localhost:5555");
```

2.3.2.4 Komunikace sady algoritmů pro doporučování

Doporučení je vyvoláno klientskou žádostí na rozhraní reprezentované třídou **AlgorithmEndpointImpl** a její zpracování zajišťuje metoda *recommend()*. Metoda má několik vstupních parametrů:

```
@Path(ALGORITHM_PATH)
@Produces({MediaType.APPLICATION_JSON, MediaType.APPLICATION_XML})
@GET
@Override
public Response recommend(@PathParam("coreId") String coreId,
    @PathParam("algorithmId") String algorithmId,
```

2. PRAKTICKÁ ČÁST

```
@QueryParam(value = "groupId") int groupId,  
@QueryParam(value = "userId") int userId,  
@QueryParam(value = "documentId") String documentId,  
@QueryParam(value = "text") String text,  
@QueryParam(value = "limit") int limit) {
```

Jak vidno, metoda umí v žádosti přijmout spoustu parametrů. Při každém vyvolání jsou všechny existující příchozí parametry uloženy do mapy a ta je následně předána tovární metodě, jejímž cílem je vytvořit na základě uživatelského vstupu vhodnou instanci třídy pro doporučení obsahu.

```
Map<String, String> algorithmParams = createAlgorithmParams(coreId,  
    algorithmId, groupId, userId, documentId, text, limit);  
IAlgorithm algorithm = AlgorithmFactory.getAlgorithm(algorithmId,  
    algorithmParams);  
  
if (algorithm == null) {  
    return algorithmEndpointHelper.createAlgorithmNotFound();  
}  
else return algorithmEndpointHelper.getRecommendation(algorithm);
```

Služby využívají pro zpracování žádostí a vytváření odpovědí pomocnou třídu **AlgorithmEndpointHelper** (podobně jako 2.3.2.3). Tato třída v sobě navíc udržuje odkaz v podobě instance třídy **SolrService**, kterou předává třídám implementující jednotlivé doporučovací algoritmy (viz dále v podsekcí 2.3.3).

Třída SolrService Třída implementuje metody pro komunikaci s Apache Solr a funguje též jako pool instancí serverových spojení pro různá jádra Solr. Vytvoření poolu bylo nutností kvůli možnosti znovu použít již vytvořené instance třídy **HttpSolrServer**.

Jejími atributy jsou:

```
private String serverUrl;  
private Map<String, HttpSolrServer> validServers = new HashMap<  
    String, HttpSolrServer>();  
private Set<String> validSolrCores;
```

HttpSolrServer je thread-safe⁵² a pokud jej použijeme k vytvoření nové instance s URL některého z jader Solr v parametru, je nutné tuto instanci znovu použít pro všechny žádosti směřující na danou URL [11].

V opačném případě, kdy jsou instance vytvářeny bez jakéhokoli rozmyslu a strategie, hrozí *leak* připojení [35].

Validní jádra Solr pro připojení do poolu se nastavují v souboru aplikačního kontextu pro Spring:

```
<bean id="solrService" class="cz.cvut.fit.bouchjal.mi_dip.rest.  
    client.solr.SolrService">
```

⁵²Programové operace jsou prováděny správně i tehdy, kdy jsou prováděny více vlákny současně.


```

<property name="serverUrl" value="http://localhost:8089/solr/" />
<property name="validSolrCores">
  <set>
    <value>mi_dip_core1</value>
    <value>mi_dip_core2</value>
  </set>
</property>
</bean>

```

SolrService obsahuje také metodu *createValidSolrServers()*, jež je anotována jako *@PostConstruct*.

Metoda s anotací *@PostConstruct* je vyvolána ještě před samotným vytvořením instance třídy. Účelem je naplnění poolu příslušnými validními instancemi spojení.

```

Iterator<String> validCores = validSolrCores.iterator();
while (validCores.hasNext()) {
    String core = validCores.next();
    validServers.put(core, new HttpSolrServer(serverUrl + core));
}

```

Kdykoliv je pak metodách tříd doporučvacích algoritmů navazováno spojení se serverem, dle zadaného identifikátoru jádra (*coreId*) se bere instanci z poolu, který má parametry *HashMap<String, HttpSolrServer>*.

```
HttpSolrServer server = solrService.getServerFromPool(coreId);
```

2.3.3 Algoritmy pro doporučování obsahu pomocí Apache Solr

Třídami, které jsou schopné různými způsoby doporučovat obsah, jsou:

- AlgorithmWeightedRating
- AlgorithmLatest
- AlgorithmMlt
- AlgorithmRandom
- AlgorithmUserBasedCf
- AlgorithmItemBasedCf

Všechny tyto třídy implementují rozhraní *IAlgorithm* a veškerá logika doporučení je vykonávána v implementacích metody *recommend()* konkrétních doporučvacích tříd a jejich pomocných metod.

2.3.3.1 Reprezentace dokumentů pro účely doporučování

Pro potřeby modelové úlohy bylo nutné zamyslet se nad reprezentací a strukturou dat v Apache Solr. Z požadavků a technických možností Solr vyplynulo

2. PRAKTICKÁ ČÁST

přímočaré řešení spočívající ve vytvoření dvou jader - jedno pro vkládání a uchovávání článků (*articleCore*), druhé pro zaznamenávání interakce uživatele s doporučenými články (*behavioralCore*).

Jádro pro články budou při svých doporučeních využívat obsahově založené algoritmy (random, latest, more like this), jádro pro interakce budou využívat algoritmy pracující s uživatelskými hodnoceními (nejlépe hodnocené, kolaborativní filtrování).

Article core Jakýkoliv nově vytvořený článek je zaslán do tohoto jádra a přidán jako dokument s následující strukturou:

```
<doc>
  <int name="id">1</int>
  <str name="articleId">http://pnjj5cr4f9 f500k9vld.org</str>
  <str name="articleText">695t5r2fgy something.</str>
  <int name="group">789</int>
  <date name="time">2012-09-19T09:42:12Z</date>
  <long name="_version_">1467289878138978304</long>
</doc>
```

Behavioral core Po každé uživatelské interakci se článkem je tato interakce přidána do jádra jako trojice `userId`, `articleId` a `userId_rating`. Pokud dokument s požadovaným `articleId` není v jádře přítomen, je v něm vytvořen. Pokud přítomen je, proběhne pouze přidání dvojice `userId` a `userId_rating`.

```
<doc>
  <int name="id">6</int>
  <str name="articleId">http://pnjj5cr4f9 f500k9vld.org</str>
  <arr name="userId">
    <int>1</int>
    <int>40</int>
    <int>15</int>
  </arr>
  <int name="group">789</int>
  <float name="1_rating">5.0</float>
  <float name="40_rating">5.0</float>
  <float name="15_rating">5.0</float>
  <float name="weightedRating">5.0</float>
  <long name="_version_">1467370760759672832</long>
</doc>
```

2.3.3.2 Algoritmus náhodného výběru

Náhodný výběr by neměl mít již z podstaty věci příliš složitou implementaci. Rozhodl jsem se proto využít možnosti, kterou nabízí Solr. Rou možností je přidání speciálního typu a pole tohoto typu do schématu⁵³ jádra.

⁵³Soubor `schema.xml` popisující veškeré detaily o tom, které filedy může jádro indexu obsahovat, a jakým způsobem s nimi má být nakládáno při přidávání dokumentů do indexu či dotazování.

```
<fieldType name="random" class="solr.RandomSortField" indexed="true" />
<dynamicField name="random_*" type="random" />
```

Pro dotaz je poté možné využít speciálního vstupu pro řazení výsledků. Solr podporuje parametrem *sort* řazení dokumentů dle specifikovaného pole v indexu. Díky definici náhodného typu lze zaslat jako vstup pro řazení field *random* s náhodným prefixem. Například:

```
q=*&sort=random_12939291%20desc
```

Solr tímto způsobem vyhodnotí pořadí dokumentů dle jména náhodného pole a verze indexu. To tedy znamená, že pokaždé, kdy je použito stejného jména náhodného pole a toho samého indexu (který nebyl mezi dotazy změněn), jsou navraceny ty samé výsledky. Proto jsem byl nucen zanést do dotazu ještě další prvek náhody a to tak, že pro názvy pole využívám náhodného čísla v rozsahu 1 až maximální hodnota celočíselného datového typu.

Programová realizace je pak již triviální:

```
int random = generator.nextInt(Integer.MAX_VALUE) + 1;
String sortOrder = "random\__" + random;

query.setSortField(sortOrder, SolrQuery.ORDER.desc);
```

2.3.3.3 Algoritmus výběru dle nejnovějších položek

Logika řazení funguje stejně jako v případě náhodného výběru výše díky parametru *sort*. S tím rozdílem, že vstupem pro parametr je pole *time* uchovávající datum vytvoření článku.

```
<date name="time">2012-09-19T09:42:12Z</date>
```

Navracené dokumenty jsou tak řazeny dle této hodnoty.

2.3.3.4 Algoritmus výběru nejlépe hodnocených položek

Pro výběr nejlépe hodnocených položek je již zapotřebí použít sofistikovanějšího mechanismu. Nelze se spoléhat na celkovou sumu či aritmetický průměr. Pomocí takového přístupu by totiž například položka, která byla hodnocena tisíckrát se známkou 1 (z 5 možných) byla považována za lepší než například položka hodnocená stokrát, ale vždy se známkou 5.

Rozhodl jsem se použít podobný přístup, jaký využívá známá filmová databáze IMDB⁵⁴.

K výpočtu váženého hodnocení je využito bayesovských odhadů. Výpočet je realizován pomocí následující formule:

$$W = \frac{Rv + Cm}{v + m}$$

⁵⁴<http://www.imdb.com/chart/top>

2. PRAKTICKÁ ČÁST

W značí výsledné vážené hodnocení

R značí průměrné hodnocení položky

v značí počet hodnotitelů položky

m značí minimální počet hodnocení potřebných k objevení se ve výsledku (IMDB pro potřeby výskytu filmu v prvních 250 užívá konstantu 250000)

C značí průměr hodnocení všech položek (IMDB používá hodnotu 7.0)

Výpočet váženého hodnocení probíhá po přidání každé další uživatelské interakce do jádra `behavioralCore`. Přepočítání je nutné, neboť do dokumentů přibývají uživatelé s novými hodnoceními, mění se tak počty a průměrné hodnoty vstupující do vzorce. Mechanismus přepočítávání je realizován v metodě třídy **SolrService**.

```
recalculateWeightedRating(SolrInputDocument sid)
```

Pro výpočet jsou důležitá pole `userId` a `userId_rating` daného dokumentu.

Navrácení seřazených výsledků pak zajišťuje třída **AlgorithmWeightedRating** a nejedná se o nic jiného, než o seřazení dle vstupního parametru *weightedRating*. Stejně jako v předchozích dvou případech.

2.3.3.5 Algoritmus výběru dle podobnosti obsahu

K doporučování dokumentů obsahově podobných jiným dokumentům v indexu mi byly opět velmi nápomocné nativní mechanismy Apache Solr. Tentokrát je řeč o vyhledávací komponentě známé jako *MoreLikeThis*⁵⁵.

Přístup spočívá v přidání request handleru do konfigurace jádra⁵⁶.

```
<requestHandler name="/mlt" class="solr.MoreLikeThisHandler">
</requestHandler>
```

Podobnost je pak počítána na základě jednoho nebo více specifikovaných polí v dotazu. Do handleru lze zasílat velký počet parametrů, například:

`mlt.fl` pro specifikaci pole, které má být použito k výpočtu podobnosti,

`mlt.mintf` pro minimální frekvenci termů dokumentu,

`mlt.minwl` pro minimální délku slova uvažovaného pro výpočet podobnosti.

Realizace tohoto mechanismu se nachází ve třídě **AlgorithmMlt**, kde jsem specifikoval parametry.

⁵⁵<https://wiki.apache.org/solr/MoreLikeThis>

⁵⁶Soubor `solrconfig.xml`.

```
SolrQuery query = new SolrQuery();
query.setRequestHandler("/") + MoreLikeThisParams.MLT);
query.set(MoreLikeThisParams.MATCH_INCLUDE, true);
query.set(MoreLikeThisParams.MIN_DOC_FREQ, 1);
query.set(MoreLikeThisParams.MIN_TERM_FREQ, 1);
query.set(MoreLikeThisParams.MIN_WORD_LEN, 1);
query.set(MoreLikeThisParams.BOOST, false);
query.set(MoreLikeThisParams.SIMILARITY_FIELDS, "articleText");
query.set(MoreLikeThisParams.MAX_QUERY_TERMS, 1000);
query.setRows(limitToQuery);
query.setQuery("articleId:" + document.getFieldValue("articleId"));
query.setFilterQueries("group:" + document.getFieldValue("group"));
```

Jako vstup pro porovnání slouží jeden dokument z jádra.

2.3.3.6 Algoritmus kolaborativního filtrování

Při provádění analýzy stávajících řešení pro doporučování jsem se dozvěděl o knihovně Apache Mahout 2.2.4.1, kterou využívá pro své potřeby systém Mendeley 2.2.4.1, načež jsem se rozhodl pro to ji vyzkoušet.

Řešení budu demonstrovat na user-based přístupu realizovaného třídou **AlgorithmUserBasedCf**.

Nejprve bylo nutné získat z úložiště seznam uživatelských ID a ID dokumentů, které tito uživatelé hodnotili a tato data uložit do kolekce FastByID-Map.

```
FastByIDMap<FastIDSet> userData = new FastByIDMap<FastIDSet>();
```

Každý uživatel byl poté přidán do kolekce a z této kolekce byl vytvořen datový model.

```
userData.put(userRelatedId, new FastIDSet(itemValues));
DataModel model = new GenericBooleanPrefDataModel(userData);
```

Po vytvoření datového modelu je již možné konstruovat doporučení. Na výběr je několik podobnostních metrik, například euklidovská vzdálenost, pearsonův korelační koeficient či log-likelihood. Vzhledem k použití booleovského modelu preferencí jsem zvolil LogLikelihoodSimilarity. Pro doporučení je ještě stanovena sousedská funkce (doporučované položky pro uživatele jsou počítány na základě podobnosti mezi uživatelem a uživateli nacházejícími se v modelu) a následně provedeno doporučení.

```
UserSimilarity similarity = new LogLikelihoodSimilarity(model);
UserNeighborhood neighborhood = new NearestUserNeighborhood(2,
    similarity, model);
long[] neighbors = neighborhood.getUserNeighborhood(Long.parseLong(
    userId));
Recommender recommender = new GenericBooleanPrefUserBasedRecommender
    (model, neighborhood, similarity);
List<RecommendedItem> recommendedItems = recommender.recommend(Long.
    parseLong(userId), limit);
```

Experimentální část

Jednou z mnoha výzev pro někoho, kdo se snaží vybudovat doporučovací systém, je to, že je velice těžké dopředu říct, zda budou naše předpovědi dost přesné. Alespoň do té doby, dokud je nezačneme dělat a nebudeme pozorovat, jak často naši uživatelé přijímají naše návrhy. Je zde obrovský prostor možností (možných metod), z čeho vybírat.

3.1 Testování různých způsobů chování

viz jak jarda vymyslel těch zhruba 5 příkladů, co mohou nastat

3.2 Experimenty

Zhodnocení aplikace a budoucí práce

Závěr

Literatura

- [1] BellKor, AT&T Labs, Inc. – Research. [online], stav ze dne 21.4.2012. Dostupné z: <http://www2.research.att.com/~volinsky/netflix/>
- [2] easyrec: Recommendation Engine. [online], stav ze dne 24.4.2012. Dostupné z: <http://easyrec.org/recommendation-engine>
- [3] How does the Amazon Recommendation feature work? [online], stav ze dne 21.4.2012. Dostupné z: <http://stackoverflow.com/questions/2323768/how-does-the-amazon-recommendation-feature-work>
- [4] Kvantily. [online], stav ze dne 26.4.2012. Dostupné z: <http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~limpouch/sigdat/pravdh/node8.html>
- [5] Mendeley: Recommendation Systems for Academic Literature. [online], stav ze dne 21.4.2012. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/KrisJack/mendeley-recommendation-systems-for-academic-literature>
- [6] Netflix Contest: 1 Million Dollars for Better Recommendations. [online], stav ze dne 21.4.2012. Dostupné z: <http://www.uie.com/brainsparks/2006/10/02/netflix-contest-1-million-dollars-for-better-recommendations/>
- [7] Netflix offers streaming movies to subscribers. [online], stav ze dne 21.4.2012. Dostupné z: <http://arstechnica.com/uncategorized/2007/01/8627/>
- [8] Náhodný výběr. [online], stav ze dne 26.4.2012. Dostupné z: <ftp://math.feld.cvut.cz/pub/prucha/ubmi/predn/u12.pdf>
- [9] Proklik. [online], stav ze dne 21.4.2012. Dostupné z: <http://www.adaptic.cz/znalosti/slovnicek/proklik/>

- [10] Recommender systems, Part 2: Introducing open source engines. [online], stav ze dne 30.4.2012. Dostupné z: <http://www.ibm.com/developerworks/library/os-recommender2/index.html>
- [11] SolrJ. [online], stav ze dne 29.4.2012. Dostupné z: <https://wiki.apache.org/solr/Solrj>
- [12] What Is Affinity Analysis? [online], stav ze dne 21.4.2012. Dostupné z: <http://www.wisegEEK.com/what-is-affinity-analysis.htm>
- [13] ØMQ - The Guide. [online], stav ze dne 26.4.2012. Dostupné z: <http://zguide.zeromq.org/page:all>
- [14] Almazro, D.; Shahatah, G.; Albdulkarim, L.; aj.: A Survey Paper on Recommender Systems. [online], stav ze dne 26.4.2012. Dostupné z: <http://arxiv.org/pdf/1006.5278v4.pdf>
- [15] Anderson, C.: The Long Tail. [online], říjen 2004. Dostupné z: <http://archive.wired.com/wired/archive/12.10/tail.html>
- [16] Anderson, C.: The 80/20 Rule Revisited. 2005, [Online; stav z 30. dubna 2014]. Dostupné z: http://www.longtail.com/the_long_tail/2005/08/the_8020_rule_r.html
- [17] Blažek, R. B.; Kotecký, R.; Hrabáková, J.; aj.: BI-PST – Pravděpodobnost a statistika, přednáška 3. [online], stav ze dne 26.4.2012. Dostupné z: https://edux.fit.cvut.cz/courses/BI-PST/_media/lectures/3_handout_pst-v2.pdf
- [18] Brodt, T.: Open Recommendation Platform. 2013, [Online; stav z 23. dubna 2014]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/d0nut/open-recommendation-platform>
- [19] DataStax: Architecture in brief | DataStax Cassandra 2.0 Documentation. [online], stav ze dne 27.4.2012. Dostupné z: http://www.datastax.com/documentation/cassandra/2.0/cassandra/architecture/architectureIntro_c.html
- [20] Davidson-Pilon, C.: The Multi-Armed Bandit Problem. [online], stav ze dne 27.4.2012. Dostupné z: <http://camdp.com/blogs/multi-armed-bandits>
- [21] Dennis, J.: ZeroMQ: Super Sockets. [online], stav ze dne 27.4.2012. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/j2d2/zeromq-super-sockets-by-j2-labs>
- [22] Drachsler, H.: Recommender Systems and Learning Analytics in TEL. University Lecture, 2014, stav ze dne 24.4.2012. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/Drachsler/rec-sys-mupplelecturekmi>

-
- [23] Fielding, R. T.: *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*. Dizertační práce, 2000, aAI9980887.
- [24] Hlaváč, V.: Učení bez učitele. University Lecture, 2014, stav ze dne 24.4.2012. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/Public/TeachingLectures/UceniBezUcitele.pdf>
- [25] Jacobi, J.; Benson, E.; Linden, G.: Personalized recommendations of items represented within a database. Září 26 2006, uS Patent 7,113,917. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US7113917>
- [26] Jakob, M.: Reinforcement Learning. University Lecture, 2010, stav ze dne 24.4.2012. Dostupné z: https://cw.felk.cvut.cz/wiki/_media/courses/a3m33ui/prednasky/files/ui-2010-p11-reinforcement_learning.pdf
- [27] John Gantz, D. R.: Extracting Value from Chaos. [online], červen 2011. Dostupné z: <http://www.emc.com/collateral/analyst-reports/idc-extracting-value-from-chaos-ar.pdf>
- [28] Linden, G.; Jacobi, J.; Benson, E.: Collaborative recommendations using item-to-item similarity mappings. Červenec 24 2001, uS Patent 6,266,649. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US6266649>
- [29] Liu, J.; Pedersen, E.; Dolan, P.: Personalized News Recommendation Based on Click Behavior. In *2010 International Conference on Intelligent User Interfaces*, 2010.
- [30] Musto, C.: Apache Mahout – Tutorial (2014). [online], stav ze dne 27.4.2012. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/Cataldo/apache-mahout-tutorial-recommendation-20132014>
- [31] Prize, N.: The Netflix Prize Rules. [online], stav ze dne 28.4.2012. Dostupné z: <http://www.netflixprize.com/rules>
- [32] Vitvar, T.: Lecture 5: Application Server Services. University Lecture, 2014, stav ze dne 24.4.2012. Dostupné z: <http://humla.vitvar.com/slides/mdw/lecture5-1p.pdf>
- [33] Vychodil, V.: Komunikace pomocí Socketu. [online], stav ze dne 27.4.2012. Dostupné z: <http://vychodil.inf.upol.cz/publications/white-papers/socket-referat.pdf>
- [34] Vychodil, V.: Pravděpodobnost a statistika: Normální rozdělení a centrální limitní věta. [online], stav ze dne 26.4.2012. Dostupné z: <http://vychodil.inf.upol.cz/kmi/pras/pr09.pdf>

- [35] Wiki, M. J.: Connection Leak. [online], stav ze dne 29.4.2012. Dostupné z: <http://wiki.metawerx.net/wiki/ConnectionLeak>
- [36] Wikipedia: Inverted index — Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2014, [Online; stav z 27. dubna 2014]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverted_index&oldid=591814302
- [37] aihorizon: Your Online Artificial Intelligence Resource: Machine Learning, Part I: Supervised and Unsupervised Learning. [online], stav ze dne 24.4.2012. Dostupné z: http://www.aihorizon.com/essays/generalai/supervised_unsupervised_machine_learning.htm
- [38] Černý, D.: Bayesovská statistika: klíč k porozumění vesmíru? [online], stav ze dne 26.4.2012. Dostupné z: http://gchd.cz/fygyz/2012_2013/david_cerny-bayesovska_statistika.pdf

Dokumentace RESTful API

sfsdf

Seznam použitých zkratek

IDC

CTO

MIT

ACM Association for Computing Machinery

ICWSM

ICML

IBM

REST

API

TCP

DBMS

NoSQL

MQ

JVM

JSON

URL

ORP

HTTP

Obsah přiloženého CD

	readme.txt.....	stručný popis obsahu CD
	exe.....	adresář se spustitelnou formou implementace
	src	
	impl.....	zdrojové kódy implementace
	thesis.....	zdrojová forma práce ve formátu \LaTeX
	text	text práce
	thesis.pdf.....	text práce ve formátu PDF
	thesis.ps	text práce ve formátu PS