

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Evidenčné číslo: FEI-5384-64329

**LÚŠTENIE HISTORICKÝCH ŠIFIER NA GRIDE
DIPLOMOVÁ PRÁCA**

2017

Martin Eliáš

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Evidenčné číslo: FEI-5384-64329

LÚŠTENIE HISTORICKÝCH ŠIFIER NA GRIDE
DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný program: Aplikovaná informatika
Číslo študijného odboru: 2511
Názov študijného odboru: 9.2.9 Aplikovaná informatika
Školiace pracovisko: Ústav informatiky a matematiky
Vedúci záverečnej práce: Ing. Eugen Antal, PhD.

Bratislava 2017

Martin Eliáš

SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program:	Aplikovaná informatika
Autor:	Martin Eliáš
Diplomová práca:	Lúštenie historických šifier na GRIDe
Vedúci záverečnej práce:	Ing. Eugen Antal, PhD.
Miesto a rok predloženia práce:	Bratislava 2017

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Aenean et est a dui semper facilisis. Pellentesque placerat elit a nunc. Nullam tortor odio, rutrum quis, egestas ut, posuere sed, felis. Vestibulum placerat feugiat nisl. Suspendisse lacinia, odio non feugiat vestibulum, sem erat blandit metus, ac nonummy magna odio pharetra felis. Vivamus vehicula velit non metus faucibus auctor. Nam sed augue. Donec orci. Cras eget diam et dolor dapibus sollicitudin. In lacinia, tellus vitae laoreet ultrices, lectus ligula dictum dui, eget condimentum velit dui vitae ante. Nulla nonummy augue nec pede. Pellentesque ut nulla. Donec at libero. Pellentesque at nisl ac nisi fermentum viverra. Praesent odio. Phasellus tincidunt diam ut ipsum. Donec eget est. A skúška mäččėňov a dĺžnov.

Kľúčové slová: historické šifry, superpočítač, grid, MPI

ABSTRACT

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study Programme:	Applied Informatics
Author:	Martin Eliáš
Master's thesis:	Solving of historical ciphers on GRID like systems
Supervisor:	Ing. Eugen Antal, PhD.
Place and year of submission:	Bratislava 2017

On the other hand, we denounce with righteous indignation and dislike men who are so beguiled and demoralized by the charms of pleasure of the moment, so blinded by desire, that they cannot foresee the pain and trouble that are bound to ensue; and equal blame belongs to those who fail in their duty through weakness of will, which is the same as saying through shrinking from toil and pain. These cases are perfectly simple and easy to distinguish. In a free hour, when our power of choice is untrammelled and when nothing prevents our being able to do what we like best, every pleasure is to be welcomed and every pain avoided. But in certain circumstances and owing to the claims of duty or the obligations of business it will frequently occur that pleasures have to be repudiated and annoyances accepted. The wise man therefore always holds in these matters to this principle of selection: he rejects pleasures to secure other greater pleasures, or else he endures pains to avoid worse pains.

Keywords: historical ciphers, supercomputer, grid, MPI

Pod'akovanie

I would like to express a gratitude to my thesis supervisor.

Obsah

Úvod	1
1 Klasické šifry	2
1.1 História	2
1.2 Charakteristika	3
1.3 Počítačové lúštenie klasických šifier	4
1.3.1 Útok hrubou silou	5
1.3.2 Slovníkový útok	6
1.3.3 Horolezecký algoritmus	6
1.3.4 Genetické algoritmy	7
2 Grid	10
2.1 hpc.stuba.sk	10
2.2 Príkazy	11
2.2.1 module	11
2.2.2 qstat	12
2.2.3 qfree	13
2.3 Výpočtové fronty	14
2.4 Príklad sériovej úlohy	14
2.5 Príklad paralelnej úlohy	15
3 MPI	17
3.1 Point-to-point komunikácia	17
3.2 Blokujúca komunikácia	18
3.3 Neblokujúca komunikácia	20
3.4 Dynamická alokácia	21
3.5 Serializácia dátových typov	22
4 Návrh	23
4.1 Štruktúra prostredia	23
4.2 Implementácia	24
4.3 build.sh	25
4.4 PGA modul	26
4.4.1 Genetický algoritmus	28
4.4.2 Serializácia Chromozómov	30

4.4.3	Mpi migrátor a topológie	31
4.5	Príklad použitia	32
4.5.1	Lokálny vývoj	32
4.5.2	Spustenie na gride hpc.stuba.sk	35
5	Experiment s GA	37
5.1	Distribúcia parametrov	37
5.2	Výsledky	40
6	Experiment s PGA	45
6.1	Topológie	45
6.2	Výsledky experimentu	45
	Záver	47
	Zoznam použitej literatúry	48
	Prílohy	I
	A Štruktúra elektronického nosiča	II
	B Výsledky Genetikého algoritmu	III

Zoznam obrázkov a tabuliek

Obrázok 1	Štruktúra GA	8
Obrázok 2	Štruktúra PGA s migračným modelom	26
Obrázok 3	Počet iterácii: 10000, počiatočná populácia: 10	41
Obrázok 4	Počet iterácii: 10000, počiatočná populácia: 50	42
Obrázok 5	Počet iterácii: 50000, počiatočná populácia: 100	43
Obrázok 6	Schéma: B	43
Obrázok 7	Schéma: C	44
Obrázok 8	Schéma: E	44
Obrázok 9	Schéma: J	45
Obrázok 10	Topológie paralelných genetických algoritmov	46
Obrázok B.1	Počet iterácii: 10000, počiatočná populácia: 20	III
Obrázok B.2	Počet iterácii: 10000, počiatočná populácia: 100	IV
Obrázok B.3	Počet iterácii: 50000, počiatočná populácia: 10	V
Obrázok B.4	Počet iterácii: 50000, počiatočná populácia: 20	VI
Obrázok B.5	Počet iterácii: 50000, počiatočná populácia: 50	VII
Obrázok B.6	Schéma: A	VII
Obrázok B.7	Schéma: D	VIII
Obrázok B.8	Schéma: F	VIII
Obrázok B.9	Schéma: G	IX
Obrázok B.10	Schéma: H	IX
Obrázok B.11	Schéma: I	X
Tabuľka 1	Disky	11
Tabuľka 2	Výpočtové fronty a ich obmedzenia	14
Tabuľka 3	Dátové typy v MPI a ich C ekvivalenty	20
Tabuľka 4	Operácie GA	27
Tabuľka 5	Schémy GA	38

Zoznam skratiek

BASH	Bourne Again SHell
CPU	Central processing unit
GA	Genetické algoritmy
GPFS	General Parallel File System
GPU	Graphics processing unit
HDD	Harddisk drive
LAN	Local Area Network
MPI	Message Passing Interface
OpenMP	Open Multi-Processing
OpenMPI	Open Message Passing Interfac
PBS	Portable Batch System
RAM	Random Access Memory
SSH	Secure shell
VPN	Virtual private network

Zoznam výpisov

1	module avail	11
2	qstat	12
3	qstat -u 3xelas	12
4	qfree	13
5	uloha1.pbs	14
6	uloha2.pbs	15
7	Point-to-point komunikácia	17
8	MPI_Send	19
9	MPI_Recv	19
10	Neblokujúca komunikácia	20
11	Štruktúra prostredia	23
12	Genetický algoritmus	28
13	Abstrktná trieda Migrator	31
14	Kód MpiMigrator-a	31
15	HelloGrid/src/main.cpp	33
16	Pseudokód ditribúcie parametrov GA	39

Úvod

Tu bude krásny úvod s diakritikou atď.

A možno aj viac riadkový úvod.

1 Klasické šifry

V tejto kapitole sa budeme zaoberať históriou a stručným prehľadom klasických šifier. Spomenieme si aj niektoré základné útoky na klasické šifry.

1.1 História

História klasických šifier a utajovania písomného textu je pravdepodobne tak stará ako samotné písmo. Písmo, v podobe akej ho poznáme a používame dnes, pravdepodobne pochádza asi spred 3000 rokov pred Kristom a za jeho objaviteľov sa považujú Feničania. V niektorých prípadoch predstavovalo už použitie písma utajenie samotného textu. Príkladom môžu byť Egyptské hieroglyfy alebo klinové písmo používané v Mezopotámii. Iným príkladom môžu byť semitské jazyky, ktoré sú charakteristické používaním iba spoluhlások bez použitia samohlások, pretože tie zaviedli až Aremejci a po nich následné Gréci, aby pomocou nich boli schopný rozlíšiť jazyky [1]. Aj diakritika ako taká má schopnosť rozlišovať významy slov, čo si ale až do 15. storočia nikto nevšimol, až pokiaľ ju Arabi nezačali používať pri kryptoanalýze rôznych šifier.

Z historického hľadiska nie je možné presne zoradiť ako jednotlivé šifry vznikali, pretože súčasne vznikali na viacerých miestach sveta. Komunikácia a s ňou spojené šírenie informácií nebolo také rýchle ako dnes, až do roku 1440, keď Johan Guttenberg vynášiel kníhtlač, čo zjednodušilo výmenu a uchovávanie informácií.

Ku kryptografii ako aj k rôznym iným vedným disciplínam prispelo v minulosti staré Grécko. Jedným z najvýznamnejších príspevkov starých Grékov bolo široké rozšírenie abecedy a písomného prejavu. Gréci písmo prebrali od Feničanov, ktorí na rozdiel od Egyptanov používali jednoduchšie písmo.

V Európe vďaka rozšíreniu abecedy začali vznikať aj prvé šifry, medzi ktoré patrí napríklad Cézarova šifra, ktorá vznikla v Rímskej ríši. Iným príkladom môže byť transpozičná šifra skytalé, ktorá bola používaná v Sparte.

Pád Rímskej ríše spôsobil úpadok kryptografie, ktorý trval až do obdobia stredoveku. Typickým znakom kryptografie v tomto období bolo napríklad písanie odzadu, alebo vertikálne, používanie cudzích jazykov, alebo vynechávanie samohlások [1].

V stredoveku, kvôli bojom medzi pápežmi Ríma a Avignonu, bola kryptografia zdokonalená a začali sa používať rôzne kódy a nomenklátory. Ich charakteristickým znakom bolo zamieňanie písmen alebo nahradzovanie mien a titulov osôb v správach. V tomto období zabezpečovanie utajenia správ pokročilo až na takú úroveň, že na doručovanie správ boli použitý špeciálne vycvičení kuriéri.

V prvej polovici 20. storočia ľudia, ktorí pracovali v oblasti utajovanej komunikácie verili, že na to, aby bola zabezpečená utajovaná komunikácia musí byť utajený kľúč a okrem neho aj šifrovací algoritmus. Toto ale odporovalo Kerckhoffovmu princípu, ktorý hovorí že: „Bezpečnosť šifrovacieho algoritmu musí závisieť výlučne na utajení kľúča a nie algoritmu“. Okrem toho sformuloval aj niekoľko požiadaviek na kryptografický systém, medzi ktoré patria:

1. systém musí byť teoreticky, alebo aspoň prakticky bezpečný
2. narušenie systému nesmie priniesť ťažkosti odosielateľovi a adresátovi
3. kľúč musí byť ľahko zapamätateľný a ľahko vymeniteľný
4. zašifrovaná správa musí byť prenášateľná telegrafom
5. šifrovacia pomôcka musí byť ľahko prenosná a ovládateľná jedinou osobou
6. systém musí byť jednoduchý, bez dlhého zoznamu pravidiel, nevyžadujúci nadmerné sústredenie

Tieto princípy sú popísané v pôvodnej publikácii od Kerckhoffa [2].

Existovala ale aj iná skupina vedcov, medzi ktorých patrili aj Lester S. Hill, ktorý si uvedomoval, že kryptológia je úzko spätá s matematikou. V roku 1917 si na Hillových prácach zakladal A. Adrian Albert, ktorý pochopil, že v šifrovaní je možné použiť viacero algebraických štruktúr. Neskôr toto všetko usporiadal a zdokonalil Claude E. Shannon, čo možno považovať za ukončenie éry klasických šifier [1].

1.2 Charakteristika

Na rozdiel od moderných šifier, ktoré sa používajú dnes, sú tie klasické rozdielne v niektorých hlavných črtách. Môžeme spomenúť niekoľko:

- Šifrovanie a dešifrovanie klasickej šifry možno realizovať zväčša pomocou papiera a ceruzky alebo nejakej mechanickej pomôcky.
- V dnešnej dobe aj vďaka rozšírenému použitiu počítačov stratila väčšina týchto algoritmov svoj význam.
- Utajuje sa algoritmus a aj kľúč a neuplatňuje sa Kerckhoffov princíp.
- Na rozdiel od moderných šifier sa používajú malé abecedy.

- V klasických šifrách je otvorený text, zašifrovaný text a kľúč v abecede reálneho jazyka, pričom v moderných šifrách sa používa binárne kódovanie.
- Na klasické šifry sa zväčša dá použiť štatistická analýza.

Zo spomenutých charakteristík existujú aj výnimky. Napríklad pri Vigenereovej šifre sa algoritmus neujaloval. To platí aj pre Vernamovu šifru, ktorá okrem toho používa navyše binárne znaky. Vernamova šifra je perfektne bezpečná v podľa Shannonovej teórie [1].

Klasické šifry môžeme rozdeliť do niekoľkých základných kategórii:

- **Substitučné šifry.** V prípade že šifra permutuje znaky zdrojovej abecedy, hovoríme o monoalfabetickej šifre. Ako príklad môžeme uviesť šifru Atbaš prípadne Cézarovu šifru, alebo iné. V inom prípade ak sa aplikuje viacero permutácií podľa polohy znaku v otvorenom texte, tak hovoríme o polyalfabetickej šifre. Príkladom je Vigenereova šifra. Ďalším prípadom je polygramová šifra, kde sa z otvoreného textu najprv vytvoria bloky, na ktoré sa potom aplikuje nejaká permutácia.
- **Transpozičné šifry.** Transpozičné šifry sú vlastne blokové šifry, ktoré pri šifrovaní a dešifrovaní aplikujú pevne zvolenú permutáciu na každý blok otvoreného/zašifrovaného textu. Od polyalfabetickej šifry sa líši v poradí vykonávania operácií.
- **Homofónne šifry.** Homofónne šifry sú šifry, ktoré majú znáhodnený zašifrovaný text. Tieto šifry sa snažia zabrániť frekvenčnej analýze textu.
- **Substitučno-permutačné šifry.** Ak aplikujeme viacero substitučného a permutačných šifier na otvorený text tak hovoríme o substitučno-permutačných šifrách. Šifrovanie prebieha tak, že sa blok otvoreného textu rozdelí na menšie bloky, na ktoré je potom aplikovaná substitúcia, a permutácia, ktorá sa aplikuje na celý blok. Substitúcia zabezpečuje konfúziu a permutácia difúziu.

1.3 Počítačové lúštenie klasických šifier

Počítače a lúštenie šifier sú v dnešnej dobe neoddeliteľnou súčasťou. Výkon počítačov vplyvom Mooreovho zákona ¹ neustále narastá, čo má za následok vznik nových metód, ktoré sa snažia využiť dostupný výkon.

„Výpočtový výkon súčasných počítačov môže byť použitý na vykonanie čiastočnej, alebo až úplnej kryptoanalýzy klasických šifier“ [1]. Takúto automatizovanú kryptoanalýzu môžeme rozdeliť do troch kategórii:

¹Moorov zákon je empirické pravidlo, ktoré hovorí že zložitost integrovaných obvodov sa zdvojnásobuje každých 18 až 24 mesiacov, pričom cena ostáva konštantná.

1. Prvou kategóriou je počítačom asistovaná kryptoanalýza, pri ktorej lúštitel' využíva počítač ako pomôcku na zjednodušenie niektorých úkonov.
2. Druhou kategóriou je poloautomatická kryptoanalýza, pri ktorej počítač prehľadáva priestor riešení, avšak rozhodujúce kroky sú prenechané na kryptoanalytika.
3. Poslednou tretou kategóriou je automatická kryptoanalýza, pri ktorej lúštitel' zadá zašifrovanú správu počítaču a ten mu následne poskytne jednu, prípadne aj viac najlepších riešení.

Automatickou kryptoanalýzou sa budeme zaoberať aj v tejto práci. Pri automatickej kryptoanalýze zohráva veľkú úlohu analýza a ohodnocovanie textov, pretože niektoré spôsoby lúštenia šifier, napríklad útok hrubou silou, produkujú veľké množstvo možných riešení, ktoré treba nejakým spôsobom ohodnotiť.

Na automatické ohodnocovanie textov sa používa ohodnocovacia funkcia, pomocou ktorej môžeme stanoviť určitý stupeň kvality, takzvané skóre. Podľa skóre potom môžeme niektoré texty zahodiť a iné posunúť na ďalšie posúdenie. Jednoduchú ohodnocovaciu funkciu by sme mohli skonštruovať napríklad pomocou slovníka. Existujú ale aj iné metódy, lepšie metódy, napríklad n-gramy, ktoré využívajú frekvencie dvojíc, trojíc, n-tíc znakov jazyka.

Pri vhodne zvolenej ohodnocovacej funkcii začnú vznikať v priestore riešení takzvané extrémny. Na to aby sme v priestore riešení našli globálny extrém, nepotrebujeme prehľadať všetky riešenia. Existujú algoritmy, ktoré dokážu nájsť globálny extrém rýchlejšie. Medzi takéto algoritmy patria napríklad: horolezecký algoritmus, simulované žižhanie, genetické algoritmy, a iné.

1.3.1 Útok hrubou silou

Útok hrubou silou (bruteforce) je typ útoku, ktorý sa snaží zlomiť kľúč tak, že sa prehľadáva celý priestor kľúčov. Aby bol takýto útok možný a prakticky realizovateľný, priestor prehľadávaných kľúčov nesmie byť väčší ako hranica daná dostupnými prostriedkami alebo časom potrebným na riešenie.

Pre ilustráciu si uveďme jednoduchý príklad. Majme zašifrovaný text „VECDXSORS-CDYBSMUIMRCSPSOBXXKQBSNO“, ktorý vieme že bol zašifrovaný šifrou podobnou Cézarovej šifry. Pre získanie otvoreného textu potrebujeme vyskúšať všetkých 26 možností posunov, čo je v tomto prípade kľúč, tak, aby sme dostali zmysluplný text.

kluc 1

VECDXSORS-CDYBSMUIMRCSPSOBXXKQBSNO

WFDEPYTPSTDEZCTNVJNSDTQTPCYLRCTOP

kluc 2

VECDXSORS CDYBSMUI MRCSPSOBXKQBSNO

XGEFQZUQTUEFADUOWKOTEURUQDZMSDUPQ

kluc 3

VECDXSORS CDYBSMUI MRCSPSOBXKQBSNO

YHFGRAVRUVFGBEVPXLPUFVSVREANTEVQR

... // dalsie kluce 4..26

Po prezretí všetkých možností by sme zistili že kľúč 16 sa dešifruje na „LUSTENIE-HISTORICKYCHSIFIERNAGRIDE“.

1.3.2 Slovníkový útok

Slovníkový útok narozdiel od útoku hrubou silou skúša iba niektoré možnosti z vopred pripraveného slovníka kľúčov.

Ukážme si ako by v princípe mohol fungovať slovníkový útok na šifru Vigenere. Nech zašifrovaný text je „SYKESUMWSWZXGCWJOQNVZMXTSYRSRFPHW“. Útočník má k dispozícii slovník slov „ABC, SOMAR, HESLO, ...“.

kluc: JANO

SYKESUMWSWZXGCWJOQNVZMXTSYRSRFPHW

JYXQJUZI JWMJXCJVFQAHQMKFJYEEIFCTN

kluc: SOMAR

SYKESUMWSWZXGCWJOQNVZMXTSYRSRFPHW

AKYEBCYKSFHJUCFRAENEHYLTBGDGROXTK

kluc: HESLO

SYKESUMWSWZXGCWJOQNVZMXTSYRSRFPHW

LUSTENIEHISTORICKYCHSIFIERNAGRIDE

1.3.3 Horolezecký algoritmus

Horolezecký algoritmus patrí medzi základné optimalizačné algoritmy. Jeho základnou myšlienkou je, že na vrchol kopca sa môžeme dostať najkratšou cestou, keď pôjdeme vždy najstrmším smerom nahor.

Algoritmus sa na začiatku vždy inicializuje náhodným kľúčom. Následne sa vygeneruje množina nových potencionálnych kandidátov na riešenie pomocou základných zmien. Ak je kľúč napríklad permutácia zmenou môže byť výmena dvoch prvkov v kľúči. Jednotli-

vým kľúčom je potom priradené skóre pomocou ohodnocovacej funkcie. Za aktuálny kľúč sa bude považovať ten, ktorý má najlepšie skóre. Výsledky tohto algoritmu ovplyvňuje voľba ohodnocovacej funkcie, ktorá sa ľahko môže dostať v lokálnom extréme, z ktorého sa nevie dostať.

1.3.4 Genetické algoritmy

Genetické algoritmy (GA) patria medzi najčastejšie používaných predstaviteľov evolučných výpočtových techník. Genetické algoritmy sa snažia napodobniť biologické procesy v prírode.

Základnými objektami sú gén, reťazec a populácia. Nad týmito objektami sa vykonávajú operácie. Medzi základné operácie patria výber, mutácia a kríženie.

Gén je základnou stavebnou jednotkou reťazca a predstavuje elementárne vlastnosti jedinca. Gén je zvyčajne reprezentovaný číselne, alebo nejakým symbolom z abecedy.

Reťazec (chromozóm) je postupnosť génov, respektíve znakov, ktoré predstavujú zvolené parametre alebo vlastnosti jedinca z problémovej oblasti. V tomto prípade reťazec predstavuje dešifrovací kľúč.

Populácia je skupina reťazcov zvoleného počtu. Veľkosť populácie sa počas riešenia genetického algoritmu môže meniť.

Generácia predstavuje populáciu GA v niektorej výpočtovej fáze, prípadne môže reprezentovať poradové číslo cyklu.

Účelová funkcia vypočítava skóre každého jedinca v populácii a je mierou toho, čo chceme maximalizovať, prípadne minimalizovať. Úlohou účelovej funkcie je nájsť globálny extrém.

Fitness je v evolučných výpočtoch pojem predstavujúci mieru úspešnosti jedincov. V prípade maximalizačnej úlohy je to najväčšia hodnota účelovej funkcie. Naopak, v prípade minimalizačnej úlohy je to najmenšia hodnota.

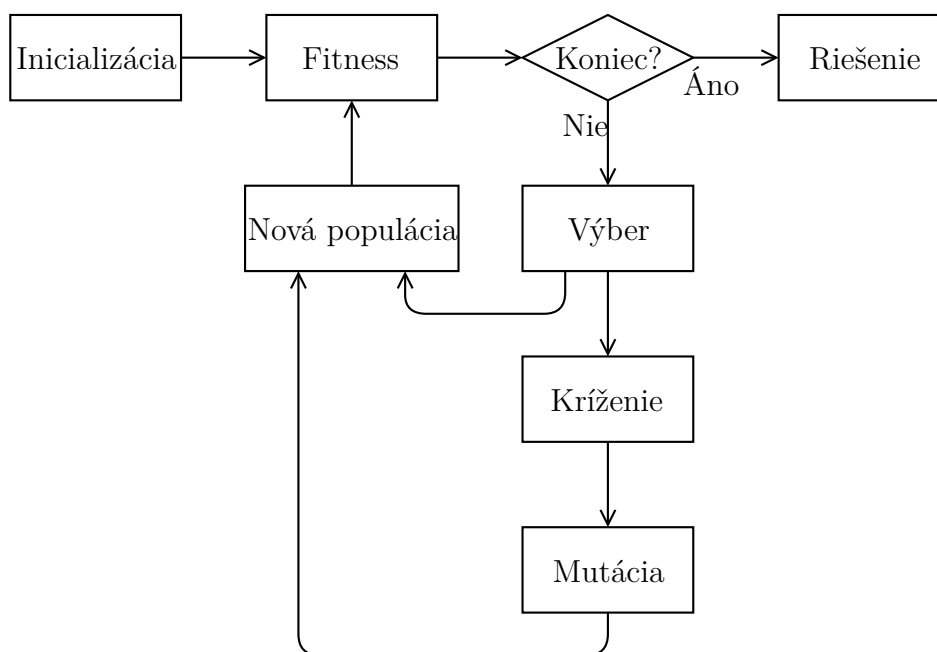
Výber je proces, ktorý vyberie niektorých jedincov z populácie na základe zvolenej stratégie. Vybraný jedinci potom vstupujú do operácii kríženia, mutácie alebo bez zmeny pokračujú do ďalšej generácie. Existuje viacero stratégií výberu jedincov, avšak základnou ideou je aby lepší jedinci prežili a postupne vytlačili slabších jedincov z populácie.

Mutácia znamená náhodnú zmenu génu v reťazci, prípadne viac zmien v celej populácii. Gén zmení svoju hodnotu na inú, náhodne zvolenú hodnotu z prehľadávaného priestoru. Mutácia je základnou hybnou silou genetických algoritmov. Umožňuje nachádzať nové

riešenia, ktoré sa v populácii ešte neobjavili.

Kríženie je operácia, pri ktorej si dva náhodne zvolené rodičovské jedince rozdelia v nejakom bode a vymenia si svoje gény. Krížením vznikajú noví, odlišní potomkovia, ktorí nesú niektoré znaky oboch rodičov.

Skôr než sa GA začne realizovať treba definovať treba určiť spôsob zakódovania parametrov jednotlivých objektov. Pri klasických šifrách sa gény zvyčajne reprezentujú pomocou abecedných znakov alebo čísiel. Ďalším krokom je určiť prehľadávaný priestor a následne formulovať účelovú funkciu. Dôležité je aj určiť veľkosť populácie, ktorá sa doporučuje medzi 10 a 100 jedincov [3]. Pri malých populáciách býva nedostatočný priestor pre rôznorodosť (diverzitu) genetických informácií, naopak pri veľkých populáciách sa už nedosahuje lepšieho efektu.



Obrázok 1: Štruktúra GA

Princíp genetických algoritmov možno vidieť aj na obrázku 1, ktorý pozostáva z niekoľkých krokov:

1. Prvým krokom je vygenerovanie počiatočnej populácie P_0 .
2. V tomto kroku sa vyhodnocuje populácia pomocou účelovej funkcie pre aktuálnu populáciu P_k .
3. V tejto fáze sa testuje ukončujúce podmienky genetického algoritmu. V prípade že algoritmus skončil vyberie za najlepší jedinec aktuálnej populácie, ktorý predstavuje

výsledné riešenie GA.

4. Ak algoritmus ešte neskončil, nasleduje výber dvoch skupín jedincov. Najprv sa vyberie jeden, prípadne viac najlepších jedincov, ktorí sa bez zmeny skopírujú do novej populácie (skupina A). Tieto reťazce zabezpečia monotónnu konvergenciu, čo znamená, že úloha v ďalšom kroku nebude mať horšie výsledky ako v tom predchádzajúcom. Ďalšie jedine vybraté iným spôsobom sú skopírované do operácie kríženia (skupina B).
5. V operácii kríženia sa náhodne spárujú rodičovské reťazce so skupiny B , s ktorých vznikne rovnaký počet potomkovských reťazcov. Potomkovia vytvoria skupinu C , ktorá pokračuje do operácie mutácie.
6. Mutácia spôsobí, že náhodne zvoleným jedincom zmenia niektoré náhodne zvolené gény a vznikne populácia D .
7. Nová populácia P_{k+1} vzniká zjednotením populácii $A \cup D$. Genetický algoritmus pokračuje bodom 2.

Predstavená schéma je len príklad ako by GA mohol vyzeráť, v skutočnosti však môžeme uvažovať o viacerých kritériách, ktoré vplývajú na GA. Niektoré uvedieme v experimentálnej časti tejto práce.

2 Grid

Jedným z cieľov práce je preskúmať možnosti aplikovania útokov na klasické šifry v gridovom prostredí. Grid môžeme chápať ako skupinu počítačov, uzlov, spojenú pomocou siete Local Area Network (LAN), prípadne inou sieťovou technológiou, ktoré môžu ale nemusia byť geograficky oddelené. Účelom takýchto počítačov je poskytnúť veľký výpočtový výkon, ktorý je použitý na riešenie špecifických úloh.

2.1 hpc.stuba.sk

Vrámcami Slovenskej technickej univerzity (STU), Centra výpočtovej techniky (CVT) sa nachádza superpočítač IBM iDataPlex, ktorý pozostáva z 52 výpočtových uzlov. Každý výpočtový uzol má nasledovnú konfiguráciu:

- CPU: 2 x 6 jadrový Intel Xeon X5670 2.93 GHz
- RAM: 48GB (24GB na procesor)
- HDD: 2TB 7200 RPM SATA
- GPU: 2 x NVIDIA Tesla M2050 448 cuda jadier, 3GB ECC RAM
- Operačný systém: Scientific Linux 6.4
- Sieťové pripojenie: 2 x 10Gb/s Ethernet

Spolu máme k dispozícii 624 CPU, 3584 cuda jadier, 2,5TB RAM, 104TB lokálneho úložného priestoru a ďalších 115TB zdieľaného úložiska. Výpočtový výkon dosahuje 6,76 TFLOPS a maximálny príkon aj spolu s chladením je 40kW [4].

kód

V tabuľke 1 môžeme vidieť dostupné diskové umiestnenia pre každého používateľa, prípadne úlohu. Umiestnenie `/home/$USER` je domovským priečinkom každého používateľa. Jedno z obmedzení tohto umiestnenia je, že môže obsahovať maximálne osemdesiat tisíc súborov a priečinkov. Taktiež má značne obmedzenú kapacitu čo sa nemusí hodiť pre každý typ úlohy. Ďalším umiestnením, ktoré má používateľ k dispozícii je `/work/$USER`. Toto umiestnenie nemá žiadne väčšie obmedzenia slúži ako zdieľaný disk pre výpočty. Môžeme tu vytvárať ľubovoľný počet súborov a priečinkov, avšak podľa [4] by sa tento disk mal využívať hlavne na prenos objemnejších dát v blokoch väčších ako 16kB. Obe spomenuté umiestnenia sú sieťové disky GPFS. Posledným umiestnením je `/scratch/$PBS_JOBID` alebo tiež aj `$TMPDIR` v prípade PBS skriptu. Tento priestor je

unikátny pre každú úlohu a je vhodný na spracovanie veľkého počtu malých súborov. V prípade použitia tohto umiestnenia si treba dať pozor na zmazanie dát, ktoré sa mažú ihneď po skončení úlohy.

Filesystem	Zálohovanie	Mazanie	Kapacita	Obmedzenia
/home/\$USER	áno	nie	32GB	80k inodes
/scratch/\$PBS_JOBID	nie	ihneď	1.6TB	nie
/work/\$USER	nie	áno	56TB	nie

Tabuľka 1: Disky

Aby sme boli schopný grid používať musíme si najprv zaregistrovať projekt a požiadať o vytvorenie používateľského účtu na stránke výpočtového strediska `hpc.stuba.sk`. Po registrácii a získaní prihlasovacích údajov sa môžeme prihlásiť do webového rozhrania, cez ktoré môžeme spravovať projekt, pridávať ďalších riešiteľov, prezerať si štatistiky a grafy. Dôležitou funkciou webového rozhrania je zmena hesla používateľa a pridanie SSH verejného kľúča, pomocou ktorého sa môžeme prihlasovať bez zadávania hesla.

2.2 Príkazy

Do gridu sa môžeme prihlásiť cez SSH zadaním príkazu `ssh login@hpc.stuba.sk` a následným zadaním hesla v prípade ak nepoužívame prihlasovanie pomocou verejného kľúča. Ak sa pripájame mimo univerzitnej siete STU, na prihlásenie musíme použiť VPN. Po pripojení máme k dispozícii štandardnú linuxovú konzolu, ktorá ale obsahuje niekoľko špecifických príkazov pre daný grid. Zaujímáť nás budú príkazy: `module`, `qstat`, `qfree`, `qsub`, `qsig`. Niektoré výstupy sú pre svoju obsiahlosť skrátené.

2.2.1 module

Príkaz `module` slúži na rýchle nastavenie ciest k vybraným knižniciam. Existujúce moduly môžeme vypísať pomocou `module avail`

```
----- /apps/modulefiles -----
abyss/1.3.7          gaussian/g03         mvapich2/2.1
ansys/15.0           gaussian/g09         mvapich2/2.2
cmake/2.8.10.2       gcc/4.7.4(default)  nwchem/6.1.1(default)
cmake/3.1.0          gcc/4.8.4           nwchem/6.6
cp2k/2.5.1           gcc/4.9.3           openblas/0.2.18
cuda/6.5             gcc/5.4             openmpi/1.10.2
devel               gcc/6.3             openmpi/1.10.4
dirac/13.3           gridMathematica/9.0 openmpi/1.10.5
```

dirac/14	intel/composer_xe_2011	openmpi/1.4.5
esi/pamstamp	intel/composer_xe_2013	openmpi/1.6.5(default)
esi/pamstamp-platform	intel/libs_2011	openmpi/1.6.5-int8
esi/procast	intel/libs_2013	openmpi/1.7.2
esi/sysweld	matlab/R2015b	openmpi/1.7.5
fftw3/3.3.3	molcas/8.0	openmpi/1.8.8
fftw3/3.3.5	mvapich2/1.8a2	openmpi/1.8.8-int8
fftw3/intel-3.3.3	mvapich2/1.9(default)	openmpi/2.1.0
fluent/15.0.7	mvapich2/2.0	openmpi/intel-1.10.4

Výpis 1: module avail

Pre načítanie modulov zadáme `module load modul1 modul2 ...`, aktuálne používané moduly zobrazíme pomocou `module list` a odstrániť ich môžeme príkazom `module purge`. Podrobnejšie voľby príkazu `module` sa môžeme dozvedieť z manuálových stránok.

2.2.2 qstat

Ďalším dôležitým príkazom je `qstat`, ktorý zobrazuje status aktuálne bežiacich úloh. Detailnejší výpis o nami spustených úlohách môžeme vypísať cez `qstat -u $USER` alebo `qstat -a`

Job ID	Name	User	Time Use	S	Queue
114557.one	halogen	3xjakubecj	499:03:0	R	parallel
114640.one	JerMnchexFq5	3breza	218:35:9	R	parallel
114663.one	Job4	3xrasova	78:07:20	R	parallel
114668.one	run.opt	3antusek	674:08:1	R	parallel
114692.one	Job5	3xbuchab	43:39:43	R	parallel
114710.one	PGA	3xelias	226:46:1	R	parallel

Výpis 2: qstat

Job ID	Queue	Jobname	SessID	TSK	Time	S	Time
114710.one	parallel	PGA	3418	96	120:00:00	R	19:08:38
115265.one	parallel	PGA_Mpi_3_b	24619	4	120:00:00	R	31:17:51
115266.one	parallel	PGA_Mpi_3_d	14748	4	120:00:00	R	31:17:51
115267.one	parallel	PGA_Mpi_3_e	14780	4	120:00:00	R	31:17:51
115268.one	parallel	PGA_Mpi_5_b	16429	6	120:00:00	R	31:17:50
115269.one	parallel	PGA_Mpi_5_d	16471	6	120:00:00	R	31:17:49
115270.one	parallel	PGA_Mpi_5_e	22492	6	120:00:00	R	31:15:43
115271.one	parallel	PGA_Mpi_5_f	22450	6	120:00:00	R	31:15:45
115272.one	parallel	PGA_Mpi_11_b	4254	12	120:00:00	R	31:12:39
115273.one	parallel	PGA_Mpi_11_d	--	12	120:00:00	Q	--

```
115274.one parallel PGA_Mpi_11_e 1647 12 120:00:00 R 31:12:08
115275.one parallel PGA_Mpi_11_f 22605 12 120:00:00 R 31:11:37
```

Výpis 3: `qstat -u 3xelias`

Posledný riadok tabuľky príkazu `qstat -u 3xelias` popisuje nami spustenú úlohu. Dôležité sú pre nás predovšetkým stĺpce `Time`, `Job ID`. Posledný stĺpec `Time` hovorí o tom ako dlho je už naša úloha spustená, druhý stĺpec `Time` nám deklaruje maximálny možný čas, ktorý má úloha PGA vyhradený. Hodnoty zo stĺpca `Job ID` môžeme použiť do príkazu `qsig` pre vynútené ukončenie úlohy.

2.2.3 qfree

Ak si chceme zobrazit aktuálne vyťaženie gridu, môžeme tak urobiť príkazom `qfree`.

```
CLUSTER STATE SUMMARY                Local   GPFS Storage

Core      1  ... 12 load FreeMem Scratch Read  Write State
Node Queue                                [GB]    [GB]  [MB/s] [MB/s]

comp01 S  [ ]  ... [ ] 0.00 44.44  0 (0.0%) 0.00  0.00 free
comp02 T  [ ]  ... [ ] 0.00 44.45  0 (0.0%) 0.00  0.00 free
...
comp44 P  [0]  ... [0] 12.0 44.41  0 (0.0%) 0.00  0.00 job-exclusive
comp45 P  [0]  ... [0] 12.0 44.40  0 (0.0%) 0.00  0.00 job-exclusive
comp46 P  [0]  ... [0] 12.0 44.41  0 (0.0%) 0.00  0.00 job-exclusive
comp47 P  [0]  ... [0] 12.0 44.41  0 (0.0%) 0.00  0.00 job-exclusive
comp48 P  [X]  ... [X] 1.25 22.76  0 (0.0%) 45.50  2.83 job-exclusive
gpu1   G  [X]  ... [X] 7.98 38.33  0 (0.0%) 42.13  0.92 job-exclusive
gpu2   G  [ ]  ... [ ] 0.00 44.45  0 (0.0%) 0.00  0.00 free
gpu3   G  [ ]  ... [ ] 0.00 44.45  0 (0.0%) 0.00  0.00 free
gpu4   G  [ ]  ... [ ] 0.00 44.45  0 (0.0%) 0.00  0.00 free
```

Výpis 4: `qfree`

Prvý stĺpec popisuje názov výpočtového uzlu. Druhý stĺpec označuje druh fronty. `S` je pre sériové úlohy, `T` pre interaktívne úlohy, podobne `P` pre paralelné výpočty a `G` pre grafické výpočty. Stĺpce jeden až dvanásť označujú procesory CPU respektíve GPU pre grafické výpočty. Zvyšné stĺpce, ako už možno vyčítať z názvu, popisujú celkové zaťaženie výpočtového uzla, voľnú pamäť a využitie diskov. Posledný stĺpec `State` popisuje stav uzlu. Uzol môže byť voľný alebo vyťažený, ak vykonáva nejakú úlohu. Procesory na ktorých prebieha výpočet našej úlohy sú označené ako `[0]`, zvyšné vyťažené CPU sú označené ako `[X]`, naopak voľné CPU sú označené medzerou `[]` a v prípade, že uzol nie je dostupný, budú CPU označené ako `[-]`.

2.3 Výpočtové fronty

Posledný a najdôležitejší príkaz je `qsub`, ktorý slúži na zaradenie úloh, PBS skriptov do výpočtovej fronty. Aby sme boli schopní spustiť akúkoľvek výpočtovú úlohu na gride, potrebujeme k tomu Portable Batch System (PBS) súbor. PBS súbor je v skutočnosti iba jednoduchý textový súbor, ktorý definuje požiadavky na výpočtové zdroje a príkazy pre grid.

V tabuľke 2 sa nachádzajú všetky výpočtové fronty, ktoré sú dostupné na gride `hpc.stuba.sk`. Fronta `debug` slúži na rýchle odladenie úloh. Úlohy v tejto fronte majú vysokú prioritu preto sú spustené takmer okamžite. Debug fronta je obmedzená na maximálne dve súčasne spustené úlohy. Fronta `gpu` je ďalším typom fronty pre úlohy, ktoré využívajú grafický akcelerátor. Pre úlohy, ktoré využívajú MPI, OpenMP a iné knižnice na paralelné programovanie slúži fronta `parallel`. Úlohy takého typu musia použiť minimálne štyri a maximálne deväťdesiatšesť CPU. Poslednou výpočtovou frontou je `serial`, na ktorej môžeme spúšťať jednoprocessorové úlohy.

Názov fronty	walltime (max)	nodes	ppn
debug	30 minút	-	-
gpu	24 hodín	-	-
parallel	240 hodín	1 - 8	4 - 12
serial	240 hodín	1	1

Tabuľka 2: Výpočtové fronty a ich obmedzenia

2.4 Príklad sériovej úlohy

```
1  #!/bin/bash
2
3  #PBS -N uloha1
4  #PBS -l nodes=1:ppn=1
5  #PBS -l walltime=00:01:00
6  #PBS -A 3ANTAL-2016
7  #PBS -q serial
8
9  cd /work/3xelias/uloha1
10 ./seriova_uloha
```

Výpis 5: `uloha1.pbs`

Vo výpise 5 môžeme vidieť príklad jednoduchého skriptu sériovej úlohy. Poukážeme na jednotlivé riadky skriptu:

- Prvý riadok v súbore definuje aký shell sa má použiť pre spustenie skriptu. V našom prípade sme použili BASH, ale mohli by sme použiť aj iný shell alebo skriptovací jazyk.
- Tretí riadok určuje názov úlohy.
- Štvrtý riadok vymedzuje, koľko uzlov a procesorov si žiadame od gridu. V tomto prípade si žiadame jeden výpočtový uzol a jeden procesor.
- Piaty riadok v PBS skripte vymedzuje aké časové rozpätie potrebujeme pre úlohu. V tomto príklade si žiadame jednu minútu.
- V šiestom riadku sa nachádza identifikátor, podľa ktorého sa identifikujú úlohy s jednotlivými projektami. Tento parameter je povinný a možno ho získať po prihlásení na webový portál <https://www.hpc.stuba.sk/index.php?l=sk&page=login>.
- Parameter -q v siedmom riadku definuje typ výpočtovej fronty do akej bude úloha zaradená. V tomto príklade chceme úlohu zaradiť do fronty „serial“.
- V deviatom riadku sa presunieme do priečinku v ktorom sú uložené všetky potrebné dáta pre túto úlohu vrátane programu „seriova_uloha“.
- Posledný riadok spustí program „seriova_uloha“.

Úlohu môže zaradiť do fronty príkazom `qsub uloha1.pbs`.

2.5 Príklad paralelnej úlohy

```
1 #!/bin/bash
2
3 #PBS -N paralelna_uloha
4 #PBS -l nodes=5:ppn=12
5 #PBS -l walltime=48:00:00
6 #PBS -A 3ANTAL-2016
7 #PBS -q parallel
8 #PBS -m ea
9 #PBS -M xelias@stuba.sk
10
11 . /etc/profile.d/modules.sh
12 module purge
```

```
13 module load gcc/5.4 openmpi/1.10.2
14
15 cd /work/3xelias/parallel
16 mpirun ./parallel
```

Výpis 6: uloha2.pbs

Podobne ako v predchádzajúcom príklade sériovej úlohy si popíšeme niektoré riadky príkladu `uloha2.pbs`:

- Na rozdiel od predchádzajúcej úlohy, v tomto príklade si na riadku číslo štyri žiadame päť výpočtových uzlov a na každom uzle dvanásť CPU. Dokopy si žiadame šesťdesiat procesorov.
- V piatom riadku požadujeme časové rozpätie štyridsiatich ôsmich hodín.
- Siedmy riadok definuje paralelnú frontu.
- Parametre `e` a `a` na riadku osem hovoria o tom, kedy sa má poslať email o zmene stavu úlohy. Parameter `e` znamená po skončení úlohy. Parameter `a` znamená pri zrušení úlohy. Ďalšie parametre môžu byť `b` (štart úlohy) a `n` (neposielat žiadny e-mail) [5].
- V deviatom riadku definujeme e-mailovú adresu, na ktorú bude zaslaný mail v prípade, ak úloha skončí alebo bude prerušená.
- V jedenástom riadku načítame všetky potrebné premenné prostredia pre moduly.
- V dvanástom riadku odstránime všetky načítané moduly ak boli nejaké dostupné v premenných prostredia.
- V riadku číslo dvanásť tohto súboru načítame knižnicu gcc verzie 5.4 a knižnicu openmpi verzie 1.10.2. Pre správny beh programu by sa všetky načítané knižnice mali zhodovať stými, s ktorými bola aplikácia spúšťaná v tomto skripte skompilovaná.
- Podobne ako v ukážke 5 sa prepneme do priečinku `/work/3xelias/parallel`, ktorý musí obsahovať všetky potrebné dáta pre samotný program `parallel`.
- Posledný riadok spustí program `mpirun`, ktorý potom spustí program `parallel`. Tento krok je vysvetlený v kapitole `mpi`. Pridat odkaz.

3 MPI

Message passing je forma programovania, ktorá sa používa pri paralelnom programovaní či už na viacjadrových procesoroch, alebo v gridovom prostredí. V takejto forme programovania môže byť program rozdelený na viacero logických blokov alebo procesov. Takýchto procesov môže byť viac ako počet dostupných CPU, avšak zvyčajne by mal byť tento počet rovnaký. Procesy môžu vykonávať rozličné úlohy a môžu bežať na rozličných, geograficky oddelených CPU.

Procesy medzi sebou komunikujú posielaním správ. Správy zvyčajne reprezentujú nejaké dáta, ale môžu slúžiť aj na synchronizáciu.

Táto forma programovania zaznamenala veľký rozmach hlavne v deväťdesiatych rokoch minulého storočia, keď takmer každý predajca paralelných systémov ponúkal vlastnú implementáciu message passing prostredia.

Následkom týchto udalostí vzniklo Message Passing Interface (MPI) Forum, čo bola skupina viac ako osemdesiat ľudí zo štyridsiatich rôznych organizácií, ktoré predstavovali predajcov paralelných systémov, používateľov ale aj výskumné laboratória a univerzity [6].

Úloha MPI fóra bola zjednotiť message passing systémy a navrhnúť nový systém. Systém by mal podporovať komplexné dátové štruktúry, bezpečnú komunikáciu a byť dostatočne modulárny.

Výsledkom práce MPI fóra vznikol v júni roku 1994 štandard MPI-1.0, ktorý je dodnes akceptovaný a má mnoho používateľov aj napriek tomu, že už existujú novšie verzie štandardu. MPI štandard nie je knižnica. Je to špecifikácia toho ako by mala konkrétna implementácia knižnice vyzeráť. Existuje viacero implementácií. Medzi najznámejšie patria OpenMPI, MVAPICH, IBM MPI.

Aj napriek tomu, že MPI štandard je veľmi rozsiahly, obsahuje stovky funkcií, zaujímať sa však budeme len o niektoré z nich.

3.1 Point-to-point komunikácia

Odosielanie a prijímanie správ je kľúčovým stavebným mechanizmom MPI komunikácie. Základné operácie sú **send** (posielanie) a **receive** (prijímanie). Výmene správ medzi dvoma procesmi hovoríme *point-to-point* komunikácia. Takmer všetky MPI konštrukcie sú založené na point-to-point komunikácii [7]. Pre ilustráciu si uveďme jednoduchý príklad:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <mpi.h>
3 int main(int argc, char **argv) {
```

```

4     char msg[20];
5     int rank;
6     MPI_Init(&argc, &argv);
7     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
8     if (rank == 0) {
9         strncpy(msg, "Hello, MPI", 20);
10        MPI_Send(msg, strlen(msg) + 1, MPI_CHAR, 1, 0, MPI_COMM_WORLD);
11    } else if (rank == 1) {
12        MPI_Recv(msg, sizeof(msg), MPI_CHAR, 0, 0, MPI_COMM_WORLD, MPI_STATUS_IGNORE);
13        printf("%s\n", msg);
14    }
15    MPI_Finalize();
16    return 0;
17 }

```

Výpis 7: Point-to-point komunikácia

V tomto príklade proces nula (`rank == 0`) pošle správu procesu prostredníctvom **send** operácie `MPI_Send`. Táto operácia definuje takzvaný **send buffer**. Send buffer je miesto v pamäti odosielateľa, v ktorom sa nachádzajú dáta na odoslanie. Send buffer je v tomto prípade premenná `msg` nachádzajúca sa v pamäti procesu nula. Prvé tri argumenty send operácie špecifikujú dáta pre príjemcu. Táto správa bude obsahovať pole charov, respektíve string. Ďalšie tri parametre send operácie definujú príjemcu správy. Proces jedna (`rank == 1`), prijme správu s **receive** operáciou `MPI_Recv`. Správa je prijatá na základe zadaných parametrov a dáta sú uložené do **receive bufferu**. V tomto príklade je receive buffer premenná `msg` v pamäťovom priestore procesu jedna. Prvé tri parametre definujú dáta, ktoré chce príjemca prijať. Ďalšie tri parametre slúžia na zvolenie správy od odosielateľa. Posledný parameter sa používa na získanie informácií o prijatej správe. V tomto príklade tento parameter ignorujeme.

Program z výpisu 7 môžeme skompilovať a následne spustiť v dvoch krokoch:

```

mpicc main.c -o p2p
mpirun -n 2 ./p2p

```

Výsledkom programu a komunikácie týchto dvoch procesov bude, že proces jedna vypíše `Hello, MPI`.

3.2 Blokujúca komunikácia

Obe MPI volania v príklade 7 boli blokujúce. To znamená, že odosielateľ čaká na volaní `MPI_Send` dovtedy, kým príjemca správu prijme. To isté platí aj pre príjemcu, ktorý čaká na volaní funkcie `MPI_Recv` až kým nedostane správu od odosielateľa.

```

MPI_Send(
    const void* buf,
    int count,
    MPI_Datatype datatype,
    int dest,
    int tag,
    MPI_Comm comm)

```

Výpis 8: MPI_Send

Vo výpise 8 vidíme definíciu volania `MPI_Send`. Prvým argumentom funkcie je adresa receive buffera, ďalší argument je dĺžka buffera (`count`), ktorá musí byť celé kladné číslo. V prípade, že táto podmienka nie je splnená MPI volanie vráti chybu. Typ buffera špecifikujeme pomocou argumentu `datatype`. Niektoré základné dátové typy môžeme vidieť v tabuľke 3. Ďalšie tri argumenty slúžia na definovanie príjemcu. Pomocou parametra `dest` môžeme zvoliť komu je správa adresovaná. V prípade, že si odosielateľ a príjemca vymieňajú viac správ s rôzneho typu alebo rôzneho obsahu potrebujeme tieto správy nejako odlíšiť. Na odlíšenie správ slúži argument `tag`. Tag musí byť kladné celé číslo. V príklade 7 sme ako tag použili nulu, avšak mohli sme použiť aj inú hodnotu. Posledným argumentom je `comm`, ktorý slúži na definovanie komunikačnej skupiny. Základná komunikačná skupina je svet (`MPI_COMM_WORLD`), kde si všetci môžu vymieňať správy. MPI štandard zahŕňa aj vytváranie vlastných podskupín komunikátorov, napríklad pomocou volania `MPI_Comm_create_group` [7].

```

MPI_Recv(
    const void* buf,
    int count,
    MPI_Datatype datatype,
    int source,
    int tag,
    MPI_Comm comm,
    MPI_Status *status)

```

Výpis 9: MPI_Recv

MPI volanie `MPI_Recv` používa veľmi podobnú syntax ako `MPI_Send`. Prvé tri argumenty sú identické. Argument `source` v prípade funkcie `MPI_Recv` definuje rank odosielateľa. Ďalším rozdielom je argument `status`, ktorý sa používa na získanie informácií o prijatej správe, alebo môže byť aj ignorovaný ako v príklade 7. Štruktúra `MPI_Status` obsahuje 3 hlavné informácie: rank odosielateľa, tag správy a dĺžku správy.

MPI_Datatype	C ekvivalent
MPI_SHORT	short int
MPI_INT	int
MPI_LONG	long int
MPI_LONG_LONG	long long int
MPI_UNSIGNED_CHAR	unsigned char
MPI_UNSIGNED_SHORT	unsigned short int
MPI_UNSIGNED	unsigned int
MPI_UNSIGNED_LONG	unsigned long int
MPI_UNSIGNED_LONG_LONG	unsigned long long int
MPI_FLOAT	float
MPI_DOUBLE	double
MPI_LONG_DOUBLE	long double
MPI_BYTE	char

Tabuľka 3: Dátové typy v MPI a ich C ekvivalenty

3.3 Neblokujúca komunikácia

Výkonnosť programov môže byť v mnohých prípadoch vylepšená prekryvaním blokujúcich volaní. Jedným z možných spôsobov ako toto dosiahnuť je použitie threadov [7]. Alternatívny spôsob ako zlepšiť výkon programu môže byť použitie neblokujúcich komunikácií.

Pri neblokujúcej komunikácii si môžeme zadať štyri rôzne neblokujúce operácie: **send** pre posielanie, **recv** pre prijímanie, **send complete** pre dokončenie posielania a **recv complete** pre dokončenie prijatia. Neblokujúce volanie **send** spustí send operáciu, ale nedokončí ju. Toto volanie inicializuje skopírovanie do send buffera ale samotné kopírovanie nedokončí. Na dokončenie operácie send je potrebné ďalšie volanie **send complete**, ktoré overí že dáta boli skutočne skopírované a prenesené príjemcovi. Neblokujúca send operácia zvyčajne beží paralelne s vykonávaným programom. Podobne aj neblokujúce volanie **recv** inicializuje recv operáciu, ale nedokončí ju. Na dokončenie potrebuje separátne volanie **recv complete**, ktoré zaručí že dáta boli prenesené do recv buffera. Neblokujúca recv operácia podobne ako send pokračuje paralelne so zvyškom programu.

```
MPI_Request request[2];
if (rank == 0) {
    char msg1[] = "Hello, ", msg2[] = "MPI";
```

```

MPI_Isend(msg1, strlen(msg1) + 1, MPI_CHAR, 1, 0, MPI_COMM_WORLD, &request[0]);
MPI_Isend(msg2, strlen(msg2) + 1, MPI_CHAR, 1, 0, MPI_COMM_WORLD, &request[1]);
zlozity_vypocet();
MPI_Waitall(2, request, MPI_STATUSES_IGNORE);

} else if (rank == 1) {
    char msg1[20], msg2[20];
    MPI_Irecv(msg1, 20, MPI_CHAR, 0, 0, MPI_COMM_WORLD, &request[0]);
    MPI_Irecv(msg2, 20, MPI_CHAR, 0, 0, MPI_COMM_WORLD, &request[1]);
    iny_vypocet();
    MPI_Waitall(2, request, MPI_STATUSES_IGNORE);
    printf("%s%s\n", msg1, msg2);
}

```

Výpis 10: Neblokujúca komunikácia

Vo výpise 10 môžeme vidieť príklad neblokujúcej komunikácie. V tomto príklade ako send operácia slúži funkcia `MPI_Isend`. Proces nula (`rank == 0`) pošle najprv správu `msg1` a následne správu `msg2`. Obe volania sú neblokujúce, to znamená, že program nečaká a pokračuje funkciou `zlozity_vypocet`. Po dokončení výpočtu čaká na doručenie správ. Tento krok je dôležitý pretože ak by sme nečakali na dokončenie prenosu správy premenné `msg1` a `msg2` by už viacej nemuseli byť validné, za predpokladu že vyjdeme z `if` konštrukcie. V prípade procesu jedna (`rank == 1`), príjemca inicializuje neblokujúce volanie `MPI_Irecv` a pokračuje funkciou `iny_vypocet`. Po dokončení výpočtu skontroluje či už boli dáta prijaté volaním `MPI_Waitall`. Na tomto volaní čaká, v prípade ak dáta ešte neboli prijaté. Tento krok je pre príjemcu dôležitý pretože mu zaručuje že dáta boli prijaté a môže ich použiť.

Výstupom tohto programu môže byť „Hello, MPI“ alebo aj „MPIHello, “, pretože poradie vykonania operácii nie je zaručené. Správne poradie správ by sme docielili rôznymi tagmi pre správy `msg1` a `msg2`.

3.4 Dynamická alokácia

V príklade 7 sme použili staticky alokovanú pamäť, čo je vo väčšine prípadov nepraktické a často môže viesť k chybám. Ak by v tomto príklade odosielateľ poslal dlhšiu správu ako je príjemca schopný prijať tak by tento program zlyhal.

Riešením tohto problému je dynamická alokácia pamäte pre prijaté správy. Aby sme mohli pamäť dynamicky alokovať potrebujeme vedieť koľko dát sa nám snaží odosielateľ poslať. To môžeme zistiť pomocou štruktúry `MPI_Status` a volaní `MPI_Probe`, `MPI_Get_count`. Kód procesu jedna z príkladu 7 by sme mohli nahradiť nasledovne:

```

MPI_Status status;
int msg_size;
MPI_Probe(0, 0, MPI_COMM_WORLD, &status);
MPI_Get_count(&status, MPI_CHAR, &msg_size);
char *buf = (char *)malloc(msg_size);
MPI_Recv(buf, msg_size, MPI_CHAR, 0, 0, MPI_COMM_WORLD, MPI_STATUS_IGNORE);
printf("%s\n", buf);
free(buf);

```

3.5 Serializácia dátových typov

Častokrát si procesy pri MPI komunikácii medzi sebou potrebujú vymieňať nie len primitívne dátové typy, ale aj zložitejšie dátové štruktúry. Odosielateľ musí dátové štruktúry pred komunikáciou rozložiť na primitívne typy. Spôsob ako sa dáta rozložia je medzi odosielateľom a príjemcom vopred dohodnutý. Príjemca po prijatí dát znovuposkladá dátové štruktúry do pôvodného stavu. Tomuto procesu sa hovorí serializácia dát.

MPI rieši tento problém napríklad volaniami `MPI_Type_create_struct`, `MPI_Pack`. Avšak tieto volania častokrát vyžadujú príliš nízkoúrovňové programovanie.

4 Návrh

Jedným zo základných cieľov tejto práce je poskytnúť jednoduchšie programové prostredie pre ďalších lúštitelov a programátorov, ktorí budú pri svojej práci využívať grid.

Takéto prostredie by malo poskytnúť spoločné stavebné bloky, ktoré by si riešitelia medzi sebou mohli navzájom zdieľať. Stavebné bloky by mohli zahŕňať napríklad implementácie šifier, ohodnocovacích funkcií alebo prácu so súborami. Ďalším spoločným črtom je vytváranie projektov, ktoré by malo byť čo najviac automatické a malo by generovať štruktúru priečinkov a základných súborov.

Keďže vývoj priamo na gride v konzolovom prostredí je nepraktický, vývoj v nami navrhovanom prostredí by mal spĺňať nasledovné základné požiadavky:

- Automatické vytvorenie projektu.
- Lokálny vývoj a testovanie
- Zdieľanie modulov medzi projektami
- Automatické generovanie a úprava skriptov pre gridové prostredie
- Jednoduchá synchronizácia s gridom `hpc.stuba.sk`

4.1 Štruktúra prostredia

V tejto kapitole si definujeme štruktúru prostredia a význam jednotlivých priečinkov a súborov.

Na nasledujúcom výpise môžeme vidieť štruktúru navrhnutého prostredia:

```
.
|- build.sh
|- CMakeLists.txt
|- module/
|   |- CMakeLists.txt
|   |- modul1/
|       |- CMakeLists.txt
|       |- ... h/cpp
|       |- ... h/cpp
|   |- modul2/
|   |- ...
|- project/
|   |- CMakeLists.txt
|   |- projekt1/
```

```

| |   |- CMakeLists.txt
| |   |- projekt1
| |   |- projekt1.pbs
| |   |- src/
| |   |-   |- main.cpp
| |   |   |- h/cpp
| |   |   |- ...
|   |- projekt2/
|   |-   |- ...
|   |- ...
|- vendor/
   |- lib1
   |- lib2
   |- ...

```

Výpis 11: Štruktúra prostredia

Skript `build.sh` vytvára projekty do podpriechinku `project`. Každý projekt po vytvorení obsahuje automaticky generované súbory: `CMakeLists.txt`, binárny spustiteľný súbor (po kompilácii), `.pbs` súbor a `main.cpp` v priečinku `src`. Do priečinku `src` by sa mali umiestňovať zdrojové súbory špecifické pre daný projekt. Ostatné zdrojové kódy, ktoré nesúvisia s daným projektom by mali ísť do modulov (priečinkov `module`). Priečinkov `module` slúži na zdieľanie zdrojových kódov (modulov) medzi projektami. Posledným priečinkom je `vendor`, ktorý slúži na uchovávanie knižníc od tretích strán.

4.2 Implementácia

V tejto práci sme si zvolili ako programovací jazyk `C++`, ktorý je dostatočne rýchly a poskytuje bohatú štandardnú knižnicu. Tento programovací jazyk sa taktiež vyučuje na Fakulte elektrotechniky a informatiky a je veľmi rozšírený v industriálnej sfére.

Keďže MPI štandard od verzie tri priamo nepodporuje `C++` volania [7], budeme používať knižnicu Boost a jej MPI nadstavbu. Z Boost knižnice tiež využijeme modul `serialization` pre dátovú serializáciu. V rámci gridu `hpc.stuba.sk` nemáme k dispozícii knižnicu boost. Tiež nemáme možnosť inštalovať žiadne ďalšie knižnice, a preto sa pred prvou kompiláciou knižnica Boost stiahne a automaticky skompiluje pre dané prostredie. Kompilácia prebieha iba jedenkrát a knižnica sa uloží do priečinku `vendor/boost_<verzia>`.

Ako buildovací systém sme použili `cmake`. `Cmake` je multiplatformový, open-source nástroj, ktorý sa používa na buildovanie a testovanie softvéru [8]. Používa jednoduché konfiguračné súbory `CMakeLists.txt`, ktorých úlohou je generovanie štandardných buildovacích

súbor ². Tento nástroj sme si tiež zvolili pretože dokáže vygenerovať naivné prostredie na kompiláciu zdrojového kódu a knižníc. Taktiež zahŕňa podporu viacerých „projektov“ vrámci jedného repozitáru. Ďalšou výhodou je že môže byť použitý v kombinácii s takmer ľubovoľným grafickým vývojovým prostredím.

Na správu zdrojových kódov sme použili systém `git` pretože archiváciu správu zdrojových kódov považujeme za veľmi dôležitú. Zdrojové kódy tohto projektu sú dostupné na githube <https://github.com/melias122/grid>.

Okrem archivácie zdrojových kódov považujeme za dôležité aj to ako je zdrojového kód naformátovaný. Na formátovanie zdrojových súborov sme použili nástroj `clang-format`.

4.3 build.sh

Základným príkazom celého prostredia je skript `build.sh` v kombinácii s buildovacím nástrojom `cmake`. Skript `build.sh` sa používa na vytváranie nových projektov, kompilovanie, synchronizáciu s gridom a na spúšťanie projektov v lokálnom prostredí ale aj na gride. Základné operácie tohto príkazu `build.sh` sú:

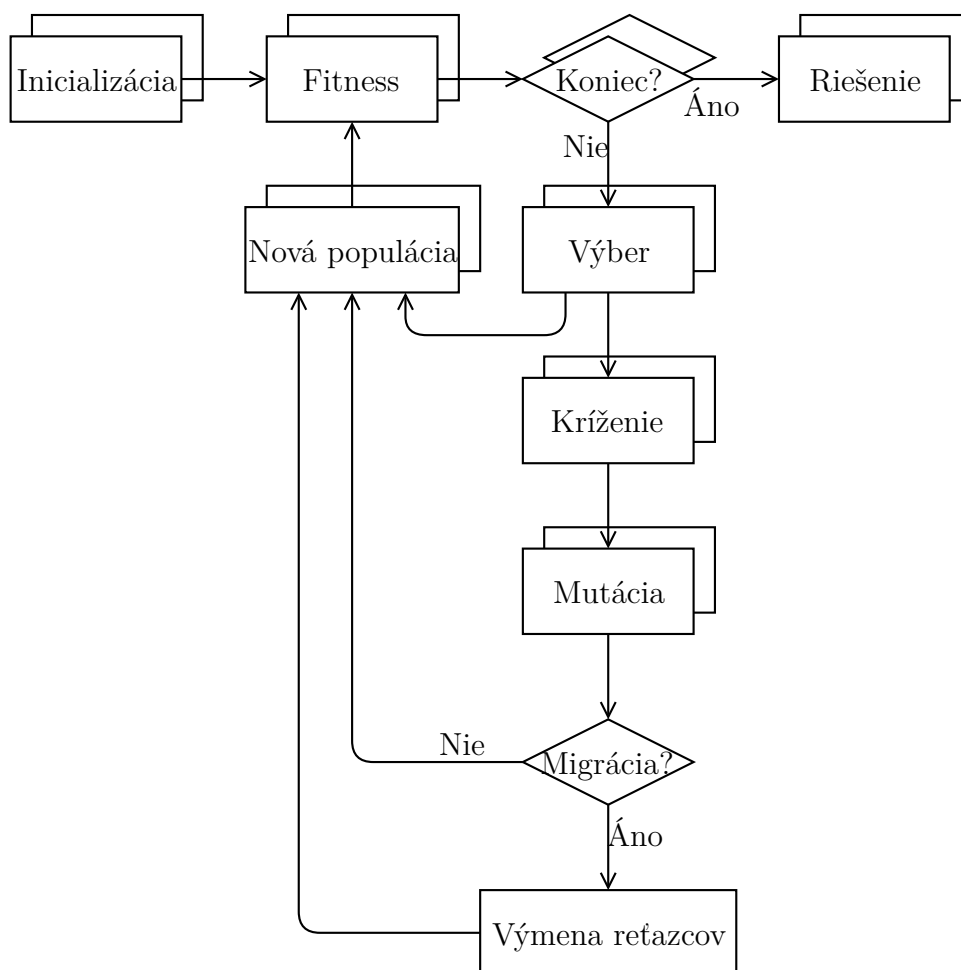
- `-b/--build`, tento argument skompiluje všetky projekty a moduly nachádzajúce sa v priečinkoch `project`, `module` do priečinku `.build`. Taktiež skompiluje všetky potrebné závislosti a sformátuje zdrojové kódy, prípade existencie nástroja `clang-format`. Tento mód kombinuje príkazy: `module` (kap. 2.2.1), `clang-format`, `cmake` a `make`.
- `-h/--help` argument vypíše návod ako pracovať s týmto príkazom.
- `-r/--run [projekt]` spustí projekt, ktorý je zadaný ako ďalší argument tohto príkazu. Názov projektu sa musí zhodovať s niektorým vytvoreným projektom z priečinku `project`. Hlavou myšlienkou tohto argumentu je že by mal zjednocovať spúšťanie projektov rovnako v lokálnom prostredí ale aj na gride. Príkaz v tomto móde parsuje `main.cpp` v priečinku projektu, z ktorého sa snaží získať nastavenia `nodes`, `ppn`, `walltime` a `queue`. Na základe týchto nastavení pred každým spustením upraví `.pbs` súbor. V prípade, že tento používame tento mód v lokálnom prostredí, príkaz použije nastavenia ako argumenty pre `mpirun` na simulovanie gridového prostredia.
- `-n/--new-project [projekt]` vytvorí projekt do priečinku `project`. Tento príkaz automaticky vytvára základné súbory pre projekt ktorými sú: `main.cpp`, a `.pbs` súbor, `CMakeLists.txt`, `.gitignore`.

²Makefile pre Unix, workspaces pre Windows MSVC

- `--sync` zosynchronizuje lokálny projekt na grid do priečinku `/work/$USER/grid`. Priečinok `work` bol zvolený narozdiel od `home`, pretože nekladie žiadne obmedzenia na počet súborov. Tento príkaz nemá deštruktívny charakter, nezmaže žiadne súbory. Na použitie tohto módu je potrebné mať vytvorený súbor `.username`, ktorý musí obsahovať login do gridu. V prípade, že tento súbor neexistuje, príkaz `build.sh` v tomto móde upozorní používateľa aby si ho vytvoril.

4.4 PGA modul

Základnú implementáciu GA poskytol vedúci práce Ing. Eugen Antal, PhD. Táto implementácia bola ďalej nami rozvíjaná a do značnej miery upravená, niektoré časti kódu boli prepísané, avšak základná idea ostala. Doimplementovali sme niektoré genetické operácie kríženia: single point crossover, uniform crossover.



Obrázok 2: Štruktúra PGA s migračným modelom

Na obrázku 2 môžeme vidieť zjednodušenú blokovú shému PGA s migračným mode-

lom. Pri takomto type prebieha výpočet jednotlivých genetických algoritmov vo viacerých nezávislých, ale spolupracujúcich subpopuláciách (ostrovoch). Tieto ostrovy môžu bežať na viacerých procesoroch alebo aj nezávislých počítačoch. Ostrovy si medzi sebou po určitom počte generácií a na základe vopred určených väzieb (topológií) vymenia niektorých jedincov, napríklad najlepších v aktuálnej generácii. Potom pokračujú izolovane ďalej. Procesu výmeny jedincov medzi jednotlivými GA hovoríme migrácia.

Operácia	Typ	Popis
Select	Elitism(n)	Vyberie n najlepších jedincov
	Random(n)	Náhodne zvolí n jedincov
	Tournament(n)	n-krát zvolí 2 jedincov a vyberie lepšieho
	Worst(n)	Vyberie n najhorších jedincov
Crossover	SinglePoint(1 2)	Zvolí náhodný bod a skříží 2 rodičov. Vrátí 1 alebo 2 potomkov.
	Uniform(1 2)	Zvolí niekoľko náhodných bodov a skříží 2 rodičov. Vrátí 1 alebo 2 potomkov.
Mutation	Swap(n)	n-krát vymení 2 rôzne gény.
	SwapAll	Zmení všetky gény jedinca.
	WithProbability(p)	S pravdepodobnosťou p zmení náhodný gén.

Tabuľka 4: Operácie GA

Základné stavebné bloky GA v našej implementácii sú:

Genes Obsahuje jednotlivé gény a predstavuje kľúč šifry. Z implementačného hľadiska sme zvolili reprezentáciu pomocou `std::string`. Výhodou tejto reprezentácie je jednoduchosť a aj o niečo lepší výkon, napríklad oproti `std::vector`.

Chromosome Je tvorený z génov a má skóre. Ohodnocovanie génov prebieha v našom modeli pomocou fitness funkcie a aj šifrovacej funkcie.

Generator Generuje gény pre chromozóm. Gény sú generované z abecedy podľa vopred určeného modelu. Generator je interface a teda umožňuje rôzne implementácie, pre rôzne reprezentácie génov. Pre monoalfabetickú substitúciu sme napríklad vytvorili `ShuffleGenerator`, ktorý generuje náhodné permutácie so zadanej abecedy.

Population Obsahuje chromozómy a je reprezentovaná pomocou `std::vector`.

Cipher Interface, ktorý definuje šifru pomocou dešifrovacej funkcie.

Fitness Interface, ktorý definuje vyhodnocovaciu funkciu.

Migrator Abstraktná trieda, ktorá definuje migračnú logiku a vytvára topológiu.

Select Abstraktná trieda, ktorá definuje operáciu výberu.

GeneticOperation Abstraktná trieda, definuje operácie kríženie a mutácia.

Schema Popisuje genetický algoritmus. Obsahuje počet iterácií, veľkosť počiatočnej populácie, generátor, lúštenú šifru, fitness funkciu a migrátor v prípade že použijeme PGA. Schéma tiež umožňuje pridávať operácie. Operácia je dvojica zložená z výberu (Select) a genetickej operácie (Mutation, Crossover). Dostupné operácie môžeme vidieť aj tabuľke 4.

4.4.1 Genetický algoritmus

Genetický algoritmus v module PGA je implementovaný nasledovne:

```
1  Population GeneticAlgorithm::run(int id, const Scheme &scheme) {
2      Population pop;
3      for (int i = 0; i < scheme.initialPopulation; i++) {
4          pop.emplace_back(scheme.generator, scheme.cipher, scheme.fitness);
5      }
6      for (int i = 1; i <= scheme.iterations; i++) {
7          if (scheme.migrator) {
8              scheme.migrator->migrate(id, i, pop);
9          }
10         Population newpop;
11         for (const std::vector<Operation> &ops : scheme.operations) {
12             Population subpop = pop;
13             for (const Operation &op : ops) {
14
15                 subpop = op.select->select(subpop);
16                 op.geneticOperation->apply(subpop);
17
18                 for (Chromosome &c : subpop) {
19                     c.calculateScore(scheme.cipher, scheme.fitness, scheme.cache);
20                 }
21             }
22             append(newpop, subpop);
23         }
24         pop.swap(newpop);
25     }
26     std::sort(pop.begin(), pop.end(), Chromosome::byBestScore());
27     return pop;
28 }
```

Výpis 12: Genetický algoritmus

Základom tohto GA je trieda **Scheme**, ktorá definuje štruktúru genetického algoritmu. V prípade, že používame migračný model algoritmus musí mať unikátne id. Na riadku 2 až

5 algoritmus vytvorí jednotlivé chromozómy populácie o veľkosti `initialPopulation`. Gény sú vytvára generátor a skóre je vypočítané pomocou šifry a fitness funkcie. Ak je migrátor definovaný v schéme, tak na riadku 7-9 vykonáme migráciu populáciu. Migračná logika sa odohráva vo vnútri migrátora a migrovaný jedinci sa pridajú do aktuálnej populácie. Následne sa na aktuálnu populáciu na riadkoch 10 až 21 budú vykonávať operácie podľa vytvorenej schémy. Operácie môžu mať aj podoperácie a vytvárajú tak akúsi reťaz operácií. Na riadku 12 sa vytvorí kópia pôvodnej populácie, na ktorú sa ide aplikovať reťaz operácií. Riadok 13 prechádza cez jednotlivé operácie. Vždy sa vykoná najprv výber (`Select`) a na vybratú subpopuláciu je aplikovaná genetická operáciu kríženia alebo mutácie (riadok 15 a 16). Tejto subpopulácii sa preráta skóre. V tomto modeli musíme rátať skóre pri každej subpopulácii, pretože niektorá operácia, napríklad `swap`, mohla zmeniť gény a teda aj skóre jedinca, ktoré by mohlo byť použité v ďalšom výbere. Riadok 22 zjednocuje jednotlivé subpopulácie a na riadku 24 sa aktuálna populácia vymení za novú. Po prejdení všetkých iterácií už len algoritmus zoradí jedincov podľa najlepšieho skóre a vráti výslednú populáciu.

Pomocou triedy `Scheme` by sme mohli vytvoriť jednoduchú schému GA napríklad takto:

```

1  ShuffleGenerator gen(alpha);
2  Monoalphabetic cipher(ciphertext);
3  L1DistanceBigrams fitness(bigrams);
4  Scheme s(10000, 30, &gen, &cipher, &fitness);
5  s.addOperations(new Select::Elitism(1), new Mutation::Swap(1));
6  auto subop = s.addOperations(new Select::Elitism(2), new Crossover::SinglePoint(2));
7  subop.emplace_back(new Select::Interface, new Mutation::WithProbability(0.25));
8  ...

```

V tomto príklade by sme vytvorili `ShuffleGenerator` z danej abecedy `alpha`, monoalfabetickú šifru s `ciphertextom`, ktorý chceme lúštiť, bigramovú fitness funkciu s referenčnými hodnotami `bigrams`. Schéma `s` má 10000 iterácií GA, počiatočná populácia má veľkosť 30 jedincov. Schéma obsahuje dve zreťazenia operácií. Prvé zreťazenie je na riadku 5, kde sa vyberie jeden elitný jedinec na ktorého je aplikovaná operácia `Swap`. Druhé zreťazenie je na riadku 6 a 7, kde sa z populácie vyberú dvaja elitný jedinci, ktorí sa skrížia a vytvoria dvoch potomkov. Na riadku 7 potom pridáme suboperáciu. Výber len skopíruje populáciu na ktorú sa aplikuje mutácia. Jednotlivých podoperácií ako aj zreťazení môžeme vytvárať ľubovoľne veľa.

4.4.2 Serializácia Chromozómov

Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.5, pri MPI komunikácii častokrát potrebujeme vymenovať aj zložené dátové typy ako štruktúry, triedy, vektory a iné.. Pri implementácii PGA migrátora sme narazili na tento problém. Keď nastane čas migrácie, jednotlivé os- trovy si medzi sebou potrebujú vymeniť časť populácie. Aby migrátor mohol posielat a aj prijímať vektory chromozómov (populácie). Do triedy Chromosome sme museli implemen- tovať serializačnú procedúru, čo bolo vďaka použitiu Boost knižnice veľmi jednoduché.

Na nasledujúcich riadkoch môžeme vidieť ako vyzerala trieda Chromosome pred úpravou potrebnou na serializáciu:

```
1 class Chromosome {
2 public:
3     // public methods ...
4 private:
5     Genes m_genes; // std::string
6     double m_score;
7 };
8 using Population = std::vector<Chromosome>;
```

Ďalšie riadky zobrazujú triedu Chromosome po úprave na serializáciu aj s potrebnými include súbormi z knižnice Boost.

```
1 #include <boost/serialization/access.hpp>
2 #include <boost/serialization/string.hpp>
3 #include <boost/serialization/vector.hpp>
4
5 class Chromosome {
6 public:
7     // public methods ...
8 private:
9     friend class boost::serialization::access;
10    template <class Archive>
11    void serialize(Archive &ar, const unsigned int version)
12    {
13        ar &m_genes;
14        ar &m_score;
15    }
16    Genes m_genes; // std::string
17    double m_score;
18 };
19 using Population = std::vector<Chromosome>;
```


Hlavnou myšlienkou tohto riešenia je sprístupnenie privátnych premenných a funkcie serialize triedy Chromosome. To sme dosiahli pridaním riadku 9. Na riadku 10 až 15 je uvedený kód serializácie, ktorý je veľmi jednoduchý aj pre elegantnosť Boost knižnice, v ktorej je už serializácia pre stringy, vektory aj primitívne typy implementovaná.

4.4.3 Mpi migrátor a topológie

Aby sme boli schopný vytvoriť PGA potrebujeme okrem genetického algoritmu nejako vytvárať topológie, ktoré medzi sebou dokážu komunikovať.

Vytváranie topológií sa nám podarilo zovšeobecniť nasledovným spôsobom:

```

1  class Migrator {
2      public:
3      Migrator(int migrationTime);
4      virtual void migrate(int senderId, int itteration, Population &population) = 0;
5      // sender -> receiver
6      void addMigration(int senderId, int receiverId, Migration::Type t, int n)
7      // ...
8  };

```

Výpis 13: Abstrktná trieda Migrator

Migrator je abstraktná trieda, ktorá definuje interface migrate a pomocnú funkciu addMigration na vytváranie topológií. Ideou tohto modelu je, že každý GA migruje v rovnakom čase. Funkcia addMigration vytvára migračné väzby typu odosielateľ (senderId) posíela príjemcovi (receiverId) n jedincov typu t. Pričom typ t môže byť napríklad: najlepší, najhorsi, nahodný a iné. Pre príjemcu samozrejme platí, že očakáva migráciu rovnakého typu. Interface migrate musí byť implementovaný pre kontrétny PGA Migrator. Konkrétne implementácie môžu zahŕňať napríklad: thready, MPI, OpenMP, a ďalšie. Pomocou Migrator-a by sme mohli vytvoriť napríklad topológiu f z obrázku 10, ktorá by obsahovala 5 ostrovov.

```

1  int size = 5;
2  Migrator m;
3  for (int i = 0; i <= size - 2; i += 2) {
4      m.addMigration(i + 1, 0, Migration::Type::Best, 1);
5      for (int j = 1; j <= size - 2; j += 2) {
6          m.addMigration(i + 2, j, Migration::Type::Best, 1);
7      }
8  }

```

V tejto práci sme implementovali MPI migrátor nasledovným spôsobom:

```

1  void MpiMigrator::migrate(int senderId, int itteration, Population &population)

```

```

2  {
3      // nonblocking send
4      for (const Migration &m : p_senderMigrations[senderId]) {
5          Population pop = m.select(p);
6          mpi::request r = comm.isend<Population>(m.receiverId(), 0, pop);
7      }
8      // recv
9      for (const int &id : p_receiverMigrations[senderId]) {
10         Population pop;
11         comm.recv<Population>(id, 0, pop);
12         append(p, pop);
13     }
14     // wait for non blocking send
15     for (auto &r : request) {
16         r.wait();
17     }
18 }

```

Výpis 14: Kód MpiMigrator-a

MpiMigrátor pošle niektorých jedincov populácie vopred zadaného typu, podľa vytvorenej migračnej schémy (riadok 4-7). Posielanie v tomto prípade nesmie byť blokujúce, pretože by sa každý odosielateľ snažil iba poselať ale nikto by nič neprijímal, čo by znamenalo deadlock. Naopak prijímanie blokujúce byť môže (riadok 9-13). Migrátor prijme nových jedincov ak existuje k nemu priradená väzba. Prijatých jedincov potom zaradí do aktuálnej populácie a nakoniec čaká na dokončenie neblokujúcich volaní (riadok 15-17).

4.5 Príklad použitia

Táto kapitola by mala slúžiť ako manuál pre ďalších používateľov. Postupne si prejdeme všetky kroky potrebné k použitiu nami vytvoreného softvéru.

4.5.1 Lokálny vývoj

Na lokálny vývoj sme použili linuxový operačný systém Ubuntu 16.04 LTS, ktorý poskytuje všetky potrebné nástroje na vývoj. Podobné kroky by však mali platiť aj na iných linuxových operačných systémoch, prípadne MacOS alebo Windows 10, ktorý v najnovších verziách podporuje **bash** a balíčkový systém **apt** [9].

Prvým krokom je nainštalovanie potrebných balíčkov príkazom **apt**.

```
sudo apt install build-essential libmpich-dev git cmake clang-format
```

Druhý krok je naklonovanie git repozitára. Tento krok môžeme preskočiť ak používame zdrojové súbory priložené k tejto práci.

```
git clone git@github.com:melias122/grid.git
```

V treťom kroku sa prepneme do repozitára a skompilujeme celý projekt. Ešte pred kompiláciou musíme vytvoriť súbor `.project-id`, ktorý by musí obsahovať identifikátor pre náš projekt, v opačnom prípade nás na to upozorní príkaz `build.sh`. Prvýkrát môže byť kompilovanie časovo náročnejšie, pretože sa musí stiahnuť a skompilovať knižnica `boost` s príslušnými modulmi.

```
# prepnutie sa do repozitara
cd grid/

# vytvorenie id projektu
echo 3ANTAL-2016 > .project-id

# kompilacia projektu a zavislosti
./build.sh -b
```

V štvrtom kroku by sme mali mať celý repozitár úspešne skompilovaný a môžeme založiť nový projekt. V prípade, že niečo neprebehlo dobre, môžeme všetko vrátiť do pôvodného stavu príkazom `git clean -xdf`, alebo projekt zmazať a začať od kroku jedna. Na vytvorenie nového projektu nám stačí zadať:

```
# vytvorenie noveho projektu s nazvom HelloGrid
./build.sh -n HelloGrid
```

Čo vytvorí nasledovnú štruktúru v priečinku projekt:

```
project/CMakeLists.txt
project/HelloGrid/CMakeLists.txt
project/HelloGrid/HelloGrid.pbs
project/HelloGrid/.gitignore
project/HelloGrid/src
project/HelloGrid/src/main.cpp
```

Dôležité súbory pre kompilačný systém sú všetky `CMakeLists.txt` súbory bez ktorých sa projekt neskompiluje. V prípade že by sme chceli pridať ďalší `.cpp` súbor, môžeme ho pridať do priečinku `HelloGrid/src` a následne ho musíme pridať do súboru `HelloGrid/CMakeLists.txt` v ktorom existuje nápoveda kam pridať zdrojový súbor.

```
1 // Project HelloGrid
2 //
3 // nodes defines number of nodes to use
4 // ppn defines number of proccesors to use
5 // total cores = nodes * ppn
6 // nodes = 1
```

```

7 // ppn = 2
8 //
9 // queue defines queue for this project
10 // available queues are: serial, parallel, debug, gpu
11 // queue = parallel
12 //
13 // walltime defines time to run on grid. Format is hh:mm:ss
14 // walltime = 24:00:00
15 //
16 // Variables above are used for ../HelloGrid.pbs
17 // Edit them as needed, but do not delete them!
18 // Notice that gpus are not supported yet.
19
20 #include <iostream>
21 #include "MpiApp.h"
22 using namespace std;
23 int main(int argc, char **argv) {
24     MpiApp app(argc, argv);
25     println("Hello, " << "MpiApp");
26     return 0;
27 }

```

Výpis 15: HelloGrid/src/main.cpp

Parametre nodes a ppn sú dôležité pre spustenie programu na lokálnom počítači. Zvyšné parametre, queue a walltime sa prejavia až pri spustení na gride.

Zmeňme riadok 6 na `nodes = 2`, riadok 11 na `queue = debug`, riadok 14 na `walltime = 00:01:00` a nahradme funkciu main nasledovne:

```

int main(int argc, char **argv) {
    MpiApp app(argc, argv);
    if (app.rank() == 0) {
        string msg;
        for (int i = 1; i < app.size(); i++) {
            app.recv(i, 0, msg);
            println(msg);
        }
    } else {
        string msg("hello my number is " + to_string(Rand.Int(0, 100)));
        app.send(0, 0, msg);
    }
    return 0;
}

```

Proces 0 v tomto príklade prijme 3 správy od procesov 1, 2, 3, ktoré posielajú náhodné číslo medzi 0 a 100. Teraz môžeme projekt HelloGrid skompilovať a následne spustiť pomocou príkazov:

```
# skompiluje projekt HelloGrid a vsetky zavislosti
./build.sh -b

# spustenie programu HelloGrid
./build.sh -r HelloGrid

# priklad vystupu programu HelloGrid
hello my number is 26
hello my number is 62
hello my number is 73
```

4.5.2 Spustenie na gride hpc.stuba.sk

Aby sme boli schopný použiť program vytvorený v kapitole 4.5.1. Musíme najprv celý projekt skopírovať na grid hpc.stuba.sk. Možností ako skopírovať projekt je viacero. Môžeme ho skopírovať manuálne napríklad pomocou programu rsync, scp alebo môžeme použiť systém git, prípadne iný program na kopírovanie. Pri manuálnom kopírovaní si treba dať pozor aby sme neskopírovali priečinky a súbory, ktoré závisia od lokálneho prostredia. Sú to hlavne súbory z predchádzajúcich kompilácií a priečinky: .build a vendor/boost. Odporúčame preto použiť príkaz build.sh a jeho argument --sync. Nachádzame sa v priečinku /grid a repozitáre môžeme zosynchronizovať pomocou:

```
./build.sh --sync
```

Príkaz ./build.sh --sync skopíruje celý projekt /grid na server hpc.stuba.sk do priečinku /work/3xelias/grid. Taktiež skopíruje .project-id a vynechá všetky súbory viazané na lokálne prostredie. Po skopírovaní súborov sa môžeme prihlásiť pomocou ssh.

```
# prihlasenie do gridu
ssh 3xelias@login.hpc.stuba.sk

# prepnutie sa do priecinku kam sme skopirovali projekt
cd /work/3xelias/grid

# skompilovanie projektu
./build.sh -b

# pridanie programu do vypoctovej fronty
./build.sh -r project/HelloGrid
```

V tomto prípade neuvidíme žiadny výstup. Výstup si môžeme pozrieť až po zaradení do fronty a skončení programu, čo by malo v prípade že sme použili debug frontu takmer okamžité. Výstup môžeme nájsť po skončení programu v priečinku `project/HelloGrid`. Sú to súbory `HelloGrid` s príponou `.o<id_procesu>` pre štandardný výstup a `.e<id_procesu>` pre chybový výstup. Výstupy si môžeme stiahnuť na lokálny počítač pomocou:

```
# exit z gridu
exit

# na lokalnom pocitaci v priečinku ~/grid
./build.sh --sync
```

Tentokrát, ak sme nespravili žiadnu zmenu na lokálnom pc, tak sa neskopíruje nič, ale stiahnu sa výstupy s programu `HelloGrid` do priečinku `project/HelloGrid`.

5 Experiment s GA

V našej práci sme sa rozhodli vyskúšať experiment s genetickými algoritmi, ktoré lúštia monoalfabetickú substitúciu. Dôležitosť tohto experimentu spočívala v nájdení vhodných parametrov, pri ktorých bude najvyššia úspešnosť rozlúštenia zašifrovaného textu.

Prvým krokom bolo nasadenie vlastnej implementácie GA, ktoré by sme mohli upraviť podľa vlastných požiadaviek.

Ďalším krokom bolo zvolenie vhodných parametrov GA, pre nájdenie optimálneho riešenia. Naším zámerom bolo preskúmať viacero parametrov, ktoré by sme mohli neskôr použiť pre ďalšie skúmanie paralelných genetických algoritmov. Medzi skúmané parametre patrili: veľkosť počiatočnej populácie, počet iterácií genetického algoritmu a kombinácie rôznych operácií (schémy). Veľkosť počiatočnej populácie, ktorú sme skúmali bola v počte: 10, 20, 50 a 100 chromozómov. Počet iterácií bol 10000 a 50000. Zvolené schémy môžeme vidieť v tabuľke 5.

Prvým stĺpcom tabuľky je názov samotnej schémy. Ďalšie stĺpce tabuľky predstavujú zrefazovanie jednotlivých operácií. Riadky schémy predstavujú aplikovanie jednotlivých refazov operácií na populáciu z predchádzajúcej generácie. Všimnime si napríklad schému **J**. Prvou operáciou v prvom riadku tejto schémy je výber elitného jedinca, ktorý postupuje do novej generácie. V druhom riadku je tak isto zvolený jeden elitný jedinec, ale tentokrát je nad ním vykonaná operácia mutácie, ktorá jeden krát zamení pozície dvoch náhodne vybraných génov. V tretom riadku schémy **J** sa $((n-2)/2)$ -krát vykoná náhodný výber, ktorého výstupom sú dvaja jedinci. Títo jedinci postupujú do operácie kríženia, ktorej výsledkom sú dvaja nový potomkovia nad ktorými sa vykoná operácia swap.

Úspešnosť jednotlivých schém bola vyhodnocovaná nad textami od dĺžky 50 po 2000 s nárastom o 50 znakov, pričom z každej dĺžky sme mali k dispozícii 100 rôznych textov. Po celom behu GA bol vybraný najlepší jedinec reprezentujúci potencionálny kľúč, ktorým bol dešifrovaný zašifrovaný text a jeho výsledok porovnaný s pôvodným otvoreným textom. Ako ohodnocovacia funkcia bola použitá bigramová funkcia, ktorá vypočítavala manhattanovskú vzdialenosť.

5.1 Distribúcia parametrov

Aby sme mohli využiť celú výpočtovú silu ktorú nám gridové prostredie ponúka a aby sme sa zároveň vyhli opakovanému spúšťaniu každej schémy, navrhli sme riešenie, v ktorom by sme mali jeden hlavný proces distribuuujúci parametre n pracovných procesov.

Schéma	Výber	Mutácia	Kríženie	Suboperácia
A	Tournament(n)	Swap(1)	-	-
B	Random(n)	Swap(1)	-	-
C	Tournament(n/2)	Swap(1)	-	-
	Tournament(n/2)	-	-	-
D	Tournament(n/2)	Swap(1)	-	-
	Random(n/2)	-	-	-
E	Elite(1)	-	-	-
	Elite(1)	Swap(1)	-	-
	(n-2) * Tournament(2)	-	Singlepoint(2)	
F	Elite(1)	-	-	-
	Elite(1)	Swap(1)	-	-
	(n-2) * Tournament(2)	-	Singlepoint(1)	-
G	Elite(1)	-	-	-
	Elite(1)	Swap(1)	-	-
	((n-2)/2) * Tournament(2)	-	Singlepoint(2)	Swap(1)
H	Elite(1)	-	-	-
	Elite(1)	Swap(1)	-	-
	(n-2)*Random(2)	-	Singlepoint(1)	-
I	Elite(1)	-	-	-
	Elite(1)	Swap(1)	-	-
	(n-2)/2 * Random(2)	-	Singlepoint(2)	-
J	Elite(1)	-	-	-
	Elite(1)	Swap(1)	-	-
	((n-2)/2) * Random(2)	-	Singlepoint(2)	Swap(1)

Tabuľka 5: Schémy GA

Tento spôsob môže mať dve riešenia. Prvým je, že hlavný proces rozhoduje komu posíla prácu. Druhý spôsob riešenia je, že pracovné procesy notifikujú hlavný proces keď sú voľné. Nevýhodou prvého riešenia je, že môžu vzniknúť časové prestoje pracovných procesov, pretože tu chýba spätná komunikácia a hlavný proces prakticky nemá možnosť zistiť či proces svoju prácu skončil. Tento problém rieši druhý prístup, kde sa pracovné procesy snažia získať prácu hneď ako je to možné. Preto sme sa rozhodli implementovať druhý spôsob, ktorý je podľa nášho názoru ľahší na implementáciu a aj rýchlejší.

Úlohou hlavného procesu je distribúcia parametrov (nastavení GA) pracovným procesom. Hlavný proces zostaví parametre: iterácia, veľkosť populácie, dĺžka textu, načíta otvorený text a zašifrovaný text. Potom čaká na notifikáciu od ľubovoľného pracovného procesu, od ktorého prijme jeho id. Následne zostaví parametre a pošle ich pracovnému procesu na spracovanie. V prípade, že hlavný proces už nemá čo poslať, čaká na všetky pracovné procesy, ktoré následne ukončí.

kluc

Úlohou pracovného procesu je na prijaté parametre aplikovať schémy z tabuľky 5. Pracovný proces sa snaží získať prácu od hlavného procesu tak, že mu najprv pošle svoje id a potom čaká kým mu hlavný proces pridelí prácu (parametre), alebo zruší jeho činnosť.

```
void run_master(mpi::comm &comm) {
    for (int itteration : {10000, 50000}) {
        for (int populationSize : {10, 20, 50 , 100}) {
            for (int textsize = 50; textsize <= 2000; textsize += 50) {
                for (int text = 1; text <= 100; text++) {
                    string pt = read_plaintext();
                    string ct = read_ciphertext();
                    Data data;
                    comm.recv(mpi::any_source, 0, data);
                    // copy data
                    data.itteration = itteration;
                    ...
                    comm.send(data.workerId, 1, data);
                }
            }
        }
    }
    // shutdown workers
}

void run_worker(int id, mpi::comm &comm) {
    // initialize
```

```

while (1) {
    Data data(id);
    // nonblocking send
    comm.isend(master, 0, data);
    comm.recv(master, 1, data);
    if (!data.status) return;
    // setup GA scheme
    Scheme scheme = ...
    for (schemeId &s : {A, B, C, ...}) {
        GeneticAlgorithm::run(scheme);
        // write best
    }
}
}

```

Výpis 16: Pseudokód distribúcie parametrov GA

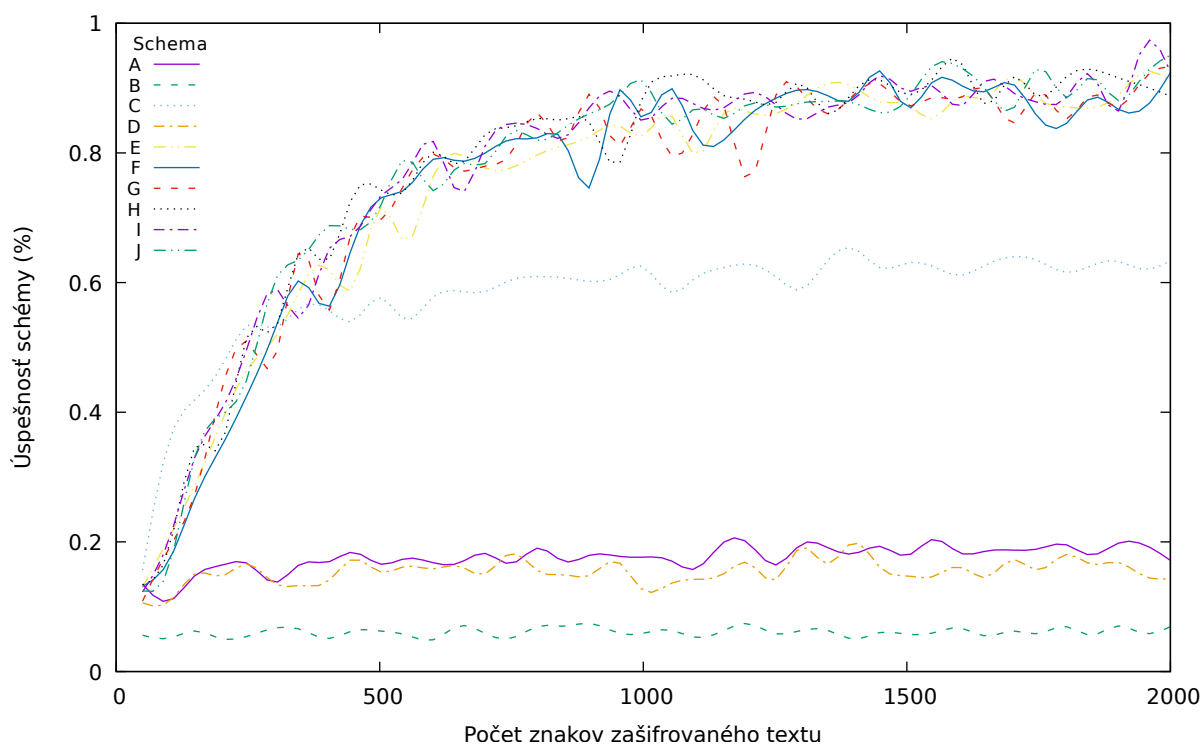
5.2 Výsledky

Experiment s GA bežal na gride hpc.stuba.sk 34 hodín. Použitých bolo pritom 96 výpočtových uzlov, čo zjavne urýchlilo celý experiment. Spolu bolo treba 320000 spustení genetického algoritmu.

Na obrázku 3 môžeme vidieť jeden z výsledkov genetického algoritmu. Ako možno vidieť z grafu najhoršie výsledky dosiahla schéma B, ktorá je zložená z náhodného výberu a jedného swapu. Táto schéma sa správa podľa našich očakavaní. Náhodnosť spôsobuje vysokú mieru diverzity. O niečo lepšie ale podobné výsledky dosahujú schémy A a D, ktoré sa správajú veľmi náhodne a neprinášajú lepšie výsledky. Prekvapivé výsledky prináša schéma C, u ktorej vidieť vysokú mieru selektívneho tlaku, avšak táto schéma ako vidieť z grafu uviazne v nejakom lokálnom extréme. Lepšie výsledky prinášajú schémy E, F, G, H, I J, ktoré vďaka zachovaniu elitných jedincov dokážu pri dostatočne dlhých textoch prinášať dobré výsledky.

Na ďalšom obrázku 4 môžeme vidieť GA s počiatočnou populáciou o veľkosti 50 jedincov. Zvýšenie počtu jedincov spôsobuje malé zlepšie „náhodných“ schém A a D, avšak úspešnosť týchto schém nie je dostatočná. Zvýšenie veľkosti populácie značne pomohlo schéme C, ktorá takto vďaka vyššej diverzite má možnosť dosiahnuť globálny extrém. Zvyšné schémy, ktoré obsahujú elitný jedincov, dosahujú z vyšším počtom jedincov mierne zlepšenie u kratších textov.

Podľa očakávaní našich očakávaní boli dosiahnuté najlepší výsledky s nastavením genetického algoritmu pri 50000 iterácii a s počiatočnou populáciou veľkosti 100 jedincov



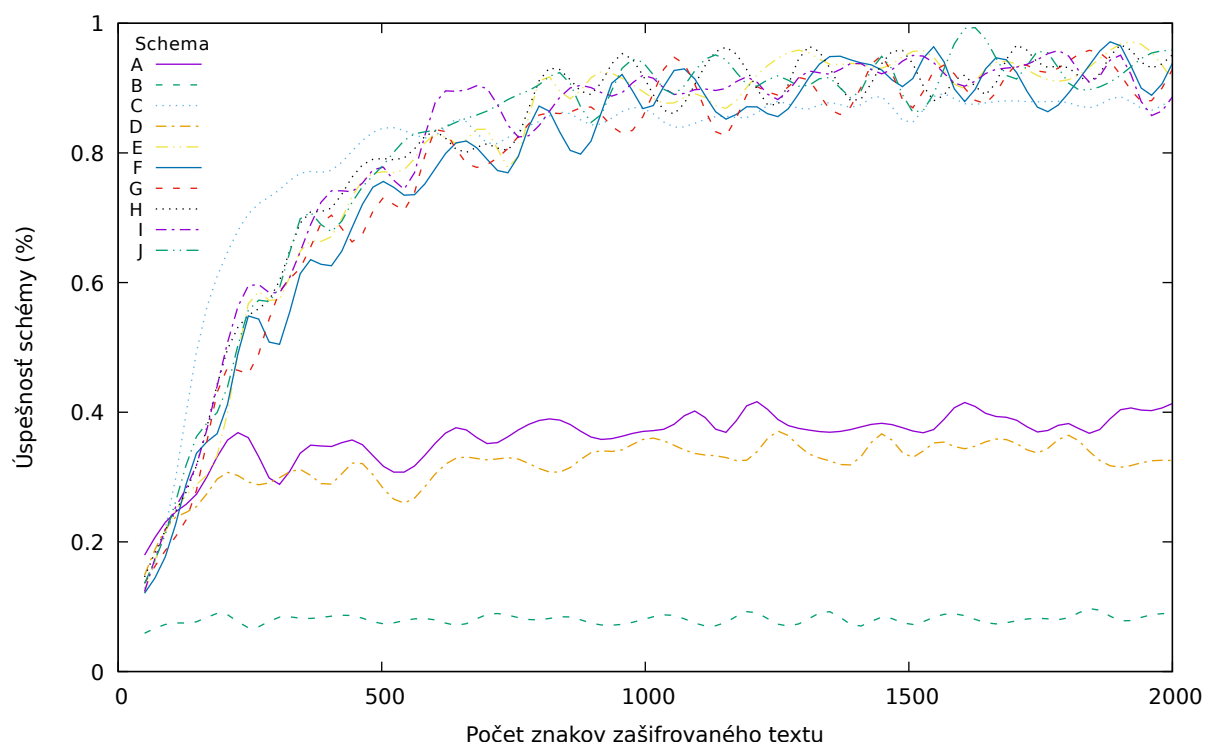
Obrázok 3: Počet iterácií: 10000, počiatočná populácia: 10

(obrázok 5). Lepšie výsledky boli dosiahnuté najmä pri kratších textoch a mierne zlepšenie môžeme vidieť aj pri dlhších textoch. Treba však poznamenať, že GA pri takom nastavení beží značne dlhšie a dobré výsledky sa dajú dosiahnuť aj s menším počtom iterácií a menšou populáciou.

Zo schémy B na obrázku 6 možno vidieť, že náhodne zvolený jedinci prinášajú do GA diverzitu.

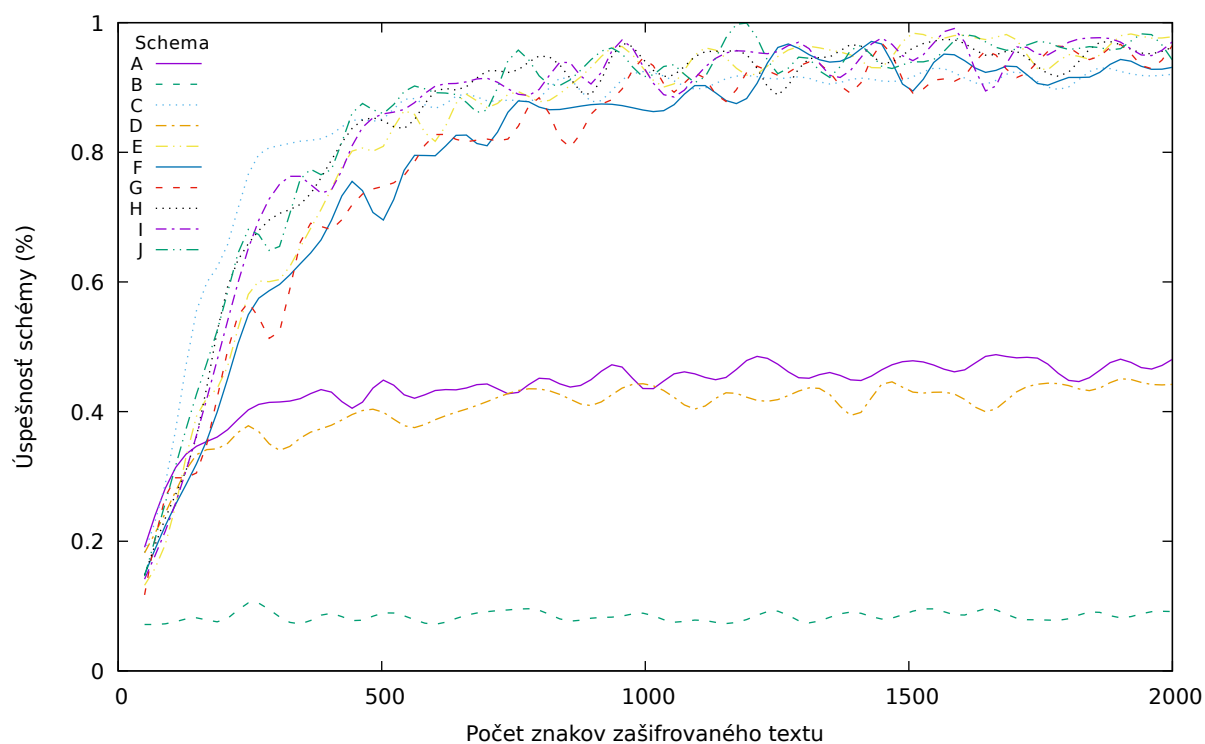
Ako sme už poznamenali schéma C (obrázok 7) dosahuje prekvapivé výsledky aj napriek tomu, že neobsahuje výber elitných jedincov. K dosahovaniu vysokej úspešnosti jej pomáha najmä veľkosť populácie, avšak ako možno vidieť z grafu tejto schémy napríklad zväčšenie populácie z 50 a 100 jedincov už neprinieslo o toľko lepšie výsledky a je možné že príliš veľká populácia by tejto schéme mohla aj uškodiť pôsobením väčšej rôznorodosti.

Na ďalších obrázkoch schém E (obrázok 8) a F (obrázok B.8), môžeme vidieť že zväčšenie počtu iterácií GA ako aj veľkosti populácie prináša pri lúštení monoalfabetickej substitúcie iba mierne zlepšenie úspešnosti. Z grafov týchto funkcií že zlepšenie sa pohybuje okolo 10%.

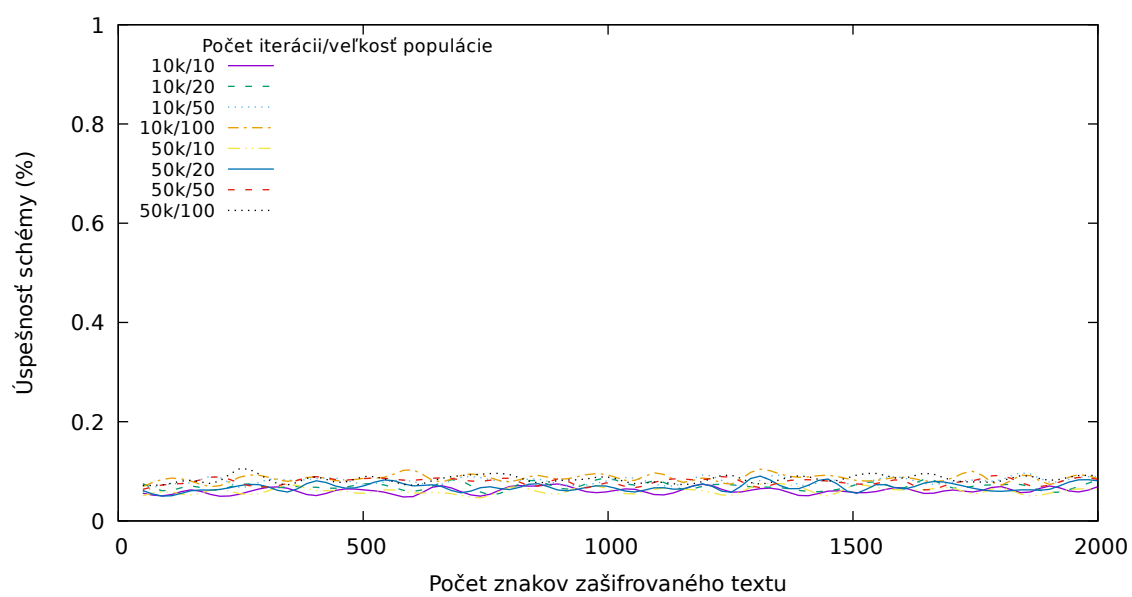


Obrázok 4: Počet iterácií: 10000, počiatočná populácia: 50

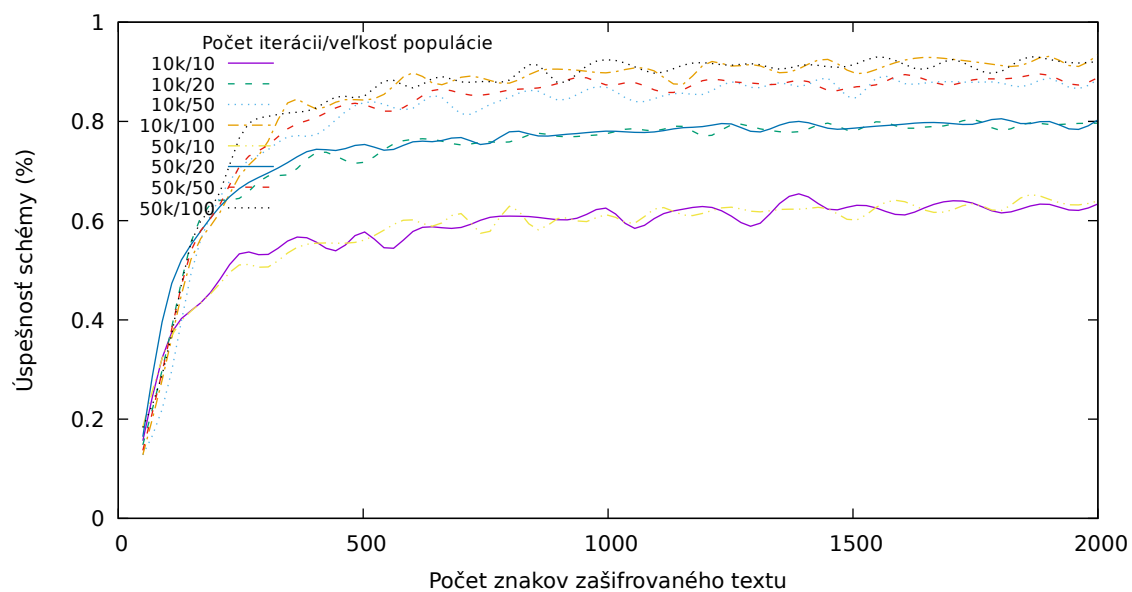
Zvyšné výsledky z tohto experimentu môžeme vidieť v prílohe B tejto práce.



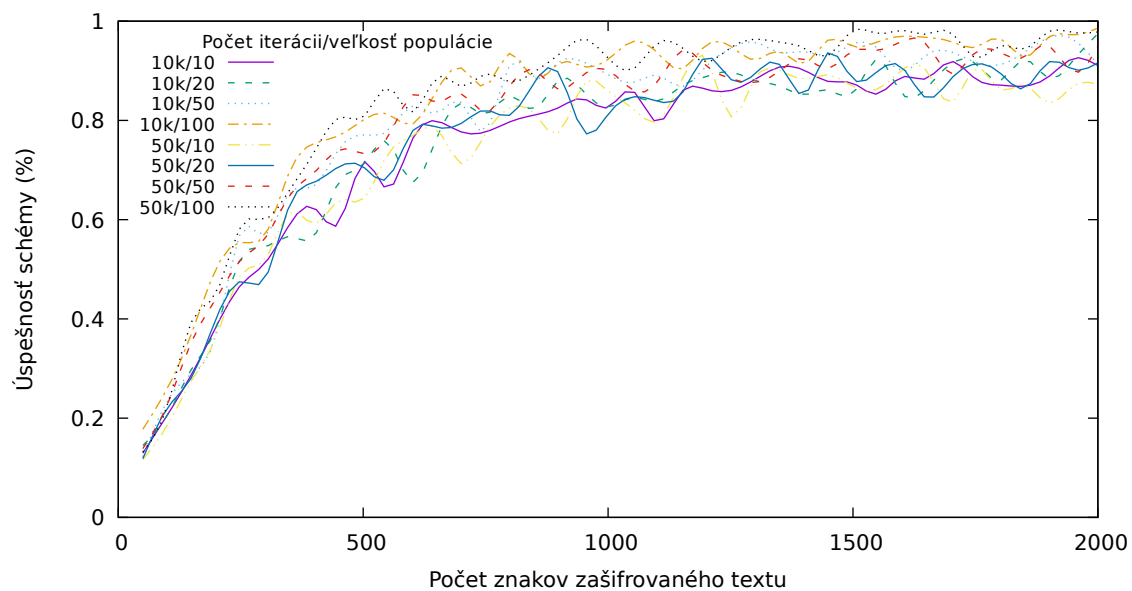
Obrázok 5: Počet iterácií: 50000, počiatočná populácia: 100



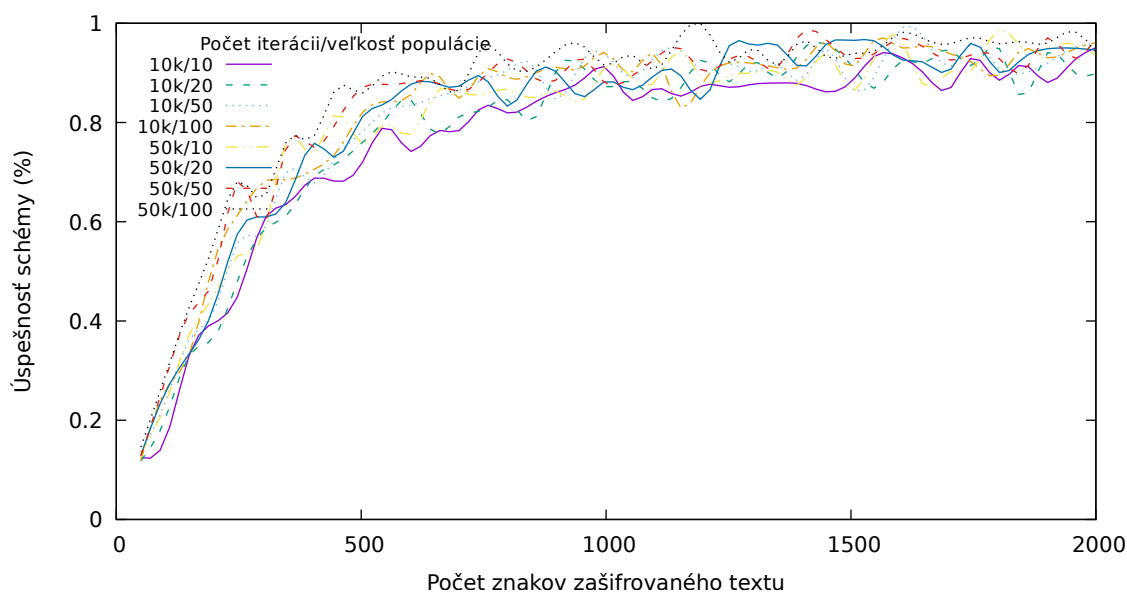
Obrázok 6: Schéma: B



Obrázok 7: Schéma: C



Obrázok 8: Schéma: E



Obrázok 9: Schéma: J

6 Experiment s PGA

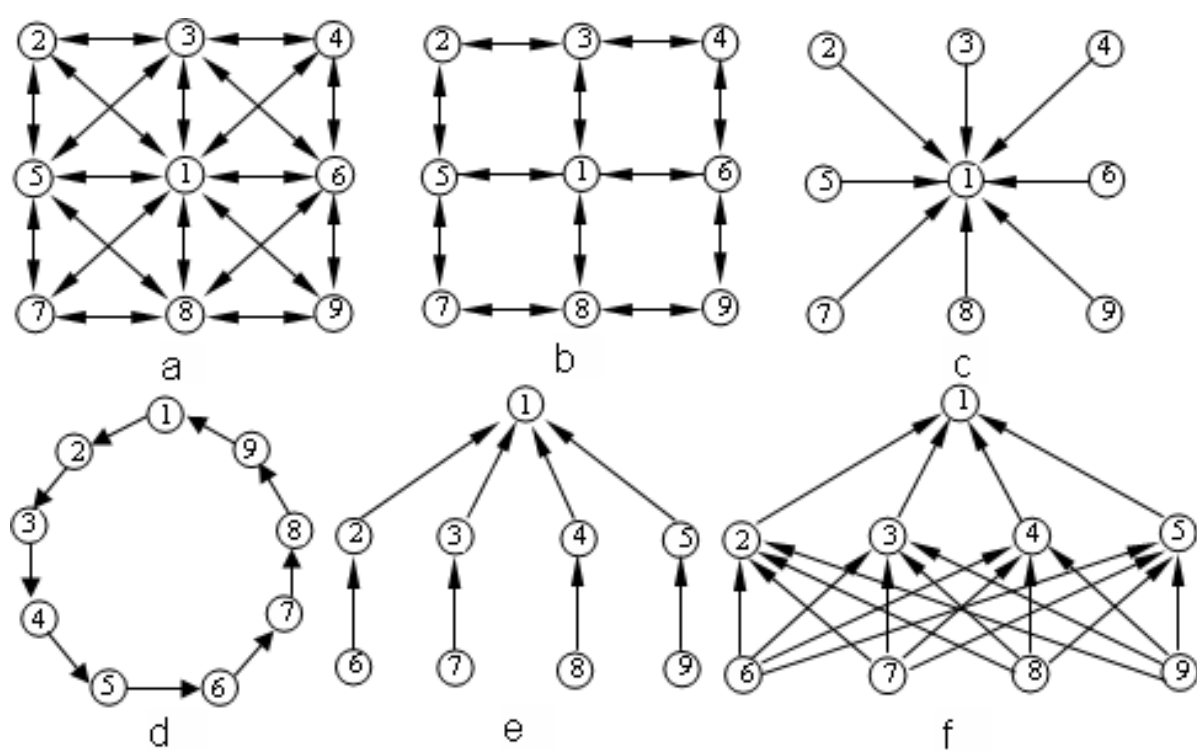
Paralelné genetické algoritmy (PGA) možno chápať ako ďalšiu úroveň paralelnej organizácie populácie, ktorá ma za cieľ zýšiť výkonnosť aj efektívnosť genetických algoritmov [10]. PGA prinášajú výhody v porovnaní s GA, ktoré sú podľa [10] sú: paralelné hľadanie vo veľkom mnohodomenzionálnom priestore potenciálnych riešení, lepšia možnosť vnútornej organizácie v porovnaní s GA, vyššia efektívnosť pri rovnakom počte vyhodnotení účelovej funkcie v porovnaní s GA, schopnosť nájsť lepšie riešenia, schopnosť uvoľniť sa zo stagnácie v lokálnom extréme a smerovať ku globálnemu extrému.

Štruktúra topológie medzi populáciami môže byť rôzna. Jednotlivé populácie medzi sebou nemusia byť všetky previazané. Niektoré vybrané topológie z [10] môžeme vidieť na obrázku 10. Perióda migrácie by nemala byť veľmi krátka a migračné väzby by nemali byť príliš početné pretože sa môže stať že sa celý PGA bude správať ako keby jedna veľká populácia.

6.1 Topológie

6.2 Výsledky experimentu

Výsledky PGA a ich interpretácia ...



Obrázok 10: Topológie paralelných genetických algoritmov

Záver

Conclusion is going to be where?

Here.

Zoznam použitej literatúry

1. GROŠEK, O., VOJVODA, M. a ZAJAC, P. *Klasické šifry*. Slovenská technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-227-2653-5.
2. KERCKHOFFS, A. a COLLECTION, George Fabyan. *La cryptographie militaire, ou, Des chiffres usités en temps de guerre: avec un nouveau procédé de déchiffrement applicable aux systèmes à double clef*. Librairie militaire de L. Baudoin, 1883. Extrait du Journal des sciences militaires.
3. SEKAJ, I. *Evolučné výpočty a ich využitie v praxi*. Iris, 2005. ISBN 9788089018871.
4. *STUBA klaster - IBM iDataPlex*. Dostupné tiež z: <https://www.hpc.stuba.sk>.
5. *Commands overview*. Adaptive Computing, 2012. Dostupné tiež z: <http://docs.adaptivecomputing.com/torque/4-0-2/Content/topics/12-appendices/commandsOverview.htm>.
6. SNIR, Marc, OTTO, Steve, HUSS-LEDERMAN, Steven, WALKER, David a DON-GARRA, Jack. *MPI-The Complete Reference, Volume 1: The MPI Core*. 2nd. (Revised). Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1998. ISBN 0262692155.
7. FORUM, Message Passing Interface. *MPI: A Message-Passing Interface Standard*. 2015. Dostupné tiež z: <http://mpi-forum.org/docs/mpi-3.1/mpi31-report.pdf>.
8. *CMake: Reference Documentation*. 2017. Dostupné tiež z: <https://cmake.org/documentation/>.
9. *Bash on ubuntu on Windows*. 2017. Dostupné tiež z: <https://msdn.microsoft.com/commandline/wsl/about>.
10. IVAN SEKAJ, Michal Oravec. Paralelné evolučné algoritmy.

Prílohy

A	Štruktúra elektronického nosiča	II
B	Výsledky Genetického algoritmu	III

A Štruktúra elektronického nosiča

/CHANGELOG.md

- file describing changes made to FEIstyle

/example.tex

- main example *.tex* file for diploma thesis

/example_paper.tex

- example *.tex* file for seminar paper

/Makefile

- simply Makefile – build system

/fei.sublime-project

- is project file with build in Build System for Sublime Text 3

/img

- folder with images

/includes

- files with content

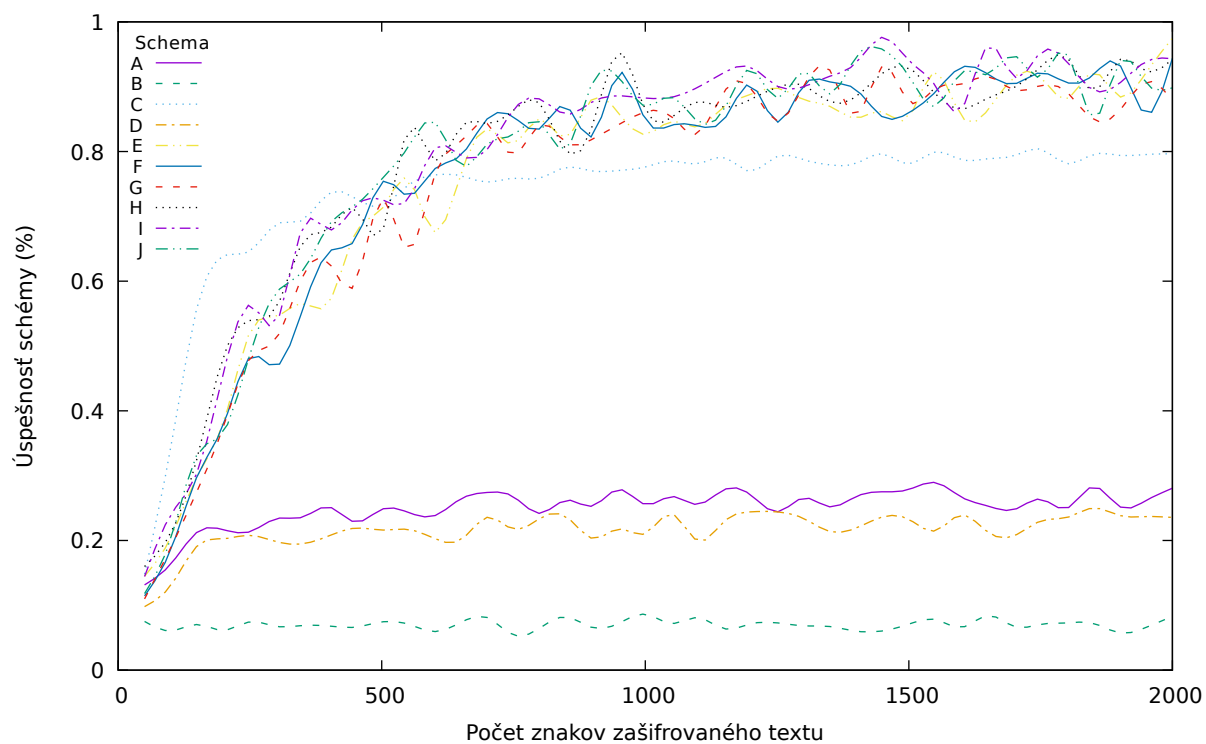
/bibliography.bib

- bibliography file

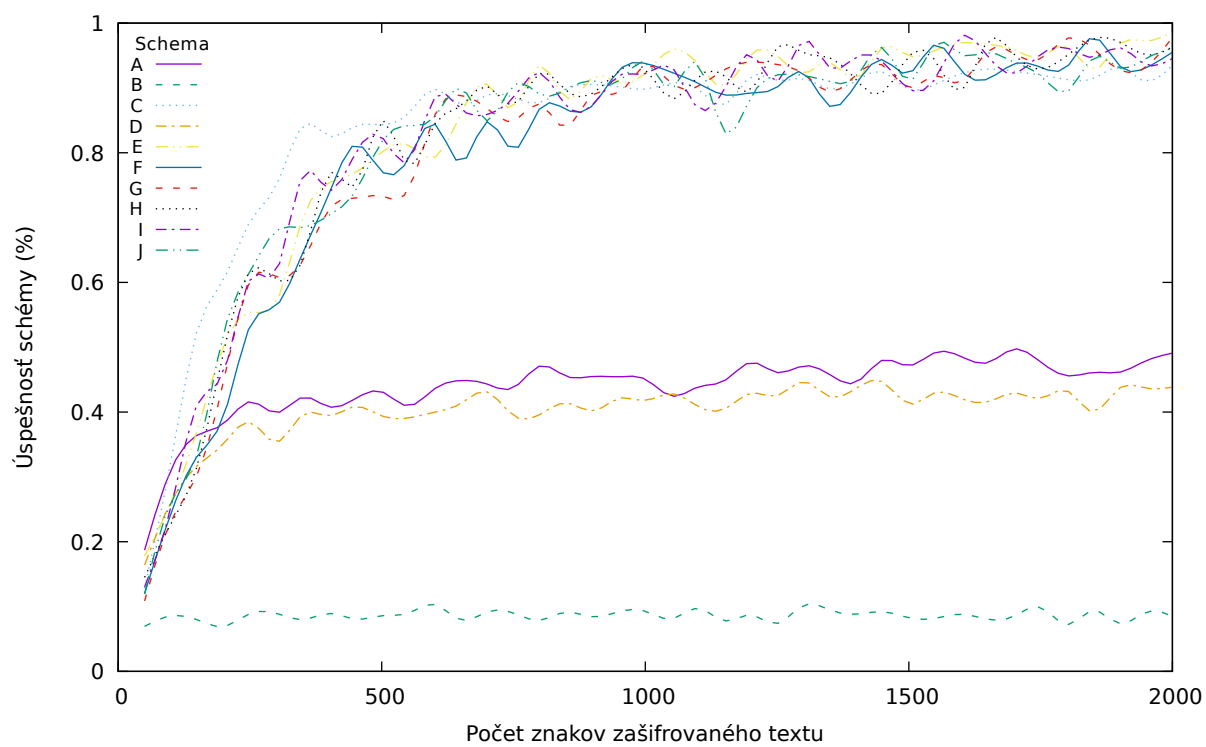
/attachmentA.tex

- this very file

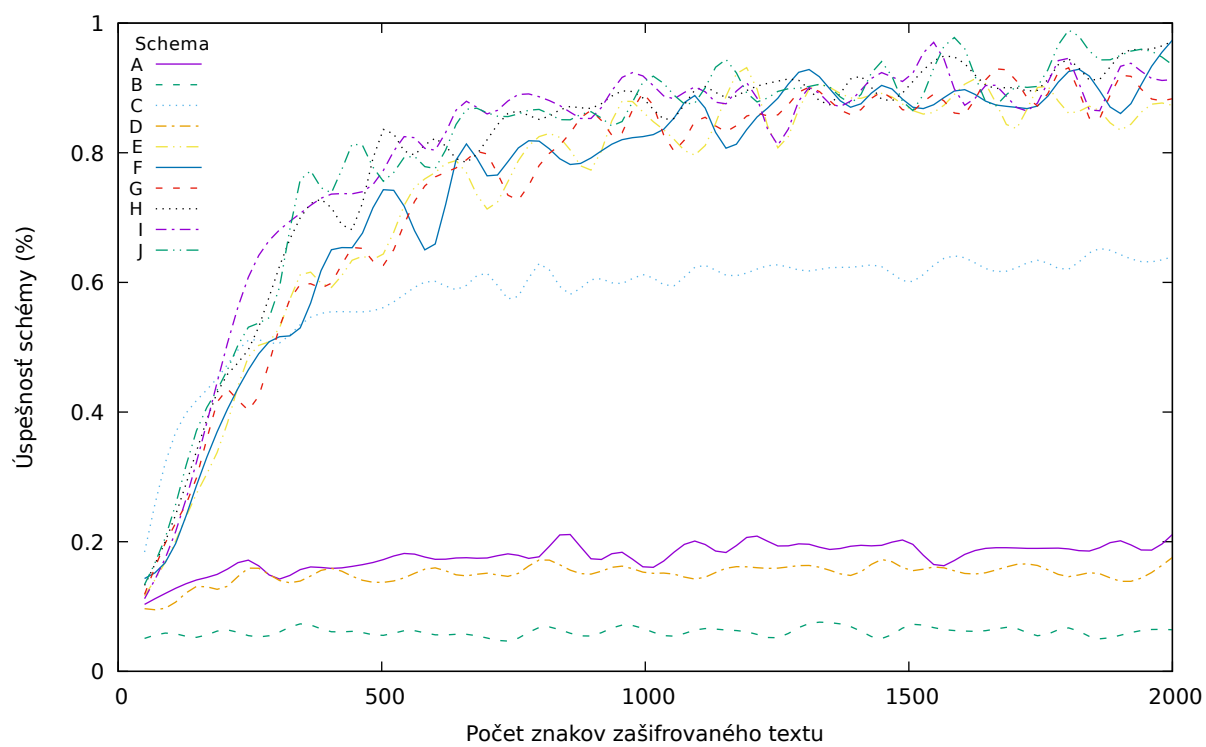
B Výsledky Genetického algoritmu



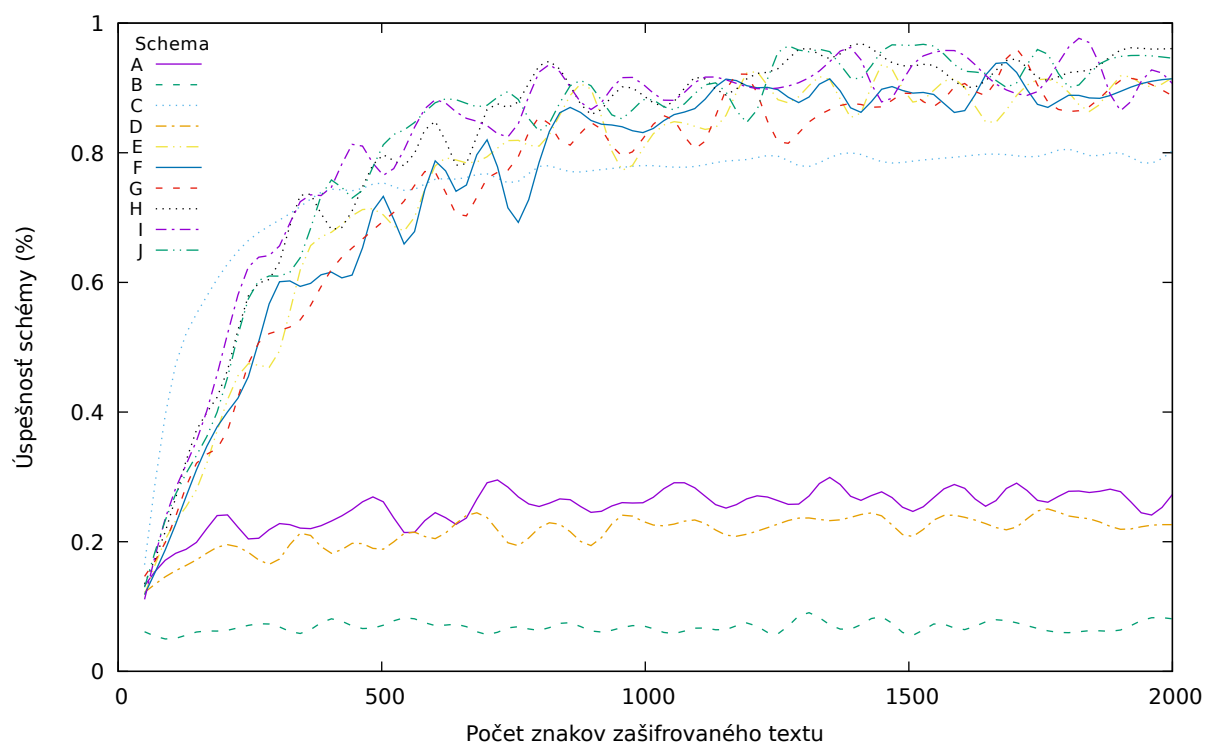
Obrázok B.1: Počet iterácií: 10000, počiatočná populácia: 20



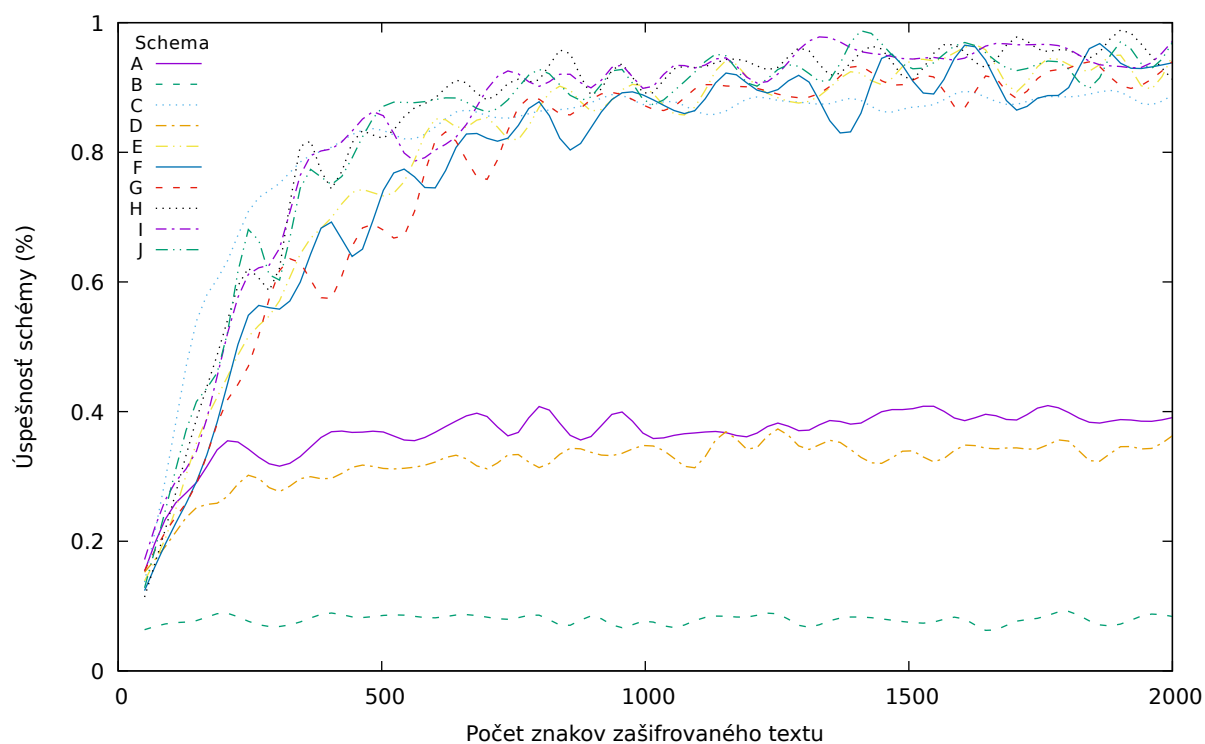
Obrázok B.2: Počet iterácií: 10000, počiatočná populácia: 100



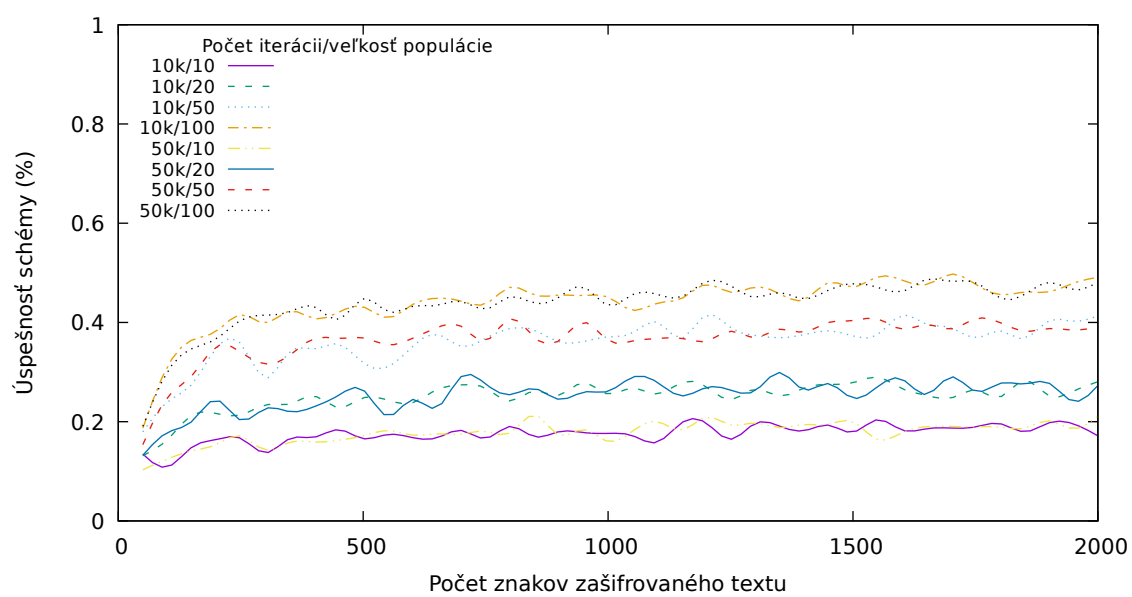
Obrázok B.3: Počet iterácií: 50000, počiatočná populácia: 10



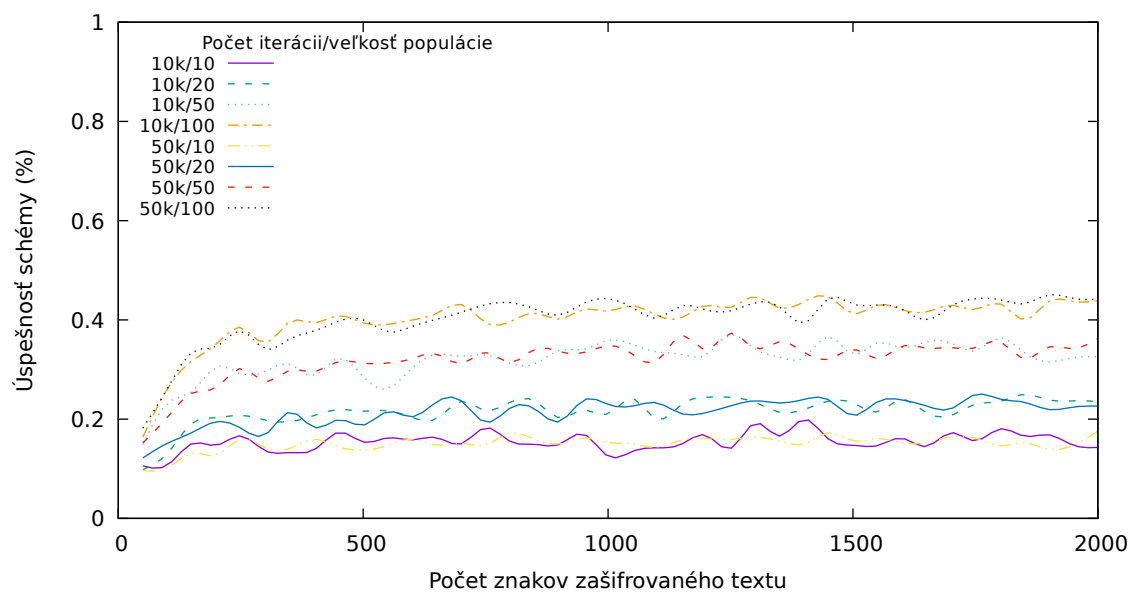
Obrázok B.4: Počet iterácií: 50000, počiatočná populácia: 20



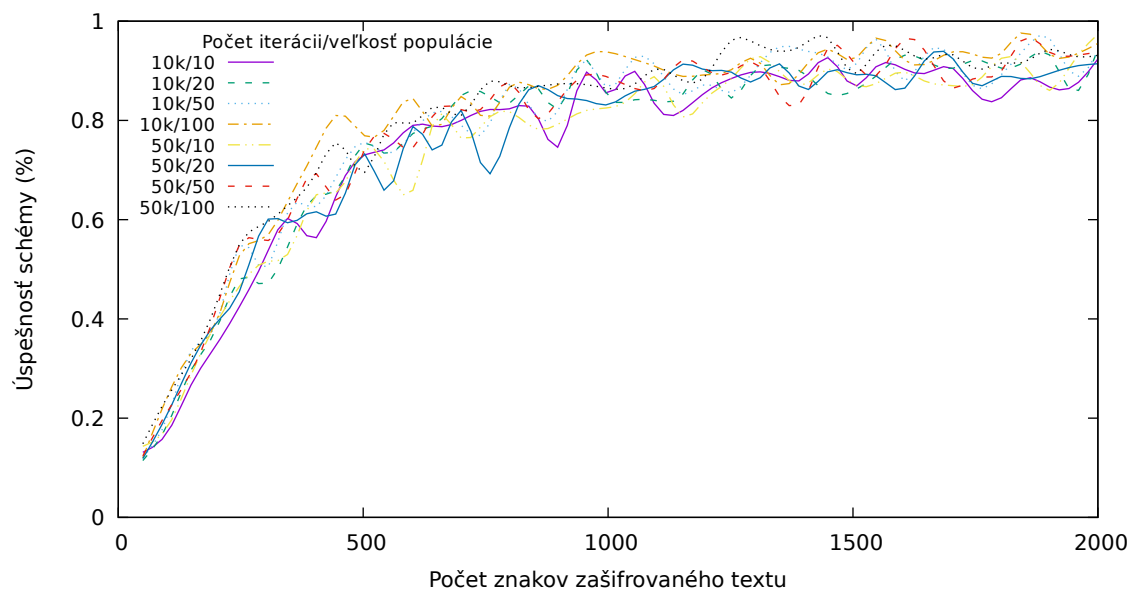
Obrázok B.5: Počet iterácií: 50000, počiatočná populácia: 50



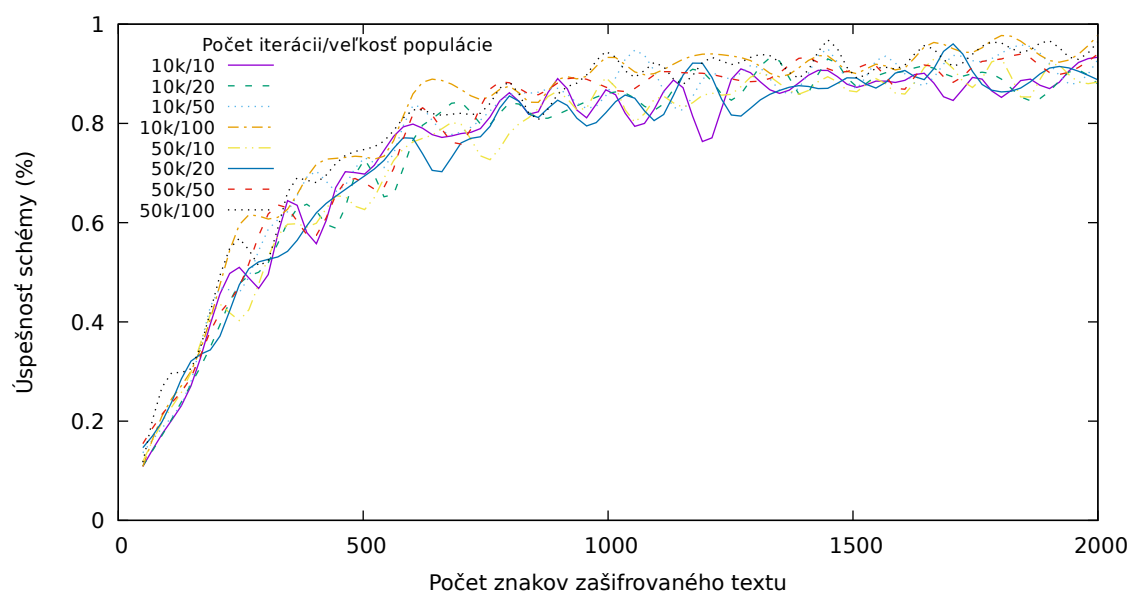
Obrázok B.6: Schéma: A



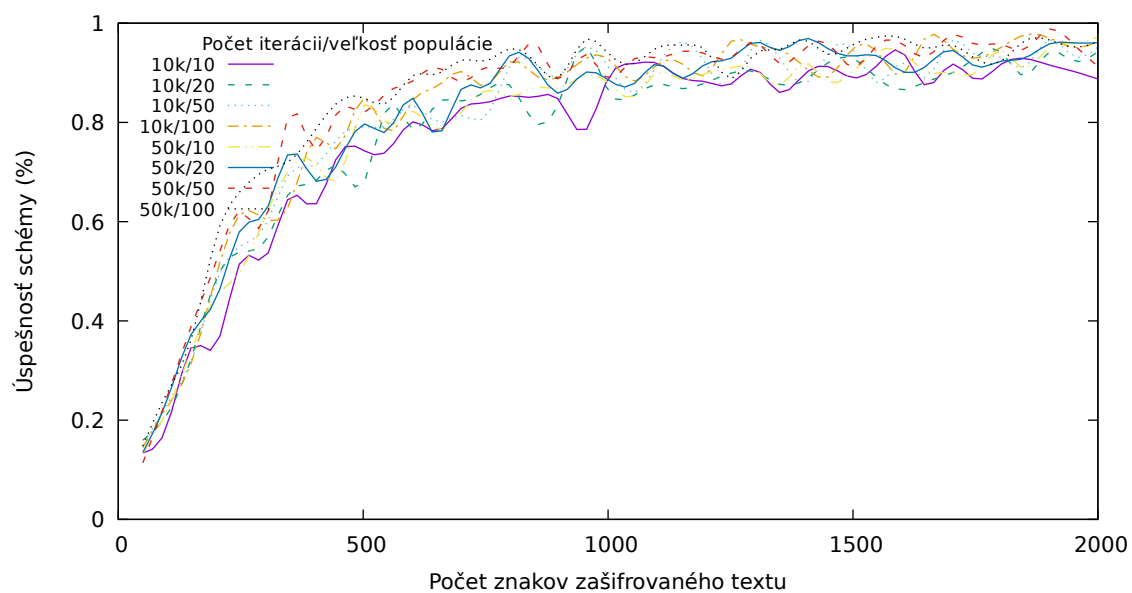
Obrázok B.7: Schéma: D



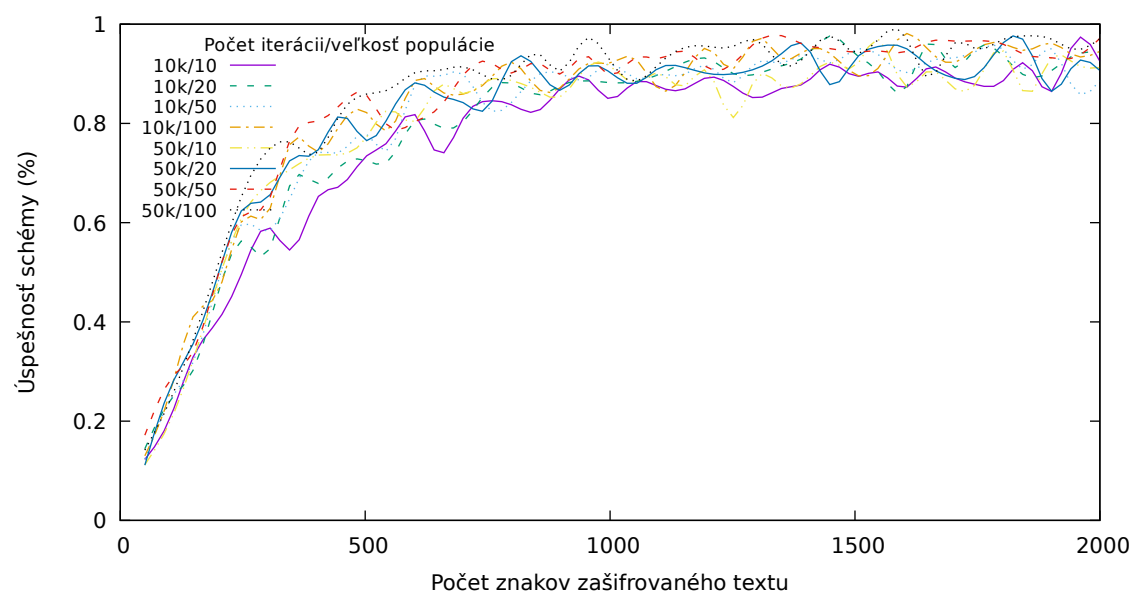
Obrázok B.8: Schéma: F



Obrázok B.9: Schéma: G



Obrázok B.10: Schéma: H



Obrázok B.11: Schéma: I