Univerzita Komenského, Bratislava
Fakulta Matematiky, Fyziky a Informatiky

Sila a zložitosť moderných regulárnych výrazov

Diplomová práca

2015 **Tatiana Tóthová**

Univerzita Komenského, Bratislava
Fakulta Matematiky, Fyziky a Informatiky

Sila a zložitosť moderných regulárnych výrazov

Diplomová práca

Študijný program:	Informatika
Študijný odbor:	2508 Informatika
Školiace pracovisko:	Katedra Informatiky
Školiteľ:	RNDr. Michal Forišek, PhD.

Bratislava, 2015

Tatiana Tóthová

83491340

Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Tatiana Tóthová
Študijný program: informatika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: 9.2.1. informatika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Sila a zložitosť moderných regulárnych výrazov
Power and complexity of modern regular expressions

Cieľ: Práca nadväzuje na autorkinu bakalársku prácu z rovnakej oblasti. Cieľom práce je hlbšie skúmanie nových syntaktických konštrukcii v praktických regulárnych výrazoch (regexoch), a to hlavne z hľadísk ich vyjadrovacej sily (t.j. začlenenia tried rozpoznávaných jazykov do Chomského hierarchie), popisnej zložitosti a prípadne aj časovej a priestorovej zložitosti rozpoznávania. Výsledkom práce by mal byť súbor vlastných originálnych vedeckých výsledkov.

Vedúci: RNDr. Michal Forišek, PhD.
Katedra: FMFI.KI - Katedra informatiky
Vedúci katedry: doc. RNDr. Daniel Olejár, PhD.

Dátum zadania: 26.11.2013

Dátum schválenia: 27.11.2013

prof. RNDr. Branislav Rovan, PhD.
garant študijného programu

....
študent

....
vedúci práce

.....tu bude poďakovanie.....

Tatiana Tóthová

Abstrakt

Skúmali sme moderné regulárne výrazy špecifikované v jazyku Python z hľadiska teórie formálnych jazykov. Nové konštrukcie rozširujúce klasické regulárne výrazy sú spätné referencie, pozitívny a negatívny lookaround. Práca nadväzuje na výsledky o spätných referenciách a pozitívnom lookarounde a dopĺňuje výsledky do hierarchie tried regexov nad rôznymi množinami operácií, ako napríklad neporovnateľnosť s bezkontextovými jazykmi. Ďalej ukazujeme, že uzavretosť triedy s pozitívnym lookaroundom na zreťazenie nie je triviálne a dokázali sme vlastnosti negatívneho lookaroundu podobné ako pri pozitívnej verzii. V oblasti priestorovej zložitosti sme zistili, že regexy s pozitívnym lookaroundom potrebujú priestor $NSPACE(\log n)$ a s pridaným negatívnym lookaroundom dosiahneme $DSPACE(\log^2 n)$. Pokiaľ na vstup dostávame zároveň regex aj slovo, zložitosť pre triedu s pozitívnym lookaroundom je $NSPACE(n \log n)$ a výsledok $DSPACE(n \log^2 n)$ platí iba ak je zaručená konštantná hĺbka vnorenia lookaroundov. K dôkazom sme zaviedli nový formálny model s konfiguráciami a krokom výpočtu inšpirovaný Turingovým strojom.

Kľúčové slová: regex, spätné referencie, pozitívny a negatívny lookaround, lookahead, lookbehind, priestorová zložitosť

Abstract

We study modern regular expressions specified in programming language Python as formal model in theory of formal languages. New constructions extending basic regular languages are backreference, positive and negative lookaround. There are already known results about backreference and positive lookaround. We fill in the hierarchy of classes of regexes over different sets of operations with new results, e.g. incomparability with context-free languages. We show that closure under concatenation of class of regexes with positive lookaround is not trivial. Then we prove properties of negative lookaround similar to results about the positive version. In the field of space complexity we show that regex with positive lookaround needs $NSPACE(\log n)$ and with added negative lookaround there is needed $DSPACE(\log^2 n)$. If we get on input together regex and word, for class with positive lookaround we show space complexity $NSPACE(n \log n)$ and result $DSPACE(n \log^2 n)$ holds only if we can assure that there is only constant depth of nested lookarounds. For proving last few results we defined new formal model with configurations and step of computation inspired by Turing machine.

Key words: regex, backreference, positive and negative lookaround, lookahead, lookbehind, space complexity

Obsah

Úvod

Regulárne výrazy vznikli v 60-tych rokoch 20. storočia a ukázalo sa, že sú ďalším modelom na vyjadrenie regulárnych jazykov. Vďaka ich jednoduchosti boli implementované ako nástroj na vyhľadávanie v textovom editore a neskôr pribudli aj do programovacích jazykov. S postupom času, ako sa produkty vyvíjali, do výrazov pribúdali konštrukcie, ktoré prax považovala za užitočné. Teraz tento model vraciame naspäť do teórie formálnych jazykov pod názvom moderné regulárne výrazy alebo aj regexy.

Väčšina nových operácií umožňuje kratší zápis niektorých regexov, ale novú funkcionalitu neprináša, pretože ich vieme rozpísať pomocou klasických regulárnych výrazov. Nové jazyky vieme zapísať vďaka zopár zložitejším konštrukciám, menovite sú to spätné referencie, pozitívny a negatívny lookaround.

Koncept spätných referencií už bol skúmaný, v práci sa odvolávame na viaceré články. My sme sa zamerali na operácie pozitívny a negatívny lookaround, o ktorých sme doposiaľ výsledky nenašli. Touto témou sme sa začali zaoberať v bakalárskej práci [Tó13], kde sa ukázalo, že model so spätnými referenciami rozširujú. Dôraz bol kladený na pozitívny lookahead a lookbehind, štúdium vlastností týchto operácií a vlastností a zaradenia rozšírenej triedy regexov.

V tejto práci doplníme výsledky o negatívnom lookarounde, doplníme hierarchiu tried regexov o nové výsledky a definujeme nový formálny model pre moderné regulárne výrazy. Budeme sa venovať aj novej oblasti – priestorovej zložitosti. V tomto smere sa priblížime praxi tým, že zistíme, koľko pamäte treba, ak dostávame na vstup zároveň regex aj slovo.

Použité pojmy a skratky

ε – prázdne slovo

$\mathbb{N}$, $\mathbb{N}_0$ – prirodzené čísla (bez nuly, s nulou)

L_1L_2 – zreťazenie jazykov L_1 a L_2

L^* – Kleeneho iterácia ($L^* = \cup_{i=0}^{\infty} L^i$, kde $L^0 = \{\varepsilon\}$, $L^1 = L$ a $L^{i+1} = L^iL$)

$\mathcal{R}$ – trieda regulárnych jazykov

$\mathscr{L}_{CF}$ – trieda bezkontextových jazykov

$\mathscr{L}_{CS}$ – trieda kontextových jazykov

DKA/NKA – deterministický/nedeterministický konečný automat

LBA – lineárne ohraničený Turingov stroj

TS – Turingov stroj

matchovať – keď regex α matchuje slovo w (vyhlási zhodu), znamená to, že $w \in L(\alpha)$

lookaround – spoločný názov pre lookahead a lookbehind

Regex – regexy nad množinou operácií, ktorými vieme popísať iba regulárne jazyky (základná definícia)

Eregex – *Regex* so spätnými referenciami

LEregex – *Eregex* s operáciami lookahead a lookbehind

nLEregex – *LEregex* s operáciami negatívny lookahead a negatívny lookbehind

$\mathscr{L}_{RE}$ – trieda jazykov nad *Regex*, ekvivalentná $\mathcal{R}$

$\mathscr{L}_{ERE}$ – trieda jazykov nad *Eregex*

$\mathscr{L}_{LERE}$ – trieda jazykov nad *LEregex*

$\mathscr{L}_{nLERE}$ – trieda jazykov nad *nLEregex*

1 Úvod do súčasneho stavu problematiky

Myšlienka regulárnych výrazov bola prvýkrát spomenutá v teórii formálnych jazykov a automatov ako iný spôsob popisu regulárnych jazykov. Vtedy pozostávali z operácií zjednotenia, zreťazenia a Kleeneho uzáveru. Z takéhoto zápisu bolo ľahšie vidieť, o aký jazyk ide, než z konečných automatov alebo regulárnych gramatík. Vďaka jednoduchosti boli implementované ako nástroj na vyhľadávanie slov zo špecifikovaného jazyka. Postupom času a s inšpiráciou zo strany užívateľov k nim pribúdali ďalšie operácie. Niektoré boli len skratkou k tomu, čo sa už dalo zapísať – umožnili zapísať to isté, ale menej znakmi – ostatné otvárali dvere k popisu dovtedy nedosiahnuteľných jazykov.

Zmes týchto operácií nazývame moderné regulárne výrazy alebo regexy. Tento model opäť vraciame do teórie jazykov a skúmame jeho vlastnosti, zaradenie v Chomského hierarchii a zložitosť.

1.1 Základné definície

Každý regulárny výraz sa skladá zo znakov a metaznakov. Znak je regulárny výraz reprezentujúci sám seba, teda $L(a) = \{a\}$. Metaznaky popisujú operáciu nad regulárnymi výrazmi. Ak potrebujeme použiť metaznak ako znak, stačí pred neho dať \, teda $L(\backslash x) = \{x\}$. Ak metaznak vyžaduje vstup, je ním posledný znak/metaznak/uzátvorkovaný výraz naľavo od neho.

Nech α, β sú regexy. Základné operácie sú:

- zreťazenie $(\alpha)(\beta)$
- alternácia $(\alpha)|(\beta)$

- Kleeneho uzáver $(\alpha)*$

Platí $L((\alpha)(\beta)) = L(\alpha)L(\beta)$, $L((\alpha)|(\beta)) = L(\alpha) \cup L(\beta)$ a $L((\alpha)*) = L(\alpha)^*$.

Aby sme špecifikovali pole pôsobnosti operácií, používame v regulárnych výrazoch okrúhle zátvorky (). Je možné ich vynechať, potom sa operácie budú vyhodnocovať podľa priorít – tie uvedieme po definovaní všetkých operácií.

Regulárny výraz je vykonávaný zľava doprava. Keď sa dostaneme na koniec výrazu aj slova (za posledný znak), hovoríme, že výraz matchuje[1] (z angl. *match* – zhoda) slovo, výraz vyhovuje slovu, alebo slovo vyhovuje výrazu.

Jazyk vyhovujúci regexu α je množina slov matchovaných týmto regexom. Hovoríme aj, že regex generuje tento jazyk.

1.1.1 Nové konštrukcie

Najprv si uvedieme konštrukcie, ktoré sú len „kozmetickou úpravou" základných regulárnych výrazov. Všetky sa dajú zapísať pomocou základných operácií, ale nový zápis je stručnejší a prehľadnejší. Pre formálnejšiu definíciu starších aj novších operácií odporúčame siahnuť po [Tó13].

- $+$ – opakuj 1 alebo viackrát: $(\alpha)+ = \alpha(\alpha)*$
- $\{\}$ – zložené zátvorky sú používané ako $\{n, m\}$ (opakuj aspoň n a najviac m-krát) a $\{n\} = \{n, n\}$ (opakuj n-krát)
- [ ] – predstavuje ľubovoľný znak, z tých, ktoré má vnútri zapísané. Vieme použiť aj intervaly, napr. a–z, A–Z, 0–9, ... a kombinovať ich. Všetky metaznaky vnútri [ ] sa považujú za normálne znaky.
- [ˆ] – predstavuje ľubovoľný znak, ktorý nepatrí medzi zapísané. Ostatné ako [ ].
- ? – ak samostatne: opakuj 0 alebo 1-krát
  ak za operáciou: namiesto greedy implementácie použi minimalistickú, t.j. zober čo najmenej znakov (platí pre $*, +, ?, \{n, m\}$)[2]

[1] Preklad „regex sa zhoduje so slovom" nevyjadruje presne to, čo je vyjadrené v angličtine. Znie to, akoby regex bol to isté, čo slovo. Preto sme sa rozhodli zostať pri slove match a slovese matchovať.

[2] Všetky spomenuté operácie berú všetky znaky, čo môžu, a na ich implementáciu bol použitý greedy algoritmus.

- . – predstavuje ľubovoľný znak
- ˆ – metaznak označujúci začiatok slova
- $ – metaznak označujúci koniec slova

Okrem operácií označených metaznakmi vznikli aj zložitejšie operácie, na popis ktorých treba dlhšie konštrukcie. V prvom rade sa zaviedlo **číslovanie okrúhlych zátvoriek**. Čísluje sa zľava doprava podľa poradia ľavej (otváracej) zátvorky, ale konštrukcie tvaru (?. . .) sa vynechávajú. Toto číslovanie sa deje automaticky pri každom matchovaní, teda už pri písaní výrazu ho môžeme využívať. Popíšme si teraz zložitejšie operácie:

- **komentár** ozn. (?#text komentáru) – klasický komentár, určený čitateľom kódu; nemá vplyv na výraz, pri matchovaní sa ignoruje
- **spätné referencie** ozn. $\backslash k$, $k \in \mathbb{N}$ – môže sa nachádzať na ľubovoľnom mieste vo výraze ZA k-tou pravou (zatváracou) zátvorkou. Odkazuje sa na k-te zátvorky a presný význam sa určuje až pri hľadaní zhody na konkrétnom vstupe. Algoritmus si zapamätá aké podslovo zo vstupu matchoval výraz vnútri k-tych zátvoriek a presne toto podslovo matchuje konštrukcia , keď ďalej vo výraze narazí na $\backslash k$. Počas matchovania môžu k-te zátvorky matchovať viackrát. V momente, keď ideme vykonávať $\backslash k$ si vyberáme doteraz posledné z nich.

  Ukážeme si to na príklade, ako regex $\alpha \underset{k}{(} \beta \underset{k}{)} \gamma \backslash k \delta$ matchuje slovo w:

  $$w = \underbrace{x_1 \dots x_{i-1}}_{\alpha} \overbrace{\underbrace{x_i \dots x_{j-1}}_{\underset{k}{(} \beta \underset{k}{)}}}^{w_k} \underbrace{x_j \dots x_{l-1}}_{\gamma} \overbrace{\underbrace{x_l \dots x_{m-1}}_{\backslash k}}^{w_k} \underbrace{x_m \dots x_n}_{\delta}$$

  musí platiť $w_k = x_i \dots x_{j-1} = x_l \dots x_{m-1}$ a zároveň w_k je posledné matchované podslovo k-tych zátvoriek v momente, keď sme narazili na konštrukciu $\backslash k$.

  Predpokladáme, že číslo k je zapísané znakmi z inej abecedy ako zvyšok regexu – t.j. je jednoznačne určiteľné, kde končí zápis k.[3]

[3] V implementovaných regexoch vieme deterministicky určiť, kde končí číslo k – sú povolené maximálne trojciferné čísla. My chceme všeobecnejší model, bez obmedzení na veľkosť k, a práve preto je tento predpoklad oprávnený. Zároveň si to môžeme dovoliť, lebo ak máme k zapísané ako číslo v desiatkovej sústave, v teórii je jednoduché zasubstituovať hľadaný jazyk tak, aby neobsahoval znaky 0,. . . ,9. Viac informácií o obmedzeniach regexov v praxi nájdete v [Tó13, kapitola Prax].

- **lookahead** – nazeranie dopredu.
  - **pozitívny** ozn. (?=α), kde α je nejaký moderný regulárny výraz

    V momente, keď na lookahead narazíme, zapamätáme si aktuálnu pozíciu v slove. Od tejto pozície začneme hľadať zhodu s výrazom α. Akonáhle α vyhlási zhodu (nemusí ani dočítať slovo do konca), vrátime sa naspäť na zapamätané miesto a odtiaľ pokračujeme v slove vykonávaním regexu za lookaheadom – akokeby tam lookahead nikdy nebol. Inak povedané lookahead neberie písmenká zo vstupu – lebo sa vrátime na miesto, kde sme začali – a na nejakom mieste výpočtu predstavuje podmienku, ktorá musí byť splnená – robí akýsi prienik. Ak nenájde zhodu na žiadnom prefixe od zapamätaného miesta, znamená to nezhodu pre celý regex – ak sa dá, musíme sa vo výpočte vrátiť naspäť a vyskúšať inú možnosť predošlých operácií.[4] Pokiaľ chceme, aby lookahead slovo dočítal do konca, použijeme metaznak \$, ktorý matchuje koniec slova.

    Ukážme si priebeh matchovania regexom $\alpha(?=\beta)\gamma$ na slove w. Vidíme, že β a γ začínajú na rovnakom mieste v slove.

    $$w = \underbrace{x_1 \dots x_{i-1}}_{\alpha} \underbrace{\overbrace{x_i \dots x_j}^{\beta} x_{j+1} \dots x_n}_{\gamma}$$

  - **negatívny** ozn. (?! α), kde α je nejaký moderný regulárny výraz

    Nesmie nájsť slovo z jazyka $L(\alpha)$. Postup je ako pri lookaheade, ale končí úspešne len ak by lookahead zamietol.

- **lookbehind** – nazeranie dozadu.
  - **pozitívny** ozn. (?<=α), kde α je nejaký moderný regulárny výraz

    Hľadá slovo z $L(\alpha)$ naľavo od aktuálneho miesta v slove (musí končiť na susediacom políčku vľavo od aktuálnej pozície v slove). Opäť nie je určená hranica slova, môže začínať kdekoľvek, ak nie je vynútený začiatok slova znakom ˆ.

    Ak by sme chceli deterministický algoritmus, vyzeral by nasledovne: odteraz do konca vykonávania lookbehindu bude na pozícii, na ktorej v slove sme, špeciálny znak pre koniec slova – endmarker (nie \$). Najprv vyskúšame

[4] V praxi je lookahead atomická operácia, ale my opäť chceme model v plnej sile.

1 susedný symbol naľavo, či patrí do jazyka. Ak nie, skúsime čítať o jeden znak viac (2 symboly naľavo), keď neuspejeme, opäť posunieme pomyselný začiatok slova doľava. Ak akceptujeme, môže to byť len na endmarkeri. Ak sme neakceptovali a začiatok slova nejde viac posunúť, zamietneme.

Opäť to bude dobre vidieť na príklade, výpočet regexu $\alpha(?<=\beta)\gamma$ na slove w. Podslová α, β končia na tej istej pozícii.

$$w = \underbrace{x_1 \dots x_{i-1} \overbrace{x_i \dots x_j}^{\beta}}_{\alpha} \underbrace{x_{j+1} \dots x_n}_{\gamma}$$

– **negatívny** ozn. $(?<!\ \alpha)$, kde α je nejaký moderný regulárny výraz

  Hľadá ako pozitívny lookbehind, ale akceptuje, len ak neexistuje slovo z jazyka $L(\alpha)$ vyskytujúce sa naľavo od aktuálnej pozície.

Pre posledné 2 operácie zostaneme pri ich anglických názvoch, pretože sú stručnejšie a zvučnejšie. Existuje pre ne aj spoločný názov <u>lookaround</u>, takisto s prívlastkom pozitívny/negatívny, ak myslíme iba ich pozitívne/negatívne verzie. Bude našim zvykom ponechávať pozitívny lookaround/lookahead/lookbehind bez prívlastku. Pokiaľ budeme myslieť negatívnu verziu alebo to nebude z kontextu jasné, explicitne to napíšeme.

Moderné regulárne výrazy sa skladajú z <u>konečného počtu</u> znakov, metaznakov a zložitejších operácií.

Chceli by sme čitateľa upozorniť na kombinácie operácií a ich správanie, ktoré nemusia byť z modelu zrejmé:

Spätné referencie a pozitívny lookaround – Je zakázané odkazovať sa na konštrukcie typu (?. . .), čo spĺňa lookaround. Avšak vnútri lookaroundu je regex, ktorého súčasťou môžu byť aj zátvorky. Tieto zátvorky sú číslované a je povolené sa na ne odkazovať.

Spätné referencie a negatívny lookaround – Ak negatívny lookaround uspeje, on ani zátvorky v jeho vnútri nematchujú žiadne podslovo. Preto nemá zmysel sa na ne odkazovať a ani to nie je dovolené. Avšak pokiaľ sa nachádzame vo výpočte niekde v regexe vnútri negatívneho lookaroundu, ten má povolené používať spätné referencie, takže v tomto momente je možné sa odkazovať na tieto vnútorné zátvorky a takisto je možné odkazovať sa na zátvorky mimo negatívneho lookaroundu, v regexe naľavo od neho (t.j. také, čo už matchovali). Všeobecne povedané pre niekoľko vnorených negatívnych lookaroundov: v danom momente výpočtu je možné odkazovať sa na všetky zátvorky hlavného regexu (nenachádza sa vnútri negatívneho lookaroundu) a všetky zátvorky obsiahnuté v negatívnych lookaroundoch, v ktorých sme vnorení (t.j. ktoré sú v tomto momente výpočtu aktívne). Stále platí, že tieto zátvorky sa musia nachádzať v regexe naľavo od nás.

Poz.,neg. lookaround a $*$ – Je zakázané obaľovať samotný lookaround do zátvoriek (to reprezentuje iba prázdne slovo) a tiež nie je dovolené uplatňovať naň operáciu $*$ – nemá to zmysel, pretože pokiaľ lookaround uspel, uspeje ľubovoľne veľakrát, lebo jeho výpočet sa bude spúšťať stále z toho istého miesta v slove. Môže však byť skonštruovaný regex, ktorý bude obsahovať lookaround (myslíme ľubovoľnú zo 4 operácií). Tento regex bude obalený zátvorkami, na ktoré je uplatnená operácia $*$. Predstavme si, že $*$ spôsobí niekoľko iterácií. Potom lookaround bude podľa definície spúšťaný každú iteráciu spolu s celým týmto regexom. Bez újmy na všeobecnosti, nech je to pozitívny lookahead. Teraz si predstavme, že obsahuje $ tak, že zakaždým je nútený matchovať slovo až do konca. Uvedomme si, že toto začína byť pomerne silnou podmienkou – v každej iterácii pozitívny lookahead musí matchovať zvyšok slova na vstupe, teda nejaký jeho sufix. Takáto konštrukcia už je na predstavu pomerne náročná.

Priotity operácií

Ako sme už spomínali, pre korektné matchovanie regexom potrebujeme vedieť priority operácií. Zároveň nám to umožní niekedy vynechať zátvorky a regex tak bude prehľadnejší.

Nové konštrukcie lookahead a lookbehind neberú zo slova žiadne písmenká. Môžeme si ich predstaviť ako overenie nejakej podmienky, je to taká odbočka od výpočtu. Preto nemá zmysel na ne aplikovať operácie ako $*, +, ?, \{\}, |$ a teda taký regex nebude validný. Je možné ich uzavrieť do ďalších lookaroundov, je možné sa odkazovať na zátvorky, ktoré majú vnútri (iba ak sa jedná o pozitívny lookaround, odkazovať sa dovnútra negatívnejho lookaroundu nemá zmysel). Pokiaľ však aplikujeme operáciu na nejaký regex obsahujúci lookaround, prirodzene je lookaround vykonaný zakaždým, keď naň príde rad.

Niektoré operácie sa správajú ako znak – [ ], [^] , ., ^, $, \$k$ – teda je s nimi možné narábať ako s obyčajným znakom (okrem ^a $, tieto nemá zmysel iterovať (napr. $∗) – existuje vždy práve 1 začiatok a 1 koniec slova). Ostatné kombinujú znaky s nasledovnými prioritami:

priorita	najvyššia			najnižšia
operácia	()	$*$ + ? {}	zreťazenie	|

Máme veľkú množinu operácií a budeme chcieť rozlišovať regexy používajúce rôzne operácie. Preto si zavedieme triedy regexov nad konkrétnymi množinami operácií. Regex z takejto triedy bude obsahovať iba operácie z povolenej množiny, v ľubovoľnom počte (stále však platí, že regex je konečnej dĺžky). Množiny regexov $Regex$, $Eregex$[5], $LEregex$, $nLEregex$ sa líšia o pridané operácie, triedy jazykov nad týmito množinami sú $\mathscr{L}_{RE}$, $\mathscr{L}_{ERE}$, $\mathscr{L}_{LERE}$, $\mathscr{L}_{nLERE}$. Definíciu množín a tried nájdete na strane s pojmami a skratkami.

1.2 Vlastnosti a sila moderných regulárnych výrazov

Keď sme hľadali články o moderných regulárnych výrazoch, našli sme výsledky prevažne o regulárnych výrazoch schopných generovať iba regulárne jazyky a preštudovaná bola trieda $Eregex$ [CSY03], [CN09] (v článkoch pomenovaná EREG). Tému moderných regulárnych výrazov sme rozvinuli v bakalárskej práci [Tó13], v tejto práci naviažeme na tieto výsledky. Popíšme si teraz poznatky nadobudnuté v oblasti nášho záujmu.

Keďže operácie lookahead a lookbehind sú v regexoch nové, na počiatku sme skúmali ich vlastnosti. Uzáverové vlastnosti tried Chomského hierarchie dopadli nasledovne:

Veta 1.2.1. [Tó13, Veta 2.2.5.]

Trieda $\mathcal{R}$ je uzavretá na pozitívny lookaround.

Trieda $\mathscr{L}_{CS}$ je tiež uzavretá a trieda $\mathscr{L}_{CF}$ nie je.

Základnou vlastnosťou pozitívneho lookaheadu je, že do jeho vnútra sa oplatí dávať iba prefixové jazyky. Vyplýva to z toho, že lookahead matchuje tak skoro, ako len môže – akonáhle nájde prvé slovo patriace do jeho jazyka, zvyšok vstupu už neskúma. A

[5] E je od anglického *extended*.

tým pádom môžeme z daného jazyka vyhodiť všetky slová, ktorých prefix doň tiež patrí. Analogicky to platí pre pozitívny lookbehind a sufixové jazyky. Dôsledkom je, že pokiaľ jazyk v pozitívnom lookarounde obsahuje prázdne slovo (ε), potom je možné celý lookaround vynechať. Dôvodom je to, že lookaround neberie zo vstupu písmenká, preto si môže zakaždým zvoliť matchovať ε a automaticky vždy akceptovať.

Prejdime teraz k regexom. Pridaním pozitívneho lookaroundu k triede *Regex* získame nový model. Avšak silnejší ako *Regex* nie je:

Veta 1.2.2. [Tó13, Veta 2.2.10.]
Trieda jazykov nad Regex s pozitívnym lookaroundom je $\mathcal{R}$.

Skúmaním modelu so spätnými referenciami aj pozitívnym lookaroundom vznikla hierarchia:

Veta 1.2.3. [Tó13, Vety 2.2.13 a 2.2.14.]
$\mathscr{L}_{ERE} \subsetneq \mathscr{L}_{LERE} \subseteq \mathscr{L}_{CS}$

Z viet 1.2.2 a 1.2.3 vyplýva dôležité pozorovanie, že síce lookaround samostatne regexom silu nepridáva, ale ak ho pridáme k modelu so spätnými referenciami, pridá do triedy nové jazyky. Z tohto hľadiska naberá na význame a vidíme dôvod, prečo sa ním zaoberať.

Je to spôsobené tým, že trieda $\mathscr{L}_{ERE}$ nie je uzavretá na prienik [CN09] a pozitívny lookaround je nástroj na zapísanie prieniku 2 jazykov. Navyše pridaním negatívneho lookaroundu je zaručená aj uzavretosť na komplement. Avšak to, či je naň uzavretá aj $\mathscr{L}_{LERE}$ je otvorený problém.

Zaujímavá vlastnosť triedy $\mathscr{L}_{ERE}$ je, že obsahuje jednoduché jazyky a to v tom zmysle, že pre ňu existuje pumpovacia lema ([CSY03] aj [CN09]). Pridaním lookaroundu táto vlastnosť mizne – do triedy $\mathscr{L}_{LERE}$ patrí jazyk všetkých platných výpočtov Turingovho stroja [Tó13, Veta 2.2.16.]. Pre unárne jazyky z $\mathscr{L}_{LERE}$ bola dokázaná kvázi-pumpovacia lema. Kvázi preto, že platí len pre množinu regexov, ktoré vnútri Kleeneho $*$ neobsahujú žiadnu konštrukciu lookaheadu obsahujúceho metaznak \$ alebo lookbehindu obsahujúceho metaznak ^ (t.j. lookaround spúšťaný niekoľkokrát v iterácii, vždy potenciálne z inej pozície je problém).

1.3 Popisná zložitosť regulárnych výrazov

V cieľoch tejto práce je skúmať aj zložitosť moderných regulárnych výrazov. Opäť sa odvolávame na to, že k našej téme sme nenašli články. Je zrejmé, že skúmať NSPACE a DSPACE základných regulárnych výrazov nemá zmysel – sú konštantné. Preto zostala popisná zložitosť.

Z oblasti popisnej zložitosti sú známe len výsledky pre regulárne výrazy s operáciami zjednotenia, zreťazenia a Kleeneho $*$ (RE), prípadne ešte prieniku a komplementu (GRE). Navyše mali ešte znak pre prázdny jazyk $\emptyset$ a prázdne slovo ε.

Spomeňme si najprv ako možno zadefinovať popisnú zložitosť [EKSW04] [EZ76]:

Nech E je regulárny výraz, potom

- $|E|$ je jeho celková dĺžka
- $rpn(E)$ je jeho celková dĺžka v reverznej poľskej notácii. Táto notácia oproti klasickej neobsahuje okrúhle zátvorky a používa explicitný metaznak pre zreťazenie $\bullet$. Napríklad regulárny výraz $(a|ab)*(c|d)$ má 12 znakov a v reverznej poľskej notácii $aab \bullet | * cd| \bullet$ má 10 znakov.

  Uvedomme si, že dĺžka reverznej poľkej notácie je rovnaká ako počet vrcholov v syntaktickom strome pre daný výraz. Preto možno vernejšie popisuje skutočnú zložitosť regulárneho výrazu (žiadne pomocné symboly, len znaky a operácie). Nakoľko však nie je veľmi prehľadná a ťažko sa v nej hľadajú chyby, nie je tak často používaná.
- $|alph(E)| = N(E)$ je počet alfabetických symbolov v E
- $H(E)$ je hĺbka vzhľadom na $*$, počet vnorení $*$
- $L(E)$ je dĺžka najdlhšej neopakujúcej sa cesty cez výraz
- $W(E)$ je šírka, počet zjednotených symbolov. Za touto mierou zložitosti nie je žiadna intuitívna predstava. Ako vidieť neskôr v definícii, dôvodom jej vzniku bola duálnosť k L.

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené induktívne definície jednotlivých mier zložitosti. Zložitosť regulárneho jazyka vzhľadom na ľubovoľnú z týchto mier zložitosti je minimálna miera cez všetky regulárne výrazy pre daný regulárny jazyk.

	Alphabetical Symbol	E ∪ F	E · F	E*
N	1	$N(E) + N(F)$	$N(E) + N(F)$	$N(E)$
H	0	$max(H(E), H(F))$	$max(H(E), H(F))$	$H(E) + 1$
L	1	$max(L(E), L(F))$	$L(E) + L(F)$	$L(E)$
W	1	$W(E) + W(F)$	$max(W(E), W(F))$	$W(E)$

Ako pri mnohých iných modeloch, aj do regulárnych výrazov vieme zakomponovať časti, ktoré nič nerobia (okrem toho, že zaberajú miesto). V rámci skúmania najjednoduchších výrazov sa prišlo k nasledujúcim definíciám [EKSW04]:

Definícia 1.3.1. *Nech E je regulárny výraz nad abecedou Σ a nech L(E) je jazyk špecifikovaný výrazom E. Hovoríme, že E je* ***zmenšiteľný****, ak platí nejaká z nasledujúcich podmienok:*

1. *E obsahuje* $\emptyset$ *a* $|E| > 1$
2. *E obsahuje podvýraz tvaru FG alebo GF, kde L(F)=ε*
3. *E obsahuje podvýraz tvaru* $F|G$ *alebo* $G|F$*, kde* $L(F) = \{\varepsilon\}$ *a* $\varepsilon \in L(G)$

Inak, ak žiadna z nich neplatí, E nazývame ***nezmenšiteľným****.*

V originále sa používajú výrazy *collapsible* a *uncollapsible*. Táto definícia neodhalí všetky zbytočne zopakované časti, napríklad $a|a$ je nezmenšiteľný, aj keď by sa dal zapísať jednoduchým a. Problém je, že identity výrazov nie sú konečne axiomatizovateľné (ani nad unárnou abecedou)[EKSW04]. Teda nie je reálne určiť také pravidlá, aby sme dosiahli konečné zjednodušenie.

Definícia 1.3.2. *Ak E je nezmenšiteľný regulárny výraz taký, že*

1. *E nemá nadbytočné (); a zároveň*
2. *E neobsahuje podvýraz tvaru* $F**$

potom vravíme, že E je ***neredukovateľný*** *(irreducible).*

Môžeme vyvodiť, že minimálny regulárny výraz pre daný jazyk bude nezmenšiteľný a neredukovateľný, naopak to však nemusí platiť. S takýmto základom možno dokázať napríklad tvrdenie: Ak E je neredukovateľný a $|alph(E)| \geq 1$, potom $|E| \leq 11|alph(E)| - 4$.

Iné spôsoby na ohraničenie regulárnych výrazov poskytuje nasledujúce pozorovanie a veta.

Veta 1.3.3 (Proposition 6 [EKSW04]). *Nech L je neprázdny regulárny jazyk.*

(a) Ak dĺžka najkratšieho slova v L je n, potom $|alph(E)| \geq n$ pre ľubovoľný regulárny výraz E, kde L(E) = L.

(b) Ak naviac L je konečný a dĺžka najdlhšieho slova v L je n, potom $|alph(E)| \geq n$ pre ľubovoľný regulárny výraz, kde L(E) = L.

Definícia non-returning NKA hovorí, že sa nevracia do počiatočného stavu, t.j. žiadne prechody nevedú smerom do q_0.

Veta 1.3.4 (Theorem 10). *Nech E je regulárny jazyk s $|alph(E)| = n$. Potom existuje non-returning NKA akceptujúci $L(E)$ s $\leq n + 1$ stavmi a DKA akceptujúci L(E) s $\leq 2n + 1$ stavmi.*

Rozbehnutých je viacero oblastí skúmania. Regulárne výrazy sú zaujímavé hlavne preto, že tvoria stručnejší popis jazyka a sú ekvivalentné automatom. S tým súvisí prvá oblasť. Skúma sa stavová zložitosť automatu ekvivalentného konkrétnemu výrazu a naopak tiež popisná zložitosť výrazu ekvivalentného konkrétnemu automatu. Dá sa to zhrnúť ako problémy konverzií medzi modelmi. Niektorí autori siahajú po väčšej abstrakcii a namiesto automatov uvažujú iba orientované grafy s hranami označenými symbolmi. Určia si parametre grafu a snažia sa napríklad čo najlepšie popísať cesty medzi vrcholmi.

Ďalšia oblasť zahŕňa operácie nad regulárnymi výrazmi. Jeden z problémov je napríklad vzťah popisnej zložitosti výrazu pre jazyk L a L^c. Pre automaty existuje konštrukcia pre vyrobenie komplementu jazyka. Avšak pre komplementárny regulárny výraz to nie je také jednoznačné.

Ako posledný by sme spomenuli problém najkratšieho slova nešpecifikovaného regulárnym výrazom. Predpokladajme regulárny výraz E, kde $|alph(E)| = n$ nad konečnou abecedou Σ, pričom $L(E) \neq \Sigma^*$. Aké dlhé môže byť najkratšie slovo NEšpecifikované výrazom E? Najzaujímavejší výsledok je pre výraz s $|alph(E)| = 75n + 361$, kde najkratšie nešpecifikované slovo je dĺžky $3(2n - 1)(n + 1) + 3$.

2 Naše výsledky

2.1 Sila negatívneho lookaroundu

V bakalárskej práci bol skúmaný hlavne pozitívny lookaround. Teraz si pozrieme na vlastnosti negatívneho lookaroundu. Budú to vety s podobným znením ako v prípade pozitívnej verzie.

Pripomenieme, že negatívny lookahead skúša všetky prefixy a pokiaľ žiadny z nich nepatrí do jeho jazyka, akceptuje a hľadanie zhody môže pokračovať v regexe ďalej. Čo je jednoduché pri pozitívnej verzii – stačí si nedeterministicky tipnúť ten správny prefix patriaci do jazyka – to je komplikované pri tej negatívnej. Aby sme mohli s istotou povedať, že akceptuje, potrebujeme deterministický algoritmus, ktorý vyskúša všetky možnosti. Preto veľakrát budeme budovať negatívny lookaround tak, že vezmeme nejaký deterministický model akceptujúci jeho jazyk a upravíme akceptáciu.

Lema 2.1.1. *Trieda $\mathcal{R}$ je uzavretá na negatívny lookahead.*

Dôkaz. Nech $L_1, L_2, L_3 \in \mathcal{R}$. Ukážeme, že $L = L_1(?!\ L_2)L_3 \in \mathcal{R}$.

Jazyky L_1, L_2, L_3 sú regulárne, teda existujú DKA $A_i = (K_i, \Sigma_i, \delta_i, q_{0i}, F_i)$ také, že $L(A_i) = L_i,\ i \in \{1, 2, 3\}$. Zostrojíme NKA A pre L.

Konštrukcia bude veľmi podobná ako v obdobnej vete pre pozitívny lookahead v [Tó13], keď si správne predpripravíme A_2. Negatívny lookahead sa snaží za každú cenu nájsť slovo z L_2 (t.j. uspieť s A_2) a ak sa mu to nepodarí, akceptuje. Preto musíme zaručiť, že sa A_2 buď zasekne alebo prejde až do konca slova[1]. Akonáhle A_2 dosiahne akceptačný stav, negatívny lookahead musí zamietnuť.

Ďalšie pozorovanie nám hovorí, že negatívny lookahead akceptuje vždy nejaké slovo z komplementu L_2. Ale komplement vzhľadom na akú abecedu? V skutočnosti nekonečnú

[1] Ak sa zasekne, slovo z L_2 tam určite nebude, lebo A_2 je deterministický a teda neexistuje akceptačný výpočet. Ak sa nezasekne, nevieme povedať o tom slove nič, pokiaľ ho neprejdeme celé.

– ľubovoľný znak, ktorý nepatrí do Σ_2, znamená zaseknutie A_2, t.j. akceptáciu. Ak sa na to pozrieme z väčšej diaľky, uvidíme L_3, s ktorým robíme prienik. A_3 musí dočítať slovo do konca a na úplne neznámom znaku sa zasekne, takže z pohľadu výslednej akceptácie slova nevadí, ak by kvôli tomu znaku zamietol už negatívny lookahead. Preto stačí urobiť komplement vzhľadom na $\Sigma_2 \cup \Sigma_3$.

Poďme upravovať A_2, začneme vytváraním komplementu. Ak $\Sigma_3 \setminus \Sigma_2 \neq \emptyset$[2], potom vytvoríme $A_2' = (K_2', \Sigma_2', \delta_2', q_0, F_2')$ tak, že pridáme nové znaky $\Sigma_2' = \Sigma_2 \cup \Sigma_3$, jeden nový stav[3] $K_2' = K_2 \cup \{q_{ZLE}\}$ a prechody na nové znaky z každého stavu:

$$\begin{aligned}
\forall q \in K_2, \forall a \in \Sigma_2 \quad &: \quad \delta_2'(q, a) = \delta_2(q, a) \\
\forall q \in K_2, \forall a \in \Sigma_3 \setminus \Sigma_2 \quad &: \quad \delta_2'(q, a) = q_{ZLE} \\
\forall a \in \Sigma_2' \quad &: \quad \delta_2'(q_{ZLE}, a) = q_{ZLE}
\end{aligned}$$

$F_2' = F_2$. Do všetkých stavov sme pridali prechody na nové znaky a q_{ZLE} má 1 prechod na každý znak, takže A_2' je stále deterministický. Zároveň nové znaky vedú do stavu, z ktorého sa nedá dostať do žiadneho akceptačného, z čoho vyplýva $L(A_2') = L_2$.

Teraz A_2' zmeníme na A_2'' tak, aby akceptoval práve vtedy, keď (?! L_2). Najprv si skonštruujeme množinu stavov, z ktorých sa vieme dostať do akceptačného stavu: $H = \{q \in K_2' \mid \exists w \in \Sigma_2'^*,\ \exists q_A \in F_2' :\ (q, w) \vdash_{A_2'} (q_A, \varepsilon)\}$, nasledovným spôsobom:

$$H_0 = F_2'$$

$$H_{i+1} = H_i \cup \{q \in K_2' \mid \exists p \in H_i\ \ \exists a \in \Sigma_2' :\ \delta(q, a) = p\}$$

Zrejme $\exists j \in \mathbb{N} :\ H_{j+1} = H_j = H$. Nás zaujíma množina $K_2' \setminus H$, v ktorej sa nachádzajú všetky stavy, z ktorých sa na žiadnu postupnosť znakov nedá dostať do žiadneho akceptačného stavu.

$A_2'' = (K_2'', \Sigma_2'', \delta_2'', q_0, F_2'')$:

$$K_2'' = K_2' \cup \{q_A, q_Z\},\ \Sigma_2'' = \Sigma_2',\ F_2'' = (K_2' \setminus H) \cup \{q_A\}$$

---

[2]Inak $A_2' = A_2$.

[3]Pre každý nový stav predpokladáme, že je jedinečný – t.j. žiaden taký v množine stavov ešte nie je.

δ'' je definovaná nasledovne:

$$\begin{array}{llcl} \forall q \in K_2' \setminus F_2' & \forall a \in \Sigma_2' & : & \delta_2''(q\ \ , a) = \delta_2'(q, a) \\ \forall q \in K_2' \setminus F_2' & \forall a \in \Sigma_2' & : & \delta_2''(q\ \ , \varepsilon) = q_A \\ \forall q \in F_2' & \forall a \in \Sigma_2' & : & \delta_2''(q\ \ , a) = q^4 \\ & \forall a \in \Sigma_2' & : & \delta_2''(q_A, a) = q_Z \end{array}$$

Je dobré poznamenať, že A_2'' je takmer deterministický. Chýbajú mu prechody z q_Z – môžeme ho nechať cykliť v tomto stave, ale nevadí nám ani keď sa zasekne. Nedeterministické rozhodnutie vykonáva iba jedno – pri prechode do stavu q_A. Vtedy háda, že už je na konci slova. Ak nie je, δ-funkcia ho pošle do stavu q_Z. Podľa toho je zrejmé, že ak existuje akceptačný výpočet a dočítal slovo do konca, je práve jeden[5] [6].

Tvrdíme $L_1(?{=}L(A_2''))L_3 = L_1(?!\ L_2)L_3 = L$. Keďže A_1 a A_3 sa pri oboch výpočtoch budú chovať rovnako (sú nezávislé od lookaheadov), nebudeme sa nimi pri dôkaze zaoberať.

$\subseteq$: Máme akceptačný výpočet pre A_2'' na nejakom vstupe. Akceptačný stav mohol byť buď z množiny $K_2' \setminus H$, to znamená, že pôvodný automat A_2' sa dostal do stavu, z ktorého už nemohol nijako akceptovať[7]. V takom prípade $(?!\ L_2)$ akceptuje. V druhom prípade mohol A_2'' akceptovať pomocou q_A, čo znamená, že dočítal slovo do konca (pretože z q_A sa na ľubovoľný znak dostaneme do q_Z, v ktorom sa A_2'' zasekne a nebude akceptovať) a ani raz sa nedostal do akceptačného stavu automatu A_2'. Teda aj $(?!\ L_2)$ akceptuje.

$\supseteq$: Nech $(?!\ L_2)$ akceptoval, t.j. na A_2 bol vykonaný nejaký neakceptujúci výpočet (A_2 je deterministický, takže existuje práve jeden pre každé slovo). Rovnakú postupnosť stavov bude mať aj výpočet na A_2'' (automat obsahuje všetky stavy aj δ-funkciu z A_2, počiatočný stav je ten istý). Ak sa A_2 zasekol na neznámom znaku, v A_2' na ten znak pridáme prechod do stavu q_{ZLE} a v ňom zostaneme až do konca slova. Keďže q_{ZLE} nie je v A_2' akceptačný a nedá sa z neho na žiadne slovo dostať do ľubovoľného akceptačného

[4]Tento riadok v podstate netreba, A_2'' sa môže rovno zaseknúť, lebo A_2' práve akceptoval.

[5]Okrem prípadu, kedy dočíta slovo a je v stave z $(K_2' \setminus H)$ – vieme ho predĺžiť o krok na ε a skončiť v q_A. Jadro výpočtu ale zostáva rovnaké – jednoznačné.

[6]Zaujímavé je, že aj zamietací výpočet je pre každé slovo jednoznačný.

[7]Sem spadá aj prípad, keď A_2 prečítal neznámy znak a zasekol sa – A_2' zostáva až do konca slova v stave q_{ZLE}.

stavu, $q_{ZLE} \in K_2' \setminus H$ a teda $q_{ZLE} \in F_2''$. Ak sa A_2 nezasekol, tak dočítal slovo do konca a v postupnosti stavov jeho výpočtu sa nenachádza žiaden z množiny F_2. V tom prípade A_2'' z posledného stavu prejde na ε do q_A (2. riadok definície δ_2'') a akceptuje.

Z práve dokázaného tvrdenia a vety 1.2.1 už vyplýva aj platnosť našej lemy. □

Lema 2.1.2. *Trieda $\mathcal{R}$ je uzavretá na negatívny lookbehind.*

Dôkaz. Nech $L_1, L_2, L_3 \in \mathcal{R}$, existujú DKA $A_i = (K_i, \Sigma_i, \delta_i, q_{0i}, F_i)$ také, že $L(A_i) = L_i$, $i \in \{1, 2, 3\}$. Ukážeme, že $L = L_1(?\!<\,!\ L_2)L_3 \in \mathcal{R}$.

Nemôžeme skonštruovať A_2'' také, že bude akceptovať práve vtedy, keď $(?\!<\,!\ L_2)$, pretože nevieme čítať doľava – teda nevieme zaručiť, že miesto, kde začína výpočet A_2'' je skutočný začiatok slova. Mechanizmus lookbehindu musí byť riadený zvonku, automatom pre L. Skonštruujeme ho. $C = (K, \Sigma, \delta, q_0, F)$:

$$K = K_3 \cup \{(q, A) \mid q \in K_1 \wedge A \subseteq K_2\},\ \Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2 \cup \Sigma_3,\ q_0 = (q_{01}, \{q_{02}\}), F = F_3$$

δ :

$$\begin{array}{llcl}
\forall q \in K_1\ \forall A \subseteq K_2 & \forall a \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2 & : & \delta((q, A), a) \ni (\delta_1(q, a), B \cup \{q_{02}\}) \\
 & & & B = \{r \mid \exists s \in A :\ \delta_2(s, a) = r\} \\
\forall q \in K_1\ \forall A \subseteq K_2 & \forall a \in \Sigma_1 \setminus \Sigma_2 & : & \delta((q, A), a) \ni (\delta_1(q, a), \{q_{02}\}) \\
\forall q \in F_1\ \ \forall A \subseteq K_2 \setminus F_2 & & : & \delta((q, A), \varepsilon) \ni q_{03} \\
\forall q \in K_3 & \forall a \in \Sigma_3 & : & \delta(q, a) \ni \delta_3(q, a)
\end{array}$$

Prvý riadok δ-funkcie hovorí, že A_1 a všetky rozbehnuté výpočty A_2 prejdú do ďalšieho stavu a zároveň sa rozbehne nový výpočet A_2. Ak by sme hľadali jeden akceptačný výpočet A_2 stačilo by tipnúť si začiatok a odtiaľ ho simulovať. Lenže simulujeme negatívny lookbehind, teda ak neexistuje akceptačný výpočet, tak my akceptujeme (prejdeme na simulovanie A_3, 4. riadok). A to vieme povedať len v prípade, že sme videli všetky možné výpočty. Keďže A_2 je deterministický, pre každé slovo existuje práve jeden výpočet a zároveň sa nikdy nezasekne (na svojej abecede), teda nám stačí skontrolovať množinu stavov A vtedy, keď sa C rozhodne, že A_1 končí výpočet. Ak v A je nejaký akceptačný stav, potom C nevie prejsť do stavu q_3. Tým pádom sa nedostane k simulovaniu A_3 a ani k svojim akceptačným stavom.

$L(C) = L$.

$\subseteq$: Majme akceptačný výpočet C na w. Z definície F vyplýva, že A_3 akceptoval, teda $\exists u, v$ také, že $w = uv$ a $v \in L_3$. Do q_{03} sa dá dostať len z dvojice (q, A) takej, že $q \in F_1$, teda $u \in L_1$, a $A \cap F_2 = \emptyset$, teda $\nexists x, y$ také, že $u = xy$ a $y \in L_2$. To vyplýva z toho, že v každom znaku u začal jeden výpočet na A_2 a žiaden z nich neakceptoval. Teda negatívny lookbehind akceptoval a $w \in L$.

$\supseteq$: Nech $w \in L$, teda $\exists u, v$ také, že $w = uv,\ u \in L_1, v \in L_3$ a $\forall x, y :\ \ u = xy$ platí $y \notin L_2$. Pre u, v teda existujú akceptačné výpočty na A_1, A_3 a pre všetky y neakceptačné na A_2. Z toho už vieme vyskladať akceptačný výpočet na C. □

Veta 2.1.3. *Trieda $\mathcal{R}$ je uzavretá na negatívny lookaround.*

Zjavne konečné automaty si s negatívnym lookaroundom poradia. Pozrime sa teraz na model *Regex* s pridaným negatívnym lookaroundom. Najprv musíme skontrolovať kombinácie operácií ako v [Tó13, Lema. 2.2.8. a 2.2.9]. Ukazuje sa, že aj tu dostávame rovnaké výsledky ako pri pozitívnej verzii.

Lema 2.1.4. *Nech $L_1, L_2, L_3, L_4 \in \mathcal{R}$, $\alpha = (L_1\,(?!\ L_2)\,L_3) * L_4$. Potom $L(\alpha) \in \mathcal{R}$.*

Dôkaz. Podobne ako v dôkaze vety 2.1.1 pretransformujeme $(?!\ L_2)$ na akýsi $(?{=}L(A_2''))$, kde A_2'' bude akceptovať práve vtedy, keď $(?!\ L_2)$. Potom $\beta = (L_1(?{=}L(A_2''))L_3) * L_4$, $L(\beta) = L(\alpha) \in \mathcal{R}$ podľa lemy k vete 1.2.1. □

Lema 2.1.5. *Nech $L_1, L_2, L_3, L_4 \in \mathcal{R}$, $\alpha = L_4\,(L_1\,(?<!\ L_2)\,L_3)*$. Potom $L(\alpha)\ \in\ \mathcal{R}$.*

Dôkaz. Použijeme konštrukciu ako v dôkaze vety 2.1.2, kde pretransformujeme $(?<!\ L_2)$ na $(?{<=}L(A_2''))$, kde A_2'' bude akceptovať práve vtedy, keď $(?<!\ L_2$. Z toho vznikne $\beta = L_4\,(L_1\,(?<=\ \ L(A_2''))\,L_3)*$, $L(\beta) = L(\alpha) \in \mathcal{R}$ podľa lemy k vete 1.2.1. □

Veta 2.1.6. *Trieda nad regexami s negatívnym lookaroundom je $\mathcal{R}$.*

Dôkaz. Podobne ako v dôkaze vety 1.2.2 je netriviálna iba kombinácia operácií negatívny lookaround a $*$. Podľa liem 2.1.4 a 2.1.5 máme stále regulárne jazyky. □

Dôsledok 2.1.7. *Trieda nad regexami s pozitívnym a negatívnym lookaroundom je $\mathcal{R}$.*

Dôkaz. Výpočet lookaroundu je z pohľadu vonkajšieho regexu nebadateľný, pretože žiadne písmenká zo vstupu mu nie sú priradené. Pre túto vlastnosť lookaround neovplyvňuje zvyšok regexu, teda ani iné lookaroundy. Výnimkou je situácia, kedy lookaround nenájde podslovo zo svojho jazyka resp. negatívna verzia podslovo nájde a zastaví celý výpočet. Avšak pokiaľ akceptuje, zvyšok regexu pokračuje vo výpočte ako keby tam nebol.

Musíme vyriešiť iba prípad, kedy je do seba vnorených niekoľko pozitívnych a negatívnych lookaroundov. V takejto situácii vieme postupovať z najvnútornejšieho regexu s lookaroundom s hĺbou vnorenia 1. Jeho jazyk je regulárny a teda ho vieme prepísať na regex z $Regex$. Takýmto spôsobom vieme zvnútra von prepisovať regex, až skončíme s regexom z $Regex$, teda matchujúcim regulárny jazyk.

Formálne by sme to zapísali ako indukciu vzhľadom na hĺbku vnorenia lookaroundov v regexe (bez ohľadu na to, či sú pozitívne alebo negatívne). $\square$

2.2 Vlastnosti triedy $\mathscr{L}_{LERE}$

Pridanie nových operácií medzi regulárne výrazy síce pridalo na sile modelu, ale mohlo pokaziť jeho uzáverové vlastnosti. Vieme, že regulárne jazyky sú uzavreté na všetky možné operácie, ktoré poznáme. Posilnenie modelu spätnými referenciami a následne lookaroundom však ohrozilo uzavretosť na základnú operáciu regulárnych výrazov – zreťazenie. Pokiaľ zreťazíme 2 regexy obsahujúce lookahead alebo lookbehind, tieto operácie začnú zasahovať do slova z vedľajšieho jazyka. Ak by išlo o zreťazenie so zarážkou (napr. $\alpha\#\beta$), na koniec každého lookaheadu v α by stačilo pripojiť $.*\#$, prípadne znak \$ nahradiť znakom #. Podobne by sme v regexe β pridali na začiatok každého lookbehindu $\#.*$ prípadne by sme vymenili znak ˆ znakom #. Potom by tieto operácie zostali „skrotené" na území slova, ktoré danému regexu prislúcha.

Otázkou zostáva, ako to spraviť, keď zarážku k dispozícii nemáme. Odpoveďou je nasledujúca veta.

Veta 2.2.1. *Trieda $\mathscr{L}_{LERE}$ je uzavretá na zreťazenie.*

Dôkaz. Nech $\alpha, \beta \in LEregex$. Chceme ukázať, že jazyk $L(\alpha)L(\beta) \in \mathscr{L}_{LERE}$. Intuitívne nás to vedie k riešeniu $\alpha\beta$, čo ale nemusí byť vždy správne. Problémom sú operácie lookaround, presnejšie každý lookahead v α môže zasahovať do slova z $L(\beta)$ a takisto každý lookbehind z β môže zasahovať do slova z $L(\alpha)$. Navyše, ak lookahead obsahuje \$ a lookbehind ˆ, potom zasahujú do slova z iného jazyka určite. V takom prípade môže regex $\alpha\beta$ vynechať niektoré slová z L_1L_2 a tiež pridať nejaké nevhodné slová naviac.

Preto treba nájsť spôsob, ako operácie lookaroundu vhodne „skrotiť". Predpokladajme, že α má k označených zátvoriek, potom regex pre jazyk $L(\alpha)L(\beta)$ vyzerá nasledovne:

$$(?{=}\underset{1}{(}\,\alpha\,\underset{1}{)}\,\underset{k+2}{(}\,\beta\,\underset{k+2}{)}\ \$)\alpha'\backslash k{+}2\ (?{<=}\hat{}\,\backslash 1\beta') \tag{2.1}$$

V α, β treba vhodne prepísať spätné referencie podľa nového prečíslovania zátvoriek. α' je α prepísaný tak, že pre každý lookahead:

- bez \$ – na koniec pridáme $.*\backslash k{+}2\ \$$
- s \$ – pred \$ pridáme $\backslash k{+}2$

β' je β prepísaný tak, že pre každý lookbehind:

- bez ˆ – na začiatok pridáme $\hat{}\backslash 1.*$
- s ˆ – za ˆ pridáme $\backslash 1$

Čo presne robí regex 2.1? Nech w je vstupné slovo, ktoré chceme matchovať. Lookahead na začiatku ho nejako rozdelí na w_1 a w_2, pričom $w = w_1w_2$, tak, že w_1 bude patriť do $L(\alpha)$ a podslovo w_2 do $L(\beta)$. Ešte musíme overiť, či α matchuje w_1 samostatne.

Preto sme v α prepísali všetky lookaheady. V α' každý z nich musí na konci slova w matchovať w_2 (toto zabezpečí spätná referencia $\backslash k{+}2$ a \$) a teda matchovanie regexu α zostane výlučne na podslove w_1. Analogicky to platí pre upravené lookbehindy v β'.

$\square$

Otvoreným problémom zostáva, či je trieda $\mathscr{L}_{LERE}$ uzavretá aj na Kleeneho $*$. Konštrukcia z dôkazu o zreťazení fungovať nebude, pretože $*$ môže urobiť ľubovoľný počet iterácií, zápis regexu musí byť konečnej dĺžky a lookahead a lookbehind by bolo nutné usmerňovať v každej iterácii zvlášť. Naša hypotéza je, že uzavretosť neplatí, avšak doposiaľ sa nám nepodarilo nájsť vhodný jazyk na dôkaz.

2.3 Zaradenie do Chomského hierarchie

Známa je doteraz takáto hierarchia:

$$\mathcal{R} = \mathscr{L}_{RE} \subsetneq \mathscr{L}_{ERE} \subsetneq \mathscr{L}_{LERE} \subseteq \mathscr{L}_{CS}$$

a triviálne platí $\mathscr{L}_{LERE} \subseteq \mathscr{L}_{nLERE}$. Teraz k tomu doplníme niekoľko výsledkov.

Veta 2.3.1. $\mathscr{L}_{nLERE} \subseteq \mathscr{L}_{CS}$

Tento dôkaz využíva formalizmus z podkapitoly 2.4.1, pretože je vďaka tomu prehľadnejší a exaktnejší. Odporúčame preto čitateľovi tento dôkaz preskočiť a vrátiť sa k nemu, keď bude s daným formalizmom oboznámený.

Dôkaz. Podľa vety 1.2.3 vieme, že $\mathscr{L}_{LERE} \subseteq \mathscr{L}_{CS}$. Takže potrebujeme pridať operácie negatívny lookahead a negatívny lookbehind. Nech $\alpha \in nLEregex$, zostrojíme lineárne ohraničený Turingov stroj T, ktorý bude simulovať výpočet α.

Pokiaľ α neobsahuje negatívny lookaround, potom $\alpha \in LEregex$ a vieme zostrojiť požadovaný LBA. Nech α obsahuje aspoň 1 negatívny lookaround. Budeme postupovať indukciou vzhľadom na počet vnorených negatívnych lookaroundov k.

Báza indukcie: $k = 1$, teda regex α obsahuje 1 negatívny lookaround, ktorý obsahuje regex z $LEregex$. Zostrojíme T pre α. Nech LBA A simuluje regex α a ignoruje pri tom negatívny lookaround. LBA A bude nedeterministický a bude fungovať nasledovne:

Stroj A je v každom kroku v konfigurácii podľa definície 2.4.5. Na páske bude mať slovo s pomocnou informáciou ukladanou v poschodových symboloch a v stave bude obsahovať regex s ukazovateľom. LBA A bude postupovať z konfigurácie do konfigurácie podľa kroku výpočtu definovaného v 2.4.10. Zrejme takto vieme simulovať ľubovoľný regex z $LEregex$.

Zostrojíme deterministický LBA B pre regex vnútri negatívneho lookaroundu (nech je to β). Zostrojíme najprv LBA B' tak, ako LBA A pre α bez negatívneho lookaroundu. β sa líši od regexu z $LEregex$ tým, že má posunuté číslovanie zátvoriek a môže sa odkazovať na zátvorky v α naľavo od nej. Toto nie je problém, pretože dané zátvorky už boli simulované a informácia o ich podslovách je uložená vo vyšších poschodiach symbolov. Zároveň vstupné slovo pre β je len podslovo vstupu, preto si musíme označiť hranice. Vieme si do poschodí symbolov označiť endmarkery, ktoré výpočet B' smie prekročiť len ak potrebuje informáciu o spätných referenciach. Nech teda B' simuluje β na podslove ohraničenom endmarkermi. B' akceptuje práve vtedy, keď β matchuje dané podslovo. Nech B" je ekvivalentný deterministický LBA k B'. Potom výsledný stroj B pre negatívny lookaround je deterministický LBA taký, že na začiatku prekopíruje celé vstupné slovo aj s poschodovou informáciou na ďalšiu lineárne ohraničenú pásku [8].

[8] Taký istý výpočet vieme spraviť v ďalších stopách, ale keď hovoríme o ďalšej páske, je to zrozumiteľnejšie.

Pokiaľ simuluje negatívny lookahead, začiatok vstupného podslova je fixný a koniec môže byť na ľubovoľnom mieste od fixného začiatku až po samotný koniec vstupného slova. Preto B bude postupne spúšťať B" na všetkých týchto podslovách vstupu tak, že bude postupne posúvať koncový endmarker doprava. Akonáhle nejaká simulácia akceptuje, B zamietne. Ak všetky výpočty zamietnu, potom B akceptuje. Pre negatívny lookbehind je simulácia analogická, akurát koncový endmarker je fixný a začiatočný sa posúva smerom doľava – k začiatku samotného vstupného slova. Vidíme, že B je deterministický a simuluje daný negatívny lookaround.

Teraz zostrojíme T zo strojov A a B. T bude simulovať A, pokým nenarazí na negatívny lookaround. V tom momente si zapamätá, v akom stave bol A, kde sa nachádzal na vstupe (napríklad tak, že si do poschodového symbolu zaznačí, že tam skončil) a začne simulovať B. Keďže B si kopíruje celú vstupnú pásku na inú pásku a pracuje tam, informácie pre A zostanú nedotknuté. Ak B akceptoval, T pokračuje simuláciou A a akceptuje práve vtedy, keď akceptuje A. Ak B zamietol, T zamietne. Ak existuje výpočet regexu α na vstupnom slove, potom existuje aj správny počet iterácií pre každú $*$ a správny výber v alternácii, čo sú nedeterministické rozhodnutia, ktoré v krokoch výpočtov A robí. Preto na tomto vstupnom slove existuje aj akceptačný výpočet pre T. A naopak, ak T akceptoval, potom jeho akceptačný výpočet obsahuje akceptačný výpočet α.

Indukčný krok: Predpokladajme, že vieme zostrojiť LBA pre regex s $k-1$ vnorenými negatívnymi lookaroundmi. Zostrojíme LBA T pre α s hĺbkou vnorenia negatívnych lookaroundov k.

Zoberme negatívny lookaround, ktorý nie je obsiahnutý v žiadnom negatívnom lookarounde (teda je ten vonkajší). Ten obsahuje negatívne lookaroundy s hĺbkou vnorenia najviac $k-1$. Podľa indukčného predpokladu vieme zostrojiť LBA C pre celý regex vnútri tohto negatívneho lookaroundu. K takému vieme zostrojiť ekvivalentný deterministický LBA C'. Tento stroj je analogický k B" v bází indukcie, preto z neho rovnakým spôsobom vyrobíme B. Pre vonkajší regex zostrojíme LBA A ignorujúci negatívny lookaround ako v báze indukcie. Na koniec spojíme rovnakým spôsobom A a B do LBA T, ktorý sme chceli zostrojiť.

V indukcii sme neriešili prípad, kedy α obsahuje viacero negatívnych lookaroundov, ktoré navyše môžu mať rôzne hĺbky vnorenia. Platí, že akonáhle táto operácia akceptuje, jej výpočet je zahodený a celkový výpočet sa vracia na to isté miesto na vstupe, teda negatívny lookaround výpočet buď celkovo zastaví alebo ho nijako neovplyvňuje. Z toho vyplýva, že viaceré výskyty môžeme riešiť samostatne, a to konštrukciou, ktorú sme naznačili v indukcii.

Ďalej netreba zabúdať, že vnútri negatívneho lookaroundu sa môžeme odvolávať na všetky zátvorky naľavo od nás nachádzajúce sa buď v hlavnom regexe alebo v aktívnom negatívnom lookarounde (t.j. takom, ktorého otváracia zátvorka je naľavo a zatváracia zátvorka sa nachádza napravo od nás). □

Veta 2.3.2. *$\mathscr{L}_{LERE}$ je neporovnateľná s $\mathscr{L}_{CF}$.*

Dôkaz. Majme jazyk $L_{ww} = \{ww \mid w \in \{a,b\}^*\} \in \mathscr{L}_{CF}$, nech $\alpha = ([ab]*)\backslash 1$. Zrejme $L(\alpha) = L_{ww}$, teda $L_{ww} \in \mathscr{L}_{LERE}$.

Ukážeme, že jazyk $L = \{a^n b^n \mid n \in \mathbb{N}\} \notin \mathscr{L}_{LERE}$. Sporom, nech $L \in \mathscr{L}_{LERE}$, teda existuje regex $\beta \in LEregex$ taký, že $L(\beta) = L$.

Vieme, že $L \notin \mathscr{L}_{ERE}$, preto β musí obsahovať nejaký lookaround. Zároveň z $L \notin \mathcal{R}$ a vety 1.2.2 vyplýva, že musí obsahovať aj spätné referencie.

Kam sa môžu spätné referencie odkazovať a kam ich potom môžeme umiestniť? Nech výraz, na ktorý sa odkazujú, vie vyrobiť:

- a^i. Môžu nastať 4 prípady:
    - k-te zátvorky aj $\backslash k$ sa nachádzajú v hlavnom regexe:

      Potom zátvorky s referenciami matchujú dokopy a^{2i}. Na to, aby sme vedeli matchovať celé $\{a\}^*$, by sme k tomu navyše museli vedieť matchovať a^h, kde $h \in \{0, \ldots, i-1\}$, čo v konečnom dôsledku pre i idúce do nekonečna znamená vedieť $\{a\}^*$ a potom spätné referencie nepotrebujeme.
    - k-te zátvorky sú v hlavnom regexe a $\backslash k$ je v lookarounde
    - k-te zátvorky sú v lookarounde a $\backslash k$ je v hlavnom regexe
    - k-te zátvorky aj $\backslash k$ sú v lookaroundoch

  V každom z prípadov platí, že zátvorky aj spätné referencie musia matchovať v prvej polovici slova (časť a^n) a neprenášajú žiadnu informáciu do časti b^n.

- $a^i b^j$. Potom možné prípady umiestnenia sú len 2., 3., a 4. z predošlej možnosti, pretože zátvorky a k nim prislúchajúce referencie musia matchovať to isté podslovo vstupu, inak by nesúhlasili so štruktúrou slova jazyka L.

- b^j. Toto je analogický prípad k a^i.

Spätné referencie buď matchujú v rovnakej polovičke slova ako k nim prislúchajúce zátvorky alebo musia matchovať to isté podslovo. Z toho vidíme, že jediná informácia, ktorú prenášajú je počet a respektíve b v danej polovičke a táto informácia v tej polovičke aj zostáva. Keďže nič neprenášajú do druhej polovice slova a podľa vety 1.2.2 vieme, že so zvyšnými operáciami jazyk L nevieme matchovať, regex β neexistuje.

□

Dôsledok 2.3.3. $\mathscr{L}_{LERE} \subsetneq \mathscr{L}_{CS}$

Veta 2.3.4. *$\mathscr{L}_{nLERE}$ je neporovnateľná s $\mathscr{L}_{CF}$.*

Dôkaz. Opäť použíjeme jazyk $L = \{a^n b^n \mid n \in \mathbb{N}\}$ a budeme dokazovať sporom. Nech $L \in \mathscr{L}_{LERE}$.

Z vety 2.3.2 vidíme, že výraz musí obsahovať negatívny lookaround. Z jej dôkazu vidíme, že spätné referencie nepomôžu, nech sa ich pokúsime hocijako použiť. Z toho vyplýva, že ich nepoužijeme a z vety 2.1.6 zistíme, že nám zostal model schopný vyrobiť iba regulárne jazyky. Spor. □

Dôsledok 2.3.5. $\mathscr{L}_{nLERE} \subsetneq \mathscr{L}_{CS}$

Posledné výsledky s jazykom $L = \{a^n b^n \mid n \in \mathbb{N}\}$ nabádajú na myšlienky o tom, či je možné doplniť model moderných regulárnych výrazov tak, aby zvládal tento a možno ďalšie bezkontextové jazyky. Pre tento konkrétny jazyk by stačilo, aby bolo možné modifikovať podslovo reprezentované spätnými referenciami nejakým homomorfizmom – napríklad udať v špeciálnej štruktúre tesne pred referenciou, ako treba ktoré písmenká zameniť. Podľa Chomského–Schützenbergerovej vety potrebujeme homomorfizmus, prienik s regulárnym jazykom a Dyckov jazyk a porom vieme vygenerovať všetky bezkontextové jazyky. Prienik máme vďaka pozitívnemu lookaroundu, regulárne jazyky vieme zapísať všetky a homomorfizmus pridáme. Zostáva overiť, či nový model vie zapísať Dyckov jazyk, čo zostáva otvoreným problémom.

Idea zavedenia homomorfizmu už bola skúmaná na menšom modeli – triede $Eregex$. Zaoberá sa tým napríklad článok [BDH10].

Po výsledkoch v tejto kapitole vyzerá hierarchia nasledovne:

$$\mathcal{R} \subsetneq \mathscr{L}_{ERE} \subsetneq \mathscr{L}_{LERE} \subseteq \mathscr{L}_{nLERE} \subsetneq \mathscr{L}_{CS}$$

Vzťah medzi triedami $LEregex$ a $nLEregex$ je otvoreným problémom. Naša hypotéza je, že $\mathscr{L}_{LERE}$ je vlastnou podmnožinou $\mathscr{L}_{nLERE}$. Dobrým kandidátom na dôkaz by mohol byť jazyk $L = \{a^p \mid p \textit{ je prvočíslo}\}$, ku ktorému existuje regex $\gamma \in nLEregex$:

$$\gamma = (?!\ (aaa*)\backslash 1(\backslash 1) * \$)$$

Dôsledkom nerovnosti by potom bolo, že trieda $\mathscr{L}_{LERE}$ nie je uzavretá na komplement, lebo túto vlastnosť zaručuje práve negatívny lookaround.

2.4 Priestorová zložitosť

Veta 2.4.1. *$\mathscr{L}_{LERE} \subseteq NSPACE(\log n)$, kde $n > 1$ je veľkosť vstupu.*

Dôkaz. Ukážeme, že ľubovoľný $\alpha \in LEregex$ vieme simulovať nedeterministickým Turingovým strojom s jednou vstupnou read-only páskou a jednou pracovnou páskou, na ktorej použijeme maximálne logaritmický počet políčok.

Celý regex si budeme uchovávať v stavoch[9] a pridáme doňho špeciálny znak ▶, ktorým si budeme ukazovať, kam sme sa v regexe dopracovali – bude to akýsi smerník na znak, ktorý práve spracovávame. Teda stav bude vyzerať takto: $q_{\beta \blacktriangleright \xi}$ (pre lepšiu čitateľnosť budeme uvádzať namiesto stavu iba jeho dolný index: $\beta \blacktriangleright \xi$), kde $\beta\xi = \alpha$, časť β sme už namatchovali na vstup a práve sa chystáme pokračovať časťou ξ. Ak ▶ ukazuje na znak, porovnáme ho s aktuálnym znakom na vstupnej páske. Pokiaľ sa nezhodujú, výpočet sa zasekne. Pri zhode pokračujeme až kým sa nám neminie vstup aj regex. Ak ▶ ukazuje na metaznak, potom zistíme o akú operáciu ide (ak má viac znakov, treba na to niekoľko stavov – napr. lookahead) a začneme ju vykonávať.

Pracovná páska bude slúžiť ako úložisko smerníkov na rôzne miesta vstupnej pásky. Bude mať formát $A_1\#A_2\#\ldots\#A_m$. Adresu nejakého políčka na vstupnej páske vieme

[9] Každý regex má podľa definície konečnú dĺžku, to znamená aj konečný počet stavov.

zapísať v priestore $\log n$. Ak ukážeme, že m je konštanta, potom $m.\log n \in O(\log n)$. Adresa A_1 bude rezervovaná pre prvý adresný slot na aktuálnu pozíciu hlavy na vstupe, nech si ju máme odkiaľ okopírovať, keď treba. Adresy budeme využívať pri operáciách spätná referencia, lookahead a lookbehind.

Keďže celý regex vidíme pri konštrukcii Turingovho stroja, vieme si do stavov zakódovať význam a poradie adresných slotov. A celú pracovnú pásku si predpripraviť (napísať potrebný počet #).

Teraz skonštruujeme Turingov stroj $M = (K, \Sigma, \delta, q_0, F)$ k regexu α.

$$K = \{\beta \blacktriangleright \xi \mid \beta, \xi \textit{ sú podslová } \alpha \textit{ také, že } \beta\xi = \alpha\}$$

$$\Sigma = \Sigma(\alpha)^{10},\ q_0 =\blacktriangleright \alpha,\ F = \{\alpha \blacktriangleright\}$$

δ : (v tvare: stav, znak čítaný na vstupnej páske)

Kvôli prehľadnosti popíšeme len hlavné kroky algoritmu.

$\delta(\beta \blacktriangleright a\xi, a) = \{(\beta a \blacktriangleright \xi, 1)\}\ \forall a \in \Sigma$ – Ak je v regexe znak, matchujeme ho s tým na vstupe.

$\delta(\beta \blacktriangleright (\gamma)\xi, a) = \{(\beta(\blacktriangleright \gamma)\xi, 0)\}$ – Ak sú to k-te zátvorky a regex obsahuje $\backslash k$, zapíšeme aktuálnu adresu ako adresu začiatku pre $\backslash k$.

$\delta(\beta(\gamma \blacktriangleright)\xi, a) = \{(\beta(\gamma) \blacktriangleright \xi, 0)\}$ – Ak sú to k-te zátvorky a regex obsahuje $\backslash k$, zapíšeme aktuálnu adresu ako adresu konca pre $\backslash k$. Používame polootvorený interval – znak na koncovej adrese do podslova nepatrí.

$\delta(\beta \blacktriangleright (\gamma) * \xi, a) = \{(\beta(\gamma)* \blacktriangleright \xi, 0)\}$ – Pri Kleeneho $*$ máme možnosť vykonať aj 0 iterácií, teda zátvorky preskočiť. Ak sú to k-te zátvorky a regex obsahuje $\backslash k$, zapíšeme aktuálnu adresu ako adresu začiatku aj konca pre $\backslash k$.

$\delta(\beta(\gamma) \blacktriangleright *\xi, a) = \{(\beta(\blacktriangleright \gamma) * \xi, 0), (\beta(\gamma)* \blacktriangleright \xi, 0)\}$ – Kleeneho $*$: buď opakujeme alebo pokračujeme ďalej.

$\delta(\beta \blacktriangleright \backslash k\xi, a) = \{(q_{najdi\_zaciatok(k)}, 0)\}$ – Najprv si zapamätáme aktuálnu pozíciu na vstupe (ďalej označovanú ako 'aktuálna pracovná pozícia'). Stav $q_{najdi\_zaciatok(k)}$ zodpovedá presunu hlavy na vstupnej páske na začiatočnú pozíciu podslova. Tu

[10] T.j. všetky znaky a metaznaky použité v regexe α.

začneme algoritmus porovnávania podslov podľa definície spätnej referencie – aké podslovo matchujú k-te zátvorky, také isté musí ležať aj na 'aktuálnej pracovnej pozícii'. Algoritmus bude porovnávať vždy postupne po jednom znaku od začiatočnej pozície (ľavá zátvorka) po (koniec - 1) (pravá zátvorka):

```
pokiaľ začiatok != koniec:
    zapamätaj si znak
    začiatok++
    presuň hlavu na pozíciu 'aktuálna pracovná pozícia'
    porovnaj znak (ak nesedí, zasekni sa)
    (aktuálna pracovná pozícia)++
    presuň hlavu na pozíciu 'začiatok'
presuň hlavu na pozíciu 'aktuálna pracovná pozícia'
```

Vidíme, že si dočasne potrebujeme zapamätať adresu 'aktuálna pracovná pozícia', ale po skončení tohto algoritmu ju môžeme zahodiť.

Po úspešnom zbehnutí algoritmu TS prejde do stavu $\beta\backslash k \blacktriangleright \xi$.

$\delta(\beta \blacktriangleright (?{=}\gamma)\xi, a) = \{(\blacktriangleright \gamma, 0)\}$ – Lookahead: zapamätáme si aktuálnu pozíciu na vstupe do zodpovedajúceho slotu na pracovnej páske a spracujeme regex vnútri lookaheadu. Ak uspejeme, presunieme hlavu na vstupnej páske naspäť na zapamätanú pozíciu a pokračujeme v regexe ďalej: $\delta(\gamma \blacktriangleright, a) = \{(\beta(?{=}\gamma) \blacktriangleright \xi, 0)\}$.

$\delta(\beta \blacktriangleright (?{<=}\gamma)\xi, a) = \{(do\text{ľ}ava\_\gamma, 0)\}$ – Lookbehind: zapamätáme si aktuálnu pozíciu na vstupe do zodpovedajúceho slotu na pracovnej páske. Toto je zarážka pre lookbehind – svoje matchovanie musí skončiť na tejto pozícii tak, že tento znak už neberie do úvahy. Nedeterministicky sa vrátime o niekoľko políčok doľava ($\delta(do\text{ľ}ava\_\gamma, a) = \{(do\text{ľ}ava\_\gamma, -1), (\blacktriangleright \gamma, 0)\}$) a skúsime matchovať regex v lookbehinde. Keď uspejeme, porovnáme aktuálnu pozíciu so zarážkou. Ak sú rôzne, Turingov stroj sa zasekne. Inak pokračuje vo výpočte ďalej, od tejto pozície: $\delta(\gamma \blacktriangleright \_overene, a) = \{(\beta(?{<=}\gamma) \blacktriangleright \xi, 0)\}$.

<u>Počet adries</u>:

Pre **spätné referencie** potrebujeme vždy 2 adresy – na začiatok a koniec. Ak sa náhodou budú k-te zátvorky opakovať, napr. kvôli Kleeneho $*$, v definícii stojí, že sa vždy berie do úvahy posledný výskyt, takže adresy prepisujeme pri každom opakovaní. V prípade, že sa k-te zátvorky nachádzajú vnútri lookaheadu/lookbehindu, tiež máme pre ne rezervované 2 sloty. Algoritmus porovnávania potrebuje 1 ďalšiu adresu – aktuálnu pracovnú pozíciu. Po jeho dokončení adresu môžeme vymazať (tzn. v ďalšom výpočte prepísať niečím iným).

V prípade **lookaheadu a lookbehindu** spotrebujeme len 1 adresný slot a to tiež len dočasne – dokiaľ sa operácia celá nevykoná. Potom je nám tento údaj zbytočný. Tieto operácie však môžu byť vnorené a tak v najhoršom prípade zaberú $p. \log n$ priestoru, ak ich počet je p.

Ak máme 1 rezervovaný slot pre aktuálnu adresu, s spätných referencií, l_a lookaheadov a l_b lookbehindov, najviac spotrebujeme $(1 + 2s + 1 + l_a + l_b) \log n$ priestoru. Celý regex α je konečne dlhý, teda počet operácií je konečný. Čo znamená, že $m = 1 + 2s + 1 + l_a + l_b$ je konštanta a to sme chceli dokázať.

□

Veta 2.4.2 (Savitch [Sav70])**.** *Nech $S(n) \geq \log n$ je páskovo konštruovateľná, potom*

$$NSPACE(S(n)) \subseteq DSPACE(S^2(n))$$

Dôsledok 2.4.3. *$\mathscr{L}_{LERE} \subseteq DSPACE(\log^2 n)$, kde $n > 1$ je veľkosť vstupu.*

Keď už máme deterministický model pre pozitívny lookaround, vieme triedu rozšíriť aj o ten negatívny.

Veta 2.4.4. *$\mathscr{L}_{nLERE} \subseteq DSPACE(\log^2 n)$, kde $n > 1$ je veľkosť vstupu.*

Dôkaz tejto vety uvedieme neskôr. Najprv si zavedieme niekoľko nových pojmov. Keďže sa budeme opierať o dôkaz Savitchovej vety [Ďu03], bude to akási forma konfigurácií, inšpirovaná definíciou Turingovho stroja.

2.4.1 Nový formalizmus

Nasledujúce definície sa budú týkať zjednodušeného modelu regexov, v ktorom budú prípustné iba základné operácie zreťazenia, alternácie, Kleeneho uzáveru a zložité operácie – spätné referencie, pozitívny a negatívny lookaround. Ďalej bude obsahovať špeciálne znaky pre ľubovoľný znak . , začiatok slova ^ a koniec slova \$. Inak povedané, nezaujímajú nás tie operácie, ktoré sú len kozmetickou úpravou regexov a dajú sa zapísať pomocou práve spomenutých operácií.

Definícia 2.4.5. ***Konfiguráciou*** *regexu* $\alpha = r_1 \dots r_n$ *nazývame dvojicu* (r, w)*, kde* $r \in (\lceil\alpha) \cup (\alpha\lceil) \cup (r_1 \dots \lceil r_i \dots r_n)$*,* $w \in \Gamma^* \lceil\, \Gamma^*$ *a symbol* $\lceil$ *ukazuje, kde sa nachádzame vo výpočte v regexe a v slove.*

Γ *je pracovná abeceda obsahujúca poschodové symboly s konečným počtom poschodí a slovo* w *v najspodnejšom poschodí obsahuje vstupné slovo pre regex* α*.*

Teraz si zavedieme pojem indexovateľnosti zátvoriek. Od modelu so spätnými referenciami je zavedené číslovanie zátvoriek a potrebujeme odlíšiť, na ktoré zátvorky je možné sa odkazovať.

Je zakázané odkazovať sa na operácie formy (?...), preto ich ani nechceme a nebudeme brať do úvahy v poradí zátvoriek. Z týchto operácií sa v našom modeli nachádza iba pozitívny a negatívny lookaround. Je povolené odkazovať sa na zátvorky vnútri lookaroundu, takže sa vieme odvolať na podslovo, čo sa zhoduje s pozitívnou formou (keďže lookaround považujeme za neindexovateľné zátvorky, stačí ho prepísať do formy (?=(...)) a vieme sa tak referencovať na jeho obsah). Problém nastáva pri negatívnej verzii – podľa definície nesmie nájsť žiadnu zhodu, inak sa výpočet zastaví. Preto ľubovoľné jeho zátvorky po akceptácii nedefinujú žiadne podslovo, na ktoré by sme sa mohli odvolať.

Avšak počas výpočtu negatívny lookaround spätné referencie a indexovateľnosť zátvoriek využívať môže. Preto definícia bude závisieť od polohy ukazovateľa v regexe (t.j. od stavu výpočtu) – bude používať indukciu vzhľadom na počet negatívnych lookaroundov, v ktorých je vnorený.

Definícia 2.4.6. *Zátvorka (v regexe* α *je* ***indexovateľná****, ak sa bezprostredne za ňou nenachádza metaznak ? a zároveň sa nenachádza vnútri negatívneho lookaroundu.*

Nech je ukazovateľ vnorený v 1 negatívnom lookarounde. Potom najprv posúdime vonkajší regex podľa predošlého kritéria a potom rovnako posudzujeme každú zátvorku (v regexe vnútri tohto negatívneho lookaroundu, tak ako keby to bol samostatný regex.

Nech je ukazovateľ vnorený v k *negatívnych lookaroundoch a predpokladajme, že máme určené indexovateľné zátvorky v* $k-1$ *vonkajších negatívnych lookaroundoch. Indexovateľnosť zátvoriek najvnútornejšieho negatívneho lookaroundu posúdime podľa horeuvedeného kritéria ako keby bol jeho regex samostatným regexom.*

Jednoducho povedané, indexujeme zátvorky hlavného regexu a regexov vo všetkých negatívnych lookaroundoch, v ktorých sme práve vnorení (vo výpočte).

Definícia 2.4.7. *Zátvorka) v regexe α je **indexovateľná**, ak k nej prislúchajúca otváracia zátvorka je indexovateľná.*

Definícia 2.4.8. *Nech regex $\alpha \in nLEregex$ obsahuje alternáciu. Potom jeho podslovo β nazývame **alternovateľným**, ak je validným regexom z $nLEregex$ a zároveň zodpovedá jednej z týchto podmienok:*

(i) ***prvý***
β je prefix α alebo znak pred β je ([11]
$\wedge$ za β nasleduje metaznak |

(ii) ***stredný***
znak pred β je |
$\wedge$ β je dobre uzátvorkovaný výraz
$\wedge$ za β nasleduje |

(iii) ***posledný***
znak pred β je |
$\wedge$ β je sufix α alebo za β nasleduje) [12]

Lema 2.4.9. *Alternácia používa iba alternovateľné regexy.*

Dôkaz. Ukážeme indukciou na počet alternácií v regexe.

Majme regex $\alpha \in nLEregex$, ktorý obsahuje alternáciu. Bez újmy na všeobecnosti nech je to práve 1 alternácia (potenciálne zložená z viacerých metaznakov |). Podľa tabuľky priorít vieme, že alternácia má najnižšiu prioritu. Regex α môže byť v takýchto tvaroch:

1. $\beta_1| \dots |\beta_n$
2. $\alpha_1(\beta_1| \dots |\beta_n)\alpha_2$

[11] Z podmienky hovoriacej, že β musí byť validný regex, vyplýva, že prislúchajúca) sa bude nachádzať až za metaznakom |

[12] To isté ako pri podmienke (i) – prislúchajúca '(' sa musí nachádzať pred metaznakom | (susediacim s β)

Pre $\alpha_1, \alpha_2, \beta_i \in nLEregex$ $i \in \{1, \ldots, n\}$. Je zrejmé, že β_1 spĺňa podmienku prvého alternovateľného regexu, β_i pre $i \in \{2, \ldots, n-1\}$ spĺňajú podmienku pre stredný alternovateľný regex a β_n spĺňa podmienku pre posledný alternovateľný regex.

Nech platí pre regexy obsahujúce $m-1$ alternácií, že tieto alternácie používajú iba alternovateľné regexy. Zoberme teraz regex $\alpha \in nLEregex$ obsahujúci m alternácií. Opäť vieme α rozdeliť buď spôsobom 1. alebo 2. na validné regexy z $nLEregex$. Každý z $\beta_1, \ldots, \beta_n, \alpha_1, \alpha_2$ obsahuje najviac $m-1$ alternácií, teda alternácie v týchto regexoch používajú iba alternovateľné regexy. Navyše je zrejmé, že aj regexy $\beta_1, \ldots, \beta_n$ majú tvar alternovateľných regexov. □

Na základe definovania pojmu alternovateľnosti vieme jednoznačne určiť, ktoré regexy patria ku ktorej alternácii. Dôležité je, že to vieme naprogramovať do Turingovho stroja – pre každú alternáciu bude skúmať, či je ohraničená zátvorkami alebo rozdeľuje celý regex na časti (teda či nastáva prípad 1. alebo 2. z dôkazu predchádzajúcej vety). Na základe pojmu indexovateľnosti zase vieme algoritmicky určiť, ktoré zátvorky sú indexovateľné a teda si k nim uchovať pomocnú informáciu a potom im ju zase spätne priradiť.

V nasledujúcej definícii kroku výpočtu budeme používať v konfiguráciách poschodové symboly. Informáciu o tom, aké písmenko na danej pozícii leží, budeme potrebovať neustále – tá bude aj súčasťou poschodovej varianty písmenka. Špeciálna informácia vo vyšších poschodiach bude patriť k spätným referenciám a pozitívnemu lookaroundu. Už z definície spätných referencií vieme, že informácia o tom, aké podslovo predstavuje $\backslash k$ získame až počas výpočtu na konkrétnom slove. Referencia $\backslash k$ predstavuje posledné podslovo matchované k-tymi zátvorkami. Preto informácia o jeho pozícii musí byť súčasťou konfigurácie. Zároveň potrebujeme informáciu o každom lookaheade/lookbehinde – a to pozíciu v slove, kde začal matchovanie, aby sme sa po jeho vykonaní mohli na túto pozíciu vrátiť. Opäť to je informácia, ktorú získame až pri výpočte na konkrétnom vstupe a preto si ju uchováme do poschodového symbolu.

Každý regex má konečný počet operácií, preto aj poschodí v poschodových symboloch bude konečne veľa. Pre každú dvojicu zátvoriek potrebujeme 2 miesta (začiatok a koniec podslova) a pre každý lookaround 1 miesto.

Poschodové symboly sú veľmi prehľadné, čo sa týka zápisu konfigurácií. Z pohľadu výpočtu nejakého Turingovho stroja však môžu byť veľmi nepraktické. Pokiaľ nepoznáme regex dopredu, je to o to ťažšia interpretácia. Preto vo výpočtoch Turingovho stroja necháme vstup nedotknutý a informáciu pre jednotlivé operácie budeme reprezentovať vo forme adries ukazujúcich na konkrétnu pozíciu v slove.

Definícia 2.4.10. ***Krok výpočtu*** *je relácia $\vdash$ na konfiguráciách definovaná nasledovne (najprv napíšeme, čoho sa jednotlivé kroky týkajú a potom uvedieme formálny zápis):*

I. *Prečítame rovnaké písmenko v regexe aj v slove.*

II. *V regexe ukazujeme na (, ktorá je k-ta indexovateľná. V slove si zaznačíme do poschodového symbolu, že na tejto pozícii začína podslovo ku k-tym zátvorkám. V regexe prejdeme za zátvorku.*
Pokiaľ za k-tymi zátvorkami nasleduje $*$, môžeme sa rozhodnúť ich celé preskočiť (až za $*$). V tom prípade si na poschodový symbol zaznačíme začiatok aj koniec podslova.

III. *V regexe ukazujeme na), ktorá je k-ta indexovateľná. V slove si zaznačíme do poschodového symbolu, že znak na tejto pozícii už do podslova ku k-tym zátvorkám nepatrí. V regexe prejdeme za zátvorku.*

IV. *Narazili sme na začiatok alternácie (začiatok jej prvého alternovateľného regexu). Musíme si zvoliť jednu z jej možností. Buď budeme plynule pokračovať ďalej a spracovávať prvý alternovateľný regex alebo skočíme na začiatok ľubovoľného ďalšieho alternovateľného regexu z tejto alternácie.*

V. *V alternácii sme práve dokončili matchovanie jednej z možností – ukazujeme na metaznak |. Skočíme v regexe za posledný alternovateľný regex.*

VI. *Ukazujeme na Kleeneho $*$, ktorej predchádza písmenko. Máme 2 možnosti. Buď sa rozhodneme pokračovať – preskočíme v regexe $*$ – alebo spravíme ďalšiu iteráciu – skočíme pred písmenko.*

VII. *Ukazujeme na Kleeneho $*$, ktorej predchádzajú k-te zátvorky. Možnosti sú rovnaké ako v prípade s písmenkom. Rozdiel je len v tom, ak sa rozhodneme spraviť ďalšiu iteráciu. Potom musíme zmazať predošlý záznam k podslovu ku k-tym zátvorkám a zaznačiť si túto pozíciu ako jeho začiatok.*

VIII. *Narazili sme na znak spätných referencií $\backslash k$. Do slova si na túto pozíciu umiestníme pomocný ukazovateľ $\top$.*

IX. Stále ukazujeme na $\backslash k$ a v slove už máme umiestnený $\top$ a písmenko za ním neobsahuje značku konca podslova ku k-tym zátvorkám. Porovnávame písmenká v slove na pozíciách s normálnym a pomocným ukazovateľom. Pokiaľ sa zhodujú, posunieme obe pozície o 1 ďalej.

X. Stále ukazujeme na $\backslash k$, v slove je umiestnený $\top$ a ukazuje na písmenko zo značkou konca podslova ku k-tym zátvorkám. Odstránime zo slova $\top$ a v regexe sa posunieme za $\backslash k$.

XI. Narazili sme na pozitívny lookahead. Zaznačíme si do poschodového symbolu v slove, že na tejto pozícii začína a v regexe skočíme do lookaheadu.

XII. Skončili sme matchovanie lookaheadu, ukazujeme na jeho). V slove skočíme na zaznačený začiatok a vymažeme túto značku. V regexe skočíme za).

XIII. Narazili sme na pozitívny lookbehind. Zaznačíme si do poschodového symbolu v slove, že na tejto pozícii začína. V slove skočíme o niekoľko symbolov nazad (ľubovoľná pozícia medzi začiatkom slova a súčasnou, vrátane týchto 2) a v regexe skočíme do lookbehindu.

XIV. Skončili sme matchovanie lookbehindu, ukazujeme na jeho). Zároveň v slove ukazujeme na jeho zaznačený začiatok. Zmažeme túto značku a v regexe prejdeme za).

XV. Narazili sme na negatívny lookahead. Pokiaľ neexistuje postupnosť konfigurácií taká, že regex v negatívnom lookaheade by matchoval nejaký prefix slova začínajúc od súčasnej pozície v slove, potom môžeme lookahead preskočiť.

XVI. Narazili sme na negatívny lookbehind. Pokiaľ neexistuje postupnosť konfigurácií taká, že regex v negatívnom lookbehinde by matchoval nejaký sufix slova končiac na súčasnej pozícii v slove, potom môžeme lookahead preskočiť.

Formálny zápis:

I. $\forall a \in \Sigma : \ (r_1 \ldots \lceil a \ldots r_n, w_1 \ldots \lceil a \ldots w_m) \vdash (r_1 \ldots a\lceil \ldots r_n, w_1 \ldots a\lceil \ldots w_m)$

II. Nech (je indexovateľná, k-ta v poradí: $(r_1 \ldots \lceil(\ldots r_n, w_1 \ldots \lceil w_j \ldots w_m)$

$$(1) \vdash (r_1 \ldots (\lceil \ldots r_n, w_1 \ldots \lceil \overset{k}{w}_j \ldots w_m)$$

Ak za jej uzatváracou zátvorkou nasleduje $*$, *t.j.* α *je tvaru* $r_1 \dots \lceil (\dots) * \dots r_n$, *potom*

$$(2) \vdash (r_1 \dots (\dots) * \lceil \dots r_n, w_1 \dots \lceil \overset{k'}{\overset{k}{w_j}} \dots w_m)$$

III. *Nech) je indexovateľná, k-ta v poradí:*

$$(r_1 \dots \lceil) \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m) \vdash (r_1 \dots) \lceil \dots r_n, w_1 \dots \lceil \overset{k'}{w_j} \dots w_m)$$

IV. *Nech podslová* $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_A$ *regexu* α *sú všetkými členmi zobrazenej alternácie:* $(r_1 \dots \lceil \alpha_1 | \alpha_2 | \dots | \alpha_A \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$(1) \vdash \textit{ďalší prechod v } \alpha_1$$

$$(2) \vdash (r_1 \dots \alpha_1 | \lceil \alpha_2 | \dots | \alpha_A \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

$$\dots$$

$$(A) \vdash (r_1 \dots \alpha_1 | \alpha_2 | \dots | \lceil \alpha_A \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

V. *Nech podslová* $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_A$ *regexu* α *sú všetkými členmi zobrazenej alternácie, potom pre všetky možnosti:*
$(r_1 \dots \alpha_1 \lceil | \alpha_2 | \dots | \alpha_A \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$,
$(r_1 \dots \alpha_1 | \alpha_2 \lceil | \dots | \alpha_A \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$
$\dots,$
$(r_1 \dots \alpha_1 | \alpha_2 | \dots | \alpha_{A-1} \lceil | \alpha_A \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots \alpha_1 | \alpha_2 | \dots | \alpha_{A-1} | \alpha_A \lceil \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

VI. $(r_1 \dots a \lceil * \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$(1) \vdash (r_1 \dots a * \lceil \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

$$(2) \vdash (r_1 \dots \lceil a * \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

VII. $(r_1 \dots \underset{k}{(} r_i \dots r_l \underset{k}{)} \lceil * \dots r_n, w_1 \dots \overset{k}{w_a} \dots \overset{k'}{w_b} \dots \lceil w_j \dots w_m)$[13]

$$(1) \ \vdash (r_1 \dots \underset{k}{(} r_i \dots r_l \underset{k}{)} * \lceil \dots r_n, w_1 \dots \overset{k}{w_a} \dots \overset{k'}{w_b} \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

[13] Podľa definície spätných referencií platí posledné podslovo nájdené regexom v k-tych zátvorkách. Pri tejto pracovnej pozícii v regexe je zrejmé, že nejde o prvý prechod cez tieto zátvorky a teda existuje také a, b, že k je v slove nad w_a a k' nad w_b. Ak nastane prechod (2), pôvodné horné indexy k, k' miznú a pridáva sa k nad w_j.

$$(2)\ \vdash (r_1 \dots \underset{k}{(}\lceil r_i \dots r_l \underset{k}{)} * \dots r_n, w_1 \dots w_a \dots w_b \dots \lceil \overset{k}{w_j} \dots w_m)$$

VIII. $(r_1 \dots \lceil \backslash k \dots r_n, w_1 \dots \overset{k}{w_a} \dots \overset{k'}{w_b} \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots \lceil \backslash k \dots r_n, w_1 \dots \top \overset{k}{w_a} \dots \overset{k'}{w_b} \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

IX. $(r_1 \dots \lceil \backslash k \dots r_n, w_1 \dots \overset{k}{w_a} \dots \top w_c \dots \overset{k'}{w_b} \dots \lceil w_j \dots w_m)$, *kde* $a \leq c < b$ *a zároveň* $w_c = w_j$[14]

$$\vdash (r_1 \dots \lceil \backslash k \dots r_n, w_1 \dots \overset{k}{w_a} \dots w_c \top \dots \overset{k'}{w_b} \dots w_j \lceil \dots w_m)$$

X. $(r_1 \dots \lceil \backslash k \dots r_n, w_1 \dots \overset{k}{w_a} \dots \top \overset{k'}{w_b} \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots \backslash k \lceil \dots r_n, w_1 \dots \overset{k}{w_a} \dots \overset{k'}{w_b} \dots w_j \lceil \dots w_m)$$

XI. Nech (?=...) je k-ty pozitívny lookahead v poradí:
$(r_1 \dots \lceil (?\!=\dots) \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots (?\!=\lceil \dots) \dots r_n, w_1 \dots \lceil \overset{k\rightarrow}{w_j} \dots w_m)$$

XII. Nech) patrí ku k-temu pozitívnemu lookaheadu v poradí:
$(r_1 \dots (?\!=\dots \lceil) \dots r_n, w_1 \dots \overset{k\rightarrow}{w_l} \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots (?\!=\dots) \lceil \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_l \dots w_j \dots w_m)$$

XIII. Nech (?<=...) je k-ty pozitívny lookbehind v poradí, $\forall L \in \{0, \dots, j-1\}$:
$(r_1 \dots \lceil (?\!<\!=\dots) \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots (?\!<\!=\lceil \dots) \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_{j-L} \dots \overset{k\leftarrow}{w_j} \dots w_m)$$

XIV. Nech) patrí ku k-temu pozitívnemu lookbehindu v poradí:
$(r_1 \dots (?\!<\!=\dots \lceil) \dots r_n, w_1 \dots \lceil \overset{k\leftarrow}{w_j} \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots (?\!<\!=\dots) \lceil \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

XV. Ak $\nexists p \in \{j, \dots, m\} : (\lceil r_k \dots r_l, \lceil w_j \dots w_p) \vdash^* (r_k \dots r_l \lceil, w_j \dots w_p \lceil)$, *potom:*
$(r_1 \dots \lceil (?!\, r_k \dots r_l) \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots (?!\, r_k \dots r_l) \lceil \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

[14] w_c a w_j môžu byť poschodové symboly, avšak pri tejto rovnosti poschodia ignorujeme – chceme porovnať iba písmenká v slove, prislúchajúce týmto pozíciám.

XVI. *Ak* $\nexists p \in \{1, \dots, j-1\} : (\lceil r_k \dots r_l, \lceil w_p \dots w_{j-1}) \vdash^* (r_k \dots r_l \lceil, w_p \dots w_{j-1} \lceil)$, *potom:*
$(r_1 \dots \lceil \textit{(?<!}\ r_k \dots r_l) \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$

$$\vdash (r_1 \dots \textit{(?<!}\ r_k \dots r_l) \lceil \dots r_n, w_1 \dots \lceil w_j \dots w_m)$$

Prechody XV. a XVI. sa môžu zdať ťažkopádne, ťažko overiteľné. Nie je však šikovný spôsob ako krokmi znázorniť, že sa niečo nedá. Môžeme si to však predstaviť tak, že k vnútornému regexu máme zostrojený deterministický Turingov stroj, ktorý vie postupovať podľa krokov I. – XIV. a má obrátenú akceptáciu. Teda ak by chcel akceptovať, zamietne, a ak sa zasekne/zamietne, tak akceptuje.

Táto úvaha nezahŕňa vnorené negatívne lookaroundy. Potrebný Turingov stroj sa však dá zostrojiť aj tak. Keďže každý regex musí byť konečnej dĺžky, nejaký z tých negatívnych lookaroundov musí byť najvnútornejší – bez vnorených negatívnych lookaroundov. Práve k nemu vieme zostrojiť vyššie popísaný Turingov stroj. Potom Turingov stroj pre negatívny lookaround, ktorý ho obaľuje bude spúšťať tento Turingov stroj a tak ďalej, vieme zostrojovať Turingove stroje zvnútra von. Pri výpočte sa potom budú navzájom volať zvonka smerom dnu.

Definícia 2.4.11. ***Jazyk*** *generovaný regexom α je množina*

$$L(\alpha) = \{w \mid \textit{platí } (\lceil \alpha, \lceil w) \vdash^* (\alpha \lceil, w \lceil)\}$$

Poznámka 1. Postupnosť konfigurácií $(\lceil \alpha, \lceil w) \vdash^* (\alpha \lceil, w \lceil)$[15] pre daný regex α a slovo w nazývame **akceptačný výpočet**. Konfiguráciu $(\lceil \alpha, \lceil w)$ nazývame počiatočnou a $(\alpha \lceil, w \lceil)$ akceptačnou konfiguráciou.

Poznámka 2. Definícia 2.4.10 je písaná univerzálne pre všetky triedy regexov. Je zrejmé, že ak daná trieda neobsahuje nejakú operáciu, v akceptačných výpočtoch jej regexov sa nebudú nachádzať kroky výpočtu prislúchajúce tejto operácii. Triedy regexov preto budú používať iba tieto body z definície:

Regex	I.–VII.
Eregex	I.–X.
LEregex	I.–XIV.
nLEregex	I.–XVI.

[15]Bez ohľadu na to, čo obsahujú vyššie poschodia symbolov vo w.

Lema 2.4.12. *Nech $\alpha \in \mathscr{L}_{ERE}$ a $w \in L(\alpha)$. Potom existuje akceptačný výpočet, ktorý má najviac $3 \cdot |\alpha| \cdot |w|^2$ konfigurácií.*

Dôkaz. Pri prechodoch medzi konfiguráciami I., II., III., IV., V., VI.(1), VII.(1), IX., XI., XIV., XV. a XVI. sa ukazovateľ posúva vždy vpred buď v slove alebo v regexe alebo v oboch. Keby sme využívali iba tieto prechody, akceptačný výpočet má najviac $|\alpha| + |w|$ konfigurácií.

Zostali kroky výpočtu, v ktorých ukazovateľ skáče dozadu alebo zostáva na mieste, rozoberme si ich postupne:

VI.(2),VII.(2) – v prípade Kleeneho $*$ nastáva ďalšie opakovanie. Keďže $w \in L(\alpha)$, existuje pre w akceptačný výpočet. Takýchto výpočtov môže byť viac, napríklad ak sa v α vyskytuje regex $(\beta)*$ taký, že $\varepsilon \in L(\beta)$. Potom existuje nekonečne veľa výpočtov, ktoré sa líšia v počte prechodov týmto regexom. Z nich si vyberieme najkratší akceptačný výpočet. Vyberme si ľubovoľnú $*$ a sled jej iterácií v nejakom momente výpočtu[16], nech je ich počet k. Pokiaľ $k = 0$, potom je to krok II.(2) a ten sme už zarátali. V prípade $k = 1$ opäť krok VI.(2) ani VII.(2) nenastali. Nech teda $k > 1$. Tvrdíme, že každá iterácia v tomto slede okrem poslednej matchovala aspoň 1 písmenko. Ukážeme to sporom. Nech nejaká i-ta, $i < k$, matchovala prázdne slovo. Potom však túto operáciu možno vymazať zo sledu, napojiť rovnaké konfigurácie na jej začiatku a konci a máme kratší výpočet, čo je spor. Tvrdenie neplatí pre poslednú iteráciu, pretože pokiaľ je iterovaný regex v zátvorkách, posledná iterácia ovplyvňuje podslovo, ktoré bude vyjadrené spätnými referenciami a jej vymazanie by mohlo pokaziť akceptačný výpočet. Takýto sled využíva $(k-1)$-krát prechod VI.(2) alebo VII.(2), teda prvé písmenko je zadarmo. Zároveň však platíme naviac za 1 návrat v VII.(2), pokiaľ chceme mať posledné slovo ε. Predstavme si preto, že platíme za prvé písmenko a neplatíme za posledný prechod na prázdne slovo – v takomto prípade získame horný odhad počtu konfigurácií, lebo na záver nemusí byť zakaždým ε a zároveň podľa tvrdenia prvý prechod musí byť na písmenko.

Odhadnime teraz dĺžku najkratšieho akceptačného výpočtu aj s použitím krokov VI.(2) a VII.(2). Celkovo počet návratov môže byť najviac $|w|$, pretože každá iterá-

[16]Táto $*$ môže mať viac sledov iterácií, pokiaľ sa nachádza v poli pôsobnosti inej $*$. Ak vonkajšia $*$ vykonáva niekoľko (>1) iterácií, potom vnútorná $*$ je v každej z nich spúšťaná odznova. Teda môže existovať niekoľko jej sledov iterácií.

cia, za ktorú platíme návratom, musí matchovať aspoň 1 písmenko. Medzi 2 návratmi používame nenávratové kroky, ktorých je najviac $|w| + |\alpha|$. Preto akceptačný výpočet obsahujúci doteraz spomenuté kroky výpočtu bude mať najviac $|w| \cdot (|w| + |\alpha|)$ konfigurácií.

VIII., X. – prechody, pri ktorých sa žiaden ukazovateľ nepohne. Tieto prechody nastávajú pri spätných referenciách a jedná sa o objavenie sa alebo zmiznutie pomocného ukazovateľa. Počet spätných referencií je najviac $|\alpha|$ a každá z nich sa môže nachádzať v poli pôsobnosti nejakej $*$, preto je vykonávaná najviac toľkokrát, koľko môže byť iterácií. Odhadli sme, že všetky $*$ na celom slove spravia najviac $|w|$ opakovaní. Preto kroky VIII. a X. nastanú najviac $(|\alpha| \cdot |w|)$–krát.

Z toho vyplýva, že pre regex $|\alpha|$ a slovo w existuje akceptačný výpočet, ktorý obsahuje najviac $|w| \cdot (|w| + |\alpha|) + |w| \cdot |\alpha| \leq 3 \cdot |w|^2 \cdot |\alpha|$ konfigurácií. □

Spočítajme počet všetkých konfigurácií pre triedu regexov $LEregex$. Vstupné slovo a regex máme, menia sa iba polohy ukazovateľov a informácií. Ukazovateľ v regexe môže mať $(r+1)$ pozícií a pre ukazovateľ v slove existuje $(w+1)$ rôznych pozícií. Čo sa týka ukazovateľa pre spätné referencie a informácií v poschodových symboloch, každý prvok z tejto množiny môže mať $(w+1)$ pozícií alebo sa v slove nenachádzať. Mohutnosť tejto množiny je $m = 1 + 2 \cdot (\text{počet spätných ref.}) + (\text{počet lookaroundov}) \leq 2r + 1$. Počet všetkých možných konfigurácií je dohromady:

$$(r+1)(w+1)(w+2)^m \leq (r+1)(w+2)^{2r+2} = O(rw^{2r+2}) \tag{2.2}$$

Keby sme priamo pokračovali v dôkaze lemy 2.4.12, odhad by nebol lepší ako 2.2. Nasledujúca lema to ukazuje všeobecnejšie.

Definujme si **hĺbku vnorenia lookaroundov** ako počet lookaroundov vnorených v sebe. Lookaround obsahujúci regex z $Eregex$ má hĺbku 1. Lookaround obsahujúci regex z $LEregex$, kde maximum zo všetkých hĺbok lookaroundov je $h - 1$ má hĺbku h.

Lema 2.4.13. *Majme triedu regexov takú, že funkcia $f(r)$ určuje ich maximálnu hĺbku vnorenia lookaroudov, kde r je dĺžka regexu. Potom počet konfigurácií v akceptačnom výpočte pre slovo dĺžky w je najviac $O(rw^2(rw)^{f(r)})$.*

Dôkaz. Dokážeme si to matematickou indukciou vzhľadom na hĺbku vnorenia lookaroundov h.

Báza indukcie: Nech $h = 1$. V regexe je $k \leq r$ lookaroundov, ktoré vnútri nemajú žiaden lookaround. Keďže lookaroundu nie sú priradené žiadne písmenká zo vstupu, môžeme ho brať ako samostatný regex, ktorý v najhoršom prípade matchuje celé w. Vnútri každého lookaroundu je regex z $Eregex$, pre ktorý podľa lemy 2.4.12 existuje akceptačný výpočet s najviac $3rw^2$ konfiguráciami. Mimo všetkých lookaroundov je tiež regex, pre ktorý platí táto lema. V najhoršom prípade sa lookaround nachádza vnútri regexu, ktorý je iterovaný $*$ a môže byť spustený najviac w-krát. Každý lookaround teda pridá najviac $3rw^3$ konfigurácií. Spolu $3rw^2 + r \cdot 3rw^3 = O(r^2w^3) = O(rw^2(rw)^1)$.

Indukčný krok: Nech tvrdenie platí pre $h-1$, ukážeme, že platí pre h. Regex obsahuje $k \leq r$ lookaroundov s hĺbkou vnorenia najviac h. Zoberme si ľubovoľný z týchto lookaroundov. Jeho vnútorný regex obsahuje lookaroundy s hĺbkou vnorenia najviac $h-1$ a podľa indukčného predpokladu takýto regex pridáva $O(rw^2(rw)^{h-1})$ konfigurácií. Pozrime sa teraz na celý regex. Keď ignorujeme lookaroundy, akcetačný výpočet má $3rw^2$ konfigurácií. Každý lookaround pridá $O(rw^2(rw)^{h-1})$ konfigurácií a môže byť spustený najviac w-krát, pokiaľ sa nachádza v poli pôsobnosti nejakej $*$. Lookaroundov je najviac r, teda dohromady má akceptačný výpočet najviac $3rw^2 + rw \cdot O(rw^2(rw)^{h-1}) = O(rw^2(rw)^h)$ konfigurácií, čo sme chceli dokázať. □

Pre triedu $LEregex$ je hĺbka vnorenia lookaroundov maximálne dĺžka regexu – $f(r) = r$, teda akceptačný výpočet môže mať najviac $O(rw^2(rw)^r) = O(r^rw^{r+2})$ konfigurácií. Tento odhad je veľmi podobný odhadu 2.2. Druhý extrém je trieda regexov, ktorej lookaroundy majú hĺbku vnorenia konštantnú, teda $f(r) = O(1)$. V takom prípade má akceptačný výpočet najviac $O(rw^2(rw)^{O(1)})$ konfigurácií.

2.4.2 Regex a slovo na vstupe

V praxi často regex dopredu nepoznáme. Vstupným údajom je text na vyhľadávanie a rovnako aj regex, ktorý znázorňuje požiadavku na vyhľadávanie. Tento problém predstavuje jazyk

$$L(regex\#word) = \{word \mid word \in L(regex) \land regex \in \mathcal{U}\}$$

kde $\mathcal{U}$ musí byť konkrétna trieda regexov (napríklad jedna z $Regex$, $Eregex$, $LEregex$, $nLEregex$).

Veta 2.4.14. *$L(regex\#word) \in NSPACE(n \log n)$, kde $regex \in LEregex$. (Presnejšie $NSPACE(r \log w)$, kde $r = |regex|$ a $w = |word|$.)*

Dôkaz. Zostrojíme nedeterministický Turingov stroj M, ktorý bude akceptovať jazyk $L(regex\#word)$ a na pracovných páskach zapíše najviac $O(r \log w)$ políčok. M bude mať vstupnú read-only pásku a 4 pracovné pásky.

Na prvú pracovnú pásku si M na začiatku prekopíruje celý regex a na tejto kópii bude pracovať. Na druhej páske bude uchovávať informáciu z poschodových symbolov. Na tretej páske si bude počítať aktuálnu pozíciu na vstupe v časti slova *word* (je ohraničené zľava # a sprava endmarkerom) a štvrtá páska bude pomocná pri procedúrach, ktoré spomenieme neskôr.

Informácia z poschodových symbolov bude zapísaná vo forme niekoľkých adries – pracovná pozícia (= ukazovateľ) v slove, ukazovateľ pre spätné referencie, začiatok a koniec podslova pre k-te zátvorky $\forall k$, začiatok lookaheadu, začiatok lookbehindu. Všetky adresy budú oddelené oddeľovačmi. Na začiatku výpočtu Turingov stroj M prejde cez regex a spočíta, koľko adries potrebuje. Podľa toho si na pásku zapíše potrebný počet oddeľovačov. Ukazovateľ v slove nastaví na prvý symbol, ostatné adresy budú nedefinované. Hlava na vstupnej páske bude väčšinu času zodpovedať pozícii ukazovateľa v slove. Adresu na túto pozíciu bude M potrebovať, keď pribudne ukazovateľ pre spätené referencie a v slove tak budú ukazovatele 2.

Informácia zapísaná na páskach zodpovedá počiatočnej konfigurácii pre regex *regex* a slovo *word*. M bude postupovať podľa krokov výpočtu z definície 2.4.10. Vždy si jeden nedeterministicky zvolí. Ak sa dá vykoná ho, inak sa zasekne. Pokiaľ má definovaný ukazovateľ pre spätné referencie, M je povinný pracovať s ním. Pri overovaní podmienok a vykonávaní krokov výpočtu bude M vykonávať nasledovné úkony:

1. indexovateľnosť zátvorky (– overenie, či vedľajší znak je ?
2. odpočítanie adresy pre k-tu zátvorku – záznam o tom, za ktorou zátvorkou sa v regexe nachádzame, si môžeme uchovávať na 4. pracovnej páske. Adresa na začiatok podslova pre k-te zátvorky je $(2k + 1)$-vá v poradí, na koniec podslova ukazuje adresa hneď za ňou.
3. nájdenie prislúchajúcej zátvorky – medzi zátvorkami musí byť dobre uzátvorko-

vaný výraz, teda počítame +1 za každú ’(’ a -1 za každú ’)’ [17]

4. indexovateľnosť zátvorky) – nájdenie prislúchajúcej (a overenie jej indexovateľnosti
5. overenie alternovateľnosti – na jednom konci má metaznak | a na druhom buď metaznak | alebo ’(’ prípadne ’)’ (algoritmus z kroku 3.) alebo siaha až do konca slova
6. skok ukazovateľa o konštantný počet krokov – stačí počítadlo v stave
7. priradenie spätnej referencie k zátvorkám – zapísané číslo z $\backslash k$ si M skopíruje na 4. pomocnú pásku a odpočíta si adresu pre k-te zátvorky podľa kroku 2.
8. pridanie ukazovateľa pre spätné referencie = kopírovanie adresy
9. práca s 2 ukazovateľmi v slove – písmenká zisťuje 1 prechodom slova a podľa nich upravuje ukazovatele
10. porovnávanie adries – napr. kopírovaním 1 z nich na 4. pracovnú pásku

Podľa popísaných úkonov máme na 4. pracovnej páske zapísaných najviac $O(\log r + \log w)$ políčok. Na 3. páske je adresa s aktuálnou pozíciou v slove zaberajúca $\log w$ políčok. Na 1. páske je regex dĺžky r. Počet spätných referencií (s), lookaheadov (l_a) a lookbehindov (l_b) je najviac r, preto na 2. páske je $2 + 2s + l_a + l_b \leq 2r + 2$ adries, čo je najviac $(2r+2)\log w = O(r \log w)$ zapísanej pamäte a je to viac ako na zvyšných páskach. Celkovo tak M zapíše najviac $O(r \log w) = O(r \log w) = O(n \log n)$ pamäte. □

Dôsledkom Savitchovej vety získavame:

Veta 2.4.15. *$L(regex\#word) \in DSPACE(n^2 \log^2 n)$, kde $regex \in LEregex$.*

Opäť pre niektoré triedy vieme dokázať lepší výsledok. Upravíme dôkaz Savitchovej vety tak, aby používal kratšie konfigurácie – namiesto konfigurácií Turingovho stroja použijeme konfigurácie z nového formalizmu, ktoré reprezentujú výpočet regexu na slove. Keďže regex aj slovo máme na vstupe, v skutočnosti nám stačí pamätať si v oboch pracovné pozície, na to potrebujeme $O(\log r + \log w)$ políčok, a informáciu z poschodových symbolov – tú si vieme tiež zaznamenať vo forme adries reprezentujúcich pozíciu

[17] Ak počíta sprava doľava, hodnoty prenásobíme -1, aby sme nedostali na začiatku súčet -1.

v slove. Preto celá konfigurácia bude zaberať $O(r \log w)$ políčok. Z odhadov o dĺžke najkratšieho akceptačného výpočtu získame odhad na hĺbku rekurzie testovacej funkcie. Pokiaľ budeme mať zaručené, že dĺžka akceptačného výpočtu je najviac polynomiálna od dĺžky regexu a slova, budeme potrebovať dokopy $O(n \log^2 n)$ políčok.

Veta 2.4.16. *$L(regex\#word) \in DSPACE(n \log^2 n)$, kde $regex \in Eregex$.*

Dôkaz. Pre účely dôkazu budeme označovať $w = |word|$ a $r = |regex|$, teda $w + r = n$.

Zostrojíme deterministický Turingov stroj M, ktorý bude akceptovať jazyk $L(regex\#word)$ a na každej pracovnej páske použije najviac $O(n \log^2 n)$ políčok. M bude mať vstupnú read-only pásku a 2 pracovné pásky.

Myšlienka je podobná dôkazu Savitchovej vety [Ďu03] – M bude vykonávať funkciu $TESTUJ(C_1, C_2, i)$, ktorá zistí, či sa vieme dostať z konfigurácie C_1 do konfigurácie C_2 na i krokov.

Podľa lemy 2.4.12 vieme, že ak existuje akceptačný výpočet pre w, potom existuje aj akceptačný výpočet taký, ktorý má najviac $3rw^2$ konfigurácií. Na základe tohto výsledku bude M zisťovať, či sa z počiatočnej konfigurácie C_0 vieme dostať do akceptačnej konfigurácie C_a na $3rw^2$ krokov – $TESTUJ(C_0, C_a, 3rw^2)$.

Pseudokód procedúry $TESTUJ$:

```
bool TESTUJ(C1, C2, i)
    if (C1 == C2) then return true
    if (i > 0 ∧ C1 ⊢ C2) then return true
    if (i <= 1) return false
    iteruj cez vsetky konfiguracie C3
        if (TESTUJ(C1, C3, ⌊i/2⌋) ∧ TESTUJ(C3, C2, ⌈i/2⌉)) then return true
    return false
```

Pre podrobnejší popis pseudokódu je nutné, aby sme najprv definovali tvar konfigurácie. Použijeme zápis z definície 2.4.10, v tvare $(a_1 \ldots \lceil a_i \ldots a_r, b_1 \ldots \lceil b_j \ldots b_w)$ respektíve $(a_1 \ldots \lceil a_i \ldots a_r, b_1 \ldots \top b_l \ldots \lceil b_j \ldots b_w)$, kde $a_1 \ldots a_r = regex$ a $b_1 \ldots b_w = word$. Reprezentovať ich budeme vo forme 2 resp. 3 adries – pracovná pozícia v regexe (i), pracovná pozícia v slove (j) a adresa k spätnej referencii (l). Namiesto poschodových symbolov si M bude pre každú konfiguráciu pamätať informáciu, ktoré zátvorky zodpovedajú ktorému podslovu slova *word*. Pre každé zátvorky si uloží 2 adresy – začiatok podslova a 1 políčko za koncom podslova (použijeme polootvorený interval $\langle za\check{c}, kon))$. Pre každý lookahead a každý lookbehind bude mať vyhradené 1 adresné miesto aby si zapamätal, kam do slova ukazoval, keď naňho narazil.

Popis pseudokódu:

riadok 2 Ak $C_1 = C_2$, potom vieme prejsť z C_1 do C_2 na ľubovoľný počet krokov.

riadok 3 Platí $C_1 \neq C_2$. Ak $i = 0$, nevieme prejsť do žiadnej inej konfigurácie ako C_1, teda vrátime **false**. Nech $i > 0$. Skontrolujeme podľa definície 2.4.10, či platí $C_1 \vdash C_2$. Konfigurácie sú uložené na páske ako m-tice, kde $m = 3 + 2 \cdot$ (počet zátvoriek)+(počet lookaheadov)+(počet lookbehindov): $C_1 = (d_1, \ldots, d_m)$, $C_2 = (e_1, \ldots, e_m)$. Nech d_1, e_1 sú pracovné pozície v regexe, d_2, e_2 sú pracovné pozície v slove a d_3, e_3 pracovné pozície ukazovateľa pre spätné referencie, pričom d_3, e_3 môžu byť nedefinované (na prislúchajúcom mieste medzi oddeľovačmi adries nebude nič zapísané). TS M overí, či je splnená nejaká z týchto podmienok (rímske čísla zodpovedajú tým v definícii 2.4.10):

I. $regex[d_1] = word[d_2] \ \wedge\ (e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + 1, d_2 + 1, nedef, d_4, \ldots, d_m)$

II. (1) $regex[d_1] =$'('
$\wedge$ $regex[d_1]$ je indexovateľná
$\wedge$ nech d_k prislúcha k $regex[d_1]$, $4 \leq k \leq m$: $e_k = d_2$ (sedí začiatok podslova)
$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + 1, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_{k-1}, d_2, d_{k+1}, \ldots, d_m)$

II. (2) $regex[d_1] =$'('
$\wedge$ 2 políčka pred pozíciou e_2 je v regexe ')$*$'
$\wedge$ zátvorky $regex[d_1]$ a $regex[e_1 - 2]$ sú k sebe prislúchajúce[18]
$\wedge$ nech d_k prislúcha k $regex[d_1]$, $4 \leq k \leq m$: $e_k = e_{k+1} = d_2$ (začiatok a koniec podslova je nastavený na to isté políčko)
$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + l, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_{k-1}, e_k, e_{k+1}, d_{k+2}, \ldots, d_m)$ pre $l \in \mathbb{N}$

III. podobne ako II.(1) – kontrola, či sedí koniec podslova

IV. $regex[e_1 - 1] =$'|'
$\wedge$ regex medzi d_1 a najbližším metaznakom | je alternovateľný

[18] To M skontroluje tak, že si overí, že medzi nimi ku každej '(' existuje ')' – teda počet výskytov '(' a ')' musí byť rovnaký.

$\wedge$ všetky regexy ohraničené | medzi d_1 a e_1 sú alternovateľné

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + l, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_m)$ pre $l \in \mathbb{N}$

V. $regex[d_1] =$'|'

$\wedge$ všetky regexy ohraničené | medzi d_1 a e_1 sú alternovateľné

$\wedge$ regex medzi e_1 a najbližším metaznakom | naľavo od neho je alternovateľný

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + l, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_m)$ pre $l \in \mathbb{N}$

VI. (1) $regex[d_1] =$'$*$' $\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + 1, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_m)$

VI. (2) $regex[d_1] =$'$*$'

$\wedge$ $regex[d_1 - 1] = a,\ a \in \Sigma$

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 - 1, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_m)$

VII. (1) $regex[d_1] =$'$*$' $\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + 1, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_m)$

VII. (2) $regex[d_1] =$'$*$'

$\wedge$ $regex[e_1 - 1] =$'(' a prislúcha k $regex[d_1]$

$\wedge$ nech d_k, d_{k+1} prislúchajú k týmto zátvorkám, potom $e_k = d_2$, $e_{k+1} = nedef$

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 - l, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_{k-1}, e_k, e_{k+1}, d_{k+2}, \ldots, d_m)$ pre $l \in \mathbb{N}$

VIII. $regex[d_1] =$'\'

$\wedge$ nasleduje číslo k, $0 \leq k \leq$ (počet indexovateľných zátvoriek)

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1, d_2, d_{2k+2}, d_4, \ldots, d_m)$ (d_{2k+2} je adresa začiatku podslova prislúchajúca ku k-tym zátvorkám)

IX. na pozícii d_1 je podslovo '\k'

$\wedge$ podobne ako I.– musí platiť $d_3 < d_{2k+3}$ a správne sa posunú adresy d_2, d_3

X. na pozícii d_1 je podslovo '\k'

$\wedge$ $d_3 = d_{2k+3}$

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_m)$

XI. na pozícii d_1 je podslovo '(?='

$\wedge$ nech d_l adresa prislúchajúca k tomuto lookaheadu: $e_l = d_2$, teda $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + 3, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_{l-1}, d_2, d_{l+1}, \ldots, d_m)$

XII. $regex[d_1] =$')' a prislúcha lookaheadu, ktorému patrí adresa d_l

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + 1, d_l, nedef, d_4, \ldots, d_{l-1}, nedef, d_{l+1}, \ldots, d_m)$

XIII. na pozícii d_1 je podslovo '(?<='

$\wedge$ nech d_l adresa prislúchajúca k tomuto lookbehindu: $e_l = d_2$

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1{+}3, d_2{-}l, nedef, d_4, \ldots, d_{l-1}, d_2, d_{l+1}, \ldots, d_m)$, kde $l \in \mathbb{N}$

XIV. $regex[d_1] =$')' a prislúcha lookbehindu, ktorému patrí adresa d_l

$\wedge$ $d_2 = d_l$

$\wedge$ $(e_1, \ldots, e_m) = (d_1 + 1, d_2, nedef, d_4, \ldots, d_{l-1}, nedef, d_{l+1}, \ldots, d_m)$

Keďže regex neobsahuje negatívny lookbaround, ďalšie riadky z definície netestujeme.

riadok 4 Po predošlých riadkoch platí $C_1 \neq C_2 \wedge C_1 \nvdash C_2$. Ak zároveň $i <= 1$, potom sa z C_1 do C_2 na i krokov dostať nedokážeme. $TESTUJ$ vráti **false**.

riadok 5 M začne iterovať cez všetky možné konfigurácie – t.j. všetky možné kombinácie adries z množiny $\{1, \ldots, d\}$, kde $d = \lceil \log(r+1) \rceil$ pre d_1 a $d = \lceil \log(w+1) \rceil$ pre ostatné adresy. Vygenerované C_3 bude mať M uložené ako lokálnu premennú.

riadok 6 M testuje, či je C_3 vo výpočte v strede medzi C_1 a C_2. Ak obe volané procedúry vrátia **true**, vrátime **true**. Inak sa M vráti na **riadok 5** a vygeneruje ďalšie C_3.

riadok 7 Neexistuje vhodná konfigurácia C_3, teda sa nevieme dostať z C_1 do C_2 na i krokov. Vrátime **false**.

Podľa vyššie špecifikovaných m-tíc pre konfigurácie bude úvodné nastavenie nasledovné:

$$C_0 = (\quad 0, \quad 0, nedef, nedef, \ldots, nedef, nedef, \ldots, nedef)$$

$$C_a = (\log(r+1), \log(w+1), nedef, \underbrace{a_1, \ldots, \quad a_{2s}}_{\text{adresy pre spätné referencie}}, \underbrace{b_1, \ldots, \ b_{l_a+l_b}}_{\text{adresy pre lookahead a lookbehind}})$$

Akceptačná konfigurácia môže mať veľa možností nastavenia adries $a_1, \ldots, a_{2s}, b_1, \ldots, b_{l_a+l_b}$ a M nevie, ktoré z nich je to správne. Preto bude spúšťať procedúru $TESTUJ$ pre všetky možné akceptačné konfigurácie. Akonáhle 1 výpočet vráti **true**, M akceptuje. Ak všetky vrátia **false**, M zamietne. Skúšanie všetkých možných adries pre M znamená iterovanie od $(0, 0, \ldots, 0)$ do $(\lceil \log(w+1) \rceil, \ldots, \lceil \log(w+1) \rceil)$, pričom 0 znamená *nedef*.

Turingov stroj M rekurzívne volá procedúru $TESTUJ$. Preto na prvej páske bude mať zásobník, kde budú uložené záznamy o jednotlivých volaniach. Druhá páska je pomocná pri vykonávaní konkrétneho volania – M potrebuje konštantný počet adries, aby mohol realizovať porovnávanie (overovanie rovnosti konfigurácií a adries, overovanie konkrétneho rozdielu medzi adresami), zisťovanie príslušnosti zátvoriek (t.j. ktorá je druhá zátvorka k tejto – treba počítať zátvorky (,)), zisťovanie poradia zátvorky/lookaheadu/lookbehindu a prislúchajúcej adresy, kontrolu alternovateľnosti (to je v podstate počítanie zátvoriek), čítanie čísla k za metaznakom \ a hľadanie adries pre k-te zátvorky, ...

Zrejme ak existuje akceptačný výpočet, M ho nájde. Treba ukázať, že sa pri tom na každej páske zmestí do pamäte $O(n \log^2 n)$. Podľa predchádzajúceho odstavca vieme, že na druhej (pomocnej) páske potrebuje $O(\log n)$ políčok, čo spĺňa podmienku. Spočítajme veľkosť pamäte potrebnú na zapísanie zásobníka.

Adresy vieme zapísať v logaritmickom priestore závislom od dĺžky slova, kam ukazujú. Pre regex to bude $\log r$ a pre slovo $\log w$, pretože vieme adresovať od oddeľovača #. Číslo i je najviac $3rw^2$ a tiež ho vieme zapísať v logaritmickom tvare, čo zaberie $\log(3rw^2) = \log 3 + \log r + 2\log w$ políčok. Platí $r \leq n, w \leq n$, lebo $r + w + 1 = n$.

Počet zátvoriek, lookaheadov a lookbehindov je v regexe dokopy najviac r, teda jedna konfigurácia bude potrebovať najviac $\log r + 2\log w + 2r\log w$ priestoru.

Jeden záznam procedúry $TESTUJ$ obsahuje 3 konfigurácie a číslo i, čo spolu zaberá $\log 3 + \log r + 2\log w + 3\log r + 6\log w + 6r\log w = O(r\log w) = O(n\log n)$ priestoru.

Počet záznamov v zásobníku závisí od hĺbky rekurzie. Keďže začíname na hodnote $i = 3rw^2$ a pri každom volaní je i zmenšené na polovicu, hĺbka vnorenia bude $\log(3rw^2) = O(\log n^3) = O(3\log n) = O(\log n)$.

Celkovo M na zásobníkovej páske zapíše $O(\log n) \cdot O(n\log n) = O(n\log^2 n)$ priestoru.

□

Dôsledok 2.4.17. *Nech $\mathcal{U}$ je trieda regexov, pre ktoré platí, že počet konfigurácií v akceptačnom výpočte pre regex α a slovo w je najviac $f(n)$, kde $n = |\alpha| + |w| + 1$. Potom $L(regex\#word) \in DSPACE(n \cdot \log n \cdot \log(f(n)))$, kde $regex \in \mathcal{U}$.*

Dôkaz. Vyplýva z dôkazu vety 2.4.16 – hĺbka vnorenia funkcie $TESTUJ$ je logaritmus z horného ohraničenia dĺžky akceptačného výpočtu. □

Dôsledok 2.4.18. *Trieda regexov s hĺbkou vnorenia lookaroundov zhora ohraničenou konštantou h patrí do $DSPACE(n\log^2 n)$.*

Dôkaz. Podľa lemy 2.4.13 je počet konfigurácií v akceptačnom výpočte najviac $O((rw)^h)$. Potom hĺbka rekurzie funkcie $TESTUJ$ je

$$\log((rw)^h) = h \log r + h \log w = O(\log r + \log w)$$

A to je ten istý odhad ako v dôkaze vety 2.4.16. □

Teraz nasleduje sľúbený dôkaz vety 2.4.4. Použijeme dôkaz predošlej vety a využijeme to, že regex poznáme dopredu – v takom prípade je jeho dĺžka konštantná, vieme počty jeho operácií a preto sa dá jeho konfigurácia ešte viac skrátiť tak, že adresy zaznačíme do niekoľkých stôp nad sebou, takže zaberá $O(\log n)$ priestoru. Vďaka konštantnej dĺžke regexu sa dá dĺžka akceptačného výpočtu odhadnúť polynómom od dĺžky vstupného slova.

Oproti predošlej vete pribudli aj nové operácie, ktoré je treba zahrnúť do konštrukcie. Pre negatívny lookaround je nutné zistiť, či do neho dané podslovo nepatrí. To urobíme tak, že vezmeme jeho vnútorný regex a spustíme na ňom výpočet na ďalšej páske, ako keby toto bol náš vstupný regex. Jeho výpočet bude ohraničený na nejakom podslove vstupu a niekedy ho bude treba spúšťať viackrát pre rôzne podslová. Pokiaľ pre všetky prípady dostaneme odpoveď, že výpočet neexistuje, negatívny lookaround akceptuje. Treba si uvedomiť, že spúšťanie výpočtu negatívneho lookaroundu nie je úplne separované od zvyšku, nakoľko môže obsahovať spätné referencie odkazujúce sa mimo neho. Takisto môže nastať situácia, kedy sa nachádza niekoľko negatívnych lookaroundov v sebe. Potom je nutné dodržiavať pravidlá indexovateľnosti zátvoriek podľa definícií 2.4.6 a 2.4.7. Tiež je treba správne určovať, ktoré podslová sú správnym vstupom a nedovoliť výpočtu prekročiť tieto hranice.

Dôkaz. Nech $\alpha \in nLEregex$, $r = |\alpha|$. Ak α neobsahuje negatívny lookaround, tvrdenie triviálne vyplýva z vety 2.4.3. Nech teda α obsahuje aspoň 1 negatívny lookaround a označíme si k ako najväčšiu hĺbku vnorenia negatívnych lookaroundov v regexe α.

Zostrojíme deterministický Turingov stroj T, ktorý bude akceptovať $L(\alpha)$ a na páskach zapíše najviac $O(\log^2 n)$ políčok. Konštrukcia T bude podobná ako v dôkaze vety 2.4.16 – iný bude zápis konfigurácií a pridáme spracovávanie negatívneho lookaroundu.

Keďže regex poznáme dopredu, vieme si definovať špeciálny znak pre regex s každou možnou polohou ukazovateľa (to je $(r+1)$ nových znakov). Takisto vieme počet spätných referencií s, lookaheadov l_a a lookbehindov l_b, preto si vieme zapísať k nim prislúchajúce informácie nad seba do niekoľkých stôp na páske – konkrétne potrebujeme $2s + l_a + l_b$ stôp. K nim pridáme ešte 2 ďalšie stopy – pre ukazovateľ v slove a ukazovateľ pre spätné referencie – a 1 stopu, kde na 1 políčku bude napísaný špeciálny znak obsahujúci informáciu o polohe ukazovateľa v regexe. Na $2s + l_a + l_b + 2$ stopách sú adresy ukazujúce pozíciu na vstupe, teda informácia zaberajúca $\log n$ políčok a na 1 stope bude zapísané 1 políčko. Turingov stroj si bude strážiť, aby zápis v každej stope začínal vždy na tom istom políčku. Potom zápis jednej konfigurácie zaberie $\log n$ políčok.

Turingov stroj T na začiatku spustí procedúru $TESTUJ$ s parametrami počiatočná konfigurácia C_0, akceptačná konfigurácia C_a a číslo i. Počiatočná konfigurácia má ukazovateľ v slove a v regexe nastavený na začiatok a ostatné adresy nedefinované. Akceptačná konfigurácia má tieto 2 ukazovatele nastavené na koniec a ostatné adresy môžu mať ľubovoľné hodnoty – preto T bude spúšťať $TESTUJ$ pre všetky možné adresy. Číslo i, teda počet krokov, na ktoré sa vieme dostať z C_0 do C_a je maximálne počet všetkých konfigurácií – podľa 2.2 je to $(r + 1)(n + 2)^{2r+2}$ (teraz $w = n$). Dĺžku regexu poznáme dopredu, teda je to konštanta. Preto hodnota i je nejaký polynóm od n.

Spomínaný počet všetkých konfigurácií je spočítaný pre triedu regexov $LEregex$. V našom algoritme však budeme realizovať prechody z definície 2.4.10: XV. a XIV. na 1 krok, preto nám tento odhad postačuje.

Úprava algoritmu $TESTUJ$, aby zahŕňal spracovanie negatívneho lookaroundu je nasledovná. Budeme aplikovať kroky výpočtu XV. alebo XVI. To znamená, že celý negatívny lookahead/lookbehind môže byť preskočený na 1 krok. Kontrola, či je tento krok prípustný, sa udeje v riadku 2 funkcie $TESTUJ$, kedy sa testuje podmienka $C_1 \vdash C_2$. Pokiaľ tento krok zodpovedá kroku výpočtu XV. alebo XVI., udeje sa nasledovné (Bez újmy na všeobecnosti, nech je to negatívny lookahead – krok XV.):

Nech $C_1 = (d_1, \ldots, d_m)$, $C_2 = (e_1, \ldots, e_m)$, pričom musí platiť $(d_2, \ldots, d_m) = (e_2, \ldots, e_m)$.

M zoberie regex vnútri negatívneho lookaroundu a na ďalšej páske bude spúšťať funkciu $TESTUJ$:

- s upravenými konfiguráciami, ktoré zodpovedajú negatívnemu lookaroundu – Negatívny lookaround môže obsahovať zátvorky, ktoré vo vonkajšom regexe nie sú indexovateľné a vlastné pozitívne lookaroundy, pre ktoré potrebuje pomocnú pamäť. Nech p je počet zátvoriek, ktoré sa nachádzajú vo vonkajšom regexe pred negatívnym lookaroundom a q je počet nových adries. Potom konfigurácie budú obsahovať $t = 3 + p + q$ stôp, čo je konštanta.

- s parametrami $(C_0,\ C_a,\ i)$ – $C_0 = (a_1, \ldots, a_t)$ je počiatočná konfigurácia a $C_a = (b_1, \ldots, b_t)$ je akceptačná konfigurácia. Platí, že a_1 ukazuje na začiatok regexu v negatívnom lookarounde, b_1 na jeho koniec, $a_2 = d_2$, adresy a_3 a b_3 sú nedefinované, adresy v konfiguráciách pre prvých p zátvoriek sú určené z C_1: $(a_4, \ldots, a_{p+4}) = (b_4, \ldots, b_{p+4}) = (d_4, \ldots, d_{p+4})$ a zvyšné $a_{p+5}, \ldots, a_t$ sú nedefinované.

  Hodnota i je rovnaká ako v hlavnej vetve procedúry $TESTUJ$, pretože horné ohraničenie pre celý regex funguje aj pre ľubovoľné jeho podslovo.

- pre všetky prefixy od pozície d_2 – To znamená, že T bude skúšať všetky akceptačné konfigurácie s hodnotami b_2 z množiny $\{d_2, d_2 + 1, \ldots, \lceil \log(n + 1) \rceil\}$.

- pre všetky možné ohodnotenia adries $b_{p+5}, \ldots, b_t$ – Počas výpočtu sa tieto adresy môžu zmeniť a budú tak mať iné hodnoty ako v počiatočnej konfigurácii. T bude skúšať (tak ako v hlavnom volaní) hodnoty od začiatku po koniec slova, teda od $(d_2, \ldots, d_2)$ do $(b_2, \ldots, b_2)$ vrátane nedefinovaných hodnôt. Hodnota b_2 určuje koniec prefixu, teda aktuálny koniec slova.

Počas výpočtu ukazovateľ v slove (adresa d_2) a ani ostatné adresy nesmú prekročiť hranice podslova, ktoré je vstupom. Preto pri generovaní konfigurácie C_3 bude T kontrolovať, či všetky adresy sú väčšie alebo rovné adrese d_2 z konfigurácie C_0 a menšie alebo rovné adrese d_2 z konfigurácie C_a.

Pokiaľ nejaké volanie vráti hodnotu **true**, potom netreba skúšať ďalšie možnosti a negatívny lookahead vráti okamžite **false**. Ak všetky volania vrátia **false**, potom odpoveď negatívneho lookaroundu je **true**. Po skončení sa všetky informácie z výpočtu zahodia, T iba overoval, či platí $C_1 \vdash C_2$, preto ich už ďalej nepotrebuje.

Pre negatívny lookbehind je algoritmus iný iba v tom, že treba skúšať sufixy namiesto prefixov. V takom prípade adresa b_2 z akceptačnej konfigurácie bude fixná na hodnote d_2 a a_2 z počiatočnej konfigurácie bude nadobúdať hodnoty $0 - d_2$.

Popísali sme volanie negatívneho lookaroundu z hlavného regexu. α však má v sebe niekoľko vnorených negatívnych lookaroundov a najväčšia hĺbka vnorenia je k. T má na

1. páske rozpracovanú vetvu hlavného regexu a teraz pracuje na 2. páske na negatívnom lookarounde a narazí na ďalší. Pre T je to obdobná situácia, ako keby pracoval stále na 1. páske. Zopakuje postup popísaný vyššie a vykoná príslušné volania procedúry $TESTUJ$ na 3. páske. Keď je hĺbka vnorenia k, v najvnútornejšom regexe bude mať na $k+1$ páskach rozpracované výpočty. Keď ukončí výpočet na l-tej páske, vráti sa s výsledkom na $(l-1)$-vú pásku. M skonštruovaný v dôkaze 2.4.16 mal na vykonávanie 1 vetvy procedúry $TESTUJ$ 2 pásky. Preto T bude potrebovať $2(k+1)$ pások. k je konštanta, preto je to v súlade s definíciou TS.

Čo sa týka pamäťových nárokov, na $(k+1)$ páskach je v každom kroku výpočtu spúšťaná najviac 1 vetva procedúry $TESTUJ$. Takto definovaná a spúšťaná procedúra pri každom spustení zaberie $O(\log n \cdot \log n) = O(\log^2 n)$ priestoru, pretože hĺbka rekurzie je

$$\log i = \log((r+1)(n+2)^{2r+2}) = \log(r+1) + (2r+2)\log(n+2) = O(\log n)$$

a každá inštancia procedúry potrebuje $O(\log n)$ pamäte pre zapamätanie 3 konfigurácií a čísla i. O zvyšných $(k+1)$ páskach vieme z konštrukcie stroja M z dôkazu 2.4.16, že sú iba pomocné a na každej je zapísaných $O(\log(r+n)) = O(\log n) = O(\log^2 n)$ políčok. Ukázali sme, že vieme zostrojiť požadovaný Turingov stroj T, ktorý na každej páske zapíše najviac $O(\log^2 n)$ políčok. □

2.5 Ukážka zlepšenia popisnej zložitosti

Nové konštrukcie moderných regulárnych výrazov podstatne ovplyvňujú popisnú zložitosť. Ako sme spomínali, mnohé z nich neposilňujú model, ale sprostredkovávajú kratší zápis niektorých regexov. Zložitejšie konštrukcie tiež prispievajú svojou troškou, ako uvidíme ďalej v príklade. Výskum v tejto oblasti je bohatý na výsledky o regulárnych jazykoch ako sme videli v kapitole 1.3. Pokračovať je možné porovnávaním so známymi výsledkami o klasických regulárnych výrazoch alebo skúmaním zložitosti nových jazykov, ktoré sme dosiahli až silnejším modelom.

Ochutnávkou z tejto oblasti je regex, ktorý ukazuje, že nové konštrukcie môžu pomôcť pri zápise niektorých konečných jazykov:

$$\alpha = \overbrace{(}^{II.}\ (?{=}\underbrace{(a^{m+1}) * a\{1, m-1\}\$ \mid a^m\$)}_{I.}\overbrace{a^m}^{II.})+$$

$$\text{platí: } a^x = \underbrace{aa\dots a}_{x}$$

Podrobnejšie si popíšme, čo jednotlivé časti matchujú a ako prebieha výpočet:

I. matchuje a^m alebo a^l, kde

$$l \in \{j(m+1)+1, j(m+1)+2, \dots, j(m+1)+m-1 \mid j \in \mathbb{N}_0\}$$

To znamená, že matchuje celé $\{a\}^*$ okrem: a^{m+1}, $a^{m(m+1)l}$, $l \in \mathbb{N}$

II. Vonkajší regex matchuje a^{km}, kde $k \in \mathbb{N}$

III. je prienik I. a II. V lookaheade vidíme na konci znak \$, teda matchuje až do konca slova. Výsledný regex matchuje a^{km} také, že nie je tvaru $a^{m(m+1)l}$, $l \in \mathbb{N}$.

Lookahead je nútený každú iteráciu matchovať a^{im}, kde $i \in \mathbb{N}$. Najkratšie slovo, ktoré je tvaru a^{im} a regex I. ho zamietne je $a^{m(m+1)}$. Pokiaľ sa operácia + dostane k $(m+1)$-vej iterácii, v tomto momente regex zamietne kvôli lookaheadu. Nie je možné vrátiť sa a zmeniť výpočet, pretože mimo lookaheadu sa neudiali žiadne nedeterministické rozhodnutia. Z tohto dôvodu bude ľubovoľné slovo dlhšie ako $a^{m(m+1)-1}$ zamietnuté. Regex α preto zodpovedá konečnému jazyku

$$L = \{a^m, a^{2m}, \dots, a^{m^2}\}$$

Počet znakov potrebných na zápis α za predpokladu, že nemôžeme používať operáciu $\{n, m\}$[19]

$$\alpha = \underbrace{((?{=}(}_{5}\ a^{m+1}\ \underbrace{)*}_{2}\ a\{1, m-1\}\ \underbrace{\$\mid}_{2}\ a^m\ \underbrace{\$)}_{2}\ a^m\ \underbrace{)+}_{2}$$

$$14 + (m+1) + \left(\sum_{i=1}^{m-1} i + (m-2)\right) + m + m = \frac{m(m-1)}{2} + 4m + 13 = \frac{m^2 + 7m + 26}{2}$$

[19]V takom prípade by bol najkratší regex triviálne $(a\{m\})\{1, m\}$ s potrebným počtom znakov $9 + 2\log m$.

Ten istý jazyk vieme zapísať aj s pomocou negatívneho lookaheadu nasledovne:

$$\beta = (?!\ a^{m^2+1})(a^m)+$$

A ten potrebuje na zápis $7 + (m^2 + 1) + m = m^2 + m + 8$ znakov.

Porovnajme teraz tieto výsledky so starým modelom. Nebudeme to dokazovať, ale naša hypotéza je, že najlepší regulárny výraz matchujúci jazyk L je:

$$a^m \underbrace{(a^m|\varepsilon)(a^m|\varepsilon)\dots(a^m|\varepsilon)}_{(m-1)\times}$$

Počet jeho znakov je $m + (m - 1)(4 + m) = m^2 + 4m - 4$. Zápis s pozitívnym lookaheadom je efektívnejší od $m \geq 3$.

Pokiaľ by sme použili model bez ε, potom zápis regulárneho výrazu $(a^m|a^{2m}|\dots|a^{m^2})$ bude mať až kubický počet znakov od m (konkrétne $\frac{1}{2}(m^3 + m^2) + m - 1$).

Záver

Doplnili sme výsledky o negatívnom lookarounde. Ukázalo sa, že má podobné vlastnosti ako pozitívna verzia, pretože na prekročenie hranice regulárnych jazykov musia byť v modeli aj spätné referencie.

Ďalší doplňujúci výsledok k bakalárskej práci bol o uzavretosti triedy s pozitívnym lookaroundom na zreťazenie – základnú operáciu klasických regulárnych výrazov. Netriviálnosť spočívala v usmernení lookaheadov a lookbehindov tak, aby ich výpočet zostal v časti slova, ktorá ich regexu prislúcha. V tomto smere zostalo otvoreným problémom, či platí aj uzavretosť na Kleeneho $*$.

Do hierarchie tried regexov bola zaradená trieda $\mathscr{L}_{nLERE}$ a ukázali sme, že moderné regulárne výrazy síce vedia zapísať kontextové jazyky, ale nepokrývajú ani celú triedu bezkontextových jazykov. Načrtli sme ideu doplnenia homomorfizmu, ktorá už bola skúmaná v triede $\mathscr{L}_{ERE}$. Prirodzeným pokračovaním výskumu by mohlo byť hľadanie operácií, ktoré treba do modelu pridať, aby vedel popísať aspoň celú triedu bezkontextových jazykov. Otvoreným problémom zostal vzťah tried $\mathscr{L}_{LERE}$ a $\mathscr{L}_{nLERE}$.

Väčšia časť práce bola venovaná priestorovej zložitosti. Ukázali sme, že trieda $\mathscr{L}_{LERE}$ patrí do logaritmického nedeterministického priestoru a $\mathscr{L}_{nLERE}$ potrebuje $O(\log^2 n)$ deterministickej pamäte. Keď sme dostali na vstup spolu regex aj slovo, pre $\mathscr{L}_{LERE}$ v nedeterministickom modeli stačilo $O(n \log n)$ pamäte. Veľkosť deterministického priestoru závisela od horného ohraničenia najkratšieho akceptačného výpočtu, ktorý ak bol polynomiálny od dĺžky slova a regexu, potrebovali sme $O(n \log^2 n)$ pamäte. Dôkazy týkajúce sa deterministickej pamäte používali upravený dôkaz Savitchovej vety, kde sme redukovali počet zapísaných políčok na páske tým, že sme používali kratšie konfigurácie. Spolu s týmito konfiguráciami bol definovaný kompletný výpočtový model pre regulárne výrazy so spätnými referenciami, pozitívnym a negatívnym lookaroundom, ktorý pracuje v krokoch podobne ako Turingov stroj. Vďaka tomuto formalizmu sme boli schopní urobiť spomínaný odhad dĺžky najkratšieho akceptačného výpočtu. Ukázalo sa však, že niektoré regexy z tried $LEregex$ a $nLEregex$ sú natoľko zložité, že dĺžka ich akceptačného výpočtu je exponenciálna od dĺžky vstupu a regexu – takmer dosahuje počet všetkých konfigurácií.

Na záver sme načrtli výsledok z popisnej zložitosti, táto oblasť však zostáva neprebádaná. Výskum môže pokračovať predovšetkým dvoma smermi – v skúmaní regulárnych jazykov a porovnávaním s klasickým modelom alebo tvorením nových výsledkov v oblasti bezkontextových a kontextových jazykov popísateľných modernými regulárnymi jazykmi.

Spomenuli sme mnoho otvorených problémov a možností pokračovať v problematike, na záver by sme doplnili už iba oblasť časovej zložitosti rozpoznávania.

Literatúra

[BDH10] Henning Bordihn, Jürgen Dassow, and Markus Holzer. Extending regular expressions with homomorphic replacement. *RAIRO - Theoretical Informatics and Applications*, 44:229–255, 4 2010.

[CN09] Benjamin Carle and Paliath Nadendran. On extended regular expressions. In *Language and Automata Theory and Applications*, volume 3, pages 279–289. Springer, April 2009. `http://www.cs.albany.edu/~dran/my_research/papers/LATA_version.pdf` [Online; accessed 15-April-2015].

[CSY03] Cezar Câmpeanu, Kai Salomaa, and Sheng Yu. A formal study of practical regular expressions. *International Journal of Foundations of Computer Science*, 14(06):1007–1018, 2003.

[EKSW04] Keith Ellul, Bryan Krawetz, Jeffrey Shallit, and Ming-wei Wang. Regular expressions: New results and open problems. *J. Autom. Lang. Comb.*, 9(2-3):233–256, September 2004. `https://cs.uwaterloo.ca/~shallit/Papers/re3.pdf` [Online; accessed 15-April-2015].

[EZ76] Andrzej Ehrenfeucht and Paul Zeiger. Complexity measures for regular expressions. *Journal of Computer and System Sciences*, 12(2):134–146, 1976.

[HU90] John E. Hopcroft and Jeffrey D. Ullman. *Introduction To Automata Theory, Languages, And Computation.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1st edition, 1990.

[HURM78] John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman, Branislav Rovan, and Peter Mikulecký. *Formálne jazyky a automaty.* 1.vydanie Alfa, Bratislava, 1978. Prel. z: Formal languages and their relation to automata.

[Pyt12] Python Software Foundation. *Regular expression operations*, 2012. https://docs.python.org/2/library/re.html [Online; accessed 15-April-2015].

[RF13] Branislav Rovan and Michal Forišek. Formálne jazyky a automaty (skriptá), 2013. http://foja.dcs.fmph.uniba.sk/materialy/skripta.pdf [Online; accessed 18-April-2015].

[Sav70] Walter J. Savitch. Relationships between nondeterministic and deterministic tape complexities. *Journal of Computer and System Sciences*, 4(2):177–192, 1970.

[Tó13] Tatiana Tóthová. Moderné regulárne výrazy. Bachelor's thesis, FMFI UK, 2013. https://github.com/tatianka/bak [Online; accessed 15-April-2015].

[Ďu03] Pavol Ďuriš. Výpočtová zložitosť (materiály k prednáške), 2003. http://www.dcs.fmph.uniba.sk/zlozitost/data/zlozitost_duris.pdf [Online; accessed 10-April-2015].