

# Automaty a gramatiky

TIN071

Marta Vomlelová

marta@ktiml.mff.cuni.cz  
<http://ktiml.mff.cuni.cz/~marta>

May 11, 2020

- Přednáška:

- moodle <https://dl1.cuni.cz/course/index.php?categoryid=337>
- dozvíte se více než při pouhém čtení slajdů
- můžete se zeptat, ovlivnit rychlost, podrobnost výkladu.

- Cvičení:

- vyzkoušíte si prakticky sestavit automaty a gramatiky
- zařijete příklady, což je něco jiného, než je přechít,
- potřebujete zápočet, který udělují **výhradně** cvičící.

- Zkouška:

- **Zápočet je nutnou podmínkou účasti na zkoušce.**
- Písemná i ústní část
- Porozumění látce + schopnost formalizace
  - Orientace v Chomského hierarchii, automatech, gramatikách, (ne)determinizmu,
  - Napište definici, formulujte větu, popište ideu důkazu, algoritmus,
  - zařaďte jazyk do Chomského hierarchie a svou odpověď dokažte.

# Požadavky ke zkoušce

- **Zápočet je nutnou podmínkou účasti na zkoušce.**
- Zkouška sestává z písemné a ústní části. Písemná část předchází části ústní, její nesplnění znamená, že celá zkouška je hodnocena známkou nevyhověl(a) a ústní částí se již nepokračuje.
- Nesložení ústní části znamená, že při příštím termínu je nutno opakovat obě části zkoušky, písemnou i ústní. Znamka ze zkoušky se stanoví na základě bodového hodnocení písemné i ústní části.
- **Písemná část** bude sestávat z dvanácti otázek, které korespondují sylabu přednášky, ověřují schopnosti získané na cvičení a znalost definic, vět a algoritmů z přednášky.
- **Požadavky ústní části** odpovídají sylabu předmětu v rozsahu, který byl prezentován na přednášce. Zpravidla se jedná o detailnější rozbor zadaného problému, např. zdůvodnění zařazení daného jazyka do Chomského hierarchie či důkaz klíčových vět.

- J.E. Hopcroft, R. Motwani, J.D. Ullman: *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computations*, Addison–Wesley
- M. Chytil: *Automaty a gramatiky*, SNTL Praha, 1984
- moodle <https://dl1.cuni.cz/course/index.php?categoryid=337>
- cvičení.

- Počátky

- první formalizace pojmu algoritmus Ada, Countess of Lovelace 1852
- intenzivněji až s rozvojem počítačů ve druhé čtvrtině 20. století
- co stroje umí a co ne?
- Church, Turing, Kleene, Post, Markov

- Polovina 20. století

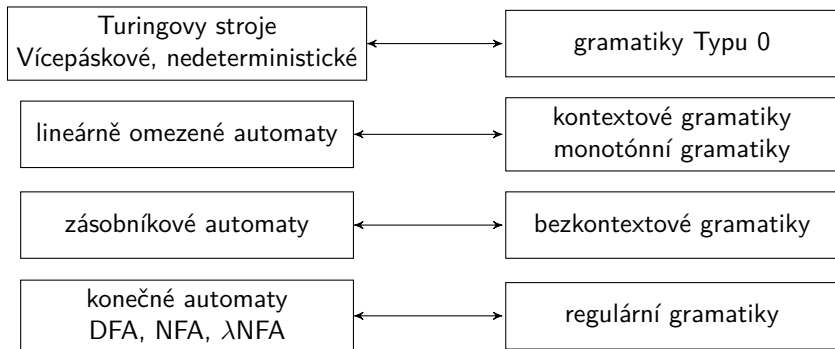
- neuronové sítě (1943)
- konečné automaty (Finite Automata) (Kleene 1956 neuronové sítě  $\approx$  FA)

- 60. léta 20. století

- gramatiky (Chomsky)
- zásobníkové automaty
- formální teorie konečných automatů.

- Osvojit si abstraktní model výpočetních zařízení,
- vnímat, jak drobné změny v definici vedou k velmi odlišným třídám,
- zažít skutečnost algoritmicky nerozhodnutelných problémů,
- příprava na přednášku o složitosti a NP-úplnosti.

## Automaty a gramatiky – dva způsoby popisu

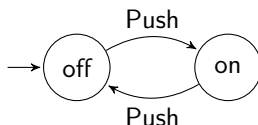


- Zamyšlení nad korektností programu, algoritmu, překladače,
- zpracování přirozeného jazyka,
- překladače:
  - lexikální analýza,
  - syntaktická analýza,
- návrh, popis, verifikace hardware
  - integrované obvody
  - stroje
  - automaty
- realizace pomocí software
  - hledání výskytu slova v textu (grep)
  - verifikace systémů s konečně stavy.

# Jednoduché příklady konečných automatů

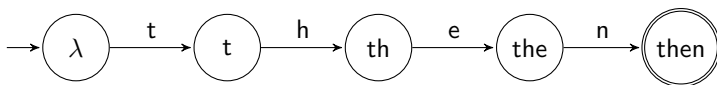
- Návrh a verifikace integrovaných obvodů.

Konečný automat modelující spínač on/off .



- Lexikální analýza

Konečný automat rozpoznávající slovo then.



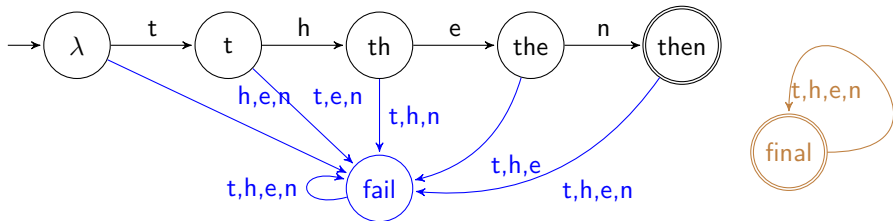


## Definition 1.1 (Deterministický konečný automat)

**Deterministický konečný automat (DFA)**  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$  sestává z:  
konečné množiny **stavů**, zpravidla značíme  $Q$   
konečné neprázdné množiny **vstupních symbolů (abecedy)**, značíme  $\Sigma$   
**přechodové funkce**, zobrazení  $Q \times \Sigma \rightarrow Q$ , značíme  $\delta$ , která bude reprezentovaná hranami grafu  
**počátečního stavu**  $q_0 \in Q$ , vede do něj šipka 'odnikud',  
a neprázdné **množiny koncových (přijímajících) stavů** (final states)  
 $F \subseteq Q$ , označených dvojitým kruhem či šipkou 'ven'.

**Úmluva:** Pokud pro některou dvojici stavu a písmene není definovaný přechod, přidáme nový stav *fail* a přechodovou funkci doplníme na totální přidáním šipek do *fail*.

Pokud je množina  $F$  prázdná, přidáme do ní i  $Q$  nový stav *final* do kterého vedou jen přechody z něj samého  $\forall s \in \Sigma: \delta(\text{final}, s) = \text{final}$ .

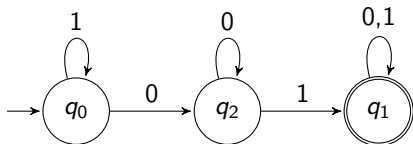


# Popis konečného automatu

## Example 1.1

Automat  $A$  přijímající  $L = \{x01y : x, y \in \{0, 1\}^*\}$ .

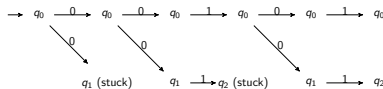
- Stavový diagram (graf) Automat  $A = (\{q_0, q_1, q_2\}, \{0, 1\}, \delta, q_0, \{q_1\})$ .



tabulka

$\delta$	0	1
$\rightarrow q_0$	$q_2$	$q_0$
$*q_1$	$q_1$	$q_1$
$q_2$	$q_2$	$q_1$

- řádky: stavy + přechody
- sloupce: písmena vstupní abecedy
- Stavový strom
  - vrcholy=stavy
  - hrany=přechody
  - *pouze dosažitelné stavy*
  - použijeme až u nedeterministických FA.



## Definition 1.2 (Slovo, $\lambda, \epsilon, \Sigma^*, \Sigma^+, \text{jazyk}$ )

Mějme neprázdnou množinu symbolů  $\Sigma$ .

- **Slovo** je konečná (i prázdná) posloupnost symbolů  $s \in \Sigma$ , **prázdné slovo** se značí  $\lambda$  nebo  $\epsilon$ .
- **Množinu všech slov v abecedě  $\Sigma$**  značíme  $\Sigma^*$ ,
- množinu všech neprázdných slov v značíme  $\Sigma^+$ .
- **jazyk**  $L \subseteq \Sigma^*$  je množina slov v abecedě  $\Sigma$ .

## Definition 1.3 (operace zřetězení, mocnina, délka slova)

Nad slovy  $\Sigma^*$  definujeme operace:

- **zřetězení slov**  $u.v$  nebo  $uv$
- **mocnina** (počet opakování)  $u^n$  ( $u^0 = \lambda$ ,  $u^1 = u$ ,  $u^{n+1} = u^n.u$ )
- **délka slova**  $|u|$  ( $|\lambda| = 0$ ,  $|auto| = 4$ ).
- **počet výskytů**  $s \in \Sigma$  ve slově  $u$  značíme  $|u|_s$  ( $|zmrzlina|_z = 2$ ).

# Rozšířená přechodová funkce

## Definition 1.4 (rozšířená přechodová funkce)

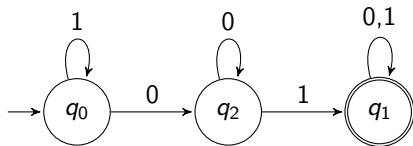
Mějme přechodovou funkci  $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ .

**Rozšířenou přechodovou funkci  $\delta^*$ :**  $Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$  (tranzitivní uzávěr  $\delta$ )  
definujeme induktivně:

- $\delta^*(q, \lambda) = q$
- $\delta^*(q, wx) = \delta(\delta^*(q, w), x)$  pro  $x \in \Sigma, w \in \Sigma^*$ .

Pozn. Pokud se v textu objeví  $\delta$  aplikované na slova, míní se tím  $\delta^*$ .

$$\delta^*(q_0, 1100) = q_2, \delta^*(q_0, 110011111111001) = q_1$$



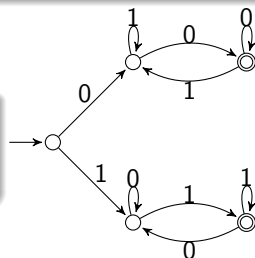
# Jazyky rozpoznatelné konečnými automaty

## Definition 1.5 (jazyky rozpoznatelné konečnými automaty, regulární jazyky)

- **Jazykem rozpoznávaným (akceptovaným, přijímaným)** konečným automatem  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$  nazveme jazyk  $L(A) = \{w \mid w \in \Sigma^* \text{ \& } \delta^*(q_0, w) \in F\}$ .
- Slovo  $w$  je **přijímáno** automatem  $A$ , právě když  $w \in L(A)$ .
- Jazyk  $L$  je **rozpoznatelný** konečným automatem, jestliže existuje konečný automat  $A$  takový, že  $L = L(A)$ .
- Třidu jazyků rozpoznatelných konečnými automaty označíme  $\mathcal{F}$ , nazveme **regulární jazyky**.

## Example 1.2 (regulární jazyky)

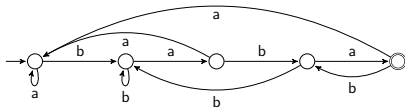
- $L = \{w \mid w = xux, w \in \{0, 1\}^*, x \in \{0, 1\}, u \in \{0, 1\}^*\}$ .



# Příklady regulárních jazyků

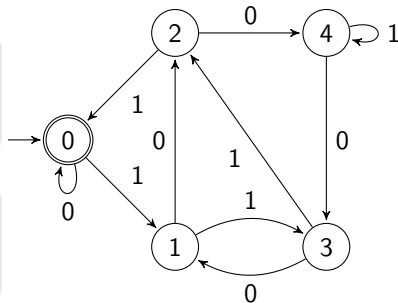
## Example 1.3 (regulární jazyk)

- $L = \{w \mid w = ubaba, w \in \{a, b\}^*, u \in \{a, b\}^*\}.$



## Example 1.4 (regulární jazyk)

- $L = \{w \mid w \in \{0, 1\}^* \text{ \& } w \text{ je binární zápis čísla dělitelného } 5\}.$



## Example 1.5 (!Neregulární jazyk)

- $L = \{0^n 1^n \mid w \in \{0, 1\}^*, n \in \mathbb{N}\}$   
NENÍ regulární jazyk.

# Iterační (pumping) lemma pro regulární jazyky

## Theorem 1.1 (Iterační (pumping) lemma pro regulární jazyky)

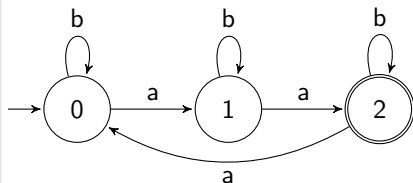
Mějme regulární jazyk  $L$ . Pak existuje konstanta  $n \in \mathbb{N}$  (závislá na  $L$ ) tak že každé  $w \in L$ ;  $|w| \geq n$  můžeme rozdělit na tři části,  $w = xyz$ , že:

- $y \neq \lambda$
- $|xy| \leq n$
- $\forall k \in \mathbb{N}_0$ , slovo  $xy^kz$  je také v  $L$ .

### Example 1.6

- Lemma řeklo:  $n = 3$ .
- $abbbba = a(b)bbba$ ;  
 $\forall i \geq 0; a(b)^i bbba \in L(A)$ .
- $aaaaba = (aaa)aba$ ;  
 $\forall i \geq 0; (aaa)^i aba \in L(A)$ .
- $aa$  nelze pumpovat, ale  $|aa| < n$ .

Automat A

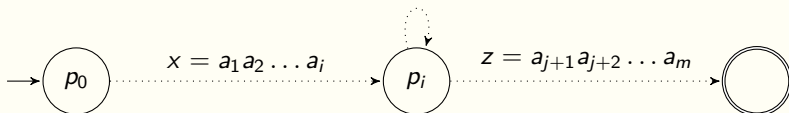


# Důkaz iteračního lematu pro regulární jazyky

## Proof: iteračního lematu pro regulární jazyky

- Mějme regulární jazyk  $L$ , pak existuje DFA  $A$  s  $n$  stavy, že  $L = L(A)$ .
- Vezměme libovolné slovo  $a_1 a_2 \dots a_m = w \in L$  délky  $m \geq n$ ,  $a_i \in \Sigma$ .
- Definujme:  $\forall i \ p_i = \delta^*(q_0, a_1 a_2 \dots a_i)$ . Platí  $p_0 = q_0$ .
- Máme  $n + 1$   $p_i$  a  $n$  stavů, některý se opakuje, vezměme první takový, tj.  $(\exists i, j)(0 \leq i < j \leq n \ \& \ p_i = p_j)$ .
- Definujme:  $x = a_1 a_2 \dots a_i$ ,  $y = a_{i+1} a_{i+2} \dots a_j$ ,  $z = a_{j+1} a_{j+2} \dots a_m$ , tj.  $w = xyz$ ,  $y \neq \lambda$ ,  $|xy| \leq n$ .

$$y = a_{i+1} a_{i+2} \dots a_j$$



- Smyčka nad  $p_i$  se může opakovat libovolně krát a vstup je také akceptovaný.





# Použití pumping lemmatu

## Example 1.7 (Pumping lemma jako hra s oponentem)

Jazyk  $L_{eq} = \{w; |w|_0 = |w|_1\}$  slov se stejným počtem 0 a 1 není regulární.

Proof: Jazyk  $L_{eq}$  není regulární.

- Předpokládejme že  $L_{eq}$  je regulární. Vezměme  $n$  z pumping lemmatu.
- Zvolme  $w = 0^n 1^n \in L_{eq}$ .
- Rozdělme  $w = xyz$  dle pumping lemmatu,  $y \neq \lambda$ ,  $|xy| \leq n$ .
- Protože  $|xy| \leq n$  je na začátku  $w$ , obsahuje jen 0.
- Z pumping lemmatu:  $xz \in L_{eq}$  (pro  $k = 0$ ). To má ale méně 0 než 1, takže nemůže být v  $L_{eq}$ . □

## Example 1.8

Jazyk  $L = \{0^i 1^i; i \geq 0\}$  není regulární.

# Aplikace pumping lemmatu 2

## Example 1.9

Jazyk  $L_{pr}$  slov  $1^p$  kde  $p$  je prvočíslo není regulární.

Proof:  $L_{pr}$  slov  $1^p$  kde  $p$  je prvočíslo není regulární.

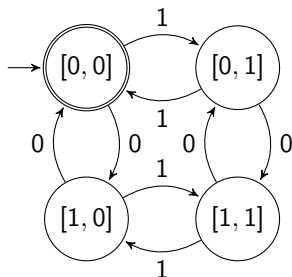
- Předpokládejme že  $L_{pr}$  je regulární. Vezměme  $n$  z pumping lemmatu. Zvolme prvočíslo  $p \geq n + 2$ , označme  $w = 1^p$ .
- Rozložme  $w = xyz$  dle pumping lemmatu, necht  $|y| = m$ . Pak  $|xz| = p - m$ .
- $xy^{p-m}z \in L_{pr}$  z pumping lemmatu, ale  $|xy^{p-m}z| = |xz| + (p - m)|y| = p - m + (p - m)m = (m + 1)(p - m)$  není prvočíslo (žádný z činitelů není 1). □

- definice
  - deterministického konečného automatu  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$
  - jazyka  $L \subseteq \Sigma^*$
  - jazyka rozpoznávaného konečným automatem
$$L(A) = \{w \mid w \in \Sigma^* \text{ \& } \delta^*(q_0, w) \in F\}$$
- iterační (pumping) lemma pro regulární jazyky
- příklad důkazu ne-regulárnosti jazyka  $0^i1^i$
- příklady regulárních jazyků.

# Příklad - 'součin' automatů

## Example 1.10

$L = \{w \mid w \in \{0,1\}^*, |w|_0 = 2k \& |w|_1 = 2\ell, k, \ell \in \mathbb{N}_0\}$ , tj. sudý počet 0 a zároveň sudý počet 1.



$\delta$	0	1
* $\rightarrow$ [0, 0]	[1, 0]	[0, 1]
[0, 1]	[1, 1]	[0, 0]
[1, 0]	[0, 0]	[1, 1]
[1, 1]	[0, 1]	[1, 1]

# Příklad (špatného) protokolu pro elektronický převod peněz

- Tři zúčastnění: zákazník, obchod, banka.
- Pro jednoduchost jen jedna platba (soubor 'money').

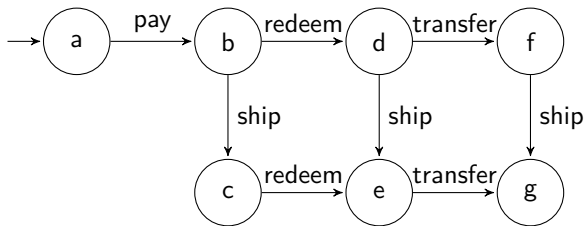
## Example 1.11

Zákazník poskytne obchodu číslo kreditní karty, obchod si vyžádá peníze od banky a pošle zboží zákazníkovi. Zákazník má možnost zablokovat kartu a žádat zrušení transakce.

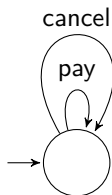
Pět událostí:

- Zákazník může zadat číslo karty **pay**.
- Zákazník může kartu zablokovat **cancel**.
- Obchod může poslat **ship** zboží zákazníkovi.
- Obchod může vyžádat **redeem** peníze od banky.
- Banka může převést **transfer** peníze obchodu.

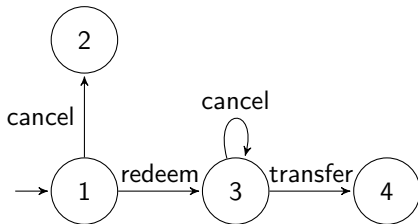
# (Neúplný) konečný automat pro bankovní příklad



Obchod



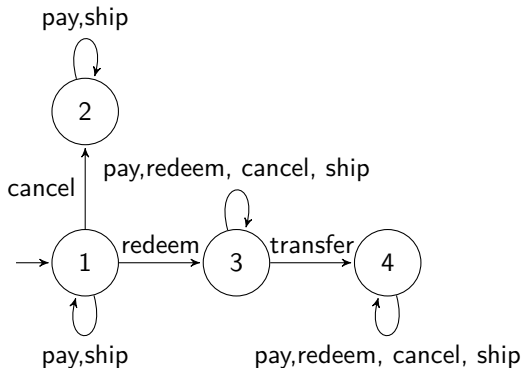
Zákazník



Banka

# Hrana pro každý vstup

- Můžeme vyžadovat, aby automat provedl akci pro každý vstup. Obchod přidá hranu pro každý stav do sebe samého označenou *cancel*.
- Zákazník by neměl shodit bankovní automat opětovným zaplacením *pay*, proto přidáme smyčku *pay*. Podobně s ostatními akcemi.

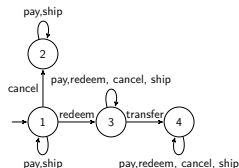
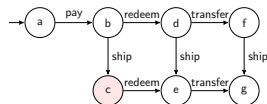
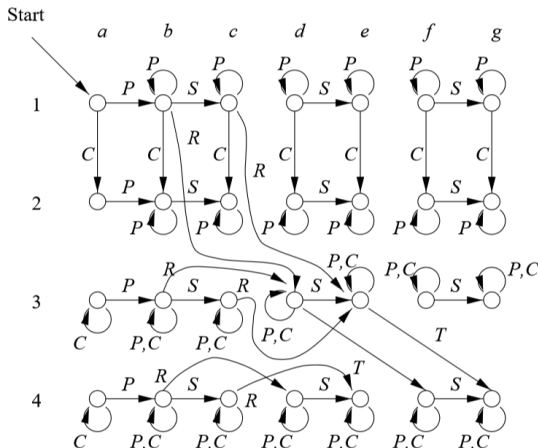


Úplnější automat pro banku.

# Součin automatů

- Součin automatů pro banku a obchod má stavy dvojice  $B \times S$ .
- Hrana v součinu automatů provádí paralelně akce v bance a obchodě. Pokud jednomu chybí akce, bude chybět i součinu automatů.

J.E. Hopcroft, R. Motwani, J.D. Ullman: *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computations*, Addison–Wesley





# Konečné automaty, Regulární jazyky

- **Deterministický konečný automat (DFA)**

$$A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F).$$

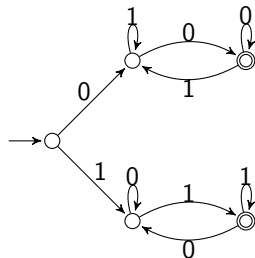
- **Jazykem rozpoznávaným (akceptovaným, přijímaným)** konečným automatem

$A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$  nazveme jazyk  
 $L(A) = \{w \mid w \in \Sigma^* \& \delta^*(q_0, w) \in F\}.$

- Jazyk  $L$  je **rozpoznatelný** konečným automatem, jestliže existuje konečný automat  $A$  takový, že  $L = L(A)$ .

- Třidu jazyků rozpoznatelných deterministickými konečnými automaty označíme  $\mathcal{F}$ , nazveme **regulární jazyky**.

- Typická otázka na cvičeních i zaškrtačací části zkoušky:  
Je daný jazyk regulární (CFL, ...)?



**ANO** Setrojíte automat (deterministický či nedeterministický).

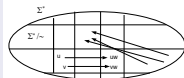
**NE** Najdete spor s Myhill–Nerodovou větou nebo s Pumping lemmatem.

# Kongruence, Myhill–Nerodova věta

## Definition 2.1 (kongruence)

Mějme konečnou abecedu  $\Sigma$  a relaci ekvivalence  $\sim$  na  $\Sigma^*$  (reflexivní, symetrická, tranzitivní). Potom:

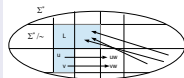
- $\sim$  je **pravá kongruence**, jestliže  $(\forall u, v, w \in \Sigma^*) u \sim v \Rightarrow uw \sim vw$ .
- je **konečného indexu**, jestliže rozklad  $\Sigma^* / \sim$  má konečný počet tříd.
- Třidu kongruence  $\sim$  obsahující slovo  $u$  značíme  $[u]_{\sim}$ , resp.  $[u]$ .



## Theorem 2.1 (!Myhill–Nerodova věta)

*Nechť  $L$  je jazyk nad konečnou abecedou  $\Sigma$ . Potom následující tvrzení jsou ekvivalentní:*

- $L$  je rozpoznatelný konečným automatem,
- existuje pravá kongruence  $\sim$  konečného indexu nad  $\Sigma^*$  tak, že  $L$  je sjednocením jistých tříd rozkladu  $\Sigma^* / \sim$ .



a)  $\Rightarrow$  b); tj. automat  $\Rightarrow$  pravá kongruence konečného indexu

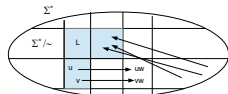
- definujeme  $u \sim v \equiv \delta^*(q_0, u) = \delta^*(q_0, v)$ .
- je to ekvivalence (reflexivní, symetrická, transitivní)
- je to pravá kongruence (z definice  $\delta^*$ )
- má konečný index (konečně mnoho stavů)

$$L = \{w \mid \delta^*(q_0, w) \in F\} = \bigcup_{q \in F} \{w \mid \delta^*(q_0, w) = q\} = \bigcup_{q \in F} [w \mid \delta^*(q_0, w) = q]_{\sim}.$$

b)  $\Rightarrow$  a); tj. pravá kongruence konečného indexu  $\Rightarrow$  automat

- abeceda automatu vezmeme  $\Sigma$
- za stavy  $Q$  volíme třídy rozkladu  $\Sigma^* / \sim$
- počáteční stav  $q_0 \equiv [\lambda]$
- koncové stavy  $F = \{c_1, \dots, c_n\}$ , kde  $L = \bigcup_{i=1, \dots, n} c_i$
- přechodová funkce  $\delta([u], x) = [ux]$  (je korektní z def. pravé kongruence).
- $L(A) = L$

$$w \in L \Leftrightarrow w \in \bigcup_{i=1, \dots, n} c_i \Leftrightarrow w \in c_1 \vee \dots \vee w \in c_n \Leftrightarrow [w] = c_1 \vee \dots \vee [w] = c_n \Leftrightarrow [w] \in F \Leftrightarrow w \in L(A)$$



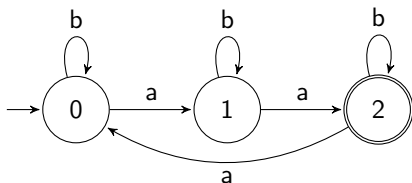
# Použití Myhill–Nerodovy věty: Konstrukce automatů

## Example 2.1

Sestrojte automat přijímající jazyk

$L = \{w \mid w \in \{a, b\}^* \& |w|_a = 3k + 2\}$ , tj. obsahuje  $3k + 2$  symbolů  $a$ .

- $|u|_x$  značí počet symbolů  $x$  ve slově  $u$
- definujme  $u \sim v \equiv (|u|_a \bmod 3 = |v|_a \bmod 3)$
- třídy ekvivalence 0,1,2
- $L$  odpovídá třídě 2
- $a$  – přechody do následující třídy
- $b$  – přechody zachovávají třídu.



# 'Pumpovatelný' ne-regulární jazyk

## Example 2.2 (Ne-regulární jazyk, který lze pumpovat)

Jazyk  $L = \{u \mid u = a^+ b^i c^i \vee u = b^i c^i\}$  není regulární (Myhill–Nerodova věta), ale vždy lze pumpovat první písmeno.

- Předpokládejme, že  $L$  je regulární
- ⇒ pak existuje pravá kongruence  $\sim_L$  konečného indexu  $m$ ,  $L$  je sjednocení některých tříd  $\Sigma^* / \sim_L$
- vezmeme množinu slov  $S = \{ab, abb, abbb, \dots, ab^{m+1}\}$
- existují dvě slova  $i \neq j$ , která padnou do stejné třídy
  - $i \neq j$        $ab^i \sim ab^j$
  - přidáme  $c^i$      $ab^i c^i \sim ab^j c^i$        $\sim$  je kongruence
  - spor             $ab^i c^i \in L \ \& \ ab^j c^i \notin L$     s '  $L$  je sjednocení některých tříd  $\Sigma^* / \sim_L$

# Iterační (pumping) lemma pro regulární jazyky

## Theorem ( Iterační (pumping) lemma pro regulární jazyky)

*Mějme regulární jazyk  $L$ . Pak existuje konstanta  $n \in \mathbb{N}$  (závislá na  $L$ ) tak že každé  $w \in L$ ;  $|w| \geq n$  můžeme rozdělit na tři části,  $w = xyz$ , že:*

- $y \neq \lambda$
- $|xy| \leq n$
- $\forall k \in \mathbb{N}_0$ , slovo  $xy^kz$  je také v  $L$ .

# Iterační lemma a nekonečnost jazyků

## Theorem 2.2

*Regulární jazyk  $L$  je nekonečný právě když existuje  $u \in L$ ;  $n \leq |u| < 2n$ , kde  $n$  je číslo z iteračního lemmatu.*

### Proof:

- $\Leftarrow$  Pokud  $\exists u \in L$ ;  $n \leq |u| < 2n$ , potom lze slovo  $u$  pumovat, čímž dostaneme nekonečně mnoho slov z jazyka  $L$ .
- $\Rightarrow$  Jazyk  $L$  je nekonečný, obsahuje slovo  $w$  takové, že  $n \leq |w|$ .
- Pokud  $|w| < 2n$ , máme hledané slovo.
  - Jinak, z iteračního lemmatu  $w = xyz$  a  $xz \in L$ , tj. zkrácení.
  - Pokud  $2n \leq |xz|$ , zkracujeme dál  $xz$ .
  - Zkracujeme maximálně o  $n$  písmen, tedy interval  $[n, 2n)$  nelze přeskočit. □

Pro určení nekonečnosti regulárního jazyka stačí prozkoumat všechna slova  $u$  taková, že  $n \leq |u| < 2 * n$ , tj. konečně mnoho slov.

## Definition 2.2 (Dosažitelné stavy)

Mějme DFA  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$  a  $q \in Q$ . Řekneme, že stav  $q$  je **dosažitelný**, jestliže existuje  $w \in \Sigma^*$  takové, že  $\delta^*(q_0, w) = q$ .

### Algorithm: Hledání dosažitelných stavů

Dosažitelné stavy hledáme iterativně.

- Začátek:  $M_0 = \{q_0\}$ .
- Opakuj:  $M_{i+1} = M_i \cup \{q \mid q \in Q, (\exists p \in M_i, \exists x \in \Sigma) \delta(p, x) = q\}$
- opakuj dokud  $M_{i+1} \neq M_i$ .

### Proof: Korektnost a úplnost

- Korektnost:  $M_0 \subseteq M_1 \subseteq \dots \subseteq Q$  a každé  $M_i$  obsahuje pouze dosažitelné stavy.
- Úplnost:
  - nechť  $q$  je dosažitelný, tj.  $(\exists w \in \Sigma^*) \delta^*(q_0, w) = q$
  - vezměme nejkratší takové  $w = x_1 \dots x_n$  tž.  $\delta^*(q_0, x_1 \dots x_n) = q$
  - zřejmě  $\delta^*(q_0, x_1 \dots x_i) \in M_i$  (dokonce  $M_i \setminus M_{i-1}$ )
  - tedy  $\delta^*(q_0, x_1 \dots x_n) \in M_n$ , tedy  $q \in M_n$ .



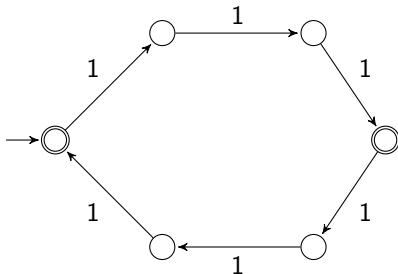
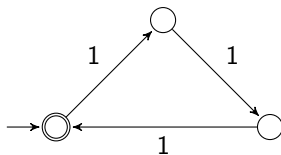


# Jazyk a přijímající automaty

## Nejednoznačnost

Automat přijímající daný jazyk není určen jednoznačně.

- Jazyk  $L = \{w \mid w \in \{1\}^* \& |w| = 3k\}$ .



# Ekvivalence automatů a homomorfismus

## Definition 2.3 (Ekvivalence automatů!)

Dva konečné automaty  $A, B$  nad stejnou abecedou  $\Sigma$  jsou **ekvivalentní**, jestli že rozpoznávají stejný jazyk, tj.  $L(A) = L(B)$ .

## Definition 2.4 (automatový homomorfismus)

Nechť  $A_1, A_2$  jsou DFA. Řekneme, že zobrazení  $h : Q_1 \rightarrow Q_2$  na  $Q_2$  je **(automatovým) homomorfismem**, jestliže:

$$\begin{array}{ll} h(q_{0_1}) = q_{0_2} & \text{'stejné' počáteční stavy} \\ h(\delta_1(q, x)) = \delta_2(h(q), x) & \text{'stejné' přechodové funkce} \\ q \in F_1 \Leftrightarrow h(q) \in F_2 & \text{'stejné' koncové stavy.} \end{array}$$

Homomorfismus prostý a na nazýváme **isomorfismus**.

## Theorem 2.3 (Věta o ekvivalenci automatů)

*Existuje-li homomorfismus konečných automatů  $A_1$  do  $A_2$ , pak jsou  $A_1$  a  $A_2$  ekvivalentní.*

# Důkaz věty o ekvivalenci automatů

## Theorem ((2.3)Věta o ekvivalenci automatů)

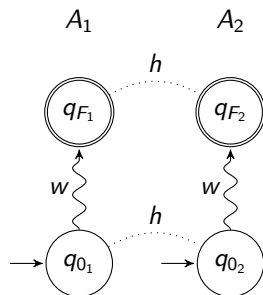
Existuje-li homomorfismus  $h$  konečných automatů  $A_1$  do  $A_2$ , pak jsou  $A_1$  a  $A_2$  ekvivalentní.

### Proof:

- Pro libovolné slovo  $w \in \Sigma^*$  konečnou iterací
  - $h(\delta_1^*(q, w)) = \delta_2^*(h(q), w)$
- dále:

$$\begin{aligned}w \in L(A_1) &\Leftrightarrow \delta_1^*(q_{0_1}, w) \in F_1 \\&\Leftrightarrow h(\delta_1^*(q_{0_1}, w)) \in F_2 \\&\Leftrightarrow \delta_2^*(h(q_{0_1}), w) \in F_2 \\&\Leftrightarrow \delta_2^*(q_{0_2}, w) \in F_2 \\&\Leftrightarrow w \in L(A_2)\end{aligned}$$

□



# Redukce a ekvivalence automatů, Tranzitivita

## Definition 2.5 (Ekvivalence stavů)

Říkáme, že stavy  $p, q \in Q$  konečného automatu  $A$  jsou **ekvivalentní** pokud:

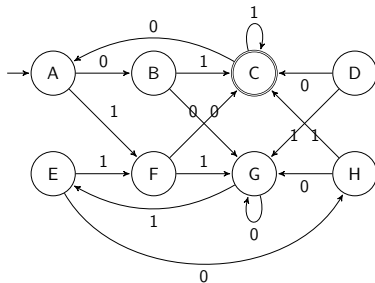
- Pro všechna vstupní slova  $w$ ;  $\delta^*(p, w) \in F$  iff  $\delta^*(q, w) \in F$ .

Pokud dva stavy nejsou ekvivalentní, říkáme, že jsou **rozlišitelné**.

## Example 2.3

Automat na obrázku:

- $C$  a  $G$  nejsou ekvivalentní,  $\delta^*(C, \lambda) \in F$  a  $\delta^*(G, \lambda) \notin F$ .
- $A, G$ :  $\delta^*(A, 01) = C$  je přijímající,  $\delta^*(G, 01) = E$  není.
- $A, E$  jsou ekvivalentní –  $\lambda, 1^*$  zřejmě,  $0$  vede do ne-přijímajících stavů,  $01$  a  $00$  se sejdou ve stejném stavu.



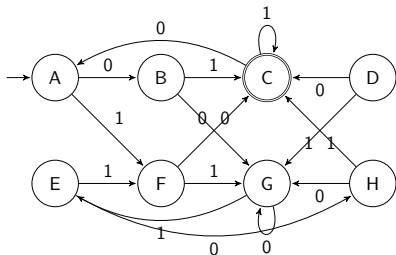
## Lemma

*Ekvivalence na stavech je tranzitivní.*

## Algorithm: !Algoritmus hledání rozlišitelných stavů v DFA

Následující algoritmus nalezne rozlišitelné stavy:

- Základ: Pokud  $p \in F$  (přijímající) a  $q \notin F$ , pak je dvojice  $\{p, q\}$  rozlišitelná.
- Indukce: Nechť  $p, q \in Q$ ,  $a \in \Sigma$  a o dvojici  $r, s$ ;  $r = \delta(p, a)$  a  $s = \delta(q, a)$  víme, že jsou rozlišitelné. Pak i  $\{p, q\}$  jsou rozlišitelné.
  - opakuj dokud existuje nová trojice  $p, q \in Q$ ,  $a \in \Sigma$ .



B	x						
C	x	x					
D	x	x	x				
E		x	x	x			
F	x	x	x		x		
G	x	x	x	x	x	x	
H	x		x	x	x	x	x
	A	B	C	D	E	F	G

Křížek značí rozlišitelné dvojice. C je rozlišitelné hned, ostatní kromě  $\{A, G\}$ ,  $\{E, G\}$  také. Vidíme tři ekvivalentní dvojice stavů.

# Algoritmus hledání rozlišitelných stavů

Přijímající vs. nepřijímající stavy

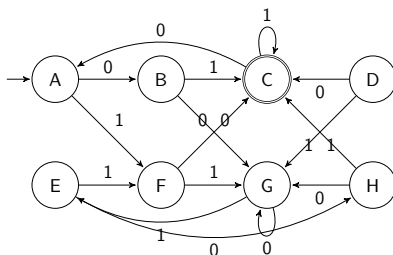
	A	B	C	D	E	F	G
B							
C	x	x					
D			x				
E			x	x			
F			x		x		
G			x			x	
H			x				x

1.krok1:  $\delta(q, 1) \in F$  pro  $q \in \{B, C, H\}$

	A	B	C	D	E	F	G
B	x						
C	x	x					
D		x	x				
E		x	x	x			
F		x	x		x		
G		x	x			x	
H	x		x	x	x	x	x

1.krok0:  $\delta(q, 0) \in F$  pro  $q \in \{D, F\}$

	A	B	C	D	E	F	G
B	x						
C	x	x					
D	x	x	x				
E		x	x	x			
F	x	x	x		x		
G		x	x	x		x	
H	x		x	x	x	x	x



B a G jsou rozlišitelné,  $\delta(A, 0) = B$ ,  $\delta(G, 0) = H$ , tj. A, G jsou rozlišitelné.

Obdobně pro E, G vedoucí  $\delta(*, 0)$  do rozlišitelných stavů H, G.

	A	B	C	D	E	F	G
B	x						
C	x	x					
D	x	x	x				
E		x	x	x			
F	x	x	x		x		
G	x	x	x	x	x	x	
H	x		x	x	x	x	x

Zůstávají tři ekvivalentní dvojice stavů.

## Theorem 2.4

*Pokud dva stavy nejsou odlišeny předchozím algoritmem, pak jsou tyto stavy ekvivalentní.*

### Proof: Korektnost algoritmu

- Uvažujme špatné páry stavů, které jsou rozlišitelné a algoritmus je nerozlišil.
- Vezměme z nich pár  $p, q$  rozlišitelný nejkratším slovem  $w = a_1 \dots a_n$ .
- Stavy  $r = \delta(p, a_1)$  a  $s = \delta(q, a_1)$  jsou rozlišitelné kratším slovem  $a_2 \dots a_n$  takže pár není mezi špatnými.  
Tedy jsou 'vykřížkované' algoritmem.
- Tedy v příštím kroku algoritmus rozliší i  $p, q$ .



Čas výpočtu je polynomiální vzhledem k počtu stavů.

- V jednom kole uvažujeme všechny páry, tj.  $O(n^2)$ .
- Kol je maximálně  $O(n^2)$ , protože pokud nepřidáme křížek, končíme.
- Dohromady  $O(n^4)$ .

Algoritmus lze zrychlit na  $O(n^2)$  pamatováním stavů, které závisí na páru  $\{r, s\}$  a následováním těchto seznamů 'zpátky'.

# Testování ekvivalence regulárních jazyků

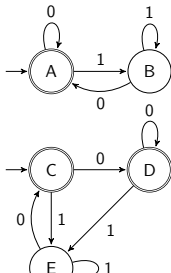
## Algorithm: Testování ekvivalence regulárních jazyků

Ekvivalenci regulárních jazyků  $L, M$  testujeme následovně:

- Najdeme DFA  $A_L, A_M$  rozpoznávající  $L(A_L) = L, L(A_M) = M$ ,  $Q_L \cap Q_M = \emptyset$ .
- Vytvoříme DFA sjednocením stavů a přechodů  $(Q_L \cup Q_M, \Sigma, \delta_L \cup \delta_M, q_L, F_L \cup F_M)$ ; zvolíme jeden z počátečních stavů.
- Jazyky jsou ekvivalentní právě když počáteční stavy původních DFA jsou ekvivalentní.

### Example 2.4

Uvažujme jazyk  $\{\lambda\} \cup \{0, 1\}^*0$  přijímající prázdné slovo a slova končící 0. Vpravo obrázek dvou DFA a tabulku rozlišitelných stavů.



B	x			
C		x		
D			x	
E	x			x
	A	B	C	D



# Minimalizace DFA

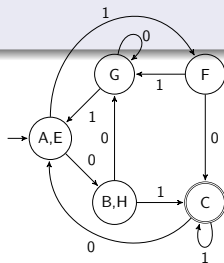
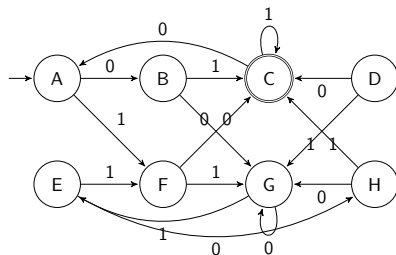
## Definition 2.6 (redukovaný DFA, redukt)

Deterministický konečný automat je **redukovaný**, pokud

- nemá nedosažitelné stavy a
- žádné dva stavy nejsou ekvivalentní.

Konečný automat  $B$  je **reduktem** automatu  $A$ , jestliže:

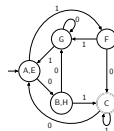
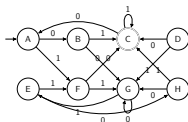
- $B$  je redukovaný a
- $A$  a  $B$  jsou ekvivalentní.



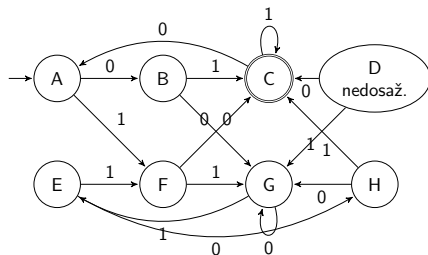
# Algoritmus nalezení reduktu DFA A

## Algorithm: Algoritmus nalezení reduktu DFA A

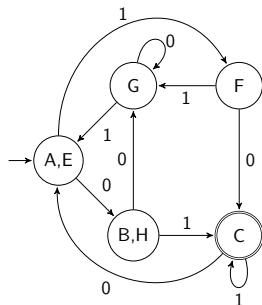
- Ze vstupního DFA A eliminujeme stavy nedosažitelné z počátečního stavu.
- Najdeme rozklad zbylých stavů na třídy ekvivalence.
- Konstruujeme DFA B na třídách ekvivalence jakožto stavech. Přechodovou funkci B označíme  $\gamma$ , mějme  $S \in Q_B$ . Pro libovolné  $q \in S$ , označíme  $T$  třídu ekvivalence  $\delta(q, a)$  a definujeme  $\gamma(S, a) = T$ . Tato třída musí být stejná pro všechna  $a \in S$ .
- Počáteční stav B je třída obsahující počáteční stav A.
- Množina přijímajících stavů B jsou bloky odpovídající přijímajícím stavům A.



# Příklad redukovaného DFA



B	x					
C	x	x				
E		x	x			
F	x	x	x	x		
G	x	x	x	x	x	
H	x		x	x	x	x
	A	B	C	E	F	G



Třídy ekvivalence:

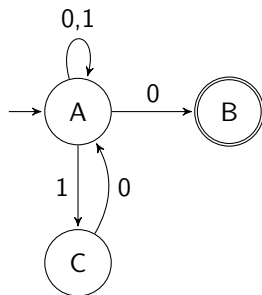
$\{A, E\}, \{B, H\}, \{C\}, \{F\}, \{G\}$

# Pro nedeterministické FA to tak snadné není

## Example 2.5

Nedeterministický FA na obrázku můžeme redukovat vypuštěním stavu C. Stavy {A, C} jsou rozlišitelné vstupem 0, takže algoritmus pro DFA redukci nenajde.

Mohli bychom hledat exhaustivním výpočtem.



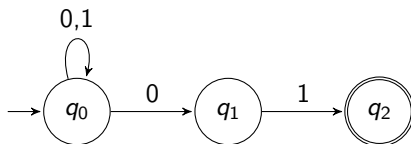
# Nedeterministické konečné automaty (NFA)

- Obecnější modely, které přijímají stále jen regulární jazyky:
  - nedeterministické konečné automaty NFA
  - NFA s  $\lambda$  přechody
  - dvousměrné konečné automaty (nepíší na pásku + prostor omezený vstupem)
- usnadní nám návrh automatu, zjednoduší zápis
- umíme převést na DFA.

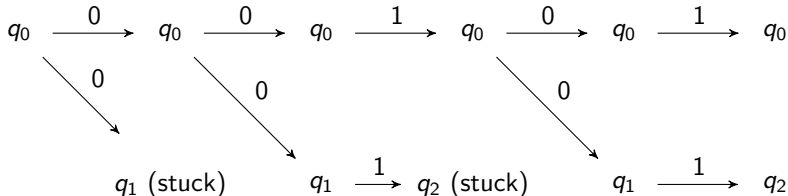
# Nedeterministické konečné automaty (NFA)

Nedeterministický automat může být ve více stavech paralelně. Má schopnost 'uhodnout' něco o vstupu.

NFA přijímající všechna slova končící 01.



NFA zpracovává vstup 00101.



# Nedeterministický konečný automat

## Definition 2.7 (Nedeterministický konečný automat)

**Nedeterministický konečný automat (NFA)**  $A = (Q, \Sigma, \delta, S_0, F)$  sestává z:  
konečné množiny **stavů**, zpravidla značíme  $Q$   
konečné množiny **vstupních symbolů**, značíme  $\Sigma$   
**přechodové funkce**, zobrazení  $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow \mathcal{P}(Q)$  vracející podmnožinu  $Q$ .  
**množiny počátečních stavů**<sup>a</sup>  $S_0 \subseteq Q$ ,  
a **množiny koncových (přijímajících) stavů**  $F \subseteq Q$ .

<sup>a</sup>alternativa: počátečního stavu  $q_0 \in Q$

## Example 2.6

Tabulka pro NFA z předchozího slajdu  $A = (\{q_0, q_1, q_2\}, \{0, 1\}, \delta, \{q_0\}, \{q_2\})$  je:

$\delta$	0	1
$\rightarrow q_0$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0\}$
$q_1$	$\emptyset$	$\{q_2\}$
$*q_2$	$\emptyset$	$\emptyset$

# Rozšířená přechodová funkce

## Definition 2.8 (Rozšířená přechodová funkce)

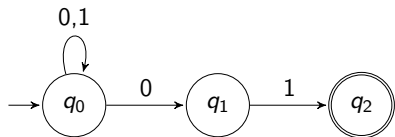
Pro přechodovou funkci  $\delta$  NFA je **rozšířená přechodová funkce**  $\delta^*$ ,  
 $\delta^* : Q \times \Sigma^* \rightarrow \mathcal{P}(Q)$  definovaná indukcí:

**start**  $\delta^*(q, \lambda) = \{q\}$ .

**ind.** Indukční krok:

$$\delta^*(q, wx) = \bigcup_{p \in \delta^*(q, w)} \delta(p, x)$$

Tj. množina stavů, do kterých se mohou dostat posloupností 'správně označených' hran.



$\delta^*(q_0, \lambda)$	=	$= \{q_0\}$
$\delta^*(q_0, 0)$	=	$\delta(q_0, 0) = \{q_0, q_1\}$
$\delta^*(q_0, 00)$	=	$\delta(q_0, 0) \cup \delta(q_1, 0) = \{q_0, q_1\}$
$\delta^*(q_0, 001)$	=	$\delta(q_0, 1) \cup \delta(q_1, 1) = \{q_0, q_2\}$
$\delta^*(q_0, 0010)$	=	$\delta(q_0, 0) \cup \delta(q_2, 0) = \{q_0, q_1\}$
$\delta^*(q_0, 00101)$	=	$\delta(q_0, 1) \cup \delta(q_1, 1) = \{q_0, q_2\}$



# Jazyk přijímaný NFA

## Definition 2.9 (Jazyk přijímaný nedeterministickým konečným automatem)

Mějme NFA  $A = (Q, \Sigma, \delta, S_0, F)$ , pak

$$L(A) = \{w \mid (\exists q_0 \in S_0) \delta^*(q_0, w) \cap F \neq \emptyset\}$$

je jazyk přijímaný automatem  $A$ .

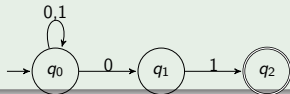
Tedy  $L(A)$  je množina slov  $w \in \Sigma^*$  takových, že  $\delta^*(q_0, w)$  obsahuje alespoň jeden přijímající stav.

## Example 2.7

Automat z předchozího slajdu přijímá jazyk  $L = \{w \mid w \text{ končí na } 01, w \in \{0, 1\}^*\}$ .

Důkaz indukcí konjunkce tvrzení:

- $\delta^*(q_0, w)$  obsahuje  $q_0$  pro každé slovo  $w$ .
- $\delta^*(q_0, w)$  obsahuje  $q_1$  iff  $w$  končí 0.
- $\delta^*(q_0, w)$  obsahuje  $q_2$  iff  $w$  končí 01.



# Ekvivalence nedeterministických a deterministických konečných automatů

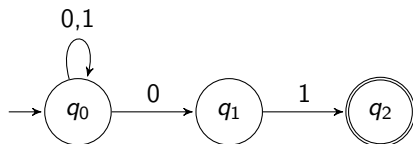
## Algorithm: !Podmnožinová konstrukce

**Podmnožinová konstrukce** začíná s NFA  $N = (Q_N, \Sigma, \delta_N, S_0, F_N)$ . Cílem je popis deterministického DFA  $D = (Q_D, \Sigma, \delta_D, S_0, F_D)$ , pro který  $L(N) = L(D)$ .

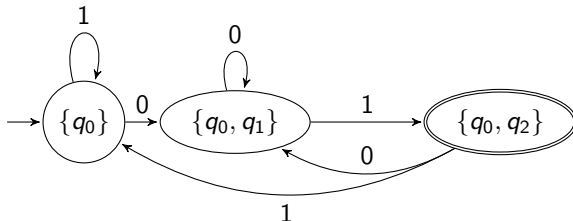
- $Q_D$  je množina podmnožin  $Q_N$ ,  $Q_D = \mathcal{P}(Q_N)$  (potenční množina). Nedosažitelné stavy můžeme vynechat.
- Počáteční stav DFA je stav označený  $S_0$ , tj. prvek  $Q_D$ .
- $F_D = \{S : S \in \mathcal{P}(Q_N) \text{ \& } S \cap F_N \neq \emptyset\}$ , tedy  $S$  obsahuje alespoň jeden přijímající stav  $N$ .
- Pro každé  $S \subseteq Q_N$  a každý vstupní symbol  $a \in \Sigma$ ,

$$\delta_D(S, a) = \bigcup_{p \in S} \delta_N(p, a).$$

# Příklad podmnožinové konstrukce pro $\{w.01 \mid w \in \{0, 1\}^*\}$



	0	1
$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$
$\rightarrow \{q_0\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0\}$
$\{q_1\}$	$\emptyset$	$\{q_2\}$
$*\{q_2\}$	$\emptyset$	$\emptyset$
$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0, q_2\}$
$*\{q_0, q_2\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0\}$
$*\{q_1, q_2\}$	$\emptyset$	$\{q_2\}$
$*\{q_0, q_1, q_2\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0, q_2\}$



## Theorem 2.5 (Převod NFA na DFA)

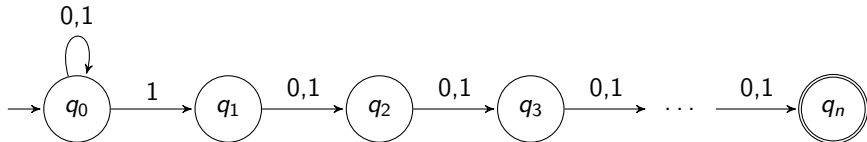
Pro DFA  $D = (Q_D, \Sigma, \delta_D, S_0, F_D)$  vytvořený podmnožinovou konstrukcí z NFA  $N = (Q_N, \Sigma, \delta_N, q_0, F_N)$  platí  $L(N) = L(D)$ .

### Proof.

Indukcí dokážeme:  $\delta_D^*(S_0, w) = \delta_N^*(q_0, w)$ . □

### Example 2.8 ('Těžký' případ pro podmnožinovou konstrukci)

Jazyk  $L(N)$  slov 0's a 1's takových, že  $n$ -tý symbol od konce je 1. Intuitivně si DFA musí pamatovat  $n$  posledních přečtených symbolů.



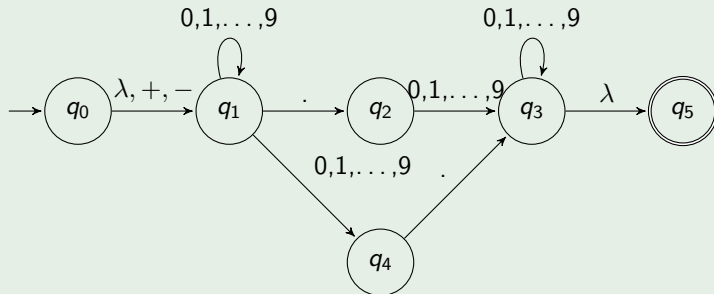
- Aplikace hledání v textu

# Konečné automaty s $\lambda$ přechody

- Nově dovolíme přechody na  $\lambda$ , prázdné slovo, tj. bez přechtení vstupního symbolu.

## Example 2.9 (NFA s $\lambda$ přechody)

- (1) Volitelně znaménko  $+$  nebo  $-$ ,
- (2) řetězec číslic,
- (3) desetinná tečka
- (4) další řetězec číslic. Nejméně jeden z řetězců (2) a (4) musí být neprázdný.



## Definition 2.10 ( $\lambda$ -NFA)

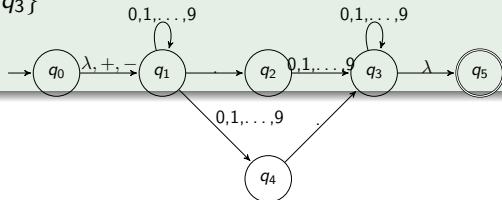
$\lambda$ -NFA je  $E = (Q, \Sigma, \delta, \{q_0\}, F)$ , kde jsou všechny komponenty stejné jako pro NFA, jen  $\delta$  je definovaná pro  $Q \times (\Sigma \cup \{\lambda\})$ .

Požadujeme  $\lambda \notin \Sigma$  (resp. volíme nový znak pro prázdné slovo).

## Example 2.10

Předešlý  $\lambda$ -NFA je:  $E = (\{q_0, q_1, \dots, q_5\}, \{., +, -, 0, 1, \dots, 9\}, \delta, \{q_0\}, \{q_5\})$  s  $\delta$ :

$\delta$	$\lambda$	$+, -$	$.$	$0, 1, \dots, 9$
$q_0$	$\{q_1\}$	$\{q_1\}$	$\emptyset$	$\emptyset$
$q_1$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{q_2\}$	$\{q_1, q_4\}$
$q_2$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{q_3\}$
$q_3$	$\{q_5\}$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{q_3\}$
$q_4$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{q_3\}$	$\emptyset$
$*q_5$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$



## Definition 2.11 ( $\lambda$ -uzávěr)

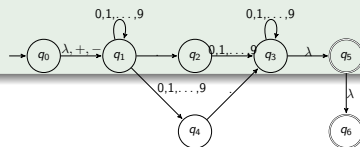
Pro  $q \in Q$  definujeme  $\lambda$ -uzávěr  $\lambda\text{CLOSE}(q)$  rekurzivně:

- Stav  $q$  je v  $\lambda\text{CLOSE}(q)$ .
- Je-li  $p \in \lambda\text{CLOSE}(q)$  a  $r \in \delta(p, \lambda)$  pak i  $r \in \lambda\text{CLOSE}(q)$ .

Pro  $S \subseteq Q$  definujeme  $\lambda\text{CLOSE}(S) = \bigcup_{q \in S} \lambda\text{CLOSE}(q)$ .

## Example 2.11 ( $\lambda$ uzávěr)

- $\lambda\text{CLOSE}(q_0) = \{q_0, q_1\}$
- $\lambda\text{CLOSE}(q_1) = \{q_1\}$
- $\lambda\text{CLOSE}(q_3) = \{q_3, q_5, q_6\}$
- $\lambda\text{CLOSE}(\{q_3, q_4\}) = \{q_3, q_4, q_5, q_6\}$



# Rozšířená přechodová funkce a jazyk přijímaný $\lambda$ -NFA

## Definition 2.12

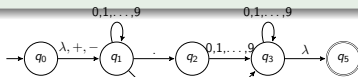
Nechť  $E = (Q, \Sigma, \delta, S_0, F)$  je  $\lambda$ -NFA. Rozšířenou přechodovou funkci  $\delta^*$  definujeme následovně:

- $\delta^*(q, \lambda) = \lambda\text{CLOSE}(q)$ .
- Indukční krok:  $v = wa$ , kde  $w \in \Sigma^*$ ,  $a \in \Sigma$ .

$$\delta^*(q, wa) = \lambda\text{CLOSE} \left( \bigcup_{p \in \delta^*(q, w)} \delta(p, a) \right)$$

## Example 2.12

$$\begin{aligned} \delta^*(q_0, \lambda) &= \lambda\text{CLOSE}(q_0) &= \{q_0, q_1\} \\ \delta^*(q_0, 5) &= \lambda\text{CLOSE}(\bigcup_{q \in \delta^*(q_0, \lambda)} \delta(q, 5)) = \lambda\text{CLOSE}(\delta(q_0, 5) \cup \delta(q_1, 5)) &= \{q_1, q_4\} \\ \delta^*(q_0, 5.) &= \lambda\text{CLOSE}(\delta(q_1, .) \cup \delta(q_4, .)) &= \{q_2, q_3, q_5\} \\ \delta^*(q_0, 5.6) &= \lambda\text{CLOSE}(\delta(q_2, 6) \cup \delta(q_3, 6) \cup \delta(q_5, 6)) &= \{q_3, q_5\} \end{aligned}$$





# Eliminace $\lambda$ -přechodů

## Theorem 2.6 (Eliminace $\lambda$ -přechodů)

*Jazyk  $L$  je rozpoznatelný  $\lambda$ -NFA právě když je  $L$  regulární.*

### Algorithm: Eliminace $\lambda$ -přechodů

Pro libovolný  $\lambda$ -NFA  $E = (Q_E, \Sigma, \delta_E, S_0, F_E)$  zkonstruujeme DFA  $D = (Q_D, \Sigma, \delta_D, q_D, F_D)$  přijímající stejný jazyk jako  $E$ .

- $Q_D \subseteq \mathcal{P}(Q_E)$ ,  $\forall S \subseteq Q_E : \lambda\text{CLOSE}(S) \in Q_D$ . V  $Q_D$  může být i  $\emptyset$ .
- $q_D = \lambda\text{CLOSE}(S_0)$ .
- $F_D = \{S \mid S \in Q_D \text{ \& } S \cap F_E \neq \emptyset\}$ .
- Pro  $S \in Q_D$ ,  $a \in \Sigma$  definujeme  $\delta_D(S, a) = \lambda\text{CLOSE}(\bigcup_{p \in S} \delta(p, a))$ .

# Eliminace $\lambda$ -přechodů

## Proof.

(IF) Stačí přidat  $\delta(q, \lambda) = \emptyset$  pro každé  $q \in Q$ .

(Only-if) Vezmeme  $D$  z předchozí definice a indukcí dle délky  $w$  dokážeme  $L(D) = L(E)$ .

- $|w| = 0$ , pak  $w = \lambda$ , víme  $\delta_E^*(S_0, \lambda) = \lambda\text{CLOSE}(\cup_{q_0 \in S_0} \delta^*(q_0, \lambda)) = \lambda\text{CLOSE}(\cup_{q_0 \in S_0} \lambda\text{CLOSE}(q_0)) = \lambda\text{CLOSE}(S_0) = q_D$ ,
- Předpokládejme  $w = va$ ,  $a \in \Sigma$ ,  $v \in \Sigma^*$ ,  $\delta_E^*(S_0, v) = \delta_D^*(q_D, v)$ . Rekursivní krok je stejný jako v definici  $\delta^*$  a při eliminaci  $\lambda$ -přechodů.



- **Mihyll–Nerodova věta**
  - užití pro důkaz ne–regulárnosti jazyka
  - příklad ne–regulárního jazyka, který lze pumpovat
  - nekonečnost regulárního jazyka lze rozpoznat analýzou konečného množství slov
- **dosažitelné stavy**, algoritmus nalezení
- **ekvivalentní automaty, stavy**
- **rozlišitelné stavy**, algoritmus nalezení
- **redukovaný DFA**, redukt, **algoritmus nalezení reduktu**.
- **Nedeterministický FA**, **podmnožinová konstrukce**.
- **$\lambda$  nedeterministický FA**,  **$\lambda$  uzávěr**.

# Množinové operace nad jazyky

## Definition 3.1 (Množinové operace nad jazyky)

Mějme dva jazyky  $L, M$ . Definujme následující operace:

- (1) binární **sjednocení**  $L \cup M = \{w | w \in L \vee w \in M\}$ 
  - Příklad: jazyk obsahuje slova začínající  $a^i$  nebo tvaru  $b^j c^j$ .
- (2) **průnik**  $L \cap M = \{w | w \in L \ \& \ w \in M\}$ 
  - Příklad: jazyk obsahuje slova sudé délky končící na 'baa'.
- (3) **rozdíl**  $L - M = \{w | w \in L \ \& \ w \notin M\}$ 
  - Příklad: jazyk obsahuje slova sudé délky nekončící na 'baa'.
- (4) **doplňěk (komplement)**  $\bar{L} = -L = \{w | w \notin L\} = \Sigma^* - L$ 
  - Příklad: jazyk obsahuje slova nekončící na 'a'

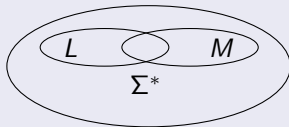
## Theorem (de Morganova pravidla)

$$L \cap M = \overline{\bar{L} \cup \bar{M}}$$

Platí:  $L \cup M = \overline{\bar{L} \cap \bar{M}}$

$$L - M = L \cap \bar{M}.$$

## Důkaz ze vztahů $\&, \vee, \neg$ .



# Uzávěrové vlastnosti regulárních jazyků

## Theorem 3.1 (Uzavřenost na množinové operace)

Mějme regulární jazyky  $L, M$ . Pak jsou následující jazyky také regulární:

- (1) sjednocení  $L \cup M$
- (2) průnik  $L \cap M$
- (3) rozdíl  $L - M$
- (4) doplněk  $\bar{L} = \Sigma^* - L$ .

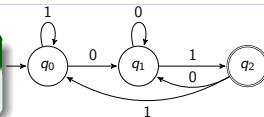
## Proof: Uzavřenost RJ na doplněk

- Pokud  $\delta$  není pro některé dvojice  $q, a$  definovaná, přidáme nový nepřijímající stav  $q_n$  a do něj přechod pro vše dříve nedefinované plus  $\forall a \in \Sigma \cup \{\lambda\}: \delta(q_n, a) = q_n$ .
- Pak stačí prohodit koncové a nekoncové stavy přijímajícího deterministického FA  $F = Q_A - F_A$ .



### Example 3.1

Jazyk  $\{w; w \in \{0, 1\}^*01\}$



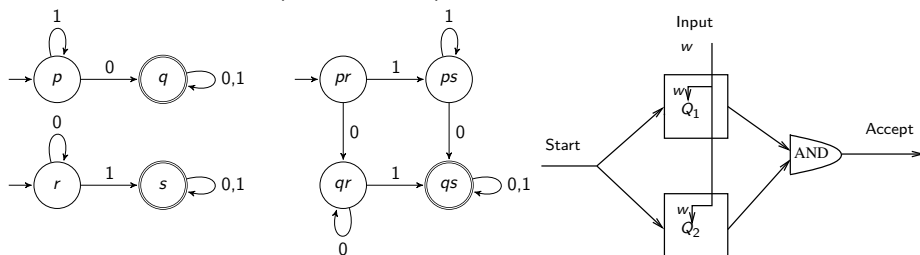
# Konstrukce součinu automatů

## Proof: Průnik, sjednocení, rozdíl

- Pro rozdíl doplníme funkci  $\delta$  na totální.
- Zkonstruujeme součinný automat,  
 $Q = (Q_1 \times Q_2, \Sigma, \delta((p_1, p_2), x) = (\delta_1(p_1, x), \delta_2(p_2, x)), (q_{0_1}, q_{0_2}), F)$
- průnik:  $F = F_1 \times F_2$
- sjednocení:  $F = (F_1 \times Q_2) \cup (Q_1 \times F_2)$
- rozdíl:  $F = F_1 \times (Q_2 - F_2)$ .



Příklad součinu automatů (průnik jazyků). Slova obsahující 0,1, oboje.



# Příklady na uzávěrové vlastnosti

## Example 3.2

Konstruujeme konečný automat přijímající slova, která obsahují  $3k + 2$  symbolů 1 a neobsahují posloupnost 11.

- Přímá konstrukce je komplikovaná.
- $L_1 = \{w \mid w \in \{0, 1\}^* \& |w|_1 = 3k + 2\}$
- $L_2 = \{w \mid u, v \in \{0, 1\}^* \& w = u11v\}$
- $L = L_1 - L_2$ .

## Example 3.3

Jazyk  $M$  slov s různým počtem 0 a 1 není regulární.

- Je-li  $M$  regulární,  $\overline{M} = \Sigma^* - M$  je také regulární.
- O  $\overline{M}$  víme, že regulární není (pumping lemma).

# Ještě jeden příklad

## Example 3.4

Jazyk  $L_{0 \neq 1} = \{0^i 1^j : i \neq j, i, j \in \mathbb{N}_0\}$  není regulární.

- Jazyk  $L_{01} = \{0^i 1^j : i, j \in \mathbb{N}_0\}$  je regulární, umíme sestavit konečný automat.
- $L_{01} - L_{0 \neq 1} = \{0^i 1^i : i \in \mathbb{N}_0\}$
- Z uzávěrových vlastností víme, že rozdíl regulárních jazyků je regulární.
- Jazyk  $L_{01}$  regulární je.
- Předpokládejme, že  $L_{0 \neq 1}$  je regulární. Pak by i  $\{0^i 1^i : i \in \mathbb{N}_0\}$  musel být regulární, což není - SPOR.



# Řetězcové operace nad jazyky

## Definition 3.2 (Řetězcové operace nad jazyky)

Nad jazyky  $L, M$  definujeme následující operace:

**zřetězení** jazyků

$$L.M = \{uv \mid u \in L \& v \in M\}$$

$$L.x = L.\{x\} \text{ a } x.L = \{x\}.L \text{ pro } x \in \Sigma$$

**mocniny** jazyka

$$L^0 = \{\lambda\}$$

$$L^{i+1} = L^i.L$$

**pozitivní iterace**

$$L^+ = L^1 \cup L^2 \dots = \bigcup_{i \geq 1} L^i$$

**obecná iterace**

$$L^* = L^0 \cup L^1 \cup L^2 \dots = \bigcup_{i \geq 0} L^i$$

$$\text{tedy } L^* = L^+ \cup \{\lambda\}$$

**otočení jazyka**

$$L^R = \{u^R \mid u \in L\}$$

(=zrcadlový obraz, reverze)

$$(x_1 x_2 \dots x_n)^R = x_n x \dots x_2 x_1$$

**levý kvocient**  $L$  podle  $M$

$$M \setminus L = \{v \mid uv \in L \& u \in M\}$$

**levá derivace**  $L$  podle  $w$

$$\partial_w L = \{w\} \setminus L \text{ (pozn. derivace bude i v jiném významu)}$$

**pravý kvocient**  $L$  podle  $M$

$$L/M = \{u \mid uv \in L \& v \in M\}$$

**pravá derivace**  $L$  podle  $w$

$$\partial_w^R L = L/\{w\}.$$

### Theorem 3.2 (Uzavřenost reg. jazyků na řetězcové operace)

*Jsou-li  $L, M$  regulární jazyky, je regulární i  $L.M$ ,  $L^*$ ,  $L^+$ ,  $L^R$ ,  $M \setminus L$  a  $L/M$ .*

### Lemma ( $L.M$ )

*Jsou-li  $L, M$  regulární jazyky, je regulární i  $L.M$ .*

#### Proof:

Vezmeme DFA  $A_1 = (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_1, F_1)$ , pak  $A_2 = (Q_2, \Sigma, \delta_2, q_2, F_2)$  tak že  $L = L(A_1)$  a  $M = L(A_2)$ .

Definujeme nedeterministický automat  $B = (Q \cup \{q_0\}, \Sigma, \delta, q_0, F_2)$  kde:

$Q = Q_1 \cup Q_2$  předpokládáme různá jména stavů, jinak přejmenujeme  
končíme až po přechtení slova z  $L_2$

$\delta(q_0, \lambda) = \{q_1, q_2\}$  pro  $q_1 \in F_1$  tj.  $\lambda \in L(A_1)$

$\delta(q_0, \lambda) = \{q_1\}$  pro  $q_1 \notin F_1$  tj.  $\lambda \notin L(A_1)$

$\delta(q_0, x) = \emptyset$  pro  $x \in \Sigma$

$\delta(q, x) = \{\delta_1(q, x)\}$  pro  $q \in Q_1$  &  $\delta_1(q, x) \notin F_1$  počítáme v  $A_1$

$= \{\delta_1(q, x), q_2\}$  pro  $q \in Q_1$  &  $\delta_1(q, x) \in F_1$  nedet. přechod z  $A_1$

$= \{\delta_2(q, x)\}$  pro  $q \in Q_2$  počítáme v  $A_2$ .

Pak  $L(B) = L(A_1).L(A_2)$ . □

## Lemma ( $L^*, L^+$ )

*Je-li  $L$  regulární jazyk, je regulární i  $L^*, L^+$ .*

- Idea: opakovaný výpočet automatu  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$
- realizace: nedeterministické rozhodnutí, zda pokračovat nebo restart
- speciální stav pro příjem  $\lambda \in L^0$  (pro  $L^+$  vynecháme či  $\notin F$ ).

### Proof: Důkaz pro $L^*$

Vezmeme DFA  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ , tak že  $L = L(A)$ .

Definujeme nedeterministický automat  $B = (Q \cup \{q_B\}, \Sigma, \delta_B, q_B, F \cup \{q_B\})$  kde:

$\delta_B(q_B, \lambda) = \{q_0\}$     nový stav  $q_B$  pro příjem  $\lambda$ , přejdeme do  $q_0$

$\delta_B(q_B, x) = \emptyset$     pro  $x \in \Sigma$

$\delta_B(q, x) = \{\delta(q, x)\}$     pokud  $q \in Q$  &  $\delta(q, x) \notin F$  uvnitř  $A$

$= \{\delta(q, x), q_0\}$     pokud  $q \in Q$  &  $\delta(q, x) \in F$  možný restart

Pak  $L(B) = L(A)^* (q_B \in F_B)$ ,  $L(B) = L(A)^+ (q_B \notin F_B)$ . □

## Lemma ( $L^R$ )

*Je-li  $L$  regulární jazyk, je regulární i  $L^R$ .*

- Zřejmě  $(L^R)^R = L$  a tedy stačí ukázat jeden směr.
- idea: obrátíme šipky ve stavovém diagramu; nederministický FA

### Proof:

Vezmeme DFA  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ , tak že  $L = L(A)$ .

Definujeme nederministický automat  $B = (Q \cup \{q_B\}, \Sigma, \delta_B, q_B, \{q_0\})$  kde:

- $\delta_B(q, x) = \{p \mid \delta(p, x) = q\}$  pro  $q \in Q$
  - $\delta_B(q_B, \lambda) = F$ ,  $\delta_B(q_B, x) = \emptyset$ .
  - Pro libovolné slovo  $w = x_1 x_2 \dots x_n$ 
    - $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$  je přijímající výpočet pro  $w$  v  $A$
- $\Leftrightarrow$
- $q_B, q_n, q_{n-1}, \dots, q_2, q_1, q_0$  je přijímající výpočet pro  $w^R$  v  $B$ . □

Pozn. Někdy  $L$  nebo  $L^R$  má výrazně jednodušší přijímající automat.

# Uzavřenost kvocientu

## Lemma ( $M \setminus L$ a $L/M$ )

*Jsou-li  $L, M$  regulární jazyky, je regulární i  $M \setminus L$  a  $L/M$ .*

- Idea:  $A_L$ , budeme startovat ve stavech, do kterých se lze dostat slovem z  $M$

### Proof:

Vezmeme DFA  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ , tak že  $L = L(A)$ .

Definujeme nedeterministický NFA  $B = (Q, \Sigma, \delta, S_0, F)$  kde:

- definujeme  $S_0 = \{q \mid q \in Q \ \& \ (\exists u \in M) \ q = \delta(q_0, u)\}$ 
  - lze nalézt algoritmicky  
 $(\{q \mid L(A_q) \cap M \neq \emptyset \text{ kde } A_q = (Q, \Sigma, \delta, q_0, \{q\})\})$
- $v \in M \setminus L$ 
  - $\Leftrightarrow (\exists u \in M) \ uv \in L$
  - $\Leftrightarrow (\exists u \in M, \exists q \in Q) \ \delta(q_0, u) = q \ \& \ \delta(q, v) \in F$
  - $\Leftrightarrow \exists q \in S \ \& \ \delta(q, v) \in F$
  - $\Leftrightarrow v \in L(B)$

$$L/M = (M^R \setminus L^R)^R$$



**Regulární výrazy (RV)** jsou

- algebraickým popisem jazyků
- deklarativním způsobem, jak vyjádřit slova, která chceme přijímat.
- Schopné definovat všechny a pouze regulární jazyky.
- Můžeme je brát jako programovací jazyk, uživatelsky přívětivý popis konečného automatu.

## Example 3.5

- UNIX grep příkaz.
  - Lexikální analyzátoři jako Lex a Flex (popis pomocí 'token'ů je vzásadě regulární výraz).
  - Python knihovna re .
- 
- Syntaktická analýza potřebuje silnější nástroj, bezkontextové gramatiky, budou následovat.

# Regulární výrazy (RegE)

Definition 3.3 (Regulární výrazy (Regular Expression) (RegE), hodnota RegE  $L(\alpha)$ )

**Regulární výrazy**  $\alpha, \beta \in \text{RegE}(\Sigma)$  nad konečnou neprázdnou abecedou  $\Sigma = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  a jejich hodnota  $L(\alpha)$  jsou definovány induktivně:

	výraz $\alpha$	pro	hodnota $L(\alpha) \equiv [\alpha]$
• Základ:	$\lambda$	prázdný řetězec	$L(\lambda) = \{\lambda\}$
	$\emptyset$	prázdný výraz	$L(\emptyset) = \{\} \equiv \emptyset$
	$\mathbf{a}$	$a \in \Sigma$	$L(\mathbf{a}) = \{a\}$ .

• Indukce:

výraz	hodnota	poznámka
$\alpha + \beta$	$L(\alpha + \beta) = L(\alpha) \cup L(\beta)$	
$\alpha\beta$	$L(\alpha\beta) = L(\alpha)L(\beta)$	můžeme značit ., ale plete se s UNIX grep.
$\alpha^*$	$L(\alpha^*) = L(\alpha)^*$	
$(\alpha)$	$L((\alpha)) = L(\alpha)$	závorky nemění hodnotu.

Každý regulární výraz dostaneme indukcí výše, tj. třída  $\text{RegE}(\Sigma)$  je nejmenší třída uzavřená na uvedené operace.

## Lemma 3.1

Jazyk  $L(\lambda) = \{\lambda\} = \emptyset^*$ , v definici jen pro význam symbolu  $L(\lambda)$ .

# Příklady regulárních výrazů, priorita

## Example 3.6 (Regulární výrazy)

Jazyk střídajících se nul a jedniček lze zapsat:

- $(01)^* + (10)^* + 1(01)^* + 0(10)^*$
- $(\lambda + 1)(01)^*(\lambda + 0)$ .

Jazyk  $L((0^*10^*10^*1)^*0^*) = \{w \mid w \in \{0, 1\}^*, |w|_1 = 3k, k \geq 0\}$ .

## Definition 3.4 (priorita)

Nejvyšší prioritu má iterace  $*$ , nižší konkatenace (zřetězení), nejnižší sjednocení  $+$ .

## Theorem 3.3 (varianta Kleeneho věty)

*Každý jazyk reprezentovaný konečným automatem lze zapsat jako regulární výraz.*

*Každý jazyk popsáný regulárním výrazem můžeme zapsat jako  $\lambda$ -NFA (a tedy i DFA).*



# Převod RegE výrazu na $\lambda$ -NFA automat

## Převod RegE výrazu na $\lambda$ -NFA automat.

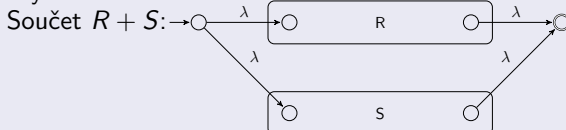
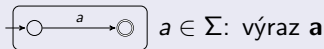
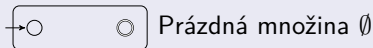
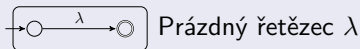
Důkaz indukcí dle struktury  $R$ . Základ:

V každém kroku zkonstruujeme  $\lambda$ -NFA  $E$  rozpoznávající stejný jazyk  $L(R) = L(E)$  se třemi dalšími vlastnostmi:

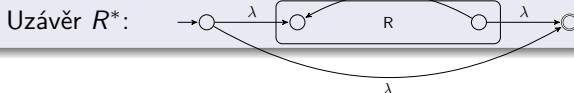
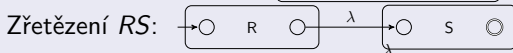
Právě jeden přijímající stav.

Žádné hrany do počátečního stavu.

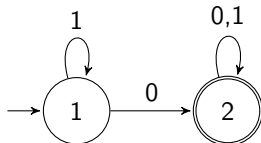
Žádné hrany z koncového stavu.



INDUKCE:



# Příklad: Od konečného automatu k RegE



$$R_{12}^{(2)} = \mathbf{1}^* \mathbf{0} (\mathbf{0} + \mathbf{1})^*$$

$$R_{ij}^{(k+1)} = R_{ij}^{(k)} + R_{i(k+1)}^{(k)} (R_{(k+1)(k+1)}^{(k)})^* R_{(k+1)j}^{(k)}$$

$R_{11}^{(0)}$	$\lambda + \mathbf{1}$	=
$R_{12}^{(0)}$	$\mathbf{0}$	=
$R_{21}^{(0)}$	$\emptyset$	=
$R_{22}^{(0)}$	$(\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})$	=
$R_{11}^{(1)}$	$\lambda + \mathbf{1} + (\lambda + \mathbf{1})(\lambda + \mathbf{1})^*(\lambda + \mathbf{1})$	$= \mathbf{1}^*$
$R_{12}^{(1)}$	$\mathbf{0} + (\lambda + \mathbf{1})(\lambda + \mathbf{1})^* \mathbf{0}$	$= \mathbf{1}^* \mathbf{0}$
$R_{21}^{(1)}$	$\emptyset + \emptyset(\lambda + \mathbf{1})^*(\lambda + \mathbf{1})$	$= \emptyset$
$R_{22}^{(1)}$	$\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1} + \emptyset(\lambda + \mathbf{1})^* \mathbf{0}$	$= \lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1}$
$R_{11}^{(2)}$	$\mathbf{1}^* + \mathbf{1}^* \mathbf{0} (\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})^* \emptyset$	$= \mathbf{1}^*$
$R_{12}^{(2)}$	$\mathbf{1}^* \mathbf{0} + \mathbf{1}^* \mathbf{0} (\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})^* (\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})$	$= \mathbf{1}^* \mathbf{0} (\mathbf{0} + \mathbf{1})^*$
$R_{21}^{(2)}$	$\emptyset + (\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})(\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})^* \emptyset$	$= \emptyset$
$R_{22}^{(2)}$	$\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1} + (\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})(\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})^* (\lambda + \mathbf{0} + \mathbf{1})$	$= (\mathbf{0} + \mathbf{1})^*$

# Od DFA k regulárním výrazům

## Regulární výraz z DFA

Mějme DFA  $A$ ,  $Q_A = \{1, \dots, n\}$  o  $n$  stavech.

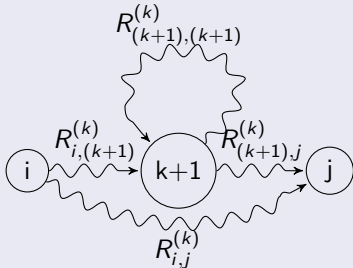
Nechť  $R_{ij}^{(k)}$  je regulární výraz,  $L(R_{ij}^{(k)}) = \{w \mid \delta_{\leq k}^*(i, w) = j\}$  množina slov převádějících stav  $i$  do stavu  $j$  v  $A$  cestou, která neobsahuje stav s vyšším indexem než  $k$ .

Budeme rekurzivně konstruovat  $R_{ij}^{(k)}$  pro  $k = 0, \dots, n$ .

$k = 0, i \neq j$ :  $R_{ij}^{(0)} = \mathbf{a_1} + \mathbf{a_2} + \dots + \mathbf{a_m}$  kde  $a_1, a_2, \dots, a_m$  jsou symboly označující hrany  $i$  do  $j$  (nebo  $R_{ij}^{(0)} = \emptyset$  nebo  $R_{ij}^{(0)} = \mathbf{a}$  pro  $m = 0, 1$ ).

$k = 0, i = j$ : smyčky,  $R_{ii}^{(0)} = \lambda + \mathbf{a_1} + \mathbf{a_2} + \dots + \mathbf{a_m}$  kde  $a_1, a_2, \dots, a_m$  jsou symboly na smyčkách v  $i$ .

INDUKCE. Mějme  $\forall i, j \in Q \ R_{ij}^{(k)}$ . Konstruujeme  $R_{ij}^{(k+1)}$ .



$$R_{ij}^{(k+1)} = R_{ij}^{(k)} + R_{i(k+1)}^{(k)} (R_{(k+1)(k+1)}^{(k)})^* R_{(k+1)j}^{(k)}$$

- Cesty z  $i$  do  $j$  neprocházející uzlem  $(k+1)$  jsou již v  $R_{ij}^{(k)}$ .
- Cesty z  $i$  do  $j$  přes  $(k+1)$  s případnými smyčkami můžeme zapsat  $R_{i(k+1)}^{(k)} (R_{(k+1)(k+1)}^{(k)})^* R_{(k+1)j}^{(k)}$ .
- regulární výrazy jsou uzavřené na sčítání (sjednocení), zřetězení i iteraci, tj.  $R_{ij}^{k+1} \in \text{RegE}(\Sigma)$

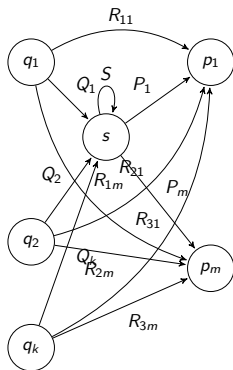
Nakonec,  $\text{RegE} = \bigoplus_{j \in F_A} R_{1j}^{(n)}$  sjednocení přes přijímající stavy  $j$ .



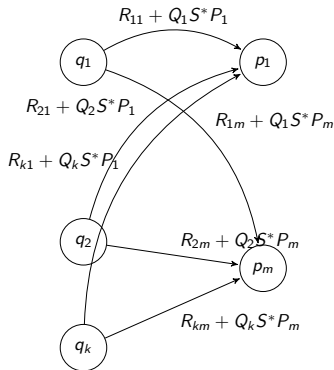
# Konverze DFA na RegE eliminací stavů

- Předchozí metoda může obsahovat až  $4^n$  symbolů.
- Následující algoritmus se občas vyhne duplicitě.
- Dovolíme regulární výrazy jako popisky na hranách grafu (transformovaného automatu).

Stav  $s$  vybrán k eliminaci



Výsledek eliminace  $s$  z předchozího grafu.

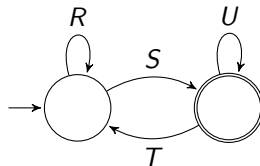


# Konstrukce regulárního výrazu $RegE$ z NFA

Pro každý cílový stav  $q \in F$  aplikujeme předchozí redukci na všechny  $p \in Q \setminus \{q, q_0\}$ .

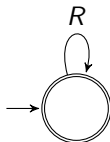
Pro  $q \neq q_0$  vezmeme

$$RegE(q) = (R + SU^*T)^*SU^*.$$



Pro  $q = q_0$  vezmeme

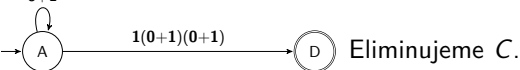
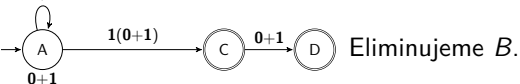
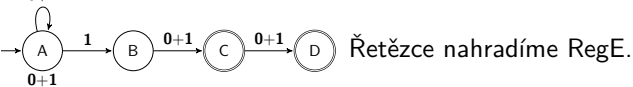
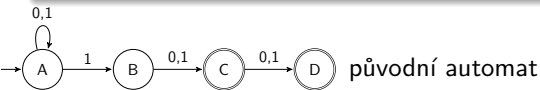
$$RegE(q) = R^*.$$



Sečteme výrazy (jazyky sjednotíme) přes všechny přijímající stavy;  
 $RegE(NFA) = \bigoplus_{q \in F} RegE(q).$

## Example 3.7

NFA přijímající slova s 1 na 2. nebo 3. pozici od konce.



A máme RegE výraz:  $(0 + 1)^* 1(0 + 1) + (0 + 1)^* 1(0 + 1)(0 + 1)$ .

[Pořadí eliminace]

Nejdřív eliminujeme uzly ne-cílové a ne-startovní  $q \notin F, q \neq q_0$ .

# Shrnutí převodů mezi reprezentacemi regulárních jazyků

## Převod NFA na DFA

- $\lambda$  uzávěr v  $O(n^3)$  – prohledává  $n$  stavů násobeno  $n^2$  hran pro  $\lambda$  přechody.
- Podmnožinová konstrukce, DFA s až  $2^n$  stavy. Pro každý stav,  $O(n^3)$  času na výpočet přechodové funkce.

## Převod DFA na NFA

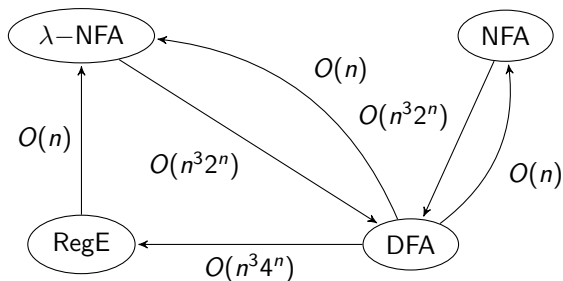
- Přidat množinové závorky k přechodové funkci a přechody pro  $\lambda$  u  $\lambda$ -NFA.

## Převod automatu DFA an RegE regulární výraz

- $O(n^3 4^n)$

## RegE výraz na automat

- V čase  $O(n)$  vytvoříme  $\lambda$ -NFA.





- Regulární výrazy
- Kleeneho věta
  - Jazyk je přijímaný konečným automatem právě když lze napsat jako regulární výraz,
    - tj. z  $\emptyset$  a  $\{a\}$  pro  $a \in \Sigma$
    - a konečného počtu aplikací iterace, zřetězení a sjednocení.
- Uzávěrové vlastnosti
  - dnes jen 'regulární' sloupec

jazyk	regulární (RL)	bezkontextové	deterministické CFL
sjednocení	ANO	ANO	NE
průnik	ANO	NE	NE
$\cap$ s RL	ANO	ANO	ANO
doplňěk	ANO	NE	ANO
homomorfismus	ANO	ANO	NE
inverzní hom.	ANO	ANO	ANO

## Lemma (Další vlastnosti bez důkazu)

- *Zjednodušení návrhu automatů*

$$L.\emptyset = \emptyset.L = \emptyset$$

$$\{\lambda\}.L = L.\{\lambda\} = L$$

$$(L^*)^* = L^*$$

$$(L_1 \cup L_2)^* = L_1^*(L_2.L_1^*)^* = L_2^*(L_1.L_2^*)^*$$

$$(L_1.L_2)^R = L_2^R.L_1^R$$

$$\partial_w(L_1 \cup L_2) = \partial_w(L_1) \cup \partial_w(L_2)$$

$$\partial_w(\Sigma^* - L) = \Sigma^* - \partial_w L$$

# Substituce jazyků

## Definition 4.1 (Substituce jazyků)

Mějme konečnou abecedu  $\Sigma$ . Pro každé  $x \in \Sigma$  budiž  $\sigma(x)$  jazyk v nějaké abecedě  $Y_x$ . Dále položíme

$$\sigma(\lambda) = \{\lambda\}$$

$$\sigma(u.v) = \sigma(u).\sigma(v)$$

- Zobrazení  $\sigma : \Sigma^* \rightarrow P(Y^*)$ , kde  $Y = \bigcup_{x \in \Sigma} Y_x$  se nazývá **substituce**.
- $\sigma(L) = \bigcup_{w \in L} \sigma(w)$
- **nevypouštějící substituce** je substituce, kde žádné  $\sigma(x)$  neobstahuje  $\lambda$ .

## Example 4.1 (substituce)

- 1)  $\Sigma = \{k, p, m, c, t\}$ ,  $L = (kmp)(ckmp)^*t$ ,  
 $k$  slovník křestních jmen,  $p$  slovník příjmení,  $m$  mezera,  $c$  čárka,  $t$  tečka.
- 2) Pokud  $\sigma(0) = \{a^i b^j, i, j \geq 0\}$ ,  $\sigma(1) = \{cd\}$   
tak  $\sigma(010) = \{a^i b^j cda^k b^l, i, j, k, l \geq 0\}$ .

# Homomorfizmus a inverzní homomorfizmus jazyků

## Definition 4.2 (homomorfizmus (jazyků), inverzní homomorfizmus)

**homomorfizmus**  $h$  je speciální případ substituce, kde obraz je vždy jen jednoslovný jazyk (vynecháváme u něj závorky), tj.  $(\forall x \in \Sigma) h(x) = w_x$ . Pokud  $\forall x : w_x \neq \lambda$ , jde o **nevypouštějící homomorfizmus**.

**Inverzní homomorfizmus**  $h^{-1}(L) = \{w | h(w) \in L\}$ .

## Example 4.2 (homomorfizmus)

homomorfizmus  $h$  definujeme:  $h(0) = ab$ , a  $h(1) = \lambda$ . Pak  $h(0011) = abab$ . Pro  $L = 10^*1$  je  $h(L) = (ab)^*$ .

## Theorem 4.1 (uzavřenost na homomorfizmus)

*Je-li jazyk  $L$  i  $\forall x \in \Sigma$  jazyk  $\sigma(x), h(x)$  regulární, pak je regulární i  $\sigma(L), h(L)$ .*

## Proof.

Strukturální indukci 'probubláváním' algebraickým popisem jazyka základních, sjednocení, zřetězení a iterace. Tvzení:  $\sigma(L(E)) = L(\underline{\sigma}(E))$ .  $\sigma(\{\lambda\}) = \lambda$ ,  $\sigma(\emptyset) = \emptyset$ ,  $\sigma(\{x\}) = \underline{\sigma}(x)$ ,  $\sigma(L(\alpha + \beta)) = L(\underline{\sigma}(\alpha) + \underline{\sigma}(\beta))$  atd. □

# Přehled definic k 'probublání' substitute

Regulární výrazy:

	výraz $\alpha$	hodnota $L(\alpha) \equiv [\alpha]$
	$\lambda$	$L(\lambda) = \{\lambda\}$
	$\emptyset$	$L(\emptyset) = \{\} \equiv \emptyset$
• Základ:	<b>a</b>	$L(\mathbf{a}) = \{\mathbf{a}\}.$
	$\alpha + \beta$	$L(\alpha + \beta) = L(\alpha) \cup L(\beta)$
	$\alpha\beta$	$L(\alpha\beta) = L(\alpha)L(\beta)$
	$\alpha^*$	$L(\alpha^*) = L(\alpha)^*$
	$(\alpha)$	$L((\alpha)) = L(\alpha)$

Substitute

$$\sigma(\lambda) = \{\lambda\}$$

$$\sigma(u.v) = \sigma(u).\sigma(v)$$

$$\sigma(L) = \bigcup_{w \in L} \sigma(w)$$

Proof.

$$\begin{aligned}\sigma(L(\alpha)^*) &= \sigma(L(\alpha)^0) \cup \sigma(L(\alpha)^1) \cup \sigma(L(\alpha)^n) \cup \dots \\ &= L(\underline{\sigma}(\alpha)^0) \cup L(\underline{\sigma}(\alpha)^1) \cup L(\underline{\sigma}(\alpha)^n) \cup \dots \\ &= L(\sigma(\alpha)^*)\end{aligned}$$

# Inverzní homomorfizmus

## Definition ((4.2) Inverzní homomorfizmus)

Nechť  $h$  je homomorfizmus abecedy  $\Sigma$  do slov nad abecedou  $T$ . Pak  $h^{-1}(L)$  'h inverze  $L$ ' je množina řetězců

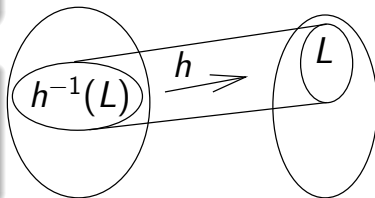
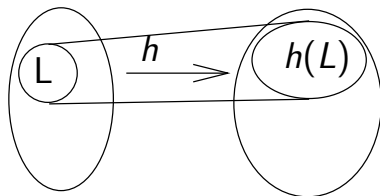
$$h^{-1}(L) = \{w \mid w \in \Sigma^*; h(w) \in L\}.$$

## Example 4.3

Nechť  $L = (\{00\} \cup \{1\})^*$ ,  $h(a) = 01$  a  $h(b) = 10$ .

Pak  $h^{-1}(L) = (\{ba\})^*$ .

Důkaz:  $h((\{ba\})^*) \in L$  snadno.  
Ostatní  $w$  generují izolované 0 (rozbor případů).



Homomorfizmus  
dopředně a zpětně.

aplikovaný

# Inverzní homomorfizmus DFA

## Theorem 4.2

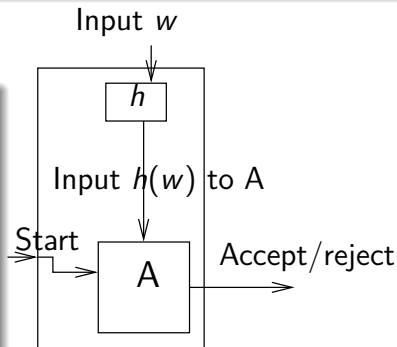
Je-li  $h$  homomorfizmus abecedy  $\Sigma$  do abecedy  $T$  a  $L$  je regulární jazyk abecedy  $T$ , pak  $h^{-1}(L)$  je také regulární jazyk.

## Proof.

Mějme DFA  $A = (Q, T, \delta, q_0, F)$  pro  $L$ .  
Konstruujeme DFA pro  $h^{-1}(L)$ .

- Definujeme  $B(Q, \Sigma, \gamma, q_0, F)$  kde  $\gamma(q, a) = \delta^*(q, h(a))$  ( $\delta^*$  operace na řetězcích).
- Indukcí dle  $|w|$ ,  
 $\gamma^*(q_0, w) = \delta^*(q_0, h(w))$ .
- Proto  $B$  přijímá právě řetězce  $w \in h^{-1}(L)$ .

□



DFA pro  $h^{-1}(L)$  aplikuje  $h$  na svůj vstup a simuluje DFA pro  $L$ .

# Příklad: Navštív všechny stavy

## Example 4.4

Nechť  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$  je DFA. Definujme jazyk  $L = \{w \in \Sigma^*; \delta^*(q_0, w) \in F$  a pro každý stav  $q \in Q$  existuje prefix  $x_q$  slova  $w$  tak, že  $\delta^*(q_0, x_q) = q\}$ . Tento jazyk  $L$  je regulární.

$M$  Označme  $M = L(A)$ .

$T$  Definujme novou abecedu  $T$  trojic  $\{[paq]; p, q \in Q, a \in \Sigma, \delta(p, a) = q\}$ .

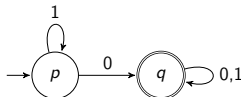
$h$  Definujme homomorfizmus  $(\forall p, q, a) h([paq]) = a$ .

$L_1$  Jazyk  $L_1 = h^{-1}(M)$  je regulární, protože  $M$  je regulární (DFA inverzní homomorfizmus).

- $h^{-1}(101)$  obsahuje  $2^3 = 8$  řetězců, např.

$$[p1p][q0q][p1p] \in \{[p1p], [q1q]\}\{[p0q], [q0q]\}\{[p1p], [q1q]\}.$$

- Dále zkonstruujeme  $L$  z  $L_1$  (další slide).





$L_2$  Vynutíme začátek  $q_0$ . Definujeme

$$E_1 = \bigcup_{a \in \Sigma, q \in Q} \{[q_0 a q]\} =$$

$$E_1 = \{[q_0 a_1 q_0], [q_0 a_2 q_1], \dots, [q_0 a_m q_n]\}.$$

Pak  $L_2 = L_1 \cap L(E_1 \cdot T^*)$ .

$L_3$  Vynutíme stejné sousedící stavy.

Definujeme ne–odpovídající dvojice

$$E_2 = \bigcup_{q \neq r, p, q, r, s \in Q, a, b \in \Sigma} \{[p a q][r b s]\}.$$

Definujeme  $L_3 = L_2 - L(T^* \cdot E_2 \cdot T^*)$ ,

- Končí v přijímajícím stavu, protože jsme začali z jazyku  $M$  přijímaném DFA  $A$ .

$L_4$  Všechny stavy.  $\forall q \in Q$  definujeme  $E_q$  jako regulární výraz sjednocení všech symbolů  $T$  takových, že  $q$  není ani na první, ani na poslední pozici. Odečteme  $L(E_q^*)$  od  $L_3$ .  $L_4 = L_3 - \bigcup_{q \in Q} \{E_q^*\}$ .

$L$  Odstraníme stavy, necháme symboly.  
 $L = h(L_4)$ . Tedy  $L$  je regulární.

Přehled:

$$M = L(A)$$

Inverzní homom.

$$L_1 \quad h^{-1}(M) \subseteq \{[qap]\}^*$$

průnik RJ

$$L_2 + q_0$$

rozdíl RJ

$$L_3 + \text{sousední stavy rovny}$$

rozdíl RJ

$$L_4 + \text{všechny stavy}$$

homomorfismus

$$L \quad h([qap]) = a$$

# Rozhodovací problémy pro regulární jazyky

## Lemma (Test ne-prázdnoti regulárního jazyka)

*Lze algoritmicky rozhodnout, zda jazyk přijímaný DFA, NFA,  $\lambda$  je prázdný.*

Jazyk je prázdný právě když žádný z koncových stavů není dosažitelný.  
Dosažitelnost lze testovat  $O(n^2)$ .

## Lemma (Test náležením do regulárního jazyka)

*Pro daný řetězec  $w$ ;  $|w| = n$  a regulární jazyk  $L$ . Lze algoritmicky rozhodnout, zda je  $w \in L$ .*

- DFA: Spust' automat; pokud  $|w| = n$ , při dobré reprezentaci a konstatním čase přechodu  $O(n)$ .
- NFA o  $s$  stavech: čas  $O(ns^2)$ . Každý vstupní symbol aplikujeme na všechny stavy předchozího kroku, kterých je nejvýš  $s$ .
- $\lambda$ -NFA - nejdříve určíme  $\lambda$ -uzávěr. Pak aplikujeme přechodovou funkci a  $\lambda$ -uzávěr na výsledek.

## Definition (3.3 RJ – algebraický popis jazyků)

Pro konečnou neprázdnou abecedu  $\Sigma$  označme  $RJ(\Sigma)$  nejmenší třídu jazyků, která:

- obsahuje prázdný jazyk  $\emptyset$
- pro každé písmeno  $x \in \Sigma$  obsahuje jazyk  $\{x\}$
- je uzavřená na sjednocení  $A, B \in RJ(\Sigma) \Rightarrow A \cup B \in RJ(\Sigma)$
- je uzavřená na zřetězení  $A, B \in RJ(\Sigma) \Rightarrow A.B \in RJ(\Sigma)$
- je uzavřená na iteraci  $A \in RJ(\Sigma) \Rightarrow A^* \in RJ(\Sigma)$ .

## Theorem (3.3 Kleene)

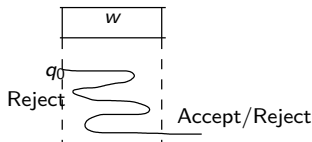
*Libovolný jazyk je rozpoznatelný konečným automatem právě když je ve třídě RJ.*

Třída regulárních jazyků je uzavřená na

- sjednocení, průnik, doplněk
- zřetězení, iteraci, substituci, homomorfizmus, inverzní homomorfizmus
- reverzi, levý i pravý kvocient.

# Dvousměrné (dvoucestné) konečné automaty

- Konečný automat provádí následující činnosti:
  - přečte písmeno
  - změni stav vnitřní jednotky
  - posune čtecí hlavu doprava
- Čtecí hlava se nesmí vracet.



## Definition 5.1 (Dvousměrné (dvoucestné) konečné automaty)

**Dvousměrným (dvoucestným) konečným automatem** nazýváme pěticu

$A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ , kde

$Q$  je konečná množina stavů,

$\Sigma$  je konečná množina vstupních symbolů

přechodové funkce  $\delta$  je zobrazení  $Q \times \Sigma \rightarrow Q \times \{-1, 1\}$  rozšířené o pohyb hlavy

$q_0 \in Q$  počáteční stav

množina přijímajících stavů  $F \subseteq Q$ .

Pozn.: Je deterministický, nedeterministický zavádět nebudeme.

Pozn.2: Nulový pohyb hlavy lze, jen trochu zkomplikuje důkaz dále.

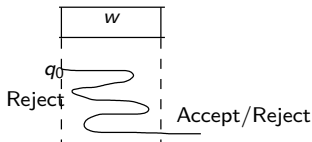
- Reprezentujeme opět stavovým diagramem, tabulkou.

# Výpočet dvousměrného automatu

## Definition 5.2 (Výpočet dvousměrného automatu)

Slovo  $w$  je **přijato dvousměrným konečným automatem**, pokud:

- výpočet začal na prvním písmenu slova  $w$  vlevo v počátečním stavu
- čtecí hlava poprvé opustila slovo  $w$  vpravo v některém přijímajícím stavu
- mimo čtené slovo není výpočet definován (výpočet zde končí a slovo není přijato).



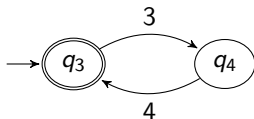
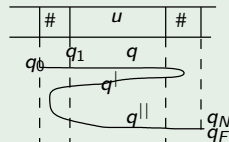
- Ke slovům si můžeme přidat speciální koncové znaky  $\# \notin \Sigma$
- funkce  $\partial_{\#}$  odstraní  $\#$  zleva,  $\partial_{\#}^R$  zprava.
- Je-li  $L(A) = \{\#w\# \mid w \in L \subseteq \Sigma^*\}$  regulární, potom i  $L$  je regulární
- $L = \partial_{\#} \partial_{\#}^R (L(A) \cap \# \Sigma^* \#)$ .

# Příklad dvousměrného automatu

## Example 5.1 (Příklad dvousměrného automatu)

Nechť  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_1, F)$ . Dvousměrný konečný automat  $B = (Q \cup Q^I \cup Q^{II} \cup \{q_0, q_N, q_F\}, \Sigma \cup \{\#\}, \delta^I, q_0, \{q_F\})$  přijímající jazyk  $L(B) = \{\#u\# \mid uu \in L(A)\}$  (toto NENÍ levý ani pravý kvocient!) definujeme následovně:

$\delta^I$	$x \in \Sigma$	#	poznámka
$q_0$	$q_N, -1$	$q_1, +1$	$q_1$ je počátek $A$
$q$	$p, +1$	$q^I, -1$	$p = \delta(q, x)$
$q^I$	$q^I, -1$	$q^{II}, +1$	
$q^{II}$	$p^{II}, +1$	$q_F, +1$	$q \in F, p = \delta(q, x)$
$q^{II}$	$p^{II}, +1$	$q_N, +1$	$q \notin F, p = \delta(q, x)$
$q_N$	$q_N, +1$	$q_N, +1$	
$q_F$	$q_N, +1$	$q_N, +1$	



## Theorem 5.1

*Jazyky přijímané dvousměrnými konečnými automaty jsou právě regulární jazyky.*

Proof: konečný automat  $\rightarrow$  dvousměrný automat

- Konečný automat předevedeme na dvousměrný přidáním posunu hlavy vpravo
- $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F) \rightarrow 2A = (Q, \Sigma, \delta^l, q_0, F)$ , kde  $\delta^l(q, x) = (\delta(q, x), +1)$ .



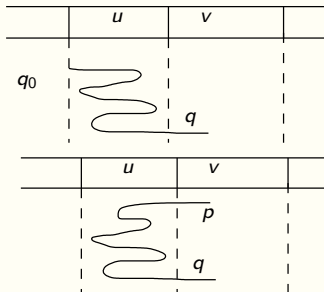
- Možnost pohybovat čtecí hlavou po pásce nezvětšila sílu konečného automatu (dokud na pásku nic nepíšeme!).
- Pro důkaz potřebujeme přípravu

# Funkce $f_u$ popisující výpočet 2DFA nad slovem $u$

## Algorithm: Funkce $f_u$ popisující výpočet 2DFA nad slovem $u$

Definujeme funkci  $f_u : Q \cup \{q_0^|\}$   $\rightarrow Q \cup \{0\}$

- $f_u(q_0^|)$  popisuje v jakém stavu poprvé odejdeme vpravo, pokud začneme výpočet vlevo v počátečním stavu  $q_0$ ,
- $f_u(p)$ ;  $p \in Q$  v jakém stavu opět odejdeme vpravo, pokud začneme výpočet vpravo v  $p$
- symbol 0 značí, že daná situace nenastane (odejdeme vlevo nebo cyklus)
- Definujeme ekvivalenci slov následovně:  $u \sim w \Leftrightarrow_{\text{def}} f_u = f_w$ ,
  - tj. slova jsou ekvivalentní pokud mají stejné 'výpočtové' funkce



## Regulárnost 2DFA

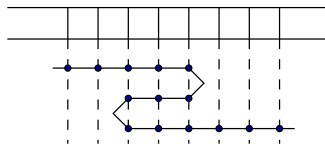
Ekvivalence  $\sim$  je ekvivalence, má konečný index, je to pravá kongruence, jazyk 2DFA odpovídá sjednocení tříd  $f_w(q_0^|) \in F$ .

Podle Myhill–Nerodovy věty je  $L(A)$  regulární jazyk.



# Konstruktivní důkaz věty o 2DFA

- Potřebujeme převést návraty na lineární výpočet.
- Zajímají nás jen přijímající výpočty
- Díváme se na řezy mezi symboly (v jakém stavu přechází na další políčko)



## Pozorování:

- stavy se v přechodu řezu střídají (doprava, doleva)
- první stav jde doprava, poslední také doprava
- v deterministických přijímajících výpočtech nejsou cykly
- první a poslední řez obsahují jediný stav

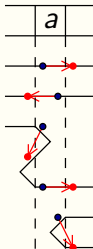
## Algorithm: 2DFA $\rightarrow$ NFA

- Najdeme všechny možné řezy – posloupnosti stavů (je jich konečně mnoho).
- Mezi řezy definujeme nedeterministické přechody podle čteného symbolu.
- Rekonstruuujeme výpočet skládáním řezů jako puzzle.

## Algorithm: Formální převod 2DFA na NFA

Nechť  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$  je dvousměrný (deterministický) konečný automat. Definujeme ekvivalentní nedeterministický automat  $B = (Q^l, \Sigma, \delta^l, (q_0), F^l)$  kde:

- $Q^l$  jsou všechny korektní přechodové posloupnosti
  - posloupnosti stavů  $(q^1, \dots, q^k); q^i \in Q$
  - délka posloupnosti je lichá ( $k = 2m + 1$ )
  - žádný stav se neopakuje na liché ani na sudé pozici  
( $\forall i \neq j$ ) ( $q^{2i} \neq q^{2j}$ ) & ( $\forall i \neq j$ ) ( $q^{2i+1} \neq q^{2j+1}$ )
- $F^l = \{(q) | q \in F\}$  posloupnosti délky 1
- $\delta^l(c, a) = \{d | d \in Q^l \& c \xrightarrow{a} d \text{ je lokálně konzistentní přechod pro } a\} \subset Q^l$ 
  - existuje bijekce:  $h : c_{\text{odd}} \cup d_{\text{even}} \rightarrow c_{\text{even}} \cup d_{\text{odd}}$ , tak, že:
  - pro  $h(q) \in c_{\text{even}}$  je  $(h(q), -1) = \delta(q, a)$
  - pro  $h(q) \in d_{\text{odd}}$  je  $(h(q), +1) = \delta(q, a)$



$$L(A) = L(B)$$

Trajektorie 2DFA  $A$  odpovídá řezům v FA  $B$ , odtud  $L(A) = L(B)$ .

# Příklad převodu 2DFA na NKA

## Možné řezy a jejich přechody

- Mějme následující dvousměrný konečný automat:

	a	b
$\rightarrow p$	$p, +1$	$q, +1$
$*q$	$q, +1$	$r, -1$
$r$	$p, +1$	$r, -1$

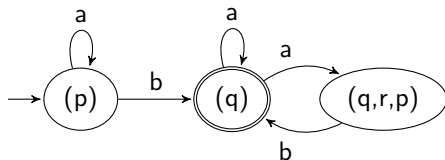
- Doleva jediné  $r$  – všechny sudé pozice  $r$ , tj. jediná sudá
- možné řezy:  $(p), (q), (p, r, q), (q, r, p)$ .

	a	b
$\rightarrow (p)$	$(p)$	$(q)$
$*(q)$	$(q), (q, r, p)$	
$(p, r, q)$		
$(q, r, p)$		$(q)$

Ukázka (zacykleného, nepřijímajícího) výpočtu:

a	a	b	a	a	b	a	a	b	b
p	p	p	q	q	q				
					r				
					p	q	q	q	
							r		
					p		q		
					r		r		
					p		q		

Výsledný NFA:



- Obecnější modely, které přijímají stále jen regulární jazyky:
  - nedeterministické konečné automaty NFA
  - NFA s  $\lambda$  přechody
  - dvousměrné konečné automaty (nepíší na pásku + prostor omezený vstupem)
- usnadní nám návrh automatu, zjednoduší zápis
- umíme převést na DFA.

# Automaty s výstupem (motivace)

- Dosud jediná zpráva z automatu: 'Jsme v přijímajícím stavu'.
- Můžeme z FA získat více informací? Můžeme zaznamenat trasu výpočtu?

Moore: indikace stavů (všech, nejen koncových)

- v každé chvíli víme, kde se automat nachází
- Příklad: různé (regulární) čítače

Mealy: indikace přechodů

- po přečtení každého symbolu víme, co automat dělal
- Příklad: regulární překlad slov

Automat už není tak docela černá skříňka.

## Definition 5.3 (Mooreův stroj)

**Mooreovým (sekvenčním) strojem** nazýváme šestici  $A = (Q, \Sigma, Y, \delta, \mu, q_0)$  resp. pěticí  $A = (Q, \Sigma, Y, \delta, \mu)$ , kde

$Q$  je konečná neprázdná množina stavů

$\Sigma$  je konečná neprázdná množina symbolů (vstupní abeceda)

$Y$  je konečná neprázdná množina symbolů (**výstupní abeceda**)

$\delta$  je zobrazení  $Q \times \Sigma \rightarrow Q$  (přechodová funkce)

$\mu$  je zobrazení  $Q \rightarrow Y$  (**značkovací funkce**)

$q_0 \in Q$  (počáteční stav)

- Někdy nás nezajímá počáteční stav, ale jen práce automatu
- značkovací funkce umožňuje suplovat roli koncových stavů
  - $F \subseteq Q$  nahradíme značkovací funkcí  $\mu : Q \rightarrow \{0, 1\}$  takto:  
 $\mu(q) = 0$  pokud  $q \notin F$ ,  
 $\mu(q) = 1$  pokud  $q \in F$ .

# Příklad Mooreova stroje

## Example 5.2 (Mooreův stroj pro tenis)

Mooreův stroj pro počítání tenisového skóre.

- Vstupní abeceda: ID hráče, který uhrál bod
- Výstupní abeceda & stavy: skóre (tj.  $Q = Y$  a  $\mu(q) = q$ )

Stav/výstup	A	B
00:00	15:00	00:15
15:00	30:00	15:15
15:15	30:15	15:30
00:15	15:15	00:30
30:00	40:00	30:15
30:15	40:15	30:30
30:30	40:30	30:40
15:30	30:30	15:40
00:30	15:30	00:40
40:00	A	40:15
40:15	A	40:30
40:30	A	shoda
30:40	shoda	B
15:40	30:40	B
00:40	15:00	B
shoda	A:40	40:B
A:40	A	shoda
40:B	shoda	B
A	15:00	00:15
B	15:00	00:15

## Definition 5.4 (Mealyho stroj)

**Mealyho (sekvenčním) strojem** nazýváme šestici  $A = (Q, \Sigma, Y, \delta, \lambda_M, q_0)$  resp. pětici  $A = (Q, \Sigma, Y, \delta, \lambda_M)$ , kde

$Q$  je konečná neprázdná množina stavů

$\Sigma$  je konečná neprázdná množina symbolů (vstupní abeceda)

$Y$  je konečná neprázdná množina symbolů (výstupní abeceda)

$\delta$  je zobrazení  $Q \times \Sigma \rightarrow Q$  (přechodová funkce)

$\lambda_M$  je zobrazení  $Q \times \Sigma \rightarrow Y$  (**výstupní funkce**)

$q_0 \in Q$  (počáteční stav)

- Výstup je určen stavem a vstupním symbolem
  - Mealyho stroj je obecnějším prostředkem než stroj Mooreův
  - Značkovací funkci  $\mu : Q \rightarrow Y$  lze nahradit výstupní funkcí  $\lambda_M : Q \times \Sigma \rightarrow Y$  například takto:

$$\forall x \in \Sigma \quad \lambda_M(q, x) = \mu(q)$$

nebo  $\forall x \in \Sigma \quad \lambda_M(q, x) = \mu(\delta(q, x))$



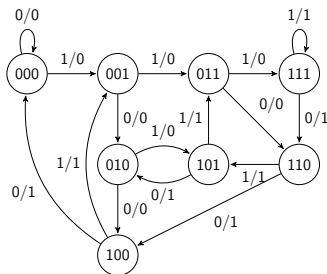
# Příklad Mealyho stroje

## Example 5.3 (Mealyho stroj)

Automat, který dělí vstupní slovo v binárním tvaru číslem 8 (celočíslně).

- Posun o tři bity doprava
- potřebujeme si pamatovat poslední trojici bitů
- vlastně tříbitová dynamická paměť

Stav \ symbol	0	1
000	000/0	001/0
001	010/0	011/0
010	100/0	101/0
011	110/0	111/0
100	000/1	001/1
101	010/1	011/1
110	100/1	101/1
111	110/1	111/1



- I když nevíme, kde automat startuje, po třech symbolech začne počítat správně.

# Výstup sekvenčních strojů

slovo ve vstupní abecedě  $\rightarrow$  slovo ve výstupní abecedě

Mooreův stroj

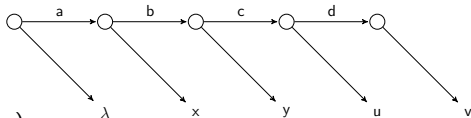
značková funkce  $\mu : Q \rightarrow Y$

$\mu^* : Q \times \Sigma^* \rightarrow Y^*$

$\mu^*(q, \lambda) = \lambda$  (někdy  $\mu^*(q, \lambda) = q$ )

$\mu^*(q, wx) = \mu^*(q, w) \cdot \mu(\delta^*(q, wx))$

Příklad:  $\mu^*(00:00, AABA) = (00:00 \ .) \ 15:00 \ . \ 30:00 \ . \ 30:15 \ . \ 40:15$



Mealyho stroj

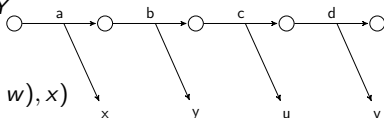
výstupní funkce  $\lambda_M : Q \times \Sigma \rightarrow Y$

$\lambda_M^* : Q \times \Sigma^* \rightarrow Y^*$

$\lambda_M^*(q, \lambda) = \lambda$

$\lambda_M^*(q, wx) = \lambda_M^*(q, w) \cdot \lambda_M(\delta^*(q, w), x)$

Příklad:  $\lambda_M^*(000, 1101010) = 0001101$



## Lemma (Převod Mooreova stroje na Mealyho)

*Pro každý Mooreův stroj existuje Mealyho stroj převádějící každé vstupní slovo na stejné výstupní slovo.*

### Proof.

- Nechť  $A = (Q, \Sigma, Y, \delta, \mu, q_0)$  je Mooreův stroj.
- Definujeme Mealyho stroj  $B = (Q, \Sigma, Y, \delta, \lambda_M, q_0)$ , kde  $\lambda_M(q, x) = \mu(\delta(q, x))$   
tj.  $\lambda_M$  vrací značku stavu, do kterého přejdeme.



### Example 5.4

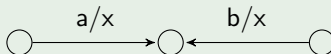
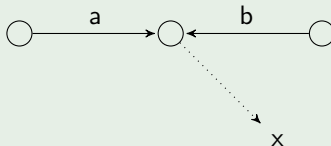
Mooreův stroj

stav	0	1	výstup
a	a	b	0
b	b	c	1
c	c	a	2

Mealyho stroj

se stejným výstupem

stav	0	1
a	a/0	b/1
b	b/1	c/2
c	c/2	a/0



# Převod Mealyho stroje na Mooreův

## Lemma (Převod Mealyho stroje na Mooreův)

*Pro každý Mealyho stroj existuje Mooreův stroj převádějící každé vstupní slovo na stejné výstupní slovo.*

Nechť  $A = (Q, \Sigma, Y, \delta, \lambda_M, q_0)$  je Mealyho stroj.

Sestrojíme Mooreův stroj  $B$  tak, aby  $\forall q, w \lambda_M^*(q, w) = \mu^*(q, w)$ .

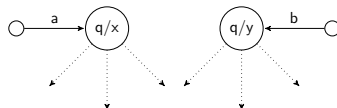
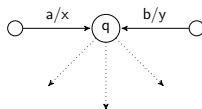
! Rozdělíme stav na více stavů, podle počtu výstupních symbolů.

$B = (Q \times (Y \cup \{\_ \}), \Sigma, Y, \delta^!, \mu, (q_0, \_))$ , kde  
 $\delta^!((q, y), x) = (\delta(q, x), \lambda_M(q, x))$  a  
 $\mu((q, y)) = y$

Příklad:

stav	0	1
a	a/0	b/0
b	a/1	b/1

stav	0	1	výstup
(a,0)	(a,0)	(b,0)	0
(a,1)	(a,0)	(b,0)	1
(b,0)	(a,1)	(b,1)	0
(b,1)	(a,1)	(b,1)	1



## Theorem

*Každé dva ekvivalentní redukované automaty jsou isomorfní.*

## Proof.

- Každý stav  $q \in Q_1$  je dosažitelný. Najdeme pro něj slovo  $q = \delta_1^*(q_{0_1}, w)$
- a definujeme  $h(q) = \delta_2^*(q_{0_2}, w)$ .
- Lze dokázat, že je  $h$  korektně definovaná funkce, zachovává vlastnosti homomorfizmu  $(q_0, F, \delta)$  a jde o bijekci, tj. je to isomorfismus.



# Konečné automaty – shrnutí

## Konečný automat

- redukováný deterministický automat (lze definovat i jednoznačný)
- nedeterminismus  $\lambda$ -NFA,  $2^n$ , (dvousměrný FA  $n^n$ )

## Regulární výrazy

## Automaty a jazyky

- regulární jazyky
- uzavřenost na množinové operace
- uzavřenost na řetězcové operace
- uzavřenost na substituci, homomorfizmus a inverzní homomorfizmus,
- automaty výše i regulární výrazy popisují stejnou třídu jazyků.

## Charakteristika regulárních jazyků

- Mihyll–Nerodova věta (kongruence)
- Kleeneova věta (elementární jazyky a operace)
- Iterační (pumping) lemma (iterace podslov, jen nutná podmínka).

## (Automaty s výstupem)

- (Mooreův stroj)
- (Mealyho stroj)

# Palindromy

## Definition (palindrom)

**Palindrom** je řetězec  $w$  stejný při čtení zepředu i zezadu, tj.  $w = w^R$ .

- Příklady: otto, Madam, I'm Adam.

## Lemma

Jazyk  $L_{pal} = \{w \mid w = w^R, w \in \Sigma^*\}$  není regulární.

## Example 6.1 (Bezkontextová gramatika pro palindromy)

1.  $S \rightarrow \lambda$
2.  $S \rightarrow 0$
3.  $S \rightarrow 1$
4.  $S \rightarrow 0S0$
5.  $S \rightarrow 1S1$

## Proof:

- Důkaz sporem. Předpokládejme  $L_{pal}$  je regulární, nechť  $n$  je konstanta z pumping lemma, uvažujme slovo:  $w = 0^n 1 0^n$ .
- z pumping lemmatu lze rozložit na  $w = xyz$ ,  $y$  obsahuje jednu nebo více z prvních  $n$  nul. Tedy  $xz$  má být v  $L_{pal}$  ale není, tj.  $L_{pal}$  není regulární.



# Formální (generativní) gramatiky, Bezkontextové gramatiky

## Definition 6.1 (Formální (generativní) gramatika)

Formální (generativní) gramatika je  $G = (V, T, P, S)$  složena z

- konečné množiny **neterminálů** (variables)  $V$
- neprázdné konečné množiny **terminálních symbolů** (**terminálů**)  $T$
- **počáteční symbol**  $S \in V$ .
- konečné množiny **pravidel** (**produkcí**)  $P$  reprezentující rekurzivní definici jazyka. Každé pravidlo má tvar:
  - $\beta A \gamma \rightarrow \omega, A \in V, \beta, \gamma, \omega \in (V \cup T)^*$   
tj. levá strana obsahuje aspoň jeden neterminální symbol.

## Definition (Bezkontextová gramatika CFG)

**Bezkontextová gramatika (CFG)** je  $G = (V, T, P, S)$  gramatika, obsahující pouze pravidla tvaru

$$A \rightarrow \omega, A \in V, \omega \in (V \cup T)^*.$$



## Definition 6.2 (Klasifikace gramatik podle tvaru přepisovacích pravidel)

- **gramatiky typu 0 (rekurzivně spočetné jazyky  $\mathcal{L}_0$ )**  
pravidla v obecné formě  $\alpha \rightarrow \omega$ ,  $\alpha, \omega \in (V \cup T)^*$ ,  $\alpha$  obsahuje neterminál
- **gramatiky typu 1 (kontextové gramatiky, jazyky  $\mathcal{L}_1$ )**
  - pouze pravidla ve tvaru  $\gamma A \beta \rightarrow \gamma \omega \beta$   
 $A \in V, \gamma, \beta \in (V \cup T)^*, \omega \in (V \cup T)^+$ !
  - jedinou výjimkou je pravidlo  $S \rightarrow \lambda$ , potom se ale  $S$  nevyskytuje na pravé straně žádného pravidla
- **gramatiky typu 2 (bezkontextové gramatiky, jazyky  $\mathcal{L}_2$ )**  
pouze pravidla ve tvaru  $A \rightarrow \omega$ ,  $A \in V, \omega \in (V \cup T)^*$
- **gramatiky typu 3 (regulární/pravé lineární gramatiky, regulární jazyky  $\mathcal{L}_3$ )**  
pouze pravidla ve tvaru  $A \rightarrow \omega B$ ,  $A \rightarrow \omega$ ,  $A, B \in V, \omega \in T^*$

# Uspořádanost Chomského hierarchie

- Chomského hierarchie definuje uspořádání tříd jazyků

$$\mathcal{L}_0 \supseteq \mathcal{L}_1 \supseteq \mathcal{L}_2 \supseteq \mathcal{L}_3$$

- dokonce vlastní podmnožiny (později)

$$\mathcal{L}_0 \supset \mathcal{L}_1 \supset \mathcal{L}_2 \supset \mathcal{L}_3$$

$\mathcal{L}_0 \supseteq \mathcal{L}_1$  rekurzivně spočetné jazyky zahrnují kontextové jazyky  
pravidla  $\gamma A \beta \rightarrow \gamma \omega \beta$  obsahují vlevo neterminál  $A$

$\mathcal{L}_2 \supseteq \mathcal{L}_3$  bezkontextové jazyky zahrnují regulární jazyky  
pravidla  $A \rightarrow \omega B, A \rightarrow \omega$  obsahují vpravo řetězec  $(V \cup T)^*$

$\mathcal{L}_1 \supseteq \mathcal{L}_2$  kontextové jazyky zahrnují bezkontextové jazyky  
problém je s pravidly typu  $A \rightarrow \lambda$ , ale ta umíme eliminovat.

## Example 6.2 (Notace)

$a, b, c, 1, *, ($	terminály
$A, B, C$	neterminály, proměnné
$w, z$	řetězec terminálů
$X, Y$	buď terminál nebo neterminál
$\alpha, \beta, \gamma$	řetězec $(T \cup V)^*$
$A \rightarrow \alpha   \beta$	$\{A \rightarrow \alpha, A \rightarrow \beta\}$ , OR, kompaktní zápis více pravidel.

# Derivace, Jazyk generovaný gramatikou $G$ , neterminálem $A$

## Definition 6.3 ( $\text{Derivace} \Rightarrow^*$ )

Mějme gramatiku  $G = (V, T, P, S)$ .

- Říkáme, že  $\alpha$  se **přímo přepíše** na  $\omega$  (píšeme  $\alpha \Rightarrow_G \omega$  nebo  $\alpha \Rightarrow \omega$ ) jestliže  
 $\exists \beta, \gamma, \eta, \nu \in (V \cup T)^* : \alpha = \eta\beta\nu, \omega = \eta\gamma\nu$  a  $(\beta \rightarrow \gamma) \in P$ .
- Říkáme, že  $\alpha$  se **přepíše** na  $\omega$  (píšeme  $\alpha \Rightarrow^* \omega$ ) jestliže  
 $\exists \beta_1, \dots, \beta_n \in (V \cup T)^* : \alpha = \beta_1 \Rightarrow \beta_2 \Rightarrow \dots \Rightarrow \beta_n = \omega$ ,  
tj. také  $\alpha \Rightarrow^* \alpha$ .
- Posloupnost  $\beta_1, \dots, \beta_n$  nazýváme **derivací (odvozením)**.
- Pokud  $\forall i \neq j : \beta_i \neq \beta_j$ , hovoříme o **minimálním odvození**.

## Definition 6.4 (Jazyk generovaný gramatikou $G$ )

**Jazyk  $L(G)$**  generovaný gramatikou  $G = (V, T, P, S)$  je množina terminálních řetězců, pro které existuje derivace ze startovního symbolu

$$L(G) = \{w \in T^* \mid S \Rightarrow_G^* w\}.$$

**Jazyk neterminálu  $A \in V$**  definujeme  $L(A) = \{w \in T^* \mid A \Rightarrow_G^* w\}$ .

# Gramatiky typu 3 a regulární jazyky

## Definition (Gramatika typu 3, pravá lineární)

Gramatika  $G$  je **pravá lineární, tj. Typu 3**, pokud obsahuje pouze pravidla tvaru  $A \rightarrow wB, A \rightarrow w, A, B \in V, w \in T^*$ .

## Example 6.3 (Příklad derivace gramatiky typu 3)

$$P = \{S \rightarrow 0S|1A|\lambda, A \rightarrow 0A|1B, B \rightarrow 0B|1S\}$$

$$S \Rightarrow 0S \Rightarrow 01A \Rightarrow 011B \Rightarrow 0110B \Rightarrow 01101S \Rightarrow 01101$$

- Pozorování:
  - každé slovo derivace obsahuje právě jeden neterminál
  - tento neterminál je vždy umístěn zcela vpravo
  - aplikací pravidla  $A \rightarrow w$  se derivace uzavírá
  - krok derivace generuje symboly a změni neterminál
- Idea vztahu gramatiky a konečného automatu
- neterminál = stav konečného automatu
- pravidla = přechodová funkce

# Příklad převodu FA na gramatiku

## Example 6.4 (G, FA binární zápis čísla dělitelného 5)

$L = \{w \mid w \in \{a, b\}^* \text{ \& } w \text{ je binární zápis čísla dělitelného } 5\}$

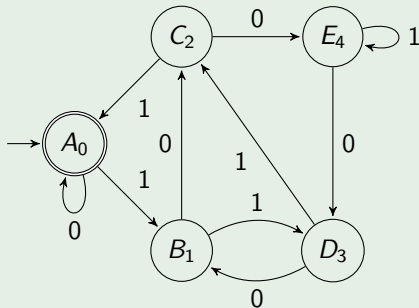
$A \rightarrow 1B \mid 0A \mid \lambda$

$B \rightarrow 0C \mid 1D$

$C \rightarrow 0E \mid 1A$

$D \rightarrow 0B \mid 1C$

$E \rightarrow 0D \mid 1E$



Příklady derivací

$A \Rightarrow 0A \Rightarrow 0$  (0)

$A \Rightarrow 1B \Rightarrow 10C \Rightarrow 101A \Rightarrow 101$  (5)

$A \Rightarrow 1B \Rightarrow 10C \Rightarrow 101A \Rightarrow 1010A \Rightarrow 1010$  (10)

$A \Rightarrow 1B \Rightarrow 11D \Rightarrow 111C \Rightarrow 1111A \Rightarrow 1111$  (15)

# Převod konečného automatu na gramatiku typu 3

**Theorem 6.1** ( $L \in RE \Rightarrow L \in \mathcal{L}_3$ )

*Pro každý jazyk rozpoznávaný konečným automatem existuje gramatika typu 3, která ho generuje.*

**Proof:** Převod konečného automatu na gramatiku typu 3

- $L = L(A)$  pro deterministický konečný automat  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ .
- definujeme gramatiku  $G = (Q, \Sigma, P, q_0)$ , kde pravidla  $P$  mají tvar
$$p \rightarrow aq, \quad \text{když } \delta(p, a) = q$$
$$p \rightarrow \lambda, \quad \text{když } p \in F$$
- je  $L(A) = L(G)$ ?
  - $\lambda \in L(A) \Leftrightarrow q_0 \in F \Leftrightarrow (q_0 \rightarrow \lambda) \in P \Leftrightarrow \lambda \in L(G)$
  - $a_1 \dots a_n \in L(A) \Leftrightarrow \exists q_0, \dots, q_n \in Q$  tž.  $\delta(q_i, a_{i+1}) = q_{i+1}, q_n \in F$ 
$$\Leftrightarrow (q_0 \Rightarrow a_1 q_1 \Rightarrow \dots a_1 \dots a_n q_n \Rightarrow a_1 \dots a_n)$$
 je derivace pro  $a_1 \dots a_n$ 
$$\Leftrightarrow a_1 \dots a_n \in L(G)$$



# Příprava převodu gramatiky typu 3 na FA

- Opačný směr
  - pravidla  $A \rightarrow aB$  kódujeme do přechodové funkce
  - pravidla  $A \rightarrow \lambda$  určují koncové stavy
  - pravidla  $A \rightarrow a_1 \dots a_n B$ ,  $A \rightarrow a_1 \dots a_n$  s více neterminály rozepíšeme
    - zavedeme nové neterminály  $Y_2, \dots, Y_n, Z_1, \dots, Z_n$
    - vytvoříme pravidla  $A \rightarrow a_1 Y_2$ ,  $Y_2 \rightarrow a_2 Y_3, \dots, Y_n \rightarrow a_n B$
    - resp.  $Z \rightarrow a_1 Z_1$ ,  $Z_1 \rightarrow a_2 Z_2, \dots, Z_{n-1} \rightarrow a_n Z_n$ ,  $Z_n \rightarrow \lambda$
  - pravidla  $A \rightarrow B$  odpovídají  $\lambda$  přechodům
    - zbavíme se jich tranzitivním uzávěrem
    - nebo musíme tranzitivně uzavřít  $S \rightarrow B$  pro hledání  $S \rightarrow \lambda$ .

## Lemma

*Ke každé gramatice typu 3 existuje gramatika typu 3, která generuje stejný jazyk a obsahuje pouze pravidla ve tvaru:  $A \rightarrow aB$ ,  $A \rightarrow \lambda$ ,  $A, B \in V$ ,  $a \in T$ .*

# Standardizace gramatiky typu 3

## Lemma

Ke každé gramatice typu 3 existuje gramatika typu 3, která generuje stejný jazyk a obsahuje pouze pravidla ve tvaru:  $A \rightarrow aB, A \rightarrow \lambda, A, B \in V, a \in T$ .

## Proof.

Pro gramatiku  $G = (V, T, S, P)$  definujeme  $G^| = (V^|, T, S, P^|)$ , kde pro každé pravidlo zavedeme dostatečný počet nových neterminálů  $Y_2, \dots, Y_n, Z_1, \dots, Z_n$  a definujeme

P	$P^ $
$A \rightarrow aB$	$A \rightarrow aB$
$A \rightarrow \lambda$	$A \rightarrow \lambda$
$A \rightarrow a_1 \dots a_n B$	$A \rightarrow a_1 Y_2, Y_2 \rightarrow a_2 Y_3, \dots, Y_n \rightarrow a_n B$
$Z \rightarrow a_1 \dots a_n$	$Z \rightarrow a_1 Z_1, Z_1 \rightarrow a_2 Z_2, \dots, Z_{n-1} \rightarrow a_n Z_n, Z_n \rightarrow \lambda$
odstraníme i pravidla: $A \rightarrow B$	tranzitivní uzávěr $U(A) = \{B   B \in V \& A \Rightarrow^* B\}$ $A \rightarrow w$ pro všechna $Z \in U(A)$ a $(Z \rightarrow w) \in P^ $





# Pouze pravidla $A \rightarrow aB, A \rightarrow \lambda$

## Example 6.5

P	$P $
$B \rightarrow a_1$	$B \rightarrow a_1 H_1, H_1 \rightarrow \lambda$
	$U(A) = \{A, B\}$ , proto
$A \rightarrow B$	$A \rightarrow a_1 H_2, H_2 \rightarrow \lambda$
$A \rightarrow a_2$	$A \rightarrow a_2 H_3, H_3 \rightarrow \lambda$

# Převod gramatiky typu 3 na konečný automat

Theorem 6.2 ( $\lambda$ -NFA pro gramatiku typu 3 rozpoznávající stejný jazyk)

*Pro každý jazyk  $L$  generovaný gramatikou typu 3 existuje  $\lambda$ -NFA rozpoznávající  $L$ .*

Proof: Převod gramatiky typu 3 na konečný automat

- Vezmeme  $G = (V, T, P, S)$  obsahující jen pravidla tvaru  $A \rightarrow aB$ ,  $A \rightarrow \lambda$ ,  $A, B \in V$ ,  $a \in T$  generující  $L$  (předchozí lemma)
- definujeme nedeterministický  $\lambda$ -NFA  $A = (V, T, \delta, S, F)$ , kde:  
$$F = \{A \mid (A \rightarrow \lambda) \in P\}$$
$$\delta(A, a) = \{B \mid (A \rightarrow aB) \in P\}$$
- $L(G) = L(A)$ 
  - $\lambda \in L(G) \Leftrightarrow (S \rightarrow \lambda) \in P \Leftrightarrow S \in F \Leftrightarrow \lambda \in L(A)$
  - $a_1 \dots a_n \in L(G) \Leftrightarrow$  existuje derivace  
 $(S \Rightarrow a_1 H_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow a_1 \dots a_n H_n \Rightarrow a_1 \dots a_n)$   
 $\Leftrightarrow \exists H_0, \dots, H_n \in V$  tak že  $H_0 = S, H_n \in F$   
 $H_{i+1} \in \delta(H_i, a_{i+1})$  pro krok  $a_1 \dots a_{i+1} H_i \Rightarrow a_1 \dots a_{i+1} H_{i+1}$
  - $a_1 \dots a_n \in L(A)$



# Levé (a pravé) lineární gramatiky

## Definition 6.5 (Levé (a pravé) lineární gramatiky)

Gramatiky typu 3 nazýváme také **pravé lineární** (neterminál je vždy vpravo). Gramatika  $G$  je **levá lineární**, jestliže má pouze pravidla tvaru  $A \rightarrow Bw, A \rightarrow w, A, B \in V, w \in T^*$ .

## Lemma

*Jazyky generované levou lineární gramatikou jsou právě regulární jazyky.*

## Proof:

- $\Rightarrow$  'otočením' pravidel levé lineární gramatiky dostaneme pravou lineární  $A \rightarrow Bw, A \rightarrow w$  převedeme na  $A \rightarrow w^R B, A \rightarrow w^R$
- získaná gramatika generuje jazyk  $L^R$ , najdeme automat
  - víme, že regulární jazyky jsou uzavřené na reverzi,  $L^R$  je regulární, tudíž i  $L = (L^R)^R$  je regulární
- $\Leftarrow$  takto lze získat všechny regulární jazyky
- (FA  $\Rightarrow$  reverse  $\Rightarrow$  pravá lineární gramatika  $\Rightarrow$  levá lineární gramatika) □

# Lineární gramatiky (a jazyky)

- Levá a pravá lineární pravidla dohromady jsou už silnější.

## Definition 6.6 (lineární gramatika, jazyk)

**Gramatika je lineární**, jestliže má pouze pravidla tvaru

$A \rightarrow uBw, A \rightarrow w, A, B \in V, u, w \in T^*$  (na pravé straně vždy maximálně jeden neterminál).

**Lineární jazyky** jsou právě jazyky generované lineárními gramatikami.

- Zřejmě platí: regulární jazyky  $\subseteq$  lineární jazyky.
- Jde o vlastní podmnožinu  $\subsetneq$ .

## Example 6.6 (lineární, neregulární jazyk)

Jazyk  $L = \{0^n 1^n \mid n \geq 1\}$  není regulární jazyk, ale je lineární, generovaný gramatikou s pravidly  $S \rightarrow 0S1 \mid 01$ .

Pozorování:

- lineární pravidla lze rozložit na levě a pravě lineární pravidla:  $S \rightarrow 0A, A \rightarrow S1$ .

# Bezkontextová gramatika pro jednoduché výrazy

## Definition (Bezkontextová gramatika)

Bezkontextová gramatika je gramatika, kde všechna pravidla jsou tvaru  
 $A \rightarrow \omega, \omega \in (V \cup T)^*$ .

## Example 6.7 (CFG pro jednoduché výrazy)

Gramatika pro jednoduché výrazy  
 $G = (\{E, I\}, \{+, *, (, ), a, b, 0, 1\}, P, E)$ ,  $P$   
jsou pravidla vypsána vpravo.

- Pravidla 1–4 definují výraz.
- Pravidla 5–10 definují identifikátor  $I$ , odpovídající regulárnímu výrazu  $(a + b)(a + b + 0 + 1)^*$ .

CFG pro jednoduché výrazy

1.  $E \rightarrow I$
2.  $E \rightarrow E + E$
3.  $E \rightarrow E * E$
4.  $E \rightarrow (E)$
5.  $I \rightarrow a$
6.  $I \rightarrow b$
7.  $I \rightarrow Ia$
8.  $I \rightarrow Ib$
9.  $I \rightarrow I0$
10.  $I \rightarrow I1$

## Definition 6.7 (Derivační strom)

Mějme gramatiku  $G = (V, T, P, S)$ . **Derivační strom** pro  $G$  je strom, kde:

- Kořen (kreslíme nahoře) je ozančen startovním symbolem  $S$ ,
- každý vnitřní uzel je ohodnocen neterminálem  $V$ .
- Každý uzel je ohodnocen prvkem  $\in V \cup T \cup \{\lambda\}$ .
- Je-li uzel ohodnocen  $\lambda$ , je jediným dítětem svého rodiče.
- Je-li  $A$  ohodnocení vrcholu a jeho děti **zleva pořadě** jsou ohodnoceny  $X_1, \dots, X_k$ , pak  $(A \rightarrow X_1, \dots, X_k) \in P$  je pravidlo gramatiky.

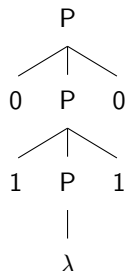
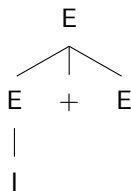
## Notation 1 (Terminologie stromů)

*Uzly, rodiče, děti, kořen, vnitřní uzly, listy, následníci, předci.*

- Stromová struktura reprezentuje zdrojový program v překladači. Struktura usnadňuje překlad do strojového kódu.

# Příklady stromů, Strom dává slovo (yield)

Derivační strom  $E \Rightarrow^* I + E$ . Derivační strom  $P \Rightarrow^* 0110$ .



## Definition 6.8 (Strom dává slovo (yield))

Říkáme, že **derivační strom dává slovo  $w$  (yield)**, jestliže  $w$  je slovo složené z ohodnocení listů bráno zleva doprava.

# Levá a pravá derivace

## Definition 6.9 (Levá a pravá derivace)

**Levá derivace** (leftmost)  $\Rightarrow_{lm}, \Rightarrow_{lm}^*$  v každém kroku přepisuje nejlevnější neterminál.

**Pravá derivace** (rightmost)  $\Rightarrow_{rm}, \Rightarrow_{rm}^*$  v každém kroku přepisuje nejpravější neterminál.

## Example 6.8 (levá derivace)

$$\begin{aligned} E &\Rightarrow_{lm} E * E \Rightarrow_{lm} I * E \Rightarrow_{lm} a * E \Rightarrow_{lm} a * (E) \Rightarrow_{lm} a * (E + E) \Rightarrow_{lm} a * (I + E) \Rightarrow_{lm} \\ &\Rightarrow_{lm} a * (a + E) \Rightarrow_{lm} a * (a + I) \Rightarrow_{lm} a * (a + I0) \Rightarrow_{lm} a * (a + I00) \Rightarrow_{lm} a * (a + b00) \end{aligned}$$

Pravá derivace používá stejné přepisy, jen je provádí v jiném pořadí.

## Example 6.9 (rightmost derivation)

$$\begin{aligned} E &\Rightarrow_{rm} E * E \Rightarrow_{rm} E * (E) \Rightarrow_{rm} E * (E + E) \Rightarrow_{rm} E * (E + I) \Rightarrow_{rm} \\ &\Rightarrow_{rm} E * (E + I0) \Rightarrow_{rm} E * (E + I00) \Rightarrow_{rm} E * (E + b00) \Rightarrow_{rm} \\ &\Rightarrow_{rm} E * (I + b00) \Rightarrow_{rm} E * (a + b00) \Rightarrow_{rm} I * (a + b00) \Rightarrow_{rm} a * (a + b00) \end{aligned}$$



## Theorem 6.3

*Pro danou gramatiku  $G = (V, T, P, S)$  a  $w \in T^*$  jsou následující tvrzení ekvivalentní:*

- $A \Rightarrow^* w$ .
- $A \Rightarrow_{lm}^* w$ .
- $A \Rightarrow_{rm}^* w$ .
- *Existuje derivační strom s kořenem  $A$  dávající slovo  $w$ .*

# Od stromů k derivaci

## Lemma

Mějme CFG  $G = (V, T, P, S)$  a derivační strom s kořenem  $A$  dávající slovo  $w \in T^*$ .

Pak existuje levá derivace  $A \Rightarrow_{lm}^* w$  v  $G$ .

## Příprava důkazu: 'obalení derivace'

Mějme následující derivaci:

$$E \Rightarrow I \Rightarrow Ib \rightarrow ab.$$

Pro libovolná slova  $\alpha, \beta \in (V \cup T)^*$  je také derivace:

$$\alpha E \beta \Rightarrow \alpha I \beta \Rightarrow \alpha I b \beta \Rightarrow \alpha a b \beta.$$

Indukcí podle výšky stromu.

- Základ: výška 1: Kořen  $A$  s dětmi dávajícími  $w$ . Je to derivační strom, proto,  $A \rightarrow w$  je pravidlo  $\in P$ , tedy  $A \Rightarrow_{lm} w$  v jednom kroku.
- Indukce: výška  $n > 1$ . Kořen  $A$  s dětmi  $X_1, X_2, \dots, X_k$ .
  - Je-li  $X_i \in T$ , definujeme  $w_i \equiv X_i$ .
  - Je-li  $X_i \in V$ , z indukčního předpokladu  $X_i \Rightarrow_{lm}^* w_i$ .

Levou derivaci konstruujeme induktivně pro  $i = 1, \dots, k$  složíme  $A \Rightarrow_{lm}^* w_1 w_2 \dots w_i X_{i+1} X_{i+2} \dots X_k$ .

- Pro  $X_i \in T$  jen zvedneme čítač  $i++$ .
- Pro  $X_i \in V$  přepíšeme derivaci:  $X_i \Rightarrow_{lm} \alpha_1 \Rightarrow_{lm} \alpha_2 \dots \Rightarrow_{lm} w_i$  na

$$w_1 w_2 \dots w_{i-1} X_i X_{i+1} X_{i+2} \dots X_k \Rightarrow_{lm}$$

$$w_1 w_2 \dots w_{i-1} \alpha_1 X_{i+1} X_{i+2} \dots X_k \Rightarrow_{lm}$$

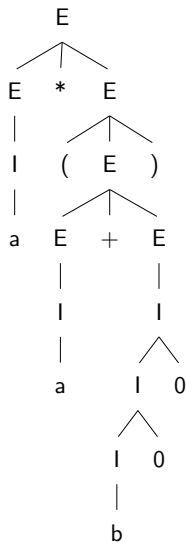
...

$$\Rightarrow_{lm} w_1 w_2 \dots w_{i-1} w_i X_{i+1} X_{i+2} \dots X_k.$$

Pro  $i = k$  dostaneme levou derivaci  $w$  z  $A$ .



# Příklad levé derivace z derivačního stromu



Je příjemnější zachytit derivaci stromem.

- Kořen:  $E \Rightarrow_{lm} E * E$
- Levé dítě kořene:  $E \Rightarrow_{lm} I \Rightarrow_{lm} a$
- Kořen a levé dítě:  $E \Rightarrow_{lm} E * E \Rightarrow_{lm} I * E \Rightarrow_{lm} a * E$
- Pravé dítě kořene:  
 $E \Rightarrow_{lm} (E) \Rightarrow_{lm} (E + E) \Rightarrow_{lm} (I + E) \Rightarrow_{lm} (a + E)$   
 $\Rightarrow_{lm} (a + I) \Rightarrow_{lm} (a + I0) \Rightarrow_{lm} (a + I00) \Rightarrow_{lm} (a + b00)$
- Plná derivace:  
 $E \Rightarrow_{lm} E * E \Rightarrow_{lm} I * E \Rightarrow_{lm} a * E \Rightarrow_{lm}$   
 $\Rightarrow_{lm} a * (E) \Rightarrow_{lm} a * (E + E) \Rightarrow_{lm} a * (I + E) \Rightarrow_{lm}$   
 $\Rightarrow_{lm} a * (a + E) \Rightarrow_{lm} a * (a + I) \Rightarrow_{lm} a * (a + I0) \Rightarrow_{lm}$   
 $\Rightarrow_{lm} a * (a + I00) \Rightarrow_{lm} a * (a + b00).$

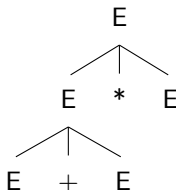
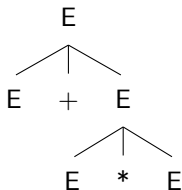
## Definition 6.10 (ekvivalence gramatik)

Gramatiky  $G_1$ ,  $G_2$  jsou **ekvivalentní**, jestliže  $L(G_1) = L(G_2)$ , tj. generují stejný jazyk.

# Víceznačnost gramatik

Dvě derivace téhož výrazu:

$$E \Rightarrow E + E \Rightarrow E + E * E \quad E \Rightarrow E * E \Rightarrow E + E * E$$



- Rozdíl je důležitý, vlevo  $1 + (2 * 3) = 7$ , vpravo  $(1 + 2) * 3 = 9$ .
- Tato gramatika může být modifikovaná na jednoznačnou.

## Example 6.10

Různé derivace mohou reprezentovat stejný derivační strom, pak není problém.

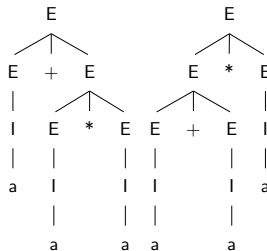
1.  $E \Rightarrow E + E \Rightarrow I + E \Rightarrow a + E \Rightarrow a + I \Rightarrow a + b$
2.  $E \Rightarrow E + E \Rightarrow E + I \Rightarrow I + I \Rightarrow I + b \Rightarrow a + b$ .

### Definition 6.11 (Jednoznačnost a víceznačnost CFG)

- Bezkontextová gramatika  $G = (V, T, P, S)$  je **víceznačná** pokud existuje aspoň jeden řetězec  $w \in T^*$  pro který můžeme najít dva různé derivační stromy, oba s kořenem  $S$  dávající slovo  $w$ .
- V opačném případě nazýváme gramatiku **jednoznačnou**.
- Bezkontextový jazyk  $L$  je **jednoznačný**, jestliže existuje jednoznačná CFG  $G$  tak, že  $L = L(G)$ .
- Bezkontextový jazyk  $L$  je (podstatně) nejednoznačný**, jestliže každá CFG  $G$  taková, že  $L = L(G)$ , je nejednoznačná. Takovému jazyku říkáme i **víceznačný**.

### Example 6.11 (nejednoznačnost CFG)

Dva derivační stromy dávající  $a + a * a$  ukazující víceznačnost gramatiky.



# Příklad víceznačného jazyka

## Example 6.12 (Víceznačný jazyk)

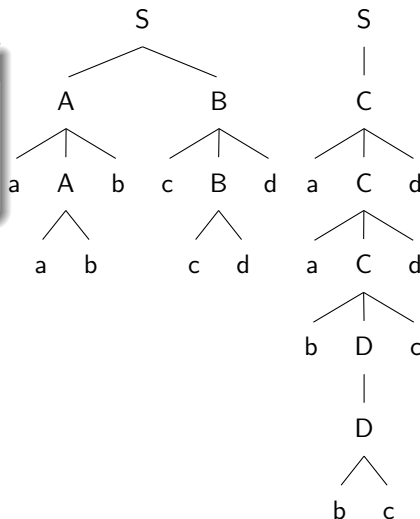
Příklad víceznačného jazyka:

$$L = \{a^n b^n c^m d^m \mid n \geq 1, m \geq 1\} \cup \{a^n b^m c^m d^n \mid n \geq 1, m \geq 1\}.$$

1.  $S \rightarrow AB|C$
2.  $A \rightarrow aAb|ab$
3.  $B \rightarrow cBd|cd$
4.  $C \rightarrow aCd|aDd$
5.  $D \rightarrow bDc|bc$ .

Jakákoli gramatika pro daný jazyk bude generovat pro některá slova typu  $a^n b^n c^n d^n$  dva různé derivační stromy.

Dva derivační stromy pro  $aabbccdd$ .





# Odstanění víceznačnosti gramatiky

- Neexistuje algoritmus, který nám řekne, zda je daná gramatika víceznačná.
- Existují bezkontextové jazyky, pro které neexistuje jednoznačná bezkontextová gramatika, pouze víceznačné CFG.
- Existují určitá doporučení pro odstranění víceznačnosti.

Víceznačnost má různé příčiny:

- Není respektovaná priorita operátorů.
- Posloupnost identických operátorů lze shlukovat zleva i zprava.
- $S \rightarrow \text{if then } S \text{ else } S \mid \text{if then } S \mid \lambda$   
slovo 'if then if then else' má dva významy

'if then (if then else)' nebo 'if then (if then) else'

Řešení:

- syntaktická chyba (Algol 60)
- else patří k bližšímu if (preference pořadí pravidel)
- závorky begin-end, odsazení v Python (asi nejčistší řešení).

# Vynucení priority

Řešením je zavést více různých proměnných, každou pro jednu úroveň 'priority'.

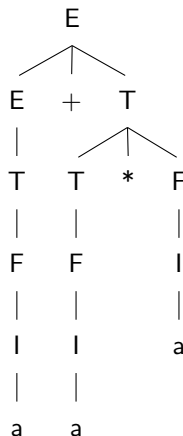
Konkrétně:

- **Faktor** je výraz který nesmí rozdělit žádný operátor.
  - identifikátory
  - výraz v závorkách
- **Term** je výraz, který nemůže rozdělit operátor  $+$ .
- **Výraz** může být rozdělen  $*$  i  $+$ .

Jednoznačná gramatika pro výrazy:

1.  $I \rightarrow a|b|Ia|Ib|I0|I1$
2.  $F \rightarrow I|(E)$
3.  $T \rightarrow F|T * F$
4.  $E \rightarrow T|E + T$ .

Jediný derivační strom pro  $a + a * a$ .



Kompilace výrazu (zásobník na mezivýsledky + dva registry):

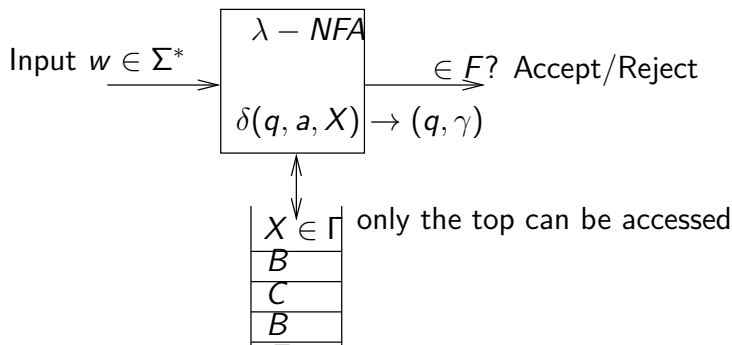
- (1)  $E \rightarrow E + T$  ... pop r1; pop r2; add r1,r2; push r2
- (2)  $E \rightarrow T$
- (3)  $T \rightarrow T * F$  ... pop r1; pop r2; mul r1,r2; push r2
- (4)  $T \rightarrow F$
- (5)  $F \rightarrow (E)$
- (6)  $F \rightarrow a$  ... push a

- 'a+a\*a' získáme postupnou aplikací pravidel 1,2,4,6,3,4,6,6
- posloupnost obrátíme a vybereme pouze pravidla generující kód  
6,6,3,6,1
- nyní nahradíme pravidla příslušným kódem  
push a; push a; pop r1; pop r2; mul r1,r2; push r2; push a; pop r1; pop r2;  
add r1,r2; push r2

- Gramatiky
  - obecné
  - kontextové
  - bezkontextové
  - regulární, pravé lineární
- jazyk gramatiky, derivace, derivace dává slovo, derivační strom (pro bezkontextové gramatiky), ekvivalentní gramatiky
- ne každá lineární gramatika má ekvivalentní pravou lineární
- bezkontextové gramatiky
- jednoznačné a (podstatně) víceznačné gramatiky

# Zásobníkové automaty

- Zásobníkové automaty jsou rozšířením  $\lambda$ -NFA nedeterministických konečných automatů s  $\lambda$  přechody.
- Přidanou věcí je **zásobník**. Ze zásobníku můžeme číst (read), přidávat na vrch (push), a odebírat z vrchu zásobníku (pop) znak  $\in \Gamma$ .
- Může si pamatovat neomezené množství informace.
- Zásobníkové automaty definují bezkontextové jazyky.
- Deterministické zásobníkové automaty přijímají jen vlastní podmnožinu bezkontextových jazyků.



# Zásobníkový automat (PDA)

## Definition 7.1 (Zásobníkový automat (PDA))

Zásobníkový automat (PDA) je  $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F)$ , kde

$Q$  konečná množina stavů

$\Sigma$  neprázdná konečná množina vstupních symbolů

$\Gamma$  neprázdná konečná zásobníková abeceda

$\delta$  přechodová funkce  $\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\lambda\}) \times \Gamma \rightarrow P_{FIN}(Q \times \Gamma^*)$ ,  
 $\delta(p, a, X) \ni (q, \gamma)$

kde  $q$  je nový stav a  $\gamma$  je řetězec zásobníkových symbolů, který nahradí  $X$  na vrcholu zásobníku

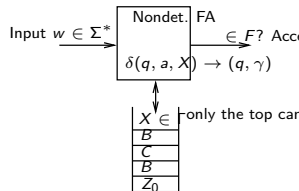
$q_0 \in Q$  počáteční stav

$Z_0 \in \Gamma$  Počáteční zásobníkový symbol. Víc na začátku na zásobníku není.

$F$  Množina přijímajících (koncových) stavů; může být nedefinovaná.

V jednom časovém kroku zásobníkový automat:

- Přečte na vstupu žádný nebo jeden symbol. ( $\lambda$  přechody pro prázdný vstup.)
- Přejde do nového stavu.
- Nahradí symbol na vrchu zásobníku libovolným řetězcem ( $\lambda$  odpovídá samotnému pop, jinak následuje push jednoho nebo více symbolů).



## Example 7.1

Zásobníkový automat pro jazyk:  $L_{ww^R} = \{ww^R \mid w \in (0 + 1)^*\}$ .

PDA přijímající  $L_{ww^R}$ :

- Start  $q_0$  reprezentuje odhad, že ještě nejsme uprostřed.
- V každém kroku nedeterministicky hádáme;
  - Zůstat  $q_0$  (ještě nejsme uprostřed).
  - Přejít  $\lambda$  přechodem do  $q_1$  (už jsme viděli střed).
- V  $q_0$ , přečte vstupní symbol a dá (push) ho na zásobník
- V  $q_1$ , srovná vstupní symbol s vrcholem zásobníku
  - pokud se shodují, přečte vstupní symbol a umaže (pop) vrchol zásobníku
- Když vyprázdníme zásobník, přijmeme vstup, který jsme doted' přečetli.

## Example 7.2 (PDA pro $L_{wwr}$ )

PDA pro  $L_{wwr}$  můžeme popsat

$P = (\{q_0, q_1, q_2\}, \{0, 1\}, \{0, 1, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \{q_2\})$  kde  $\delta$  je definovaná:

$$\delta(q_0, 0, Z_0) = \{(q_0, 0Z_0)\}$$

$$\delta(q_0, 1, Z_0) = \{(q_0, 1Z_0)\}$$

Ulož vstup na zásobník, startovní symbol tam nech

$$\delta(q_0, 0, 0) = \{(q_0, 00)\}$$

$$\delta(q_0, 0, 1) = \{(q_0, 01)\}$$

$$\delta(q_0, 1, 0) = \{(q_0, 10)\}$$

$$\delta(q_0, 1, 1) = \{(q_0, 11)\}$$

Zůstaň v  $q_0$ , přečti vstup a dej ho na zásobník

$$\delta(q_0, \lambda, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$$

$$\delta(q_0, \lambda, 0) = \{(q_1, 0)\}$$

$$\delta(q_0, \lambda, 1) = \{(q_1, 1)\}$$

$\lambda$  přechod  $q_1$  bez změny zásobníku (a vstupu)

$$\delta(q_1, 0, 0) = \{(q_1, \lambda)\}$$

$$\delta(q_1, 1, 1) = \{(q_1, \lambda)\}$$

stav  $q_1$  srovná vstupní symbol a vrchol zásobníku

$$\delta(q_1, \lambda, Z_0) = \{(q_2, Z_0)\}$$

našli jsme  $ww^R$  a jdeme do přijímajícího stavu



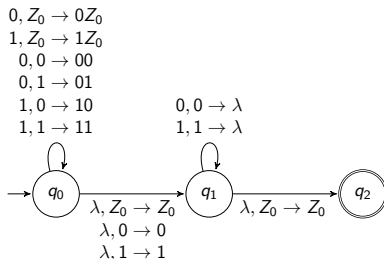
## Definition 7.2 (Přechodový diagram pro zásobníkový automat)

**Přechodový diagram pro zásobníkový automat** obsahuje:

- Uzly, které odpovídají stavům PDA.
- Šipka 'odnikud' ukazuje počáteční stav, dvojité kruhy označují přijímající stavy.
- hrana odpovídá přechodu PDA.  
Hrana označená  $a, X \rightarrow \alpha$  ze stavu  $p$  do  $q$  znamená  $\delta(p, a, X) \ni (q, \alpha)$
- Konvence je, že počáteční symbol zásobníku značíme  $Z_0$ .

Labels:

input\_symbol, stack\_symbol  $\rightarrow$  string\_to\_push



# Notace zásobníkových automatů

$a, b, c, *, +, 1, (, )$	symboly vstupní abecedy
$p, q, r$	stavy
$u, v, w, x, y, z$	řetězce vstupní abecedy
$X, Y, E, I, S$	zásobníkové symboly
$\alpha, \beta, \gamma$	řetězce zásobníkových symbolů

### Definition 7.3 (Situace zásobníkového automatu)

**Situaci** zásobníkového automatu reprezentujeme trojicí  $(q, w, \gamma)$ , kde

$q$  je stav

$w$  je zbývajícím vstup a

$\gamma$  je obsah zásobníku (vrch zásobníku je vlevo).

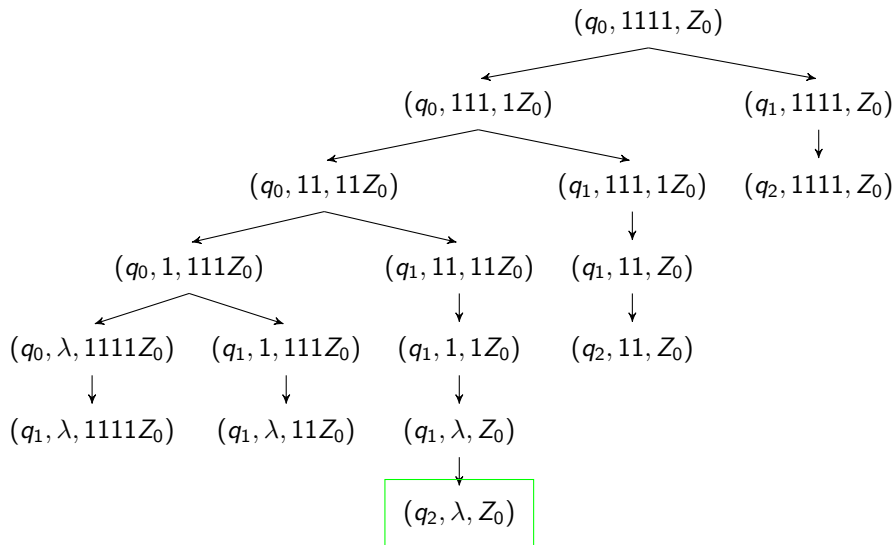
Situaci značíme zkratkou **(ID)** z anglického **instantaneous description (ID)**.

### Definition 7.4 ( $\vdash, \vdash^*$ posloupnosti situací)

Mějme PDA  $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F)$ . Definujeme  $\vdash_P$  nebo  $\vdash$  následovně.

- Necht  $\delta(p, a, X) \ni (q, \alpha)$ ,  $p, q \in Q$ ,  $a \in (\Sigma \cup \{\lambda\})$ ,  $X \in \Gamma$ ,  $\alpha \in \Gamma^*$ .  
 $\forall w \in \Sigma^*, \beta \in \Gamma^* : (p, aw, X\beta) \vdash (q, w, \alpha\beta)$ .
- Symboly  $\vdash_P^*$  a  $\vdash^*$  používáme na označení nuly a více kroků zásobníkového automatu, t.j.
  - $I \vdash^* I$  pro každou situaci  $I$
  - $I \vdash^* J$  pokud existuje situace  $K$  tak že  $I \vdash K$  a  $K \vdash^* J$ .
- Čteme  $I \vdash^* J$  **situace  $I$  vede na situaci  $J$** ,  $I \vdash J$  situace  $I$  **bezprostředně vede** na situaci  $J$ .

# Situace zásobníkového automatu na vstup 1111



# Jazyky zásobníkových automatů

## Definition 7.5 (Jazyk přijímaný koncovým stavem, prázdným zásobníkem)

Mějme zásobníkový automat  $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F)$ . Pak  $L(P)$ , **jazyk akceptovaný koncovým stavem** je

$$L(P) = \{w \mid (q_0, w, Z_0) \vdash_P^* (q, \lambda, \alpha) \text{ pro nějaké } q \in F \text{ a libovolný řetězec } \alpha \in \Gamma^*; w \in \Sigma^*\}.$$

**jazyk akceptovaný prázdným zásobníkem**  $N(P)$  definujeme

$$N(P) = \{w \mid (q_0, w, Z_0) \vdash_P^* (q, \lambda, \lambda) \text{ pro libovolné } q \in Q; w \in \Sigma^*\}.$$

- Protože je množina přijímajících stavů  $F$  nerelevantní, může se vynechat a PDA je šestice  $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0)$ .

### Example 7.3

Zásobníkový automat z předchozího příkladu akceptuje  $L_{wwr}$  koncovým stavem.

### Example 7.4

$P' \equiv P$  z předchozího příkladu, jen změníme instrukci, aby umazala poslední symbol  
 $\delta(q_1, \lambda, Z_0) = \{(q_2, Z_0)\}$  nahradíme  
 $\delta(q_1, \lambda, Z_0) = \{(q_2, \lambda)\}$   
Nyní  $L(P') = N(P') = L_{wwr}$ .

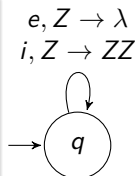
# Příklad If-Else

## Example 7.5 (If-else přijímané prázdným zásobníkem)

Následující zásobníkový automat zastaví při první chybě na if (*i*) a else (*e*), máme-li více else než if.

$P_N = (\{q\}, \{i, e\}, \{Z\}, \delta_N, q, Z)$  kde

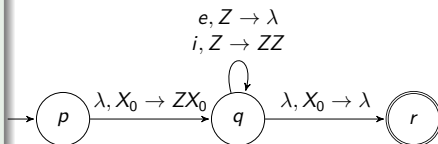
- $\delta_N(q, i, Z) = \{(q, ZZ)\}$  push
- $\delta_N(q, e, Z) = \{(q, \lambda)\}$  pop



## Example 7.6 (Přijímání koncovým stavem)

$P_F = (\{p, q, r\}, \{i, e\}, \{Z, X_0\}, \delta_F, p, X_0, \{r\})$  kde

- $\delta_F(p, \lambda, X_0) = \{(q, ZX_0)\}$  start
- $\delta_F(q, i, Z) = \{(q, ZZ)\}$  push
- $\delta_F(q, e, Z) = \{(q, \lambda)\}$  pop
- $\delta_F(q, \lambda, X_0) = \{(r, \lambda)\}$  přijmi



# Nečtený vstup a dno zásobníku $P$ neovlivní výpočet

## Lemma 7.1

Mějme PDA  $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F)$  a  $(p, x, \alpha) \vdash_P^* (q, y, \beta)$ . Potom pro libovolné slovo  $w \in \Sigma^*$  and  $\gamma \in \Gamma^*$  platí:  $(p, xw, \alpha\gamma) \vdash_P^* (q, yw, \beta\gamma)$ .  
Speciálně pro  $\gamma = \lambda$  a/nebo  $w = \lambda$ .

## Proof.

Indukcí podle počtu situací mezi  $(p, xw, \alpha\gamma)$  a  $(q, yw, \beta\gamma)$ . Každý krok  $(p, x, \alpha) \vdash_P^* (q, y, \beta)$  je určen bez  $w$  a/nebo  $\gamma$ . Proto je možný i se symboly na konci vstupu / dně zásobníku. □

## Lemma 7.2

Pro PDA  $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F)$  a  $(p, xw, \alpha) \vdash_P^* (q, yw, \beta)$  platí  $(p, x, \alpha) \vdash_P^* (q, y, \beta)$ .

**Remark** Pro zásobník ale obdoba neplatí. PDA může zásobníkové symboly  $\gamma$  použít a zase je tam naskládat (push).  $L = \{0^i 1^i 0^j 1^j\}$ , situace  $(p, 0^{i-j} 1^i 0^j 1^j, 0^j Z_0) \vdash^* (q, 1^j, 0^j Z_0)$ , mezitím vyčistíme zásobník k  $Z_0$ .

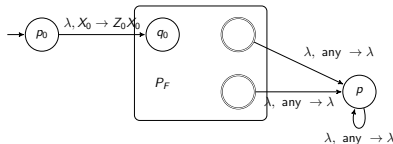
# Od přijímajícího stavu k prázdnému zásobníku

## Lemma 7.3 (Od přijímajícího stavu k prázdnému zásobníku)

Mějme  $L = L(P_F)$  pro nějaký PDA

$P_F = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta_F, q_0, Z_0, F)$ .

Pak existuje PDA  $P_N$  takový, že  $L = L(P_N)$ .



## Proof:

Nechť  $P_N = (Q \cup \{p_0, p\}, \Sigma, \Gamma \cup \{X_0\}, \delta_N, p_0, X_0)$ , kde

- $\delta_N(p_0, \lambda, X_0) = \{(q, Z_0 X_0)\}$  start
- $\forall (q \in Q, a \in \Sigma \cup \{\lambda\}, Y \in \Gamma)$   
 $\delta_N(q, a, Y) = \delta_F(q, a, Y)$   
simulujeme
- $\forall (q \in F, Y \in \Gamma \cup \{X_0\})$ ,  
 $\delta_N(q, \lambda, Y) \ni (p, \lambda)$  přijmout  
pokud  $P_F$  přijímá,
- $\forall (Y \in \Gamma \cup \{X_0\})$ ,  
 $\delta_N(p, \lambda, Y) = \{(p, \lambda)\}$  vyprázdnit  
zásobník.

Pak  $w \in N(P_n)$  iff  $w \in L(P_F)$ .  $\square$

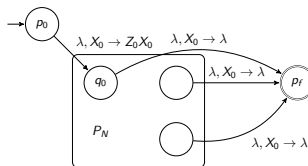


# Od prázdného zásobníku ke koncovému stavu

## Lemma 7.4 (Od prázdného zásobníku ke koncovému stavu)

Pokud  $L = N(P_N)$  pro nějaký PDA

$P_N = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta_N, q_0, Z_0)$ ,  
pak existuje PDA  $P_F$   
takový, že  $L = L(P_F)$ .



Proof:

$$P_F = (Q \cup \{p_0, p_f\}, \Sigma, \Gamma \cup \{X_0\}, \delta_F, p_0, X_0, \{p_f\})$$

kde  $\delta_F$  je

- $\delta_F(p_0, \lambda, X_0) = \{(q_0, Z_0 X_0)\}$  (start).
- $\forall (q \in Q, a \in \Sigma \cup \{\lambda\}, Y \in \Gamma),$   
 $\delta_F(q, a, Y) = \delta_N(q, a, Y).$
- Navíc,  $\delta_F(q, \lambda, X_0) \ni (p_f, \lambda)$  pro každý  $q \in Q.$

Chceme ukázat  $w \in L(P_N)$  iff  $w \in L(P_F)$ .

- (If)  $P_F$  přijímá následovně:  
 $(p_0, w, X_0) \vdash_{P_F} (q_0, w, Z_0 X_0) \vdash_{P_F=N_F}^* (q, \lambda, X_0) \vdash_{P_F} (p_f, \lambda, \lambda).$
- (Only if) Do  $p_f$  nelze dojít jinak než předchozím bodem.



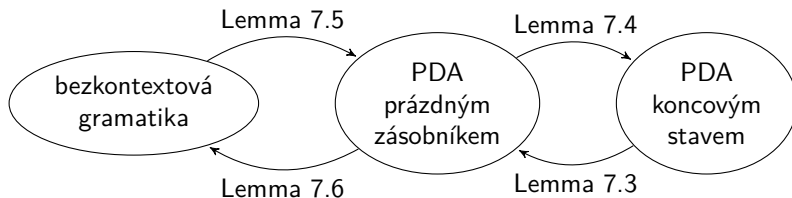
# Ekvivalence jazyků rozpoznávaných zásobníkovými automaty a bezkontextových jazyků

## Theorem 7.1 ( $L(\text{CFG}) = L(\text{PDA}) = N(\text{PDA})$ )

Následující tvrzení jsou ekvivalentní

- Jazyk  $L$  je bezkontextový, tj. generovaný CFG
- Jazyk  $L$  je přijímaný nějakým zásobníkovým automatem koncovým stavem.
- Jazyk  $L$  je přijímaný nějakým zásobníkovým automatem prázdným zásobníkem.

Důkaz bude veden směry dle následujícího obrázku.



# Od bezkontextové gramatiky k zásobníkovému automatu

## Algorithm: Konstrukce PDA z CFG $G$

Mějme CFG gramatiku  $G = (V, T, P, S)$ .

Konstruuujeme PDA  $P = (\{q\}, T, V \cup T, \delta, q, S)$ .

- (1) Pro neterminály  $A \in V$ ,  $\delta(q, \lambda, A) = \{(q, \beta) \mid A \rightarrow \beta \text{ je pravidlo } G\}$ .
- (2) pro každý terminál  $a \in T$ ,  $\delta(q, a, a) = \{(q, \lambda)\}$ .

## Example 7.7

Konvertujeme gramatiku:

$$I \rightarrow a|b|la|lb|l0|l1$$

$$E \rightarrow I|E * E|E + E|(E).$$

Množina vstupních symbolů PDA je  $\Sigma = \{a, b, 0, 1, (, ), +, *\}$ ,  $\Gamma = \Sigma \cup \{I, E\}$ ,  
přechodová funkce  $\delta$ :

- $\delta(q, \lambda, I) = \{(q, a), (q, b), (q, la), (q, lb), (q, l0), (q, l1)\}$ .
- $\delta(q, \lambda, E) = \{(q, I), (q, E * E), (q, E + E), (q, (E))\}$ .
- $\forall s \in \Sigma$  je  $\delta(q, s, s) = \{(q, \lambda)\}$ , např.  $\delta(q, +, +) = \{(q, \lambda)\}$ .

Jinak je  $\delta$  prázdná.

## Lemma 7.5 (Přijímání prázdným zásobníkem ze CFG)

*Pro PDA  $P$  konstruovaný z CFG  $G$  algoritmem výše je  $N(P) = L(G)$ .*

- Levá derivace:  $E \Rightarrow E * E \Rightarrow I * E \Rightarrow a * E \Rightarrow a * I \Rightarrow a * b$
- Posloupnost situací:  
 $(q, a * b, E) \vdash (q, a * b, E * E) \vdash (q, a * b, I * E) \vdash (q, a * b, a * E)$   
 $\vdash (q, *b, *E) \vdash (q, b, E) \vdash (q, b, I) \vdash (q, b, b) \vdash (q, \lambda, \lambda)$

Pozorování:

- Kroky derivace simuluje PDA  $\lambda$  přepisy zásobníku
- odmazávaný vstup u PDA v derivaci zůstává až do konce
- až PDA vymaže terminály, pokračuje v přepisech.

$$w \in N(P) \Leftarrow w \in L(G).$$

Nechť  $w \in L(G)$ ,  $w$  má levou derivaci  $S = \gamma_1 \xRightarrow{lm} \gamma_2 \xRightarrow{lm} \dots \xRightarrow{lm} \gamma_n = w$ .

Indukcí podle  $i$  dokážeme  $(q, w, S) \vdash_P^* (q, v_i, \alpha_i)$ , kde  $\gamma_i = u_i \alpha_i$  je levá sentenciální forma a  $u_i v_i = w$ .

- Pokud  $\gamma_i$  obsahuje pouze terminály,  $\gamma_i = w$ , hotovo.
- Každá nekoncová sentenciální forma  $\gamma_i$  může být zapsaná  $u_i A \alpha_i$ ,  
A nejlevější neterminál,  $u_i$  řetězec terminálů
- indukční předpoklad nás dovedl do situace  $(q, v_i, A \alpha_i)$ ,  $w = u_i v_i$
- Pro  $\gamma_i \xRightarrow{lm} \gamma_{i+1}$  bylo použito pravidlo  $(A \rightarrow \beta) \in P$
- PDA nahradí  $A$  na zásobníku  $\beta$ , přejde na situaci  $(q, v_i, \beta \alpha_i)$ .
- odstraníme všechny terminály  $v \in \Sigma^*$  zleva  $\beta \alpha$  porovnáváním se vstupem
  - $v_i = v v_{i+1}$  a zároveň  $\beta \alpha = v \alpha_{i+1}$
- přešli jsme do nové situace  $(q, v_{i+1}, \alpha_{i+1})$  a iterujeme.

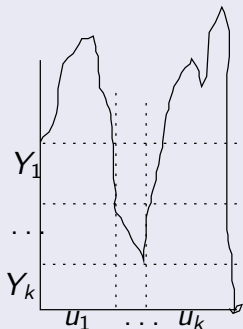


$$w \in N(P) \Rightarrow w \in L(G).$$

Dokazujeme: Pokud  $(q, u, A) \vdash_P^* (q, \lambda, \lambda)$ , tak  $A \xRightarrow{G}^* u$ .

Indukcí podle počtu kroků  $P$ .

- $n = 1$  kroků:
  - $a \in \Sigma$ , přechod  $\delta(q, a, a) \ni (q, \lambda)$ , v derivaci žádný krok,
  - $A \in \Gamma$ , přechod  $\delta(q, \lambda, A) \ni (q, \lambda)$  pro pravidlo gramatiky  $(A \rightarrow \lambda) \in G$ .
- $n > 1$  kroků;
  - První krok typu (2) – terminály, nerozšiřujeme derivaci.
  - První krok typu (1),  $A$  nahrazeno  $Y_1 Y_2 \dots Y_k$  z pravidla  $A \rightarrow Y_1 Y_2 \dots Y_k$ .  
Rozdělíme  $u = u_1 u_2 \dots u_k$ :
    - čtením symbolu  $Y_i$  skončilo slovo  $u_{i-1}$  a začíná  $u_i$ .



Použijeme indukční hypotézu na každé  $i = 1, \dots, k$ :

$(q, u_i u_{i+1} \dots u_k, Y_i) \vdash^* (q, u_{i+1} \dots u_k, \lambda)$  a dostaneme  $Y_i \Rightarrow^* u_i$ .

Dohromady  $A \Rightarrow Y_1 Y_2 \dots Y_k \Rightarrow^* u_1 Y_2 \dots Y_k \Rightarrow^* \dots \Rightarrow^* u_1 u_2 \dots u_k$ .

# Příklad: Od zásobníkového automatu ke gramatice

## Example 7.8

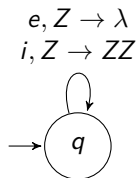
Převědme PDA  $P_N = (\{q\}, \{i, e\}, \{Z\}, \delta_N, q, Z)$  na obrázku na gramatiku.

- Neterminály gramatiky budou  $V = \{S, [qZq]\}$  nový start a jediná trojice  $P_N$ .
- Pravidla:
  - $S \rightarrow [qZq]$ .
  - $[qZq] \rightarrow i[qZq][qZq]$ .
  - $[qZq] \rightarrow e$

Můžeme nahradit trojici  $[qZq]$  symbolem  $A$  a dostaneme:

$$S \rightarrow A$$
$$A \rightarrow iAA|e.$$

Protože  $A$  a  $S$  odvozují přesně stejné řetězce, můžeme je ztotožnit:  $G = (\{S\}, \{i, e\}, \{S \rightarrow iSS|e\}, S)$ .



# Od zásobníkového automatu ke gramatice CFG

- Zásobní automat bere **jeden** symbol ze zásobníku. Stav před a po kroku může být různý.
- Neterminály gramatiky budou složené symboly  $[qXr]$ , PDA vyšel z  $q$ , vzal  $X$  a přešel do  $r$ ;  
a zavedeme nový počáteční symbol  $S$ .

## Lemma 7.6 (Gramatika pro PDA)

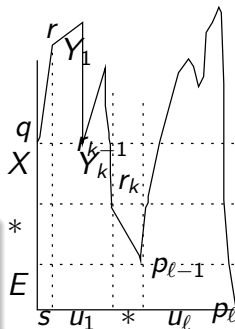
Mějme PDA  $P = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0)$ . Pak existuje bezkontextová gramatika  $G$  taková, že  $L(G) = N(P)$ .

Pravidla definujeme:

- $\forall p \in Q: S \rightarrow [q_0 Z_0 p]$ , tj. uhodni koncový stav a spusť PDA na  $(q_0, w, Z_0) \vdash^* (p, \lambda, \lambda)$ .
- Pro všechny dvojice  $(r, Y_1 Y_2 \dots Y_k) \in \delta(q, s, X)$ ,  $s \in \Sigma \cup \{\lambda\}$ ,  $\forall r_1, \dots, r_{k-1} \in Q$  vytvoř pravidlo

$$[qXr_k] \rightarrow s[rY_1 r_1][r_1 Y_2 r_2] \dots [r_{k-1} Y_k r_k]$$

- spec. pro  $(r, \lambda) \in \delta(q, a, A)$  vytvoř  $[qAr] \rightarrow a$ .





## Proof.

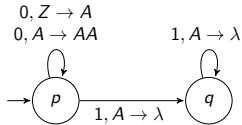
Pro  $w \in \Sigma^*$  dokazujeme

$[qXp] \Rightarrow^* w$  právě když  $(q, w, X) \vdash^* (p, \lambda, \lambda)$

indukcí v obou směrech (počet kroků PDA, počet kroků derivace.) □

### Example 7.9 ( $\{0^n 1^n; n > 0\}$ )

$\delta$	Pravidla	
	$S \rightarrow [pZp][pZq]$	(1)
$\delta(p, 0, Z) \ni (p, A)$	$[pZp] \rightarrow 0[pAp]$	(2)
	$[pZq] \rightarrow 0[pAq]$	(3)
$\delta(p, 0, A) \ni (p, AA)$	$[pAp] \rightarrow 0[pAp][pAp]$	(4)
	$[pAp] \rightarrow 0[pAq][qAp]$	(5)
	$[pAq] \rightarrow 0[pAp][pAq]$	(6)
	$[pAq] \rightarrow 0[pAq][qAq]$	(7)
$\delta(p, 1, A) \ni (q, \lambda)$	$[pAq] \rightarrow 1$	(8)
$\delta(q, 1, A) \ni (q, \lambda)$	$[qAq] \rightarrow 1$	(9)



Derivace 0011

$S \Rightarrow^{(1)} [pZq] \Rightarrow^{(3)} 0[pAq] \Rightarrow^{(7)} 00[pAq][qAq] \Rightarrow^{(8)} 001[qAq] \Rightarrow^{(9)} 0011$

- Zásobníkový automat PDA je  $\lambda$ -NFA automat rozšířený o zásobník, potenciálně nekonečnou paměť
  - a zásobníkovou abecedu, počáteční zásobníkový symbol, přechodová funkce čte a píše na zásobník, píše i řetězec
- Přijímání koncovým stavem a prázdným zásobníkem, pro nedeterministické PDA přijímají stejnou třídu jazyků
- a to bezkontextové jazyky, generované bezkontextovými gramatikami.

# Chomského normální forma

- Chomského normální forma: všechna pravidla tvaru  $A \rightarrow BC$  nebo  $A \rightarrow a$ ,  $A, B, C$  jsou neterminály,  $a$  terminál
- Každý bezkontextový jazyk (kromě slova  $\lambda$ ) je generovaný gramatikou v Chomského normálním tvaru

Postupně provedeme zjednodušení gramatiky, nejdřív:

- Eliminace *zbytečných symbolů*
- eliminace  $\lambda$ -pravidel  $A \rightarrow \lambda$ ;  $A \in V$
- eliminace *jednotkových pravidel*  $A \rightarrow B$  pro  $A, B \in V$ .

# Eliminace zbytečných symbolů

## Definition 8.1 (zbytečný, užitečný, generující, dosažitelný symbol)

- Symbol  $X$  je **užitečný** v gramatice  $G = (V, T, P, S)$  pokud existuje derivace tvaru  $S \Rightarrow^* \alpha X \beta \Rightarrow^* w$  kde  $w \in T^*$ ,  $X \in (V \cup T)$ ,  $\alpha, \beta \in (V \cup T)^*$ .
- Pokud  $X$  není užitečný, říkáme, že je **zbytečný**.
- $X$  je **generující** pokud  $X \Rightarrow^* w$  pro nějaké slovo  $w \in T^*$ . Vždy  $w \Rightarrow^* w$  v nula krocích.
- $X$  je **dosažitelný** pokud  $S \Rightarrow^* \alpha X \beta$  pro nějaká  $\alpha, \beta \in (V \cup T)^*$ .

Chceme eliminovat ne-generující a ne-dosažitelné symboly.

## Example 8.1

Uvažujme gramatiku:	Eliminujeme $B$ (ne-generující):	Eliminujeme $A$ (nedosažitelný):
$S \rightarrow AB a$	$S \rightarrow a$	$S \rightarrow a.$
$A \rightarrow b$	$A \rightarrow b.$	

## Lemma 8.1 (Eliminace zbytečných symbolů)

Nechť  $G = (V, T, P, S)$  je CFG, předpokládejme  $L(G) \neq \emptyset$ . Zkonstruujeme  $G_1 = (V_1, T_1, P_1, S)$  následovně:

- Eliminujeme ne-generující symboly a pravidla je obsahující
- poté eliminujeme všechny nedosažitelné symboly

Pak  $G_1$  nemá zbytečné symboly a  $L(G_1) = L(G)$ .

### Algorithm: Generující symboly

**Základ** Každý  $a \in T$  je generující.

**Indukce** Pro každé pravidlo  $A \rightarrow \alpha$ , kde každý symbol v  $\alpha$  je generující. Pak i  $A$  je generující.  
(Včetně  $A \rightarrow \lambda$ ).

### Algorithm: Dosažitelné symboly

**Základ**  $S$  je dosažitelný.

**Indukce** Je-li  $A$  dosažitelný, pro všechna pravidla  $A \rightarrow \alpha$  jsou všechny symboly v  $\alpha$  dosažitelné.

## Lemma 8.2 (generující/dosažitelné symboly)

Výše uvedené algoritmy najdou právě všechny generující / dosažitelné symboly.

# Eliminace $\lambda$ pravidel

## Definition 8.2 (nulovatelný neterminál)

Neterminál  $A$  je **nulovatelný** pokud  $A \Rightarrow^* \lambda$ .

Pro nulovatelné neterminály na pravé straně pravidla  $B \rightarrow CAD$ , vytvoříme dvě verze pravidla – s a bez nulovatelného neterminálu.

Algorithm: Nalezení nulovatelných symbolů v  $G$

**Základ** Pokud  $A \rightarrow \lambda$  je pravidlo  $G$ , pak  $A$  je nulovatelné.

**Indukce** Pokud  $B \rightarrow C_1 \dots C_k$ , kde jsou všechna  $C_i$  nulovatelná, je i  $B$  nulovatelné (terminály nejsou nulovatelné nikdy).

Algorithm: Konstrukce gramatiky bez  $\lambda$ -pravidel z  $G$

- Najdi nulovatelné symboly
- Pro každé pravidlo  $A \rightarrow X_1 \dots X_k \in P, k \geq 1$ , nechť  $m$  z  $X_i$  je nulovatelných. Nová gramatika  $G_1$  bude mít  $2^m$  verzí tohoto pravidla s/bez každého nulovatelného symbolu kromě  $\lambda$  v případě  $m = k$ .

# Příklad eliminace $\lambda$ -pravidel

## Example 8.2

Mějme gramatiku:

$$S \rightarrow AB$$

$$A \rightarrow aAA|\lambda$$

$$B \rightarrow bBB|\lambda$$

$$S \rightarrow AB|A|B$$

$$A \rightarrow aAA|aA|aA|a$$

$$B \rightarrow bBB|bB|bB|b$$

Výsledná gramatika:

$$S \rightarrow AB|A|B$$

$$A \rightarrow aAA|aA|a$$

$$B \rightarrow bBB|bB|b.$$

# Eliminace jednotkových pravidel

## Definition 8.3 (jednotkové pravidlo)

**Jednotkové pravidlo** je  $A \rightarrow B \in P$  kde  $A, B$  jsou oba neterminály.

## Example 8.3

$$I \rightarrow a|b|Ia|Ib|I0|I1$$
$$F \rightarrow I|(E)$$
$$T \rightarrow F|T * F$$
$$E \rightarrow T|E + T$$

Expanze  $T \vee E \rightarrow T$

$$E \rightarrow F|T * F$$

Expanze  $E \rightarrow F$

$$E \rightarrow I|(E)$$

Expanze  $E \rightarrow I$

$$E \rightarrow a|b|Ia|Ib|I0|I1$$

Dohromady:  $E \rightarrow a|b|Ia|Ib|I0|I1|(E)|T * F|E + T$ .

Musíme se vyhnout možným cyklům.

## Definition 8.4 (jednotkový pár)

Dvojici  $A, B \in V$  takovou, že  $A \Rightarrow^* B$  pouze jednotkovými pravidly nazýváme **jednotkový pár** (jednotková dvojice).



## Algorithm: Nalezení jednotkových párů

**Základ**  $(A, A)$  pro každý  $A \in V$  je jednotkový pár.

**Indukce** Je-li  $(A, B)$  jednotkový pár a  $(B \rightarrow C) \in P$ , pak  $(A, C)$  je jednotkový pár.

### Example 8.4 (Jednotkové páry z předchozí gramatiky)

$(E, E), (T, T), (F, F), (I, I), (E, T), (E, F), (E, I), (T, F), (T, I), (F, I).$

## Algorithm: Eliminace jednotkových pravidel z $G$

- najdi všechny jednotkové páry v  $G$
- pro každý jednotkový pár  $(A, B)$  dáme do nové gramatiky všechna pravidla  $A \rightarrow \alpha$  kde  $B \rightarrow \alpha \in P$  a  $B \rightarrow \alpha$  není jednotkové pravidlo.

### Example 8.5

$I \rightarrow a|b|Ia|Ib|I0|I1$

$F \rightarrow I|(E)$

$T \rightarrow F|T * F$

$E \rightarrow T|E + T$

$I \rightarrow a|b|Ia|Ib|I0|I1$

$F \rightarrow (E)|a|b|Ia|Ib|I0|I1$

$T \rightarrow T * F|(E)|a|b|Ia|Ib|I0|I1$

$E \rightarrow E + T|T * F|(E)|a|b|Ia|Ib|I0|I1$

## Lemma 8.3 (Gramatika v normálním tvaru, redukováná)

*Mějme bezkontextovou gramatiku  $G$ ,  $L(G) - \{\lambda\} \neq \emptyset$ . pak existuje CFG  $G_1$  taková že  $L(G_1) = L(G) - \{\lambda\}$  a  $G_1$  neobsahuje  $\lambda$ -pravidla, jednotková pravidla ani zbytečné symboly. Gramatika  $G_1$  se nazývá **redukováná**.*

## Proof.

Idea důkazu:

- Začneme eliminací  $\lambda$ -pravidel.
- Eliminujeme jednotková pravidla. Tím nepřidáme  $\lambda$ -pravidla.
- Eliminujeme zbytečné symboly. Tím nepřidáme žádná pravidla.



## Definition 8.5 (Chomského normální tvar)

O bezkontextové gramatice  $G = (V, T, P, S)$  bez zbytečných symbolů kde jsou všechna pravidla v jednom ze dvou tvarů

- $A \rightarrow BC, A, B, C \in V,$
- $A \rightarrow a, A \in V, a \in T,$

říkáme, že je v **Chomského normálním tvaru (ChNF)**.

Potřebujeme dva další kroky:

- pravé strany délky 2 a více předělat na samé neterminály
- rozdělit pravé strany délky 3 a více neterminálů na více pravidel

### Algorithm: neterminály

- Pro každý terminál  $a$  vytvoříme nový neterminál, řekněme  $A$ ,
- přidáme pravidlo  $A \rightarrow a$ ,
- použijeme  $A$  místo  $a$  na pravé straně pravidel délky 2 a více

### Algorithm: rozdělení pravidel

- Pro pravidlo  $A \rightarrow B_1 \dots B_k$  zavedeme  $k - 2$  neterminálů  $C_i$
- Přidáme pravidla  
 $A \rightarrow B_1 C_1, C_1 \rightarrow B_2 C_2,$   
 $\dots, C_{k-2} \rightarrow B_{k-1} B_k.$

## Theorem 8.1 (ChNF)

Mějme bezkontextovou gramatiku  $G$ ,  $L(G) - \{\lambda\} \neq \emptyset$ . Pak existuje CFG  $G_1$  v Chomského normálním tvaru taková, že  $L(G_1) = L(G) - \{\lambda\}$ .

### Example 8.6

$I \rightarrow a|b|IA|IB|IZ|IU$

$F \rightarrow LER|a|b|IA|IB|IZ|IU$

$T \rightarrow TMF|LER|a|b|IA|IB|IZ|IU$

$E \rightarrow EPT|TMF|LER|a|b|IA|IB|IZ|IU$

$A \rightarrow a$

$B \rightarrow b$

$Z \rightarrow 0$

$U \rightarrow 1$

$P \rightarrow +$

$M \rightarrow *$

$L \rightarrow ($

$R \rightarrow )$

$F \rightarrow LC_3|a|b|Ia|IB|IZ|IU$

$T \rightarrow TC_2|LC_3|a|b|IA|IB|IZ|IU$

$E \rightarrow EC_1|TC_2|LC_3|a|b|IA|IB|IZ|IU$

$C_1 \rightarrow PT$

$C_2 \rightarrow MF$

$C_3 \rightarrow ER$

$I, A, B, Z, U, P, M, L, R$  jako vlevo

# Příprava na (pumping) lemma o vkládání

## Lemma (Velikost derivačního stromu gramatiky v CNF)

*Mějme derivační strom podle gramatiky  $G = (V, T, P, S)$  v Chomského normálním tvaru, který dává slovo  $w$ . Je-li délka nejdelší cesty  $n$ , pak  $|w| \leq 2^{n-1}$ .*

### Proof.

Indukcí podle  $n$ ,

**Základ**  $|a| = 1 = 2^0$

**Indukce**  $2^{n-2} + 2^{n-2} = 2^{n-1}$ .



## Lemma (Důsledek)

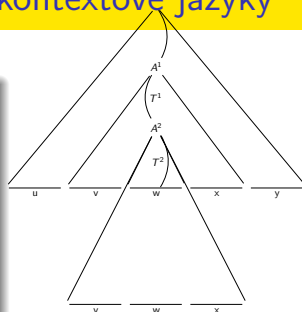
*Mějme derivační strom podle gramatiky  $G = (V, T, P, S)$  v Chomského normální formě, který dává slovo  $w$ ,  $|w| > p = 2^{n-1}$ . Pak ve stromě existuje cesta delší než  $n$ .*

# Lemma o vkládání (pumping) pro bezkontextové jazyky

## Theorem 8.2 (Lemma o vkládání (pumping) pro bezkontextové jazyky)

Mějme bezkontextový jazyk  $L$ . Pak existuje přirozené číslo  $n \in \mathbb{N}$  takové, že každé  $z \in L$ ,  $|z| > n$  lze rozložit na  $z = uvwxy$  kde:

- $|vwx| \leq n$
- $vx \neq \lambda$
- $\forall i \geq 0, uv^iwx^iy \in L$ .



### Idea důkazu:

- vezmeme derivační strom pro  $z$
- najdeme nejdelší cestu
- na ní dva stejné neterminály
- tyto neterminály určí dva podstromy
- podstromy definují rozklad slova
- nyní můžeme větší podstrom posunout ( $i > 1$ )
- nebo nahradit menším podstromem ( $i = 0$ )

Proof:  $|z| > n : z = uvwxy, |vwx| \leq n, vx \neq \lambda, \forall i \geq 0 uv^i wx^i y \in L$

- vezmeme gramatiku v Chomského NF (pro  $L = \{\lambda\}$  a  $\emptyset$  dk jinak).
- Nechť  $|V| = k$ . Položíme  $n = 2^k$ .
- Pro  $z \in L, |z| > 2^k$ , má v derivačním stromu  $z$  cestu délky  $> k$
- vezmeme nejdelší cestu; terminál kam vede označíme  $t$
- Aspoň dva z posledních  $(k + 1)$  neterminálů na cestě do  $t$  jsou stejné
- vezmeme dvojici  $A^1, A^2$  nejbližší k  $t$  (určuje podstromy  $T^1, T^2$ )
- cesta z  $A^1$  do  $t$  je nejdelší v podstromu  $T^1$  a má délku maximálně  $(k + 1)$

tedy slovo dané stromem  $T^1$  není delší než  $2^k$  (tedy  $|vwx| \leq n$ )

- z  $A^1$  vedou dvě cesty (ChNF), jedna do  $T^2$  druhá do zbytku  $vx$   
ChNF je nevypouštějící, tedy  $vx \neq \lambda$

- derivace slova ( $A^1 \Rightarrow^* vA^2x, A^2 \Rightarrow^* w$ )

$$S \Rightarrow^* uA^1y \Rightarrow^* uvA^2xy \Rightarrow^* uvwxy$$

- posuneme-li  $A^2$  do  $A^1$   
( $i = 0$ )

$$S \Rightarrow^* uA^2y \Rightarrow^* uwy$$

- posuneme-li  $A^1$  do  $A^2$  ( $i = 2, 3, \dots$ )

$$S \Rightarrow^* uA^1y \Rightarrow^* uvA^1xy \Rightarrow^* uvvA^2xxy \Rightarrow^* uvvwxy.$$



# Použití lemma o vkládání

## Example 8.7 (ne-bezkontextový jazyk)

Následující jazyk není bezkontextový

- $\{0^i 1^j 2^i \mid n \geq 1\}$
- důkaz sporem: předpokládejme bezkontextovost
- z lemmatu o vkládání máme  $n$
- zvolme  $z = |0^n 1^n 2^n| > n$
- pumpovací slovo  $|vwx| \leq n$
- tj. vždy lze pumpovat maximálně dva různé symboly
- poruší se rovnost počtu symbolů – SPOR

## Example 8.8 (ne-bezkontextový jazyk)

Následující jazyk není bezkontextový

- $\{0^i 1^j 2^k \mid 0 \leq i \leq j \leq k\}$
- důkaz sporem: předpokládejme bezkontextovost
- z lemmatu o vkládání máme  $n$
- zvolme  $z = |0^n 1^n 2^n| > n$
- pumpovací slovo  $|vwx| \leq n$
- tj. vždy lze pumpovat maximálně dva různé symboly
- pokud 0 (nebo 1), pumpujeme nahoru – SPOR  $i \leq j$  (nebo  $j \leq k$ )
- pokud 2 (nebo 1), pumpujeme dolů – SPOR  $j \leq k$  (nebo  $i \leq j$ )



# Použití lemma o vkládání

## Example 8.9 (ne-bezkontextový jazyk)

Následující jazyk není bezkontextový

- $\{0^i 1^j 2^i 3^j \mid i, j \geq 1\}$

- důkaz sporem: předpokládejme bezkontextovost
- z lemmatu o vkládání máme  $n$
- zvolme  $z = |0^n 1^n 2^n 3^n| > n$
- pumpovací slovo  $|vwx| \leq n$
- tj. vždy lze pumpovat maximálně dva různé sousední symboly
- poruší se rovnost počtu symbolů 0 a 2 nebo 1 a 3 – SPOR

## Example 8.10 (ne-bezkontextový jazyk)

Následující jazyk není bezkontextový

- $\{ww \mid w \in \{0, 1\}^*\}$

- důkaz sporem: předpokládejme bezkontextovost
- z lemmatu o vkládání máme  $n$
- zvolme  $z = |0^n 1^n 0^n 1^n| > n$
- pumpovací slovo  $|vwx| \leq n$
- tj. vždy lze pumpovat maximálně dva různé sousední symboly
- poruší se buď rovnost nul či jedniček.

# Kdy lemma o vkládání nezabere

- Lemma o vkládání je pouze implikace!

## Example 8.11 (pumpovatelný, ne-bezkontextový jazyk)

$L = \{a^i b^j c^k d^l \mid i = 0 \vee j = k = l\}$  není bezkontextový jazyk, přesto lze pumpovat.

$i = 0 : b^j c^k d^l$       lze pumpovat v libovolném písmenu  
 $i > 0 : a^i b^n c^n d^n$       lze pumpovat v části obsahující  $a$

Co s tím?

- zobecnění pumping lemmatu (Ogdenovo lemma)
  - pumpování vyznačených symbolů
- uzávěrové vlastnosti

# Cocke-Younger-Kasami algorithm náležení slova do CFL

Exponenciálně k  $|w|$ : vyzkoušet všechny derivační stromy dostatečné délky pro  $L$ .

Algorithm: CYK algoritmus, v čase  $O(n^3)$

- Mějme gramatiku v ChNF  
 $G = (V, T, P, S)$  pro jazyk  $L$  a slovo  
 $w = a_1 a_2 \dots a_n \in T^*$ .

- Vytvoříme trojúhelníkovou tabulku (vpravo),

- horizontální osa je  $w$
- $X_{ij}$  jsou množiny neterminálů  $A$  takových, že  $A \Rightarrow^* a_i a_{i+1} \dots a_j$ .

**Základ:**  $X_{ii} = \{A; A \rightarrow a_i \in P\}$

**Indukce:**  $X_{ij} = \{A \rightarrow BC; B \in X_{ik}, C \in X_{k+1,j}\}$

- Vyplňujeme tabulku zdola nahoru.
- Pokud  $S \in X_{1,n}$ , potom  $w \in L(G)$ .

$X_{15}$				
$X_{14}$	$X_{25}$			
$X_{13}$	$X_{24}$	$X_{35}$		
$X_{12}$	$X_{23}$	$X_{34}$	$X_{45}$	
$X_{11}$	$X_{22}$	$X_{33}$	$X_{44}$	$X_{55}$
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$

## Example 9.1 (CYK algoritmus)

Gramatika

$$S \rightarrow AB|BC$$

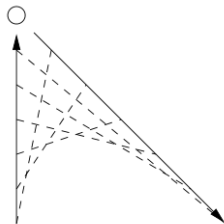
$$A \rightarrow BA|a$$

$$B \rightarrow CC|b$$

$$C \rightarrow AB|a$$

Tabulku vyplňujeme odspodu:

{S, A, C}				
-	{S, A, C}			
-	{B}	{B}		
{S, A}	{B}	{S, C}	{S, A}	
{B}	{A, C}	{A, C}	{B}	{A, C}
b	a	a	b	a



# Deterministický zásobníkový automat (DPDA)

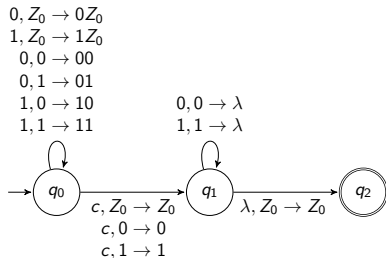
## Definition 9.1 (Deterministický zásobníkový automat (DPDA))

Zásobníkový automat  $P = (Q, \Sigma, \gamma, \delta, q_0, z_0, F)$  je **deterministický** PDA právě když platí zároveň:

- $\delta(q, a, X)$  je nejvýše jednoprvková  $\forall (q, a, X) \in Q \times (\Sigma \cup \{\lambda\}) \times \Gamma$ .
- Je-li  $\delta(q, a, X)$  neprázdná pro nějaké  $a \in \Sigma$ , pak  $\delta(q, \lambda, X)$  musí být prázdná.

## Example 9.2 (Det. PDA přijímající $L_{w c w^R}$ )

- Jazyk  $L_{w c w^R}$  palindromů je bezkontextový, ale nemá přijímající deterministický zásobníkový automat.
- Druhá podmínka zaručuje, že nebude volba mezi  $\lambda$  přechodem a čtením vstupního symbolu.
- Vložení středové značky  $c$  do  $L_{w c w^R} = \{w c w^R \mid w \in (\mathbf{0} + \mathbf{1})^*\}$  dostaneme jazyk rozpoznatelný DPDA.



$$RL \subsetneq L(P_{DPDA}) \subsetneq CFL \supsetneq N(P_{DPDA}).$$

## Theorem 9.1

*Nechť  $L$  je regulární jazyk, pak  $L = L(P)$  pro nějaký DPDA  $P$ .*

## Proof.

DPDA může simulovat deterministický konečný automat a ignorovat zásobník. (nechat tam  $Z_0$ ).



## Lemma

*Jazyk  $L_{wcwr}$  je přijímaný DPDA ale není regulární.*

Důkaz neregularity z pumping lemmatu na slovo  $0^n c 0^n$ .

### Example 9.3

Jazyk  $L_{xyy} = \{x^i y^i \mid i \in \mathbb{N}_0\} \cup \{x^i y^{2i} \mid i \in \mathbb{N}_0\}$  je bezkontextový, ale není přijímaný žádným deterministickým zásobníkovým automatem.

#### Proof.

- SPOREM: Předokládejme, že existuje deterministický PDA  $M$  přijímající jazyk  $L_{xyy}$ .
- Vytvořme dvě kopie,  $M_1$  a  $M_2$ , odpovídající si uzly budeme nazývat sourozenci.
- Zkonstruuje nový automat:
  - Počátečním stavem bude počáteční stav  $M_1$
  - koncovými stavy budou koncové stavy  $M_2$
  - přechody z koncových stavů  $M_1$  přesměrujeme do jejich sourozenců v  $M_2$
  - v automatu  $M_2$  hrany označené  $y$  přeznačíme na  $z$ .
- Výsledný automat přijímá  $\{x^i y^i z^i \mid i \in \mathbb{N}_0\}$
- $M$  je deterministický, nemá jinou cestu, tj. i ve slově  $x^i y^{2i}$  musel jít začátek stejně a pak číst  $y^i$ , nyní  $z^i$ ,
- o  $\{x^i y^i z^i \mid i \in \mathbb{N}_0\}$  víme, že není bezkontextový, tj. deterministický  $M$  nemůže existovat.

# Bezprefixové jazyky

## Definition 9.2 (bezprefixové jazyky)

Říkáme, že jazyk  $L$  je **bezprefixový** pokud neexistují slova  $x, y \in L$  taková, že  $x$  je prefix  $y$ .

## Example 9.4

- Jazyk  $L_{w_{cwr}}$  je bezprefixový.
- Jazyk  $L = \{0\}^*$  není bezprefixový.

Theorem 9.2 ( $L \in N(P_{DPDA})$  právě když  $L$  bezprefixový a  $L \in L(P'_{DPDA})$  )

Jazyk  $L$  je  $N(P)$  pro nějaký DPDA  $P$  právě když  $L$  je bezprefixový a  $L$  je  $L(P')$  pro nějaký DPDA  $P'$ .

## Proof.

- $\Rightarrow$  Prefix přijmeme prázdným zásobníkem, pro prázdný zásobník neexistuje instrukce, tj. žádné prodloužení není v  $N(P)$ .
- $\Leftarrow$  Převod  $P^|$  na  $P$  nepřidá nedeterminismus (první koncový  $\rightarrow$  smaž, přijmi).

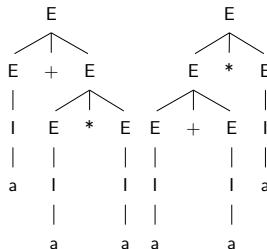


## Definition ((6.11) Jednoznačnost a víceznačnost CFG)

- Bezkontextová gramatika  $G = (V, T, P, S)$  je **víceznačná** pokud existuje aspoň jeden řetězec  $w \in T^*$  pro který můžeme najít dva různé derivační stromy, oba s kořenem  $S$  dávající slovo  $w$ .
- V opačném případě nazýváme gramatiku **jednoznačnou**.
- Bezkontextový jazyk  $L$  je **jednoznačný**, jestliže existuje jednoznačná CFG  $G$  tak, že  $L = L(G)$ .
- Bezkontextový jazyk  $L$  je (podstatně) nejednoznačný**, jestliže každá CFG  $G$  taková, že  $L = L(G)$ , je nejednoznačná. Takovému jazyku říkáme i **víceznačný**.

## Example 9.5 (nejednoznačnost CFG)

Dva derivační stromy dávající  $a + a * a$  ukazující víceznačnost gramatiky.



## Example 9.6 (nejednoznačný jazyk)

Jazyk  $L = \{a^i b^j c^k \mid i = j \vee j = k\}$  je podstatně nejednoznačný, 'dost dlouhá' slova  $a^i b^j c^i$  mají vždy dva způsoby odvození.

# DPDA's a víceznačné gramatiky

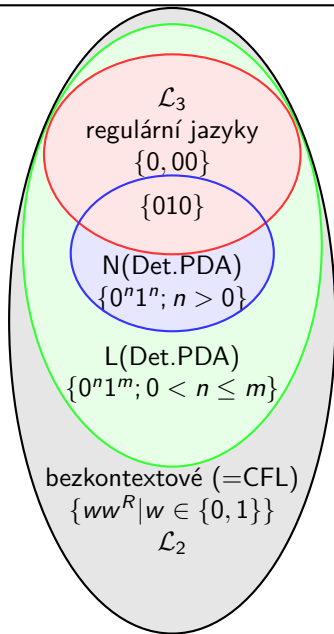
Theorem 9.3 ( $L = N(P_{DPDA}) \Rightarrow L$  má jednoznačnou CFG.)

- Necht  $L = N(P)$  pro nějaký DPDA  $P$ . Pak  $L$  má jednoznačnou CFG.
- Necht  $L = L(P)$  pro nějaký DPDA  $P$ . Pak  $L$  má jednoznačnou CFG.

Jazyk  $L_{wwr}$  má jednoznačnou gramatiku  $S \rightarrow 0S0|1S1|\lambda$  ale není přijímaný DPDA.

Proof.

- $N(P)$ : konstrukce CFG z PDA přijímajícího prázdným zásobníkem aplikovaná na DPDA vydá jednoznačnou CFG  $G$ .
- $L(P)$ :
  - Vytvoříme bezprefixový jazyk zavedením nového symbolu  $\$$  na konec každého slova  $w \in L$ .
  - Zkonstruujeme DPDA  $P'$  kde  $L' = N(P')$ .
  - Vytvoříme gramatiku  $G'$  generující jazyk  $N(P')$ .
  - Vytvoříme  $G$  tak že  $L(G) = L$ . Nového znaku  $\$$  se zbavíme tím, že ho vezmeme jako neterminál a přidáme pravidlo  $\$ \rightarrow \lambda$ . Ostatní pravidla zůstanou stejná jako v  $G'$ .
  - $G$  je jednoznačná protože  $G'$  je jednoznačná a nepřidali jsme nejednoznačnost.



kontextové (=CL)  
 $\mathcal{L}_1$   
 $\{a^i b^j c^i | i = 0, 1, \dots\}$

rekurzivně  
 spočetné  
 $\mathcal{L}_0$

## Theorem 10.1 (CFL uzavřené na sjednocení, konkatenaci, uzávěr, reverzi)

*CFL jsou uzavřené na sjednocení, konkatenaci, uzávěr  $(*)$ , pozitivní uzávěr  $(+)$ , homomorfismus, zrcadlový obraz  $w^R$ .*

### Proof:

- Sjednocení:

- pokud  $V_1 \cap V_2 \neq \emptyset$  přejmenujeme neterminály,
- přidáme nový symbol  $S_{new}$  a pravidlo  $S_{new} \rightarrow S_1 | S_2$

- zřetězení  $L_1.L_2$

$$S_{new} \rightarrow S_1 S_2 \text{ (pro } V_1 \cup V_2 = \emptyset, \text{ jinak přejmenujeme)}$$

- iterace  $L^* = \bigcup_{i \geq 0} L^i$

$$S_{new} \rightarrow SS_{new} | \lambda$$

- pozitivní iterace  $L^+ = \bigcup_{i \geq 1} L^i$

$$S_{new} \rightarrow SS_{new} | S$$

- zrcadlový obraz  $L^R = \{w^R | w \in L\}$

$$X \rightarrow \omega^R \text{ obrátíme pravou stranu pravidel.}$$



# Průnik bezkontextových jazyků

## Example 10.1 (CFL nejsou uzavřené na průnik)

- Jazyk  $L = \{0^n 1^n 2^n \mid n \geq 1\} = \{0^n 1^n 2^i \mid n, i \geq 1\} \cap \{0^i 1^n 2^n \mid n, i \geq 1\}$

není CFL, i když oba členy průniku jsou bezkontextové, dokonce deterministické

bezkontextové.

$\{0^n 1^n 2^i \mid n, i \geq 1\}$	$\{S \rightarrow AC, A \rightarrow 0A1 \mid 01, C \rightarrow 2C \mid 2\}$
$\{0^i 1^n 2^n \mid n, i \geq 1\}$	$\{S \rightarrow AB, A \rightarrow 0A \mid 0, B \rightarrow 1B2 \mid 12\}$

- průnik není CFL z pumping lemmatu

paralelní běh dvou zásobníkových automatů

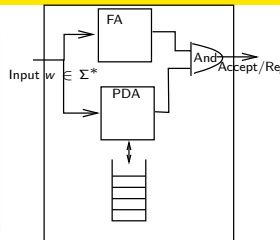
- řídící jednotky umíme spojit (viz konečné automaty)
- čtení umíme spojit (jeden automat může čekat)
- bohužel dva zásobníky nelze obecně spojit do jednoho

dva neomezené zásobníky = Turingův stroj  
= rekurzivně spočetné jazyky  $\mathcal{L}_0$

# Průnik bezkontextového a regulárního jazyka

Theorem 10.2 (CFL i DCFL jsou uzavřené na průnik s regulárním jazykem)

- Mějme  $L$  bezkontextový jazyk a  $R$  regulární jazyk. Pak  $L \cap R$  je bezkontextový jazyk.
- Mějme  $L$  deterministický CFL a  $R$  regulární jazyk. Pak  $L \cap R$  je deterministický CFL.



Proof:

- zásobníkový a konečný automat můžeme spojit
  - FA  $A_1 = (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_1, F_1)$
  - PDA přijímání stavem  $M_1 = (Q_2, \Sigma, \Gamma, \delta_2, q_2, Z_0, F_2)$
- nový automat  $M = (Q_1 \times Q_2, \Sigma, \Gamma, \delta, (q_1, q_2), Z_0, F_1 \times F_2)$ 
  - $((r, s), \alpha) \in \delta((p, q), a, Z)$  právě když
    - $a \neq \lambda$ :  $r = \delta_1(p, a) \& (s, \alpha) \in \delta_2(q, a, Z)$  ... automaty čtou vstup
    - $a = \lambda$ :  $(s, \alpha) \in \delta_2(q, \lambda, Z)$  PDA mění zásobník
    - $r = p$  FA stojí
- zřejmě  $L(M) = L(A_1) \cap L(M_2)$ 
  - paralelní běh automatů.

# Substituce a homomorfismus

- Opakování definice:

## Definition ((5.1,5.2)substituce, homomorfismus, inverzní homomorfismus)

Mějme jazyk  $L$  nad abecedou  $\Sigma$ .

**Substituce**  $\sigma$ ;  $\forall a \in \Sigma : \sigma(a) = L_a$  jazyk abecedy  $\Sigma_a$ , tj.  $\sigma(a) \subseteq \Sigma_a^*$   
převádí slova na jazyky:

- $\sigma(\lambda) = \{\lambda\}$ ,
- $\sigma(a_1 \dots a_n) = \sigma(a_1) \dots \sigma(a_n)$  (konkatenace), tj.  $\sigma : \Sigma^* \rightarrow P((\bigcup_{a \in \Sigma} \Sigma_a)^*)$
- $\sigma(L) = \bigcup_{w \in L} \sigma(w)$ .

**homomorfismus**  $h$ ,  $\forall a \in \Sigma : h(a) \in \Sigma_a^*$

převádí slova na slova

- $h(\lambda) = \lambda$ ,
- $h(a_1 \dots a_n) = h(a_1) \dots h(a_n)$  (konkatenace) tj.  $h : \Sigma^* \rightarrow (\bigcup_{a \in \Sigma} \Sigma_a)^*$
- $h(L) = \{h(w) \mid w \in L\}$ .

**Inverzní homomorfismus** převádí slova zpět

- $h^{-1}(L) = \{w \mid h(w) \in L\}$ .

# Příklad: Substituce

## Example 10.2

Mějme gramatiku  $G = (\{E\}, \{a, +, (, )\}, \{E \rightarrow E + E | (E) | a\}, E)$ . Mějme substituci:

- $\sigma(a) = L(G_a)$ ,  $G_a = (\{I\}, \{a, b, 0, 1\}, \{I \rightarrow I0 | I1 | Ia | Ib | a | b\}, I)$ ,
- $\sigma(+)=\{-, \times, :, \textit{div}, \textit{mod}\}$ ,
- $\sigma(()=\{\{,$
- $\sigma())=\{\}\}$ .

- $(a + a) + a \in L(G)$
- $(a001 - bba) * b1 \in \sigma((a + a) + a) \subset \sigma(L(G))$
- v  $\sigma(a)$  chybí  $+$  pro ukázkou, že  $(a + a) + a \notin \sigma(L(G))$ .

Co se stane, když změníme definici:

- $\sigma(()=\{(\{,$
- $\sigma())=\{\}, \}\}$ ?



# Příklad: Homomorfismus

## Example 10.3

Mějme gramatiku  
 $G = (\{E\}, \{a, +, (, )\},$   
 $\{E \rightarrow E + E | (E) | a\}, E)$ . Mějme  
homomorfismus:

- $h(a) = \lambda$
  - $h(+) = \lambda,$
  - $h(( ) = \textit{left},$
  - $h( )) = \textit{right}.$
- 
- $h((a + a) + a) = \textit{leftright},$
  - $h^{-1}(\textit{leftright}) \ni (a + +)a.$

## Example 10.4

Mějme gramatiku  
 $G = (\{E\}, \{a, +, (, )\},$   
 $\{E \rightarrow a + E | (E) | a\}, E)$ . Mějme  
homomorfismus:

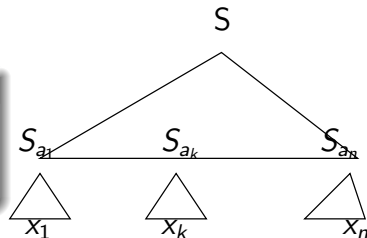
- $h_2(a) = a$
- $h_2(+) = +,$
- $h_2(( ) = \lambda,$
- $h_2( )) = \lambda.$

- 1 Je jazyk  $L(G)$  regulární?
- 2 Je jazyk  $h(L(G))$  regulární?
- 3 Je jazyk  $h^{-1}(h(L(G)))$  regulární?
- 4 Je  $h^{-1}(h(L(G))) = L(G)$ ?

# Uzávěrové vlastnosti bezkontextových jazyků

## Theorem 10.3 (CFL jsou uzavřené na substituci)

Mějme CFL jazyk  $L$  nad  $\Sigma$  a substituci  $\sigma$  na  $\Sigma$  takovou, že  $\sigma(a)$  je CFL pro každé  $a \in \Sigma$ . Pak je  $\sigma(L)$  CFL (bezkontextový).



## Proof:

- Idea: listy v derivačním stromu generují další stromy.
- Přejmenujeme neterminály na jednoznačné všude v  $G = (V, \Sigma, P, S)$ ,  $G_a = (V_a, T_a, P_a, S_a)$ ,  $a \in \Sigma$ .
- Vytvoříme novou gramatiku  $G' = (V', T', P', S)$  pro  $\sigma(L)$ :
  - $V' = V \cup \bigcup_{a \in \Sigma} V_a$
  - $T' = \bigcup_{a \in \Sigma} T_a$
  - $P' = \bigcup_{a \in \Sigma} P_a \cup \{p \in P \text{ kde všechna } a \in \Sigma \text{ nahradíme } S_a\}$ .

$G'$  generuje jazyk  $\sigma(L)$ . □

# Substitute bezkontextových jazyků

## Example 10.5 (substitute)

$$\begin{aligned} L &= \{a^i b^j \mid 0 \leq i \leq j\} & S &\rightarrow aSb \mid Sb \mid \lambda \\ \sigma(a) &= L_1 = \{c^i d^i \mid i \geq 0\} & S_1 &\rightarrow cS_1 d \mid \lambda \\ \sigma(b) &= L_2 = \{c^i \mid i \geq 0\} & S_2 &\rightarrow cS_2 \mid \lambda \\ \sigma(L): & & S &\rightarrow S_1 S_2 \mid S S_2 \mid \lambda, S_1 \rightarrow cS_1 d \mid \lambda, S_2 \rightarrow cS_2 \mid \lambda \end{aligned}$$

## Theorem 10.4 (homomorfismus)

*Bezkontextové jazyky jsou uzavřeny na homomorfismus.*

Proof:

- Přímý důsledek předchozí věty.
- Terminál  $a$  v derivačním stromě nahradím slovem  $h(a)$ .



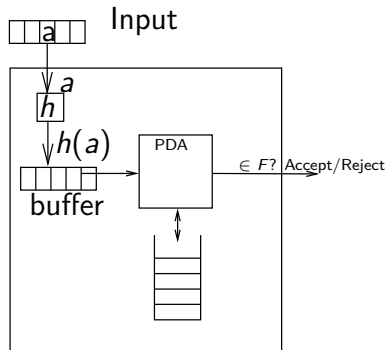
# CFL jsou uzavřené na inverzní homomorfismus

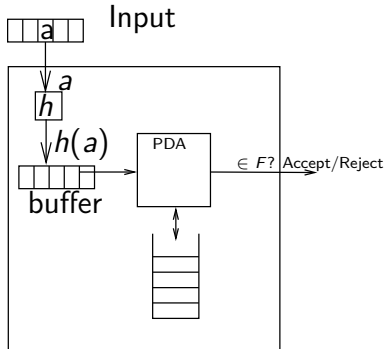
## Theorem 10.5 (CFL jsou uzavřené na inverzní homomorfismus)

*Mějme CFL jazyk  $L$  a homomorfismus  $h$ . Pak  $h^{-1}(L)$  je bezkontextový jazyk. Je-li  $L$  deterministický CFL, je i  $h^{-1}(L)$  deterministický CFL.*

Idea

- přečteme písmeno  $a$  a do vnitřního bufferu dáme  $h(a)$
- simulujeme výpočet  $M$ , kdy vstup bereme z bufferu
- po vyprázdnění bufferu načteme další písmeno ze vstupu
- slovo je přijato, když je buffer prázdný a  $M$  je v koncovém stavu
- ! buffer je konečný, můžeme ho tedy modelovat ve stavu





## Proof:

- pro  $L$  máme PDA  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F)$  (koncovým stavem)
- $h : T \rightarrow \Sigma^*$
- definujeme PDA  $M' = (Q', T, \Gamma, \delta', [q_0, \lambda], Z_0, F \times \{\lambda\})$  kde

$$Q' = \{[q, u] \mid q \in Q, u \in \Sigma^*, \exists (a \in T) \exists (v \in \Sigma^*) h(a) = vu\} \quad u \text{ je buffer}$$

$$\delta'([q, u], \lambda, Z) = \{([p, u], \gamma) \mid (p, \gamma) \in \delta(q, \lambda, Z)\}$$

$$\cup \{([p, v], \gamma) \mid (p, \gamma) \in \delta(q, b, Z), u = bv\} \quad \text{čte buffer}$$

$$\delta'([q, \lambda], a, Z) = \{([q, h(a)], Z)\}$$

naplňuje buffer

Pro deterministický PDA  $M$  je i  $M'$  deterministický.  $\square$

# Kvocienty s regulárním jazykem

## Lemma

*Bezkontextové jazyky jsou uzavřené na levý (pravý) kvocient s regulárním jazykem.*

$$R \setminus L = \{w \mid \exists u \in R \text{ } uw \in L\},$$

$$L/R = \{u \mid \exists w \in R \text{ } uw \in L\}$$

Idea:

- PDA běží paralelně s FA, nečtou vstup
- je-li FA v koncovém stavu, můžeme začít číst vstup

## Proof:

- FA  $A_1 = (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_1, F_1)$
- PDA  $M_2 = (Q_2, \Sigma, \Gamma, \delta_2, q_2, Z_0, F_2)$
- definujeme PDA  $M = (Q', \Sigma, \Gamma, \delta, (q_1, q_2), Z_0, F_2)$  kde  
 $Q' = (Q_1 \times Q_2) \cup Q_2$  dvojice stavů pro paralelní běh
$$\begin{aligned}\delta((p, q), \lambda, Z) &= \{((p', q'), \gamma) \mid \exists (a \in \Sigma) p' \in \delta_1(p, a) \& (q', \gamma) \in \delta_2(q, a, Z)\} \\ &\quad \cup \{((p, q'), \gamma) \mid (q', \gamma) \in \delta_2(q, \lambda, Z)\} \\ &\quad \cup \{(q, Z) \mid p \in F_1\} \\ \delta(q, a, Z) &= \delta_2(q, a, Z), \text{ } a \in \Sigma \cup \{\lambda\}, \text{ } q \in Q_2, \text{ } Z \in \Gamma\end{aligned}$$

zřejmě  $L(M) = L(A_1) \setminus L(M_2)$ .
- Pravý kvocient z levého a uzavřenosti na reverzi  $L/M = (M^R \setminus L^R)^R$   $\square$

# Použití uzavřenosti průniku CFL a RL

## Example 10.6

Jazyk  $L = \{0^i 1^j 2^k 3^l \mid i = 0 \vee j = k = l\}$  není bezkontextový.

Proof: Důkaz sporem:

- Nechť  $L$  je bezkontextový jazyk
- $L_1 = \{01^j 2^k 3^l \mid j, k, l \geq 0\}$  je regulární jazyk
  - $\{S \rightarrow 0B, B \rightarrow 1B \mid C, C \rightarrow 2C \mid D, D \rightarrow 3D \mid \lambda\}$
- $L \cap L_1 = \{01^i 2^i 3^i \mid i \geq 0\}$  není bezkontextový  $\Rightarrow$  SPOR



$L$  je kontextový jazyk

$S \rightarrow B_1 0A$

$B_1 \rightarrow 1B_1 \mid C_1, C_1 \rightarrow 2C_1 \mid D_1, D_1 \rightarrow 3D_1 \mid \lambda$

$\lambda$  odstraníme jako u ChNF + nový poč. symbol

$A \rightarrow 0A \mid P$

$P \rightarrow 1PCD \mid 1CD$

$DC \rightarrow CD$  přepíšeme  $\{DC \rightarrow XC, XC \rightarrow XY, XY \rightarrow CY, CY \rightarrow CD\}$

$1C \rightarrow 12, 2C \rightarrow 22, 2D \rightarrow 23, 3D \rightarrow 33$

# Rozdíl a doplněk

## Theorem 10.6 (Rozdíl s regulárním jazykem)

Mějme bezkontextový jazyk  $L$  a regulární jazyk  $R$ . Pak:

- $L - R$  je CFL.

Proof.

$L - R = L \cap \overline{R}$ ,  $\overline{R}$  je regulární. □

## Theorem 10.7 (CFL nejsou uzavřené na doplněk ani rozdíl)

*Třída bezkontextových jazyků není uzavřená na doplněk ani na rozdíl.*

CFL nejsou uzavřené na doplněk ani rozdíl.

Mějme bezkontextové jazyky  $L, L_1, L_2$ , regulární jazyk  $R$ . Pak:

- $\overline{L}$  nemusí být CFL.  $L_1 \cap L_2 = \overline{\overline{L_1} \cup \overline{L_2}}$
- $L_1 - L_2$  nemusí být CFL.  $\Sigma^* - L$  není vždy CFL.

□

- V PDA nestačí prohodit koncové a nekoncové stavy – nedeterminismus



# Uzávěrové vlastnosti deterministických CFL

- Rozumné programovací jazyky jsou deterministické CFL.
- Deterministické bezkontextové jazyky
  - nejsou uzavřené na průnik
  - jsou uzavřené na průnik s regulárním jazykem
  - jsou uzavřené na inverzní homomorfismus.

## Lemma

*Doplňěk deterministického CFL je opět deterministický CFL.*

## Proof:

- idea: prohodíme koncové a nekoncové stavy
- nedefinované kroky ošetříme 'podložkou' na zásobníku
- cyklus odhalíme pomocí čítače
- až po přečtení slova prochází koncové a nekoncové stavy stačí si pamatovat, zda prošel koncovým stavem.



# Neuzavřenost deterministických CFL

## Example 10.7 (DCFL nejsou uzavřené na sjednocení)

Jazyk  $L = \{a^i b^j c^k \mid i \neq j \vee j \neq k \vee i \neq k\}$  je CFL, ale není DCFL.

### Proof.

Vzhledem k uzavřenosti DCFL na doplněk by byl DCFL i

$\bar{L} \cap a^* b^* c^* = \{a^i b^j c^k \mid i = j = k\}$ , o kterém víme, že není CFL (pumping lemma) □

## Example 10.8 (DCFL nejsou uzavřené na homomorfismus)

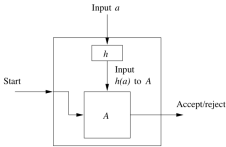
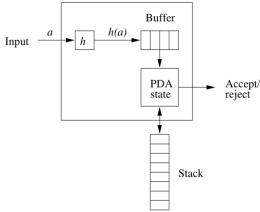
Jazyky  $L_1 = \{a^i b^j c^k \mid i \neq j\}$ ,  $L_2 = \{a^i b^j c^k \mid j \neq k\}$ ,  $L_3 = \{a^i b^j c^k \mid i \neq k\}$  jsou deterministické bezkontextové.

- Jazyk  $0L_1 \cup 1L_2 \cup 2L_3$  je deterministický bezkontextový
- Jazyk  $L_1 \cup L_2 \cup L_3$  není deterministický bezkontextový  
položme  $h(0) = \lambda$ ,  $h(1) = \lambda$ ,  $h(2) = \lambda$   
 $h(x) = x$  pro ostatní symboly
- $h(0L_1 \cup 1L_2 \cup 2L_3) = L_1 \cup L_2 \cup L_3$ ,
- doplněk  $\overline{L_1 \cup L_2 \cup L_3} \cap a^* b^* c^* = \{a^i b^j c^k \mid i = j = k\}$

# Uzávěrové vlastnosti v kostce

jazyk	regulární (RL)	bezkontextové	deterministické CFL
sjednocení	ANO	ANO	NE
průnik	ANO	NE	NE
$\cap$ s RL	ANO	ANO	ANO
doplňěk	ANO	NE	ANO
homomorfismus	ANO	ANO	NE
inverzní hom.	ANO	ANO	ANO

# Uzávěrové vlastnosti v kostce

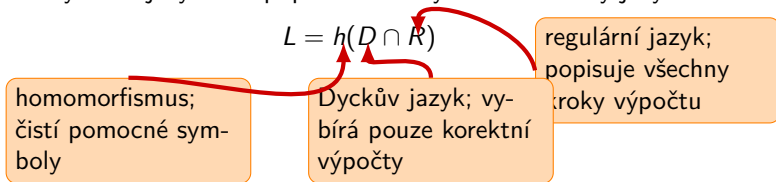
jazyk	regulární (RL)	bezkontextové	deterministické CFL
sjednocení	$F = F_1 \times Q_2 \cup Q_1 \times F_2$	$S \rightarrow S_1   S_2$	$A \cap B = \overline{\overline{A} \cup \overline{B}}$
průnik	$F = F_1 \times F_2$	$L = \{0^n 1^n 2^n   n \geq 1\} = \left\{ \begin{array}{l} \{0^n 1^n 2^i   n, i \geq 1\} \\ \cap \{0^i 1^n 2^n   n, i \geq 1\} \end{array} \right\}$	
$\cap$ s RL	$F = F_1 \times F_2$	$F = F_1 \times F_2$	$F = F_1 \times F_2$
doplňěk homom.	$F = Q_1 - F_1, \delta \text{ tot.}$ Kleene + RegExp + uz.	$A \cap B = \overline{\overline{A} \cup \overline{B}}$ $a \text{ nahrad' } S_a$	$F = Q_1 - F_1, Z_0, \text{ cykly, tot.}$ $h(0) = h(1) = 0 \text{ cca. } \cup$
inverzní hom.			

## Definition 10.1 (Dyckův jazyk)

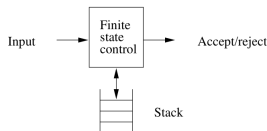
**Dyckův jazyk**  $D_n$  je definován nad abecedou  $Z_n = \{a_1, a_1^|, \dots, a_n, a_n^|\}$  následující gramatikou:  $S \rightarrow \lambda | SS | a_1 S a_1^| \dots | a_n S a_n^|$ .

Úvodní pozorování:

- jedná se zřejmě o jazyk bezkontextový
- Dyckův jazyk  $D_n$  popisuje správně uzávorkované výrazy s  $n$  druhy závorek
- tímto jazykem lze popisovat výpočty libovolného zásobníkového automatu
- pomocí Dyckova jazyka lze popsat libovolný bezkontextový jazyk.



# Jak charakterizovat bezkontextové jazyky?



- Pokud do zásobníku pouze přidáváme

potom si stačí pamatovat  
poslední symbol

- stačí konečná paměť → konečný automat.

- potřebujeme ze zásobníku také odebírat (čtení symbolu)  
takový proces nelze zaznamenat v konečné struktuře
- přidávání a odebírání není zcela libovolné  
jedná se o zásobník, tj. LIFO (last in, first out) strukturu
- roztáhněme si výpočet se zásobníkem do lineární struktury

$X$  symbol přidán do zásobníku  
 $X^{-1}$  symbol odebrán do zásobníku

- přidávaný a odebíraný symbol tvoří pár  $\underbrace{ZZ^{-1}} B \underbrace{AA^{-1} CC^{-1}} B^{-1}$

který se v celé posloupnosti chová jako závorka

Pro každý bezkontextový jazyk  $L$  existuje regulární jazyk  $R$  tak, že  $L = h(D \cap R)$  pro vhodný Dyckův jazyk  $D$  a homomorfismus  $h$ .

Proof:

- máme PDA přijímající  $L$  prázdným zásobníkem
- převedeme na instrukce tvaru  $\delta(q, a, Z) \in (p, w), |w| \leq 2$ 
  - delší psaní na zásobník rozdělíme zavedením nových stavů
- nechť  $R^{\downarrow}$  obsahuje všechny výrazy
  - $q^{-1}aa^{-1}Z^{-1}BAp$  pro instrukci  $\delta(q, a, Z) \ni (p, AB)$
  - podobně pro instrukce  $\delta(q, a, Z) \in (p, A), \delta(q, a, Z) \in (p, \lambda)$
  - je-li  $a = \lambda$ , potom dvojici  $aa^{-1}$  nezařazujeme
- definujeme  $R$  takto:  $Z_0q_0(R^{\downarrow})^*Q^{-1}$
- Dyckův jazyk je definován nad abecedou  $\Sigma \cup \Sigma^{-1} \cup Q \cup Q^{-1} \cup Y \cup Y^{-1}$
- $D \cap Z_0q_0(R^{\downarrow})^*Q^{-1}$  popisuje korektní výpočty

$$\underbrace{Z_0 \overbrace{q_0q_0^{-1}} \overbrace{aa^{-1}} Z_0^{-1}} B \underbrace{A \overbrace{pp^{-1}} \overbrace{bb^{-1}} A^{-1}} \underbrace{q \overbrace{q^{-1}} c \overbrace{c^{-1}} B^{-1}} \underbrace{rr^{-1}}$$

- homomorfismus  $h$  vydělí přečtené slovo, tj.
 

$h(a) = a$	pro vstupní (čtené) symboly
$h(y) = \lambda$	pro ostatní

# Greibachové normální forma

- při analýze zhora (tvorbě levé derivace daného slova  $w$ ) potřebujeme vědět, které pravidlo vybrat
- speciálně vadí pravidla tvaru  $A \rightarrow A\alpha$  (levá rekurze)

## Definition 10.2 (Greibachové normální forma CFG)

Říkáme, že gramatika je v **Greibachové normální formě**, jestliže všechna pravidla mají tvar  $A \rightarrow a\beta$ , kde  $a \in T$ ,  $\beta \in V^*$  (řetězec neterminálů).

- srovnání terminálu na pravé straně pravidel a čteného symbolu určí, které pravidlo použít
- pokud je ovšem takové pravidlo jediné.

## Theorem 10.9 (Greibachové normální forma)

*Ke každému bezkontextovému jazyku  $L$  existuje bezkontextová gramatika  $G$  v Greibachové normální formě taková, že  $L(G) = L - \{\lambda\}$ .*



# Spojení pravidel a odstranění levé rekurze

## Lemma (spojení pravidel)

*Nechť  $A \rightarrow \alpha B \beta$  je pravidlo gramatiky  $G$  a  $B \rightarrow \omega_1, \dots, B \rightarrow \omega_k$  jsou všechna pravidla pro  $B$ . Potom nahrazením pravidla  $A \rightarrow \alpha B \beta$  pravidly  $A \rightarrow \alpha \omega_1 \beta, \dots, A \rightarrow \alpha \omega_k \beta$  dostaneme ekvivalentní gramatiku.*

## Proof:

$A \Rightarrow \alpha B \beta \Rightarrow^* \alpha \mid B \beta \Rightarrow \alpha \mid \omega_i \beta$  v původní gramatice

$A \Rightarrow \alpha \omega_i \beta \Rightarrow^* \alpha \mid \omega_i \beta$  v nové gramatice



- Spojením pravidel se zbavíme některých neterminálů na začátku těla pravidla (tj. při  $\alpha = \lambda$ ).
- Na začátku  $\omega_i$  ale může být také neterminál.

# Odstranění levé rekurze

## Lemma (odstranění levé rekurze)

Nechť  $A \rightarrow A\omega_1, \dots, A \rightarrow A\omega_k$  jsou všechna levě rekurzivní pravidla gramatiky  $G$  pro  $A$  a  $A \rightarrow \alpha_1, \dots, A \rightarrow \alpha_m$  všechna ostatní pravidla pro  $A$ ,  $Z$  je nový neterminál. Potom nahrazení těchto pravidel pravidly:

1.  $A \rightarrow \alpha_i, A \rightarrow \alpha_i Z, Z \rightarrow \omega_j, Z \rightarrow \omega_j Z$ , nebo
  2.  $A \rightarrow \alpha_i Z, Z \rightarrow \omega_j Z, Z \rightarrow \lambda$
- dostaneme ekvivalentní gramatiku.

## Proof:

$$A \Rightarrow A\omega_{i_n} \Rightarrow \dots \Rightarrow A\omega_{i_1} \dots \omega_{i_n} \Rightarrow \alpha_j \omega_{i_1} \dots \omega_{i_n} \quad (G)$$

$$A \Rightarrow \alpha_j Z \Rightarrow \alpha_j \omega_{i_1} Z \dots \Rightarrow \alpha_j \omega_{i_1} \dots \omega_{i_{n-1}} Z \Rightarrow \alpha_j \omega_{i_1} \dots \omega_{i_n} \quad (1)$$

$$A \Rightarrow \alpha_j Z \Rightarrow \alpha_j \omega_{i_1} Z \dots \Rightarrow \alpha_j \omega_{i_1} \dots \omega_{i_n} Z \Rightarrow \alpha_j \omega_{i_1} \dots \omega_{i_n} \quad (2)$$



## Theorem (10.9 Greibachové normální forma)

Ke každému bezkontextovému jazyku  $L$  existuje bezkontextová gramatika  $G$  v Greibachové normální formě taková, že  $L(G) = L - \{\lambda\}$ .

### Proof: Greibachové normální forma

vezmeme gramatiku pro  $L$  v normálním tvaru (bez  $\lambda$ -pravidel)

- neterminály libovolně očísloveme  $\{A_1, \dots, A_n\}$
- povolíme rekurzivní pravidla pouze tvaru  $A_i \rightarrow A_j \omega$ , kde  $i < j$

postupnou iterací od 1 do  $n$

$A_i \rightarrow A_j \omega$  pro  $j < i$  odstraníme spojováním pravidel  
pro  $j = i$  odstraníme levou rekurzi

získáme pravidla tvaru  $A_i \rightarrow A_j \omega$  ( $i < j$ ),  $A_i \rightarrow a \omega$  ( $a \in T$ ),  $Z_i \rightarrow \omega$

- pravidla s  $A_i$  (původní neterminály) pouze tvaru  $A_i \rightarrow a \omega$   
postupným spojováním pravidel od  $n$  do 1 (pro  $n$  již platí)
- pravidla s  $Z_i$  (nové neterminály) pouze tvaru  $Z_i \rightarrow a \omega$ 
  - žádné pravidlo pro  $Z_i$  nezačíná vpravo  $Z_j$
  - buď je v požadovaném tvaru nebo se spojí s pravidlem  $A_j \rightarrow a \omega$
- odstranění terminálů uvnitř pravidel



# Příklad převodu na Greibachové NF

Původní gramatika

$$E \rightarrow E + T \mid T$$

$$T \rightarrow T * F \mid F$$

$$F \rightarrow (E) \mid a$$

Odstranění levé rekurze

$$E \rightarrow T \mid TE^{\mid}$$

$$E^{\mid} \rightarrow +T \mid +TE^{\mid}$$

$$T \rightarrow F \mid FT^{\mid}$$

$$T^{\mid} \rightarrow *F \mid *FT^{\mid}$$

$$F \rightarrow (E) \mid a$$

(téměř) Greibachové normální forma

$$E \rightarrow (E) \mid a \mid (E)T^{\mid} \mid aT^{\mid} \mid (E)E^{\mid} \mid aE^{\mid} \mid (E)T^{\mid}E^{\mid} \mid aT^{\mid}E^{\mid}$$

$$E^{\mid} \rightarrow +T \mid +TE^{\mid}$$

$$T \rightarrow (E) \mid a \mid (E)T^{\mid} \mid aT^{\mid}$$

$$T^{\mid} \rightarrow *F \mid *FT^{\mid}$$

$$F \rightarrow (E) \mid a$$

Greibachové normální forma

$$E \rightarrow (EP \mid a \mid (EPT^{\mid} \mid aT^{\mid} \mid (EPE^{\mid} \mid aE^{\mid} \mid (EPT^{\mid}E^{\mid} \mid aT^{\mid}E^{\mid}$$

$$E^{\mid} \rightarrow +T \mid +TE^{\mid}$$

$$T \rightarrow (EP \mid a \mid (EPT^{\mid} \mid aT^{\mid}$$

$$T^{\mid} \rightarrow *F \mid *FT^{\mid}$$

$$F \rightarrow (EP \mid a$$

$$P \rightarrow )$$

# Nekonečnost bezkontextových jazyků

## Lemma

Pro každý CFL  $L$  existuje přirozené číslo  $n$  takové, že  $L$  je nekonečný právě když  $\exists z \in L : n < |z| \leq 2n$ .

## Proof:

Vezměme  $n$  z lemmatu o vkládání (pumping lemma) pro CFL

$\Leftarrow n < |z|$ , tedy  $z$  lze pumpovat  $\Rightarrow$  jazyk je nekonečný

$\Rightarrow$  jazyk je nekonečný  $\Rightarrow \exists z \in L : n < |z|$ .

vezmeme nejkratší takové  $z$  a potom  $|z| \leq 2n$

**sporem** nechť  $2n < |z|$ , lze pumpovat i dolů, tj.  $|z'| < |z|$   
odstraňujeme část o max. velikosti  $n$ , tedy  $p < |z'|$  spor.



Rychlejší algoritmus:

vezmeme redukovanou gramatiku  $G$  v ChNF tž.  $L = L(G)$

uděláme orientovaný graf

- vrcholy = neterminály, hrany =  $\{(A, B), (A, C) \mid A \rightarrow BC \in P_G\}$
- hledáme orientovaný cyklus (existuje  $\Rightarrow$  jazyk je nekonečný)

# Turingovy stroje – historie a motivace

- 1931–1936 pokusy o formalizaci pojmu algoritmu  
Gödel, Kleene, Church, Turing

- **Turingův stroj**

- zachycení práce matematika
  - nekonečná tabule  
lze z ní číst a lze na ni psát
  - mozek (řídící jednotka)

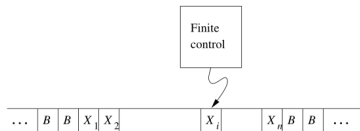
- Formalizace TM:

- místo tabule oboustranně nekonečná páska
- místo křídy čtecí a zapisovací hlava, kterou lze posunovat
- místo mozku konečná řídící jednotka (jako u PDA)

- další formalizace:

- $\lambda$ -kalkul, částečně rekurzivní funkce, RAM

- Snažíme se definovat problémy nerozhodnutelné jakýmkoli počítačem.



# Turingův stroj

## Definition 11.1

**Turingův stroj (TM)** je sedmice  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$  se složkami:

$Q$  konečná množina **stavů**

$\Sigma$  konečná neprázdná množina **vstupních symbolů**

$\Gamma$  konečná množina všech **symbolů pro pásku**. Vždy  $\Gamma \supseteq \Sigma$ ,  $Q \cap \Gamma = \emptyset$ .

$\delta$  (částečná) **přechodová funkce**.  $(Q - F) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$ , v  
 $\delta(q, x) = (p, Y, D)$ :

$q \in (Q - F)$  aktuální stav

$x \in \Gamma$  aktuální symbol na pásce

$p$  nový stav,  $p \in Q$ .

$Y \in \Gamma$  symbol pro zapsání do aktuální buňky, přepíše aktuální obsah.

$D \in \{L, R\}$  je **směr** pohybu hlavy (doleva, doprava).

$q_0 \in Q$  **počáteční stav**.

$B \in \Gamma - \Sigma$ . Blank. Symbol pro prázdné buňky, na začátku všude kromě konečného počtu buněk se vstupem.

$F \subseteq Q$  množina **koncových** neboli **přijímajících** stavů.

Pozn: někdy se nerozlišuje  $\Gamma$  a  $\Sigma$  a neuvádí se prázdný symbol  $B$ , ti. přetice.

## Definition 11.2 (Konfigurace Turingova stroje (Instantaneous Description ID))

**Konfigurace Turingova stroje** (Instantaneous Description ID) je řetězec

$X_1 X_2 \dots X_{i-1} q X_i X_{i+1} \dots X_n$  kde

- $q$  je stav Turingova stroje
- čtecí hlava je vlevo od  $i$ -tého symbolu
- $X_1 \dots X_n$  je část pásky mezi nejlevějším a nejpravějším symbolem různým od prázdného ( $B$ ). S výjimkou v případě, že je hlava na kraji – pak na tom kraji vkládáme jeden  $B$  navíc.

## Definition 11.3 (Krok Turingova stroje)

**Kroky** Turingova stroje  $M$  značíme  $\vdash_M, \vdash_M^*, \vdash_M^*$  jako u zásobníkových automatů.

Pro  $\delta(q, X_i) = (p, Y, L)$

- $X_1 X_2 \dots X_{i-1} q X_i X_{i+1} \dots X_n \vdash_M X_1 X_2 \dots X_{i-2} p X_{i-1} Y X_{i+1} \dots X_n$

Pro  $\delta(q, X_i) = (p, Y, R)$

- $X_1 X_2 \dots X_{i-1} q X_i X_{i+1} \dots X_n \vdash_M X_1 X_2 \dots X_{i-1} Y p X_{i+1} \dots X_n$ .

Odvození v konečném počtu kroků  $\vdash_M^*$  definuji rekurzivně pro  $\mathcal{I}, \mathcal{J}, \mathcal{K}$  konfigurace

Základ:  $\mathcal{I} \vdash_M^* \mathcal{I}$  Rekurze: Pokud  $\mathcal{I} \vdash_M^* \mathcal{J}$  a  $\mathcal{J} \vdash_M^* \mathcal{K}$ , tak i  $\mathcal{I} \vdash_M^* \mathcal{K}$ .



# A TM for $\{0^n 1^n; n \geq 1\}$

## Definition 11.4 (TM přijímá jazyk, rekurzivně spočetný jazyk)

Turingův stroj  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$  **přijímá jazyk**

$L(M) = \{w \in \Sigma^* : q_0 w \underset{M}{\vdash}^* \alpha p \beta, p \in F, \alpha, \beta \in \Gamma^*\}$ , tj. množinu slov, po jejichž přečtení se dostane do koncového stavu. Pásku (u nás) nemusí uklízet.

Jazyk nazveme **rekurzivně spočetným**, pokud je přijímán nějakým Turingovým strojem  $T$  (tj.  $L = L(T)$ ).

## Example 11.1 (TM pro jazyk $\{0^n 1^n; n \geq 1\}$ )

Turingův stroj  $M = (\{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4\}, \{0, 1\}, \{0, 1, X, Y, B\}, \delta, q_0, B, \{q_4\})$  s  $\delta$  v tabulce přijímá jazyk  $\{0^n 1^n; n \geq 1\}$ .

Stav	0	1	X	Y	B
$q_0$	$(q_1, X, R)$	—	—	$(q_3, Y, R)$	—
$q_1$	$(q_1, 0, R)$	$(q_2, Y, L)$	—	$(q_1, Y, R)$	—
$q_2$	$(q_2, 0, L)$	—	$(q_0, X, R)$	$(q_2, Y, L)$	—
$q_3$	—	—	—	$(q_3, Y, R)$	$(q_4, B, R)$
$q_4$	—	—	—	—	—

## Definition (TM zastaví)

TM **zastaví** pokud vstoupí do stavu  $q$ , s čteným symbolem  $X$ , a není instrukce pro tuto situaci, t.j.,  $\delta(q, X)$  není definováno.

- Předpokládáme, že v přijímajícím stavu  $q \in F$  TM zastaví,
- dokud nezastaví, nevíme, jestli přijme nebo nepřijme slovo.

## Definition (Rekurzivní jazyky)

Říkáme, že TM  $M$  **rozhoduje jazyk**  $L$ , pokud  $L = L(M)$  a pro každé  $w \in \Sigma^*$  stroj nad  $w$  zastaví.

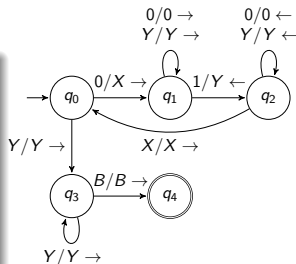
Jazyky rozhodnutelné TM nazýváme **rekurzivní jazyky**.

# Přechodový diagram pro Turingův stroj

## Definition 11.5 (Přechodový diagram pro TM)

**Přechodový diagram** pro TM sestává z uzlů odpovídajícím stavům TM. Hrany  $q \rightarrow p$  jsou označeny seznamem všech dvojic  $X/YD$ , kde  $\delta(q, X) = (p, Y, D)$ ,  $D \in \{\leftarrow, \rightarrow\}$ .

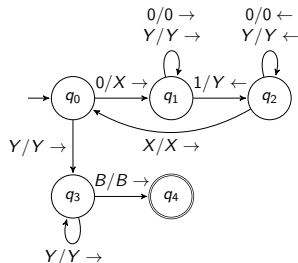
Pokud neuvedeme jinak,  $B$  značí blank – prázdný symbol.



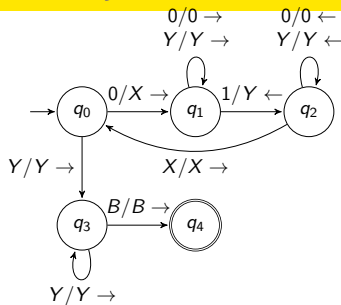
State	0	1	X	Y	B
$q_0$	$(q_1, X, R)$	–	–	$(q_3, Y, R)$	–
$q_1$	$(q_1, 0, R)$	$(q_2, Y, L)$	–	$(q_1, Y, R)$	–
$q_2$	$(q_2, 0, L)$	–	$(q_0, X, R)$	$(q_2, Y, L)$	–
$q_3$	–	–	–	$(q_3, Y, R)$	$(q_4, B, R)$
$q_4$	–	–	–	–	–

# A TM for $\{0^n 1^n; n \geq 1\}$

- Na pásce vždy výraz typu  $X^*0^*Y^*1^*$ 
  - postupně přepisujeme 0 na  $X$  a odpovídající 1 na  $Y$
  - $q_0$  přepíše 0 na  $X$  a předá řízení  $q_1$
  - $q_1$  najde první 1, přepíše na  $Y$  a předá řízení  $q_2$
  - $q_2$  se vrátí k  $X$ , nechá ho být a předá řízení  $q_0$
  - ...
  - pokud  $q_0$  vidí  $Y$ , předá řízení  $q_3$
  - $q_3$  dojde zkontrolovat, jestli na konci nezbyly 1
  - pokud  $q_3$  našlo  $B$ , předá řízení  $q_4$
  - $q_4$  skončí úspěchem (je přijímající)
  - ...
  - pokud  $q_3$  narazilo na 1, tak skončí neúspěchem
    - nemá instrukci
    - není přijímající.



# TM pro $\{0^n 1^n; n \geq 1\}$



Slovo 0011

$q_0 0011 \vdash Xq_1 011 \vdash X0q_1 11 \vdash Xq_2 0Y1 \vdash q_2 X0Y1 \vdash Xq_0 0Y1 \vdash XXq_1 Y1 \vdash$   
 $\vdash XXYq_1 1 \vdash XXq_2 YY \vdash Xq_2 XYY \vdash XXq_0 YY \vdash XXYq_3 Y \vdash XXYYq_3 B \vdash XXYYBq_4 B$

Slovo 0010

$q_0 0010 \vdash Xq_1 010 \vdash X0q_1 10 \vdash Xq_2 0Y0 \vdash q_2 X0Y0 \vdash Xq_0 0Y0 \vdash XXq_1 Y0 \vdash$   
 $\vdash XXYq_1 0 \vdash XXY0q_1 B$  a skončí neúspěchem, protože nemá instrukci.

# Ještě příklad, rekursivně spočetné jazyky

## Example 11.2

Jazyk  $L = \{a^{2^n} | n \geq 0\}$

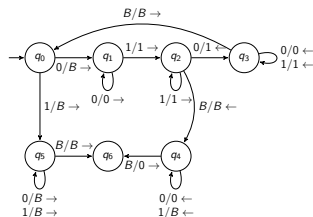
přijímá Turingův stroj  $M = (\{q_0, q_1, q_F\}, \{a\}, \{a, B\}, \delta, q_0, B, \{q_F\})$  s  $\delta$  v tabulce:

$\delta$	komentář
$\delta(q_0, B) = (q_F, B, R)$	prázdné slovo, konec výpočtu
$\delta(q_0, a) = (q_1, a, R)$	zvětší čítač ( $2k + 1$ symbolů)
$\delta(q_1, a) = (q_0, a, R)$	nuluje čítač ( $2k$ symbolů).

- Regulární jazyky:
  - simulujeme konečný automat, pohyb hlavy vždy vpravo,
  - vidím-li  $B$ , tj. konec vstupu, přejdu do nového přijímajícího stavu  $q_F$ .
  - (Z přijímajících stavů nemá TM instrukci.)
- Bezkontextové jazyky: nejsnáze s pomocnou páskou simulující zásobník, bude za chvíli.

Turingův stoj počítající **monus**  $m \dot{-} n = \max(m - n, 0)$ .

- $M = (\{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}, \{0, 1\}, \{0, 1, B\}, \delta, q_0, B, \{q_6\})$
- Počáteční pásk  $0^m 10^n$ .
- M zastaví s páskou  $0^{m \dot{-} n}$  obklopenou prázdnem B.
- Najdi nejlevější 0, přepiš na B.
- Jdi doprava a najdi 1; pokračuj, najdi 0 a přepiš na 1.
- Vrať se doleva.
- Pokud nenajdeš 0 (uklid'):
  - vpravo: přepiš všechny 1 na B.
  - vlevo:  $m < n$ : přepiš všechny 1 a 0 na B, nech pásku prázdnou.



# Paměť v řídicí jednotce

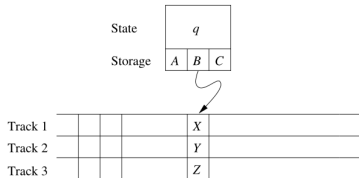
- Příklad paměti ve stavu TM
- Stav je dvojice (obecně  $n$ -tice)
- $M = (\{q_0, q_1\} \times \{0, 1, B\}, \{0, 1\}, \{0, 1, B\}, \delta, [q_0, B], B, \{[q_1, B]\})$
- $L(M) = (01^* + 10^*)$ ,

$\delta$	0	1	B
$\rightarrow [q_0, B]$	$([q_1, 0], 0, R)$	$([q_1, 1], 1, R)$	
$[q_1, 0]$		$([q_1, 0], 1, R)$	$([q_1, B], B, R)$
$[q_1, 1]$	$([q_1, 1], 0, R)$		$([q_1, B], B, R)$
$*[q_1, B]$			



# Více stop na pásce

- $L_{wcw} = \{wcw \mid w \in (0 + 1)^+\}$ ,
- $M = (\{q_1, \dots, q_9\} \times \{0, 1, B\}, \{[B, 0], [B, 1], [B, c]\}, \{B, *\} \times \{0, 1, B, c\}, \delta, [q_1, B], [B, B], \{[q_9, B]\})$
- $\delta$  je definováno ( $a, b \in \{0, 1\}$ ):
  - $\delta([q_1, B], [B, a]) = ([q_2, a], [*, a], R)$  načti symbol  $a$
  - $\delta([q_2, a], [B, b]) = ([q_2, a], [B, b], R)$  jdi vpravo, hledej střed  $c$ ,
  - $\delta([q_2, a], [B, c]) = ([q_3, a], [B, c], R)$  pokračuj vpravo ve stavu  $q_3$ ,
  - $\delta([q_3, a], [*, b]) = ([q_3, a], [*, b], R)$  pokračuj vpravo,
  - $\delta([q_3, a], [B, a]) = ([q_4, B], [*, a], L)$  zkontroluj shodu, vymaž paměť a jdi vlevo,
  - $\delta([q_4, B], [*, a]) = ([q_4, B], [*, a], L)$  jdi vlevo,
  - $\delta([q_4, B], [B, c]) = ([q_5, B], [B, c], L)$   $c$  pokračuj za střed ve stavu  $q_5$ ,
- rozeskok podle toho, jestli je ještě co kontrolovat
  - $\delta([q_5, B], [B, a]) = ([q_6, B], [B, a], L)$  ještě budeme kontrolovat,
  - $\delta([q_6, B], [B, a]) = ([q_6, B], [B, a], L)$  jdi vlevo,
  - $\delta([q_6, B], [*, a]) = ([q_1, B], [*, a], R)$  znovu začni,
  - $\delta([q_5, B], [*, a]) = ([q_7, B], [*, a], R)$  už vše vlevo od  $c$  porovnáno, jdi vpravo,
  - $\delta([q_7, B], [B, c]) = ([q_8, B], [B, c], R)$  pokračuj vpravo,
  - $\delta([q_8, B], [*, a]) = ([q_8, B], [*, a], R)$  pokračuj vpravo,
  - $\delta([q_8, B], [B, B]) = ([q_9, B], [B, B], R)$  přijmi.



## Theorem 11.1 (Rekurzivně spočetné jsou $\mathcal{L}_0$ )

*Každý rekurzivně spočetný jazyk je typu 0.*

### Proof: Od Turingova stroje ke gramatice

pro Turingův stroj  $T$  najdeme gramatiku  $G$ ,  $L(T) = L(G)$

- $G = (\{S, C, D, E\} \cup \{\underline{X}\}_{x \in \Sigma \cup \Gamma} \cup \{Q_i\}_{q_i \in Q}, \Sigma, P, S)$ ,  $P$  je:
- gramatika nejdříve vygeneruje pásku stroje a kopii slova  $wB^n \underline{W}^R Q_0 B^m$ , kde  $B^i$  představují volný prostor pro výpočet
- potom simuluje výpočet (stavy jsou součástí slova)
- v koncovém stavu smažeme pásku, necháme pouze kopii slova

$$1) \quad S \rightarrow DQ_0E$$

$$D \rightarrow xDX|E$$

generuje slovo a jeho revizní kopii pro výpočet

$$E \rightarrow BE|\lambda$$

generuje volný prostor pro výpočet

$$2) \quad \underline{XPY} \rightarrow \underline{QX'Y}$$

pro  $\delta(p, x) = (q, x', R)$

$$\underline{XPY} \rightarrow \underline{X'YQ}$$

pro  $\delta(p, x) = (q, x', L)$

$$3) \quad P \rightarrow C$$

pro  $p \in F$

$$\underline{CA} \rightarrow C, \underline{AC} \rightarrow C$$

mazání pásky

$$C \rightarrow \lambda$$

konec výpočtu



Ještě  $L(T) = L(G)$ ?

- $w \in L(T)$ 
  - existuje konečný výpočet stroje  $T$  (konečný prostor)
  - gramatika vygeneruje dostatečně velký prostor pro výpočet
  - simuluje výpočet a smaže dvojníky
- $w \in L(G)$ 
  - pravidla v derivaci nemusí být v pořadí, jakém chceme
  - derivaci můžeme přeuspořádat tak, že pořadí je 1),2),3).
  - podtržené symboly smazány, tj. vygenerován koncový stav.

### Example 11.3

Turingův stroj  $M =$

$(\{q_0, q_1, q_F\}, \{a\}, \{a, B\}, \delta, q_0, B, \{q_F\})$

$\delta(q_0, B) = (q_F, B, R)$

$\delta(q_0, a) = (q_1, a, R)$

$\delta(q_1, a) = (q_0, a, R)$

### Gramatika po zjednodušení

$G =$

$(\{S, C, D, E, a, \underline{a}, Q_0, Q_1\}, \{a\}, P, S)$

$S \rightarrow DQ_0$

$D \rightarrow aD\underline{a}|B$

$BQ_0 \rightarrow C$

$\underline{a}Q_0 \rightarrow Q_1\underline{a}$

$\underline{a}Q_1 \rightarrow Q_0\underline{a}$

$C\underline{a} \rightarrow C$

$C \rightarrow \lambda$

# Od gramatik k Turingově stroji

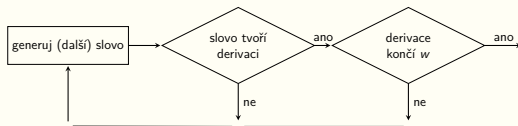
## Theorem 11.2

*Každý jazyk typu 0 je rekurzivně spočetný.*

### Proof:

idea: TM postupně generuje všechny derivace

- derivaci  $S \Rightarrow \omega_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow \omega_n = w$  kódujeme jako slovo  $\#S\#\omega_1\#\dots\#w\#$
- umíme udělat TM, který přijímá slova  $\#\alpha\#\beta\#$ , kde  $\alpha \Rightarrow \beta$
- umíme udělat TM, který přijímá slova  $\#\omega_1\#\dots\#\omega_k\#$ , kde  $\omega_1 \Rightarrow^* \omega_k$
- umíme udělat TM postupně generující všechna slova.



# TM rozšíření: Vícepáskový TM

## Definition 11.6 (Vícepáskový Turingův stroj)

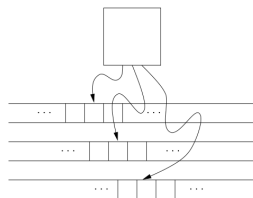
Počáteční pozice

- vstup na první pásce, ostatní zcela prázdné
- první hlava vlevo od vstupu, ostatní libovolně
- hlava v počátečním stavu

Jeden krok vícepáskového TM

- hlava přejde do nového stavu
- na každé pásce napíšeme nový symbol
- každá hlava se nezávisle posune vlevo, zůstane, vpravo.

Vícepáskový TM



## Theorem 11.3 (Vícepáskový TM)

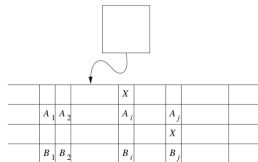
*Každý jazyk přijímaný vícepáskovým TM je přijímaný i nějakým (jednopáskovým) Turingovým strojem TM.*

## Proof: vícepáskový TM

- konstruujeme Turingův stroj  $M$
- pásku si představíme, že má  $2k$  stop
  - liché stopy: pozice  $k$ -té hlavy
  - sudé stopy: znak na  $k$ -té pásce
- pro simulaci jednoho kroku navštívíme všechny hlavy
- ve stavu si pamatujeme
  - počet hlav vlevo
  - $\forall k$  symbol pod  $k$ -tou hlavou
- pak už umíme provést jeden krok (znovu běhat)



Simulace 2-páskového TM na jedné pásce



- Simulaci výpočtu  $k$ -páskového stroje o  $n$  krocích lze provést v čase  $O(n^2)$  (simulace jednoho kroku z prvních  $n$  trvá  $4n + 2k$ , hlavy nejvýš  $2n$  daleko, přečíst, zapsat, posunout značky).

# Rozšíření: Nedeterministické Turingovy stroje

## Definition 11.7 (Nedeterministický TM)

**Nedeterministickým Turingovým strojem** nazýváme sedmici  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$ , kde  $Q, \Sigma, \Gamma, q_0, B, F$  jsou jako u TM a  $\delta : (Q - F) \times \Gamma \rightarrow P(Q \times \Gamma \times \{L, R\})$ .

Slovo  $w \in \Sigma^*$  **je přijímáno nedeterministickým TM**  $M$ , pokud existuje nějaký výpočet  $q_0 w \vdash^* \alpha p \beta$ ,  $p \in F$ .

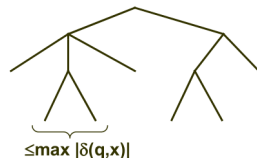
## Theorem 11.4 (Nedeterministický TM)

*Pro každý  $M_N$  nedeterministický TM existuje deterministický TM  $M_D$  takový, že  $L(M_N) = L(M_D)$ .*

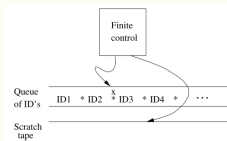
### Velmi stručně (příprava)

prohledáváme do šířky možné výpočty  $M_N$

- odvozeno v  $k$  krocích
- maximálně  $m^k$  konfigurací
  - kde  $m = \max |\delta(q, x)|$  je max. počet voleb  $M_N$



- páska nekonečná – nelze použít podmnožinovou konstrukci
- prohledáváme do šířky všechny výpočty  $M_N$
- modelujeme TM se dvěma páskami
  - první páska: posloupnost konfigurací
    - aktuální označena (křížkem na obrázku)
    - vlevo už prozkoumané, můžeme zapomenout
    - vpravo aktuální a pak další čekající
  - druhá páska: pomocný výpočet
- zpracování jedné konfigurace obnáší
  - přečti stav a symbol aktuální konfigurace ID
  - je-li stav přijímající  $\in F$ , přijmi a skonči
  - napiš ID na pomocnou pásku
  - pro každý možný krok  $\delta$  (uložený v hlavě  $M_D$ )
    - proveď krok a napiš novou ID na konec první pásky
  - vrať se k označené ID, značku vymaž a posuň o 1 doprava
  - opakuj





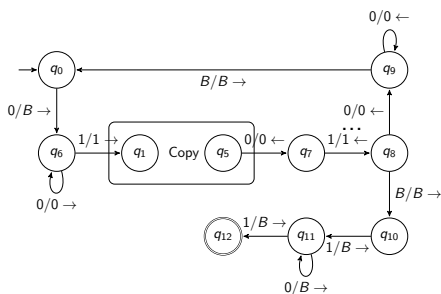
- **Turingův stroj**: nekonečná oboustranná páska, může číst, psát, pohybovat hlavou.
- **Přijímání TM**: Na začátku hlava a konečný řetězec na pásce, zbytek B. TM přijímá pokud vstoupí do koncového stavu.
- **Rekurzivně spočetné jazyky (RE)**: jazyky přijímané nějakým Turingovým strojem.
- **Konfigurace TM**: Všechny symboly pásky mezi nejlevějším a nejpravějším ne-B. Stav a pozice hlavy hned vlevo od právě čteného symbolu.
- modelovací triky
  - **Paměť v řídicí jednotce**
  - **Více stop**
- Rozšíření TM bez rozšíření třídy přijímaných jazyků:
  - **Vícepáskové TM** Samostatný pohyb hlav na páskách (lze simulovat na přidaných stopách).
  - **Nedeterministický TM**: Má instrukce na výběr, na přijetí stačí jeden přijímající výpočet.
- Budou: **Lineárně omezené automaty LBA**
  - Vstupní slovo mezi levou a pravou značkou, hlava nesmí za tyto značky ani je přepsat.
  - LBA rozpoznávají právě kontextové jazyky.

# Subroutines

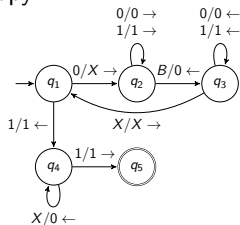
Multiplication: Input:  $0^m 10^n 1$ , Output:  $0^{mn}$ .

- Strategy: On the tape generally  $0^i 10^n 10^{kn}$
- In one basic step, change a 0 in the first group to B and add n 0's to the last group, giving us the string of the form  $0^{i-1} 10^n 10^{(k+1)n}$ .
- When finished, change the leading  $10^n 1$  to blanks.

Multiply



Copy



# Restricted Turing Machines

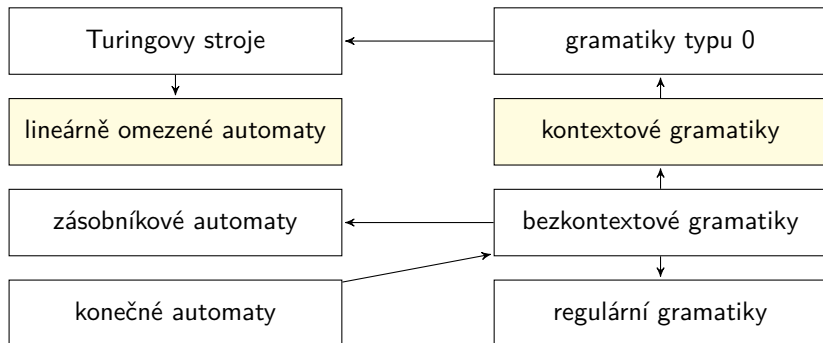
$X_0$	$X_1$	$X_2$	$\dots$
*	$X_{-1}$	$X_{-2}$	$\dots$

## Theorem 11.5 (Semi-infinite Tape, Never Writes a Blank)

*Every language accepted by a TM  $M_2$  is also accepted by a TM  $M_1$  with the following restrictions:*

- $M_1$ 's head never moves left of its initial position.
- $M_1$  never writes a blank.

## Automaty a gramatiky – Chomského hierarchie



- **gramatiky typu 1** (kontextové jazyky  $\mathcal{L}_1$ )

- pouze pravidla ve tvaru  $\alpha A \beta \rightarrow \alpha \omega \beta$

$$A \in V, \alpha, \beta \in (V \cup T)^*, \omega \in (V \cup T)^+$$

- jedinou výjimkou je pravidlo  $S \rightarrow \lambda$ , potom se ale  $S$  nevyskytuje na pravé straně žádného pravidla

- **gramatiky typu 0** (rekurzivně spočetné jazyky  $\mathcal{L}_0$ )  
pravidla v obecné formě  $\alpha \rightarrow \beta$ ,  $\alpha, \beta \in (V \cup T)^*$ ,  $\alpha$  obsahuje neterminál

## **gramatiky typu 1** (kontextové jazyky $\mathcal{L}_1$ )

- pouze pravidla ve tvaru  $\alpha A \beta \rightarrow \alpha \omega \beta$   
 $A \in V, \alpha, \beta \in (V \cup T)^*, \omega \in (V \cup T)^+$ 
  - jedinou výjimkou je pravidlo  $S \rightarrow \lambda$ , potom se ale  $S$  nevyskytuje na pravé straně žádného pravidla

- **gramatiky typu 2** (bezkontextové jazyky  $\mathcal{L}_2$ )  
pouze pravidla ve tvaru  $A \rightarrow \omega$ ,  $A \in V, \omega \in (V \cup T)^*$
- **gramatiky typu 3** (regulární/pravé lineární jazyky  $\mathcal{L}_3$ )  
pouze pravidla ve tvaru  $A \rightarrow \omega B$ ,  $A \rightarrow \omega$ ,  $A, B \in V, \omega \in T^*$

# Kontextové gramatiky

- pouze pravidla ve tvaru  $\alpha A \beta \rightarrow \alpha \omega \beta$   
 $A \in V, \alpha, \beta \in (V \cup T)^*, \omega \in (V \cup T)^+$
- s jedinou výjimkou  $S \rightarrow \lambda$ ,  
potom se ale  $S$  nevyskytuje na pravé straně žádného pravidla
- neterminál  $A$  se přepisuje pouze v kontextu  $\alpha, \beta$
- $S \rightarrow \lambda$  slouží pouze pro přidání  $\lambda$  do jazyka

## Example 12.1 (kontextový jazyk)

$L = \{a^n b^n c^n | n \geq 1\}$  je kontextový jazyk, není bezkontextový.

$$S \rightarrow aSBC|abC$$

$$CB \rightarrow BC$$

není kontextové, nutno rozepsat!

Gramatika:  $bB \rightarrow bb$

$$bC \rightarrow bc$$

$$cC \rightarrow cc$$

# Separované gramatiky

## Definition 12.1 (Separovaná gramatika)

Gramatika je **separovaná**, pokud obsahuje pouze pravidla tvaru  $\alpha \rightarrow \beta$ , kde:

- buď  $\alpha, \beta \in V^+$  (neprázdné posloupnosti neterminálů)
- nebo  $\alpha \in V$  a  $\beta \in T \cup \{\lambda\}$ .

## Lemma

*Ke každé gramatice  $G$  lze sestavit ekvivalentní separovanou gramatiku  $G'$ .*

## Proof:

- Necht  $G = (V, T, P, S)$
- pro každý terminál  $a \in T$  zavedeme nový neterminál  $A'_a$ .
- v pravidlech z  $P$ 
  - nahradíme terminály odpovídajícími neterminály
  - přidáme pravidla  $A'_a \rightarrow a$
- Výsledná gramatika je separovaná a zřejmě  $L(G) = L(G')$ .



# Od monotonie ke kontextovosti

## Definition 12.2 (monotónní (nevypouštějící) gramatika)

Gramatika je **monotónní (nevypouštějící)**, jestliže pro každé pravidlo  $(\alpha \rightarrow \beta) \in P$  platí  $|\alpha| \leq |\beta|$ . Monotónní gramatiky slovo v průběhu generování nezkracují.

## Lemma

*Ke každé monotónní gramatice lze nalézt ekvivalentní gramatiku kontextovou.*

### Proof:

- nejprve převedeme gramatiku na separovanou
  - tím se monotonie neporuší (a pravidla  $A' \rightarrow a$  jsou kontextová)
- zbývající pravidla  $A_1 \dots A_m \rightarrow B_1 \dots B_n$ ,  $m \leq n$  převedeme na pravidla s novými neterminály  $C$

$A_1 A_2 \dots A_m$	$\rightarrow C_1 A_2 \dots A_m$	$C_1 C_2 \dots C_m$	$\rightarrow B_1 C_2 \dots C_m$
$C_1 A_2 \dots A_m$	$\rightarrow C_1 C_2 \dots A_m$	$B_1 C_2 \dots C_m$	$\rightarrow B_1 B_2 \dots C_m$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$C_1 \dots C_{m-1} A_m$	$\rightarrow C_1 \dots C_{m-1} C_m$	$B_1 \dots B_{m-1} C_m$	$\rightarrow B_1 \dots B_{m-1} B_m \dots B_n$





# Příklad kontextového jazyka

## Example 12.2

Jazyk  $L = \{a^i b^j c^k \mid 1 \leq i \leq j \leq k\}$  je kontextový jazyk, není bezkontextový.

Proof:

$S \rightarrow aSBC \mid aBC$	generování symbolů $a$
$B \rightarrow BBC$	množení symbolů $B$
$C \rightarrow CC$	množení symbolů $C$
$CB \rightarrow BC$	uspořádání symbolů $B$ a $C$
$aB \rightarrow ab$	začátek přepisu $B$ na $b$
$bB \rightarrow bb$	pokračování přepisu $B$ na $b$
$bC \rightarrow bc$	začátek přepisu $C$ na $c$
$cC \rightarrow cc$	pokračování přepisu $C$ na $c$

$CB \rightarrow BC$  není kontextové pravidlo, nahradíme ho

$CB \rightarrow XB, XB \rightarrow XY, XY \rightarrow BY, BY \rightarrow BC$



# Lineárně omezené automaty

- Ještě potřebujeme ekvivalent pro kontextové gramatiky
- kontextovou gramatiku dostaneme z libovolné monotónní gramatiky

## Definition 12.3 (lineárně omezený automat (LBA))

**Lineárně omezený automat LBA** je nedeterministický TM, kde na pásce je označen levý a pravý konec  $\underline{l}$ ,  $\underline{r}$ . Tyto symboly nelze při výpočtu přepsat a nesmí se jít nalevo od  $\underline{l}$  a napravo od  $\underline{r}$ .

Slovo  $w$  **je přijímáno lineárně omezeným automatem**, pokud  $q_0 \underline{l} w \underline{r} \vdash^* \alpha p \beta$ ,  $p \in F$ .

- Prostor výpočtu je definován vstupním slovem a automat při jeho přijímání nesmí překročit jeho délku
- u monotónních (kontextových) derivací to není problém – žádné slovo v derivaci není delší než vstupní slovo

# Od kontextových jazyků k LBA

## Theorem 12.1

*Každý kontextový jazyk lze přijímat pomocí LBA.*

### Proof: z kontextové gramatiky k LBA

- derivaci gramatiky budeme simulovat pomocí LBA
- použijeme pásku se dvěma stopami
- slovo  $w$  dáme nahoru, na začátek dolní stopy  $S$
- přepisujeme slovo ve druhé stopě podle pravidel  $G$ 
  - nedeterministicky vybereme část k přepsání
  - provedeme přepsání dle pravidla (pravá část se odsune)
- pokud jsou ve druhé stopě samé terminály, porovnáme ji s první stopou
  - slovo přijmeme nebo zamítneme

!	$w$		$\bar{r}$
	$S$		

Aplikace pravidla

$$\alpha X \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta$$

$u$	$\alpha$	$X$	$\beta$	$v$
-----	----------	-----	---------	-----

$u$	$\alpha$	$\gamma$	$\beta$	$v$
-----	----------	----------	---------	-----



# Od LBA ke kontextovým jazykům

## Theorem 12.2

*LBA přijímají pouze kontextové jazyky.*

Proof: z LBA ke kontextovým gramatikám

- potřebujeme převést LBA na monotónní gramatiku
  - tj. gramatika nesmí generovat nic navíc
- výpočet ukryjeme do 'dvoustopých' neterminálů
- generuj slovo ve tvaru  $(a_0, [q_0, \underline{l}, a_0]), (a_1, a_1), \dots, (a_n, [a_n, \underline{r}])$

w		
$q_0, \underline{l}, a_0$		$a_n, \underline{r}$

- simuluj práci LBA ve 'druhé' stopě (stejně jako u TM)
  - pro  $\delta(p, x) = (q, x', R)$ :  $P\underline{X} \rightarrow \underline{X}'Q$
  - pro  $\delta(p, x) = (q, x', L)$ :  $\underline{Y}P\underline{X} \rightarrow Q\underline{Y}X'$
- pokud je stav koncový, smaž 'druhou' stop
- speciálně je třeba ošetřit přijímání prázdného slova
  - pokud LBA přijímá  $\lambda$ , přidáme speciální startovací pravidlo



## Definition 12.4 (TM zastaví)

TM **zastaví** pokud vstoupí do stavu  $q$ , s čteným symbolem  $X$ , a není instrukce pro tuto situaci, t.j.,  $\delta(q, X)$  není definováno.

- Předpokládáme, že v přijímajícím stavu  $q \in F$  TM zastaví,
- dokud nezastaví, nevíme, jestli přijme nebo nepřijme slovo.

## Definition 12.5 (Rekurzivní jazyky)

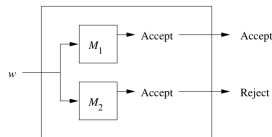
Říkáme, že TM  $M$  **rozhoduje jazyk**  $L$ , pokud  $L = L(M)$  a pro každé  $w \in \Sigma^*$  stroj nad  $w$  zastaví.

Jazyky rozhodnutelné TM nazýváme **rekurzivní jazyky**.

$L \& \bar{L} \in RE \Rightarrow L, \bar{L}$  je rekurzivní

### Theorem 12.3 (Postova věta)

Jazyk  $L$  je rekurzivní, právě když  $L$  i  $\bar{L}$  (doplňěk) jsou rekurzivně spočetné.

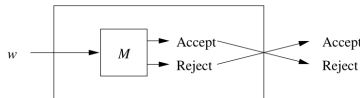


### Proof:

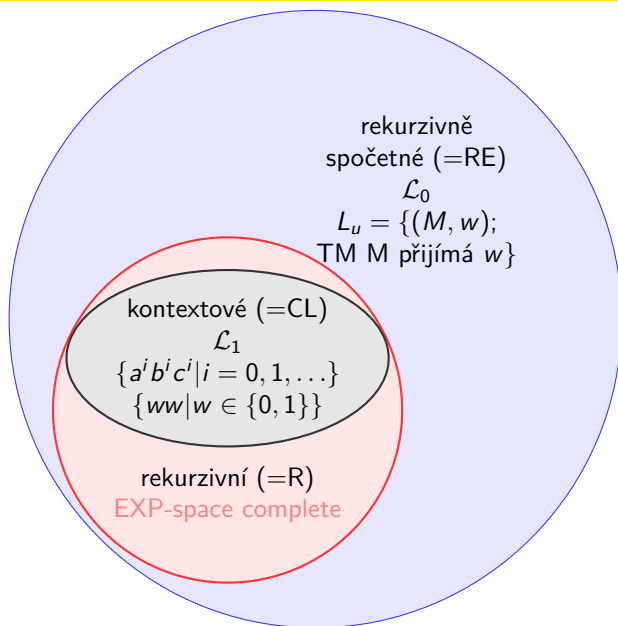
- Máme TM  $L = L(M_1)$  a  $\bar{L} = L(M_2)$ .
- pro dané slovo  $w$  naráz simulujeme  $M_1$  i  $M_2$  (dvě pásky, stav se dvěma komponentami).
- Pokud jeden z  $M_i$  přijme,  $M$  zastaví a odpoví.
- Jazyky jsou komplementární, jeden z  $M_i$  vždy zastaví,  $L$  je rekurzivní  $\square$

### Theorem 12.4

Je-li  $L$  rekurzivní jazyk, je rekurzivní i  $\bar{L}$ .



# Hierarchie jazyků (kontextové a výš)



$$L_d = \{w; \text{ TM s kódem } w \text{ nepřijímá vstup } w\}$$

# Jazyk který není rekurzivně spočetný

Směřujeme k důkazu nerozhodnutelnosti jazyka dvojic  $(M, w)$  takových, že:

- $M$  je binárně kódovaný Turingův stroj s abecedou  $\{0, 1\}$ ,
- $w \in \{0, 1\}^*$  a
- $M$  nepřijímá vstup  $w$ .

Postup:

- Kódování TM binárním kódem pro libovolný počet stavů TM.
- Kód TM vezmeme TM jako binární řetězec.
- Pokud kód nedává smysl, reprezentuje TM bez transakcí. Tedy každý kód reprezentuje nějaký TM.
- **Diagonální jazyk  $L_d$ ;**  
 $L_d = \{w; \text{TM reprezentovaný jako } w \text{ takový, že nepřijímá } w\}.$
- Neexistuje TM přijímající jazyk  $L_d$ . Spuštění takového stroje na vlastním kódu by vedlo k paradoxu.

Jazyk  $L_d$  není rekurzivně spočetný. Proto  $\overline{L_d}$  není rekurzivní. Lze dokázat, že  $\overline{L_d}$  je rekurzivně spočetný.



- Pro kódování TM  $M = (Q, \{0, 1\}, \Gamma, \delta, q_1, B, \{q_2\})$  očísujeme stavy, symboly a směry  $L, R$ .
- Předpokládáme:
  - Počáteční stav je vždy  $q_1$ .
  - Stav  $q_2$  je vždy jediný koncový stav (nepotřebujeme víc, TM zastaví).
  - První symbol je vždy 0, druhý 1, třetí B, prázdný symbol. Ostatní symboly pásy očísujeme libovolně.
  - Směr L je 1, směr R je 2.
- Jeden krok  $\delta(q_i, X_j) = (q_k, X_l, D_m)$  kódujeme:  $0^i 10^j 10^k 10^l 10^m$ . Všechna  $i, j, k, l, m \geq 1$  takže se dvě jedničky za sebou nevyskytují.
- Celý TM se skládá z kódů všech přechodů v nějakém pořadí oddělených dvojicemi jedniček 11:  $C_1 11 C_2 11 \dots C_{n-1} 11 C_n$ .

Budeme potřebovat uspořádat řetězce do posloupnosti:

- Řetězce bereme uspořádané podle délky, stejně dlouhé uspořádáme lexikograficky.
- První je  $\lambda$ , druhý 0, třetí 1, čtvrtý 00 atd.
- $i$ -tý řetězec označujeme  $w_i$ .

# Příklad kódování TM

## Turingův stroj

$M = (\{q_1, q_2, q_3\}, \{0, 1\}, \{0, 1, B\}, \delta, q_1, B, \{q_2\})$

$\delta$	0	1	B
$\rightarrow q_1$		$(q_3, 0, R)$	
$*q_2$			
$q_3$	$(q_1, 1, R)$	$(q_2, 0, R)$	$(q_3, 1, L)$

- Kód pro transakce:

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
0100100010100	0001010100100	00010010010100	0001000100010010

- Kód celého TM:

01001000101001100010101001001100010010010100110001000100010010.

## Definition 12.6 (Diagonální jazyk)

**Diagonální jazyk**  $L_d$  je definován

$L_d = \{w; \text{TM reprezentovaný jako } w \text{ který nepřijímá slovo } w\}.$

$L_d = \{w; \text{na diagonále je } 0\}.$

### Theorem 12.5

*$L_d$  není rekurzivně spočetný jazyk, tj. neexistuje TM přijímající  $L_d$ .*

	$j \rightarrow$	1	2	3	4	...
$i \downarrow$	1	0	1	1	0	...
	2	1	1	0	0	...
	3	0	0	1	1	...
	4	0	1	0	1	...
	.	.	.	.	.	...
	.	.	.	.	.	...
	.	.	.	.	.	...

Diagonal

### Proof.

- Předpokládejme  $L_d$  je RE,  $L_d = L(M_d)$  pro nějaký TM  $M_d$ .
- Jeho jazyk je  $\{0, 1\}$ , tedy je v seznamu na obrázku: 'Přijímá TM  $M_i$  vstupní slovo  $w_j$ '?
- Alespoň jeden řetězec ho kóduje, řekněme  $code(M_d) = w_d$ .
- Je  $w_d \in L_d$ 
  - Pokud 'ano', na diagonále má být 0, tj.  $w_d \notin L(M_d) = L_d$ , spor.
  - Pokud 'ne', na diagonále má být 1,  $w_d \in L(M_d) = L_d$ , spor.

Proto takový  $M$  neexistuje. Tedy  $L_d$  není rekurzivně spočetný.



# Univerzální Turingův stroj

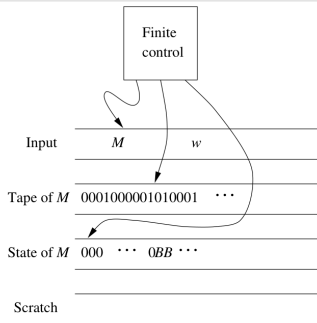
## Definition 12.7 (Univerzální jazyk)

Definujeme **univerzální jazyk**  $L_u$  jakožto množinu binárních řetězců které kódují pár  $(M, w)$ , kde  $M$  je TM a  $w \in L(M)$ .

TM rozpoznávající  $L_u$  se nazývá **Univerzální Turingův stroj**.

## Theorem 12.6 (Existence Univerzálního Turingova stroje)

*Existuje Turingův stroj  $U$ , pro který  $L_u = L(U)$ .*



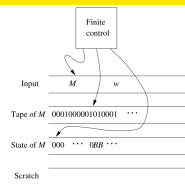
Popíšeme  $U$  jako vícepáskový Turingův stroj.

- Přechody  $M$  jsou napsány na první pásce spolu s řetězcem  $w$ .
- Na druhé pásce simulujeme výpočet  $M$ , používající formát jako kód  $M$ , tj. symboly  $0^i$  oddělené jedničkou  $1$ .
- Třetí páska obsahuje stav  $M$  reprezentovaný  $i$  nulami.

# Operace univerzálního Turingova stroje

Operace  $U$  jsou následující:

- Otestuj, zda je kód  $M$  legitimní; pokud ne,  $U$  zastav bez přijetí.
- Inicializuj druhou pásku kódovaným slovem  $w$ : 10 pro 0 ve  $w$ , 100 pro 1; blank jsou nechané prázdné a nahrazeny 1000 pouze 'v případě potřeby'.
- Napiš 0, počáteční stav  $M$ , na třetí pásku. Posuň hlavu druhé pásky na první simulované políčko.
- Simuluj jednotlivé přechody  $M$ 
  - Najdi na první pásce správnou transakci  $0^i 10^j 10^k 10^l 10^m$ ,  $0^i$  na pásce 3,  $0^j$  na pásce 2.
  - Změň obsah pásky 3 na  $0^k$ .
  - Nahraď  $0^j$  na 2. pásce řetězcem  $0^l$ . Použij čtvrtou 'scratch tape' pro správné mezery.
  - Posuň hlavu 2. pásky na pozici vedle 1 vlevo nebo vpravo, podle pohybu  $m$ .
- Pokud jsme nenašli instrukci pro  $M$ , zastavíme.
- Pokud  $M$  přejde do přijímajícího stavu, pak  $U$  také přijme. □



# Nerozhodnutelnost univerzálního jazyka

## Theorem 12.7 (Nerozhodnutelnost univerzálního jazyka)

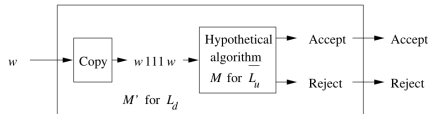
$L_u$  je rekurzivně spočetný, ale není rekurzivní.

### Proof.

- Máme TM přijímající  $L_u$ , tj. je RE.
- Předpokládejme, že je  $L_u$  rekurzivní.
- Pak  $\overline{L_u}$  by byl také rekurzivní.
- Pro TM přijímající  $\overline{L_u}$  můžeme zkonstruovat TM přijímající  $L_d$  (vpravo).
- Protože víme, že  $L_d$  není RE,  $\overline{L_u}$  není RE a  $L_u$  není rekurzivní.

□

Modifikace TM pro  $\overline{L_u}$  na TM pro  $L_d$ :



- Řetězec  $w$  přepiš na  $w111w$  (2-páskový, převed' na 1-páskový).
- Simuluj  $M$  na novém vstupu. Přijmi iff  $M$  přijme.
- Zvol  $i$  tak že  $w_i = w$ . Předchozí krok přijímá  $\overline{L_u}$ , tj. případy kdy  $M_i$  nepřijímá  $w_i$ , tj. jazyk  $L_d$ .

# Nerozhodnutelné problémy o Turingových strojích

## Definition 13.1 (Rozhodnutelný problém)

**Problémem**  $P$  myslíme matematicky/informaticky definovanou množinu otázek kódovatelnou řetězcí nad abecedou  $\Sigma^*$  s odpověďmi  $\in \{ano, ne\}$ .

**Problém je (algoritmicky) rozhodnutelný**, pokud existuje Turingův stroj TM takový, že pro každý vstup  $w \in P$  zastaví a navíc přijme právě když  $P(w) = ano$  (tj. pro  $P(w) = ne$  zastaví v ne-přijímacím stavu).

Problém, který není algoritmicky rozhodnutelný nazýváme **nerozhodnutelný problém**.

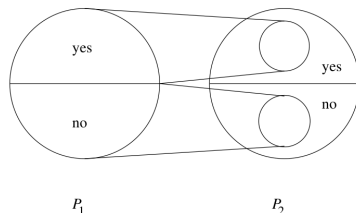
## Example 13.1 ('Problémy')

- Obsahuje vstupní slovo pět nul?
- Je vstupní slovo korektně definovaným kódem Turingova stroje v kódování výše?
- Zastaví TM kódu  $M$  nad slovem  $w$ ?
- Zastaví TM kódu  $w$  nad slovem  $w$ ?

## Definition 13.2 (Redukce)

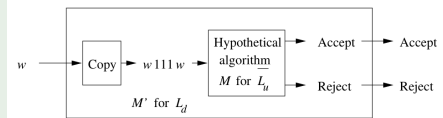
**Redukcí problému**  $P_1$  na  $P_2$ , nazýváme algoritmus  $R$ , který pro každou instanci  $w \in P_1$  zastaví a vydá  $R(w) \in P_2$  tak, že

- $P_1(w) = \text{ano}$  právě když  $P_2(R(w)) = \text{ano}$
- tj. i  $P_1(w) = \text{ne}$  právě když  $P_2(R(w)) = \text{ne}$ .



## Example 13.2

Redukce TM pro  $L_d$  na TM pro  $\overline{L_u}$ :



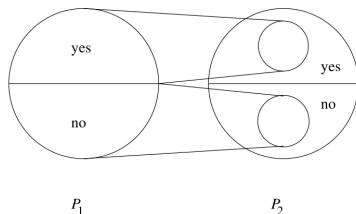
- $P_1 =$  Nepřijímá TM reprezentovaný  $w$  vstupní slovo  $w$ ?
- $P_2 =$  Nepřijímá TM reprezentovaný  $M$  vstupní slovo  $w$ ?



## Theorem 13.1 (Redukce)

*Pokud existuje redukce problému  $P_1$  na  $P_2$ , pak:*

- *Pokud  $P_1$  je nerozhodnutelný, pak je nerozhodnutelný i  $P_2$ .*
- *Pokud  $P_1$  není rekurzivně spočetný, pak není RE ani  $P_2$ .*



## Proof.

- Předpokládejme  $P_1$  je nerozhodnutelný. Je-li možné rozhodnout  $P_2$ , pak můžeme zkombinovat redukci  $P_1$  na  $P_2$  s algoritmem rozhodujícím  $P_2$  pro konstrukci algoritmu rozhodujícího  $P_1$ . Proto je  $P_2$  nerozhodnutelný.
- Předpokládejme  $P_1$  ne-RE, ale  $P_2$  je RE. Podobně jako výše zkombinujeme redukci a výsledek  $P_2$  k důkazu  $P_1$  je RE; SPOR.



# Problém zastavení

## Theorem (Nerozhodnutelnost univerzálního jazyka)

$L_u$  je rekurzivně spočetný, ale není rekurzivní.

## Theorem (Problém zastavení)

Instancí problému zastavení je dvojice řetězců  $M, w \in \{0, 1\}^*$ . Hledáme algoritmus  $\text{Halt}(M, w)$ , který vydá 1 právě když stroj  $M$  zastaví na vstupu  $w$ , jinak vydá 0.

Problém zastavení není rozhodnutelný.

## Proof.

- Redukujeme  $L_d$  na  $\text{Halt}$ .
- Předpokládejme, že máme algoritmus (Turingův stroj) pro  $\text{Halt}()$ .
- Modifikujeme ho na stroj  $\text{Halt}_{no}(w)$ ;  $w \in \{0, 1\}^*$ :
  - Pokud  $\text{Halt}(w, w)$ , spustíme nekonečný cyklus
  - jinak zastavíme.
- Otázka  $\text{Halt}(\text{Halt}_{no}, \text{Halt}_{no})$  není řešitelná, proto algoritmus  $\text{Halt}()$  nemůže existovat.

# TM přijímající prázdný jazyk (nic)

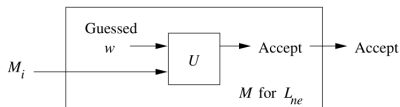
## Definition 13.3

Slova  $w$  jazyků  $L_e, L_{ne} \in \{0,1\}^*$  vnímáme jako kódy Turingových strojů. Definujeme:

- $L_e = \{w \mid L(w) = \emptyset\}$
- $L_{ne} = \{w \mid L(w) \neq \emptyset\}$ .

## Theorem 13.2

$L_{ne}$  je rekurzivně spočetný (RE).

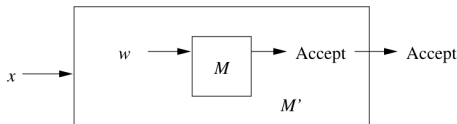


## Theorem 13.3

$L_e$  není rekurzivně spočetný, proto  $L_{ne}$  není rekurzivní.

Redukce: Pro  $w \in L_d$  do  $M$ ;  $L(M) = L_e$ .

- Obraz  $R(w)$  je TM, který ignoruje svůj vstup  $x$ ,
- na vstupní pásku napíše  $w$  a simuluje  $U$  na vstupu  $w$ .
- Jazyk je prázdný iff stroj  $w$  nepřijímá  $w$ , tj. přijímá diagonální jazyk.



# Postův korespondenční problém

## Definition 13.4 (Postův korespondenční problém)

Instance **Postova korespondenčního problému (PCP)** jsou dva seznamy slov nad abecedou  $\Sigma$  značené  $A = w_1, w_2, \dots, w_k$  a  $B = x_1, x_2, \dots, x_k$  stejné délky  $k$ . Pro každé  $i$ , dvojice  $(w_i, x_i)$  se nazývá **odpovídající** dvojice.

Instance PCP **má řešení**, pokud existuje posloupnost jednoho či více přirozených čísel  $i_1, i_2, \dots, i_m$  tak že  $w_{i_1} w_{i_2} \dots w_{i_m} = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_m}$  tj. dostaneme stejné slovo. V tom případě říkáme, že posloupnost  $i_1, i_2, \dots, i_m$  **je řešení**.

**Postův korespondenční problém** je: Pro danou instanci PCP, rozhodněte, zda má řešení.

## Example 13.3

	Seznam A	Seznam B
$i$	$w_i$	$x_i$
1	1	111
2	10111	10
3	10	0

- $\Sigma = \{0, 1\}$ , seznamy A,B v tabulce.
- Řešení 2, 1, 1, 3 vytvoří slovo 101111110.
- Jiné řešení: 2,1,1,3,2,1,1,3.

## Example 13.4

$\Sigma = \{0, 1\}$ . Neexistuje řešení pro seznamy:

	List A	List B
$i$	$w_i$	$x_i$
1	10	101
2	011	11
3	101	011.

Zdůvodnění:

- $i_1 = 1$ , jinak by první symbol neodpovídal.
- Máme částečné řešení:  
A: 10...  
B: 101...

## Definition 13.5 (Částečné řešení)

**Částečným řešením** nazýváme posloupnost indexů  $i_1, i_2, \dots, i_r$  taková že jeden z řetězců  $w_{i_1}, w_{i_2}, \dots, w_{i_r}$  a  $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_r}$  je prefix druhého (i v případě, že řetězce nejsou totožné).

## Lemma

*Je-li posloupnost čísel řešením, pak je každý prefix částečným řešením.*

- $i_2 = 1$ , řetězce  
1010  
101101  
nesouhlasí na 4.pozici.
- $i_2 = 2$ , 10011  
10111 nesouhlasí  
na 3.pozici.
- Je možné jen  $i_2 = 3$ .

A: 10101...

B: 101011...

- Jsme ve stejné pozici jako po volbě  $i_1 = 1$ .
- Nelze dostat oba řetězce na stejnou délku.

# Modifikovaný Postův korespondenční problém MPCP

## Definition 13.6 (Modifikovaný Postův korespondenční problém MPCP)

Mějme PCP, tj. seznamy  $A = w_1, w_2, \dots, w_k$  a  $B = x_1, x_2, \dots, x_k$ . Hledáme seznam 0 nebo více přirozených čísel  $i_1, i_2, \dots, i_m$  tak že  $w_1, w_{i_1}, w_{i_2}, \dots, w_{i_m} = x_1, x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m}$ . V tom případě říkáme, že PCP **má** **iniciální řešení**.

**Modifikovaný Postův korespondenční problém:** má PCP iniciální řešení?

### Example 13.5

Tento PCP nemá iniciální řešení.

	seznam $A$	seznam $B$
$i$	$w_i$	$x_i$
1	1	111
2	10111	10
3	10	0

### Proof:

- Částečné instance  $\begin{matrix} 1 \\ 111 \end{matrix}$ ,  
 $\begin{matrix} 11 \\ 111111 \end{matrix}$  se nikdy nesrovnají na stejnou délku.
- Jiné volby vedou k různým písmenům abecedy.



# MPCP redukce na PCP

## Lemma 13.1 (Redukce MPCP na PCP)

$w \in \text{MPCP}$  má iniciální řešení, právě když má  $R(w)$  řešení.

	List A	List B
$i$	$w_i$	$x_i$
1	1	111
2	10111	10
3	10	0

## Example 13.6 (MPCP redukce na PCP.)

	List C	List D
$i$	$y_i$	$z_i$
0	*1*	*1*1*1
1	1*	*1*1*1
2	1*0*1*1*1*	*1*0
3	1*0*	*0
4	\$	*\$

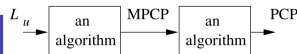
### Proof:

- Vezměme nové symboly  $*$ ,  $\$$   $\notin \Sigma$ .
- $\forall i = 1, \dots, k$  definujeme  $y_i$  rozšířením  $w_i$  s  $*$  za každým písmenem  $w_i$ .
- $\forall i = 1, \dots, k$  def.  $z_i$  rozšířením  $x_i$  s  $*$  **před** každým písmenem  $x_i$ .
- $y_0 = *y_1$ ,  $z_0 = z_1$ .
- $y_{k+1} = \$$ ,  $z_{k+1} = *\$$ .
- $i_1, i_2, \dots, i_m$  je iniciální řešení, iff  $0, i_1, i_2, \dots, i_m, (k+1)$  je řešení PCP. □

# Nerozhodnutelnost PCP

- Chceme dokázat, že PCP je algoritmicky nerozhodnutelný.
- Redukovali jsme MPCP na PCP (minulý slajd)
- a redukuje  $L_u$  na MPCP.

## Algorithm: Redukce $L_u$ na MPCP



Konstruuje MPCP pro TM  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$ , který nikdy nepíše  $B$  a nejde hlavou doleva od počáteční pozice. Nechť  $w \in \Sigma^*$  je vstupní slovo.

seznam A	seznam B	
#	#	
$X$	$X$	$\forall X \in \Gamma$
#	#	
$qX$	$Yp$	pro $\delta(q, X) = (p, Y, R)$
$ZqX$	$pZY$	pro $\delta(q, X) = (p, Y, L), Z \in \Gamma$ symbol pásky
$q\#$	$Yp\#$	pro $\delta(q, B) = (p, Y, R)$
$Zq\#$	$pZY\#$	pro $\delta(q, B) = (p, Y, L), Z \in \Gamma$ symbol pásky
$XqY$	$q$	$q \in F$ , přijímající stav
$Xq$	$q$	$q \in F$
$qY$	$q$	$q \in F$
$q\#\#$	$q\#$	$q \in F$ .



## Example 13.7

Konvertujme TM

$$M = (\{q_1, q_2, q_3\}, \{0, 1\}, \{0, 1, X, Y, B\}, \delta, q_0, B, \{q_3\})$$

$q_i$	$\delta(q_i, 0)$	$\delta(q_i, 1)$	$\delta(q_i, B)$
$q_1$	$(q_2, 1, R)$	$(q_2, 0, L)$	$(q_2, 1, L)$
$q_2$	$(q_3, 0, L)$	$(q_1, 0, R)$	$(q_2, 0, R)$
$q_3$	—	—	—

a vstupní slovo  $w = 01$  na instanci MPCP.

seznam A	seznam B	zdroj
$q_1 0$	$1 q_2$	$z \delta(q_1, 0) = (q_2, 1, R)$
$0 q_1 1$	$q_2 0 0$	$z \delta(q_1, 1) = (q_2, 0, L)$
$1 q_1 1$	$q_2 1 0$	$z \delta(q_1, 1) = (q_2, 0, L)$
$0 q_1 \#$	$q_2 0 1 \#$	$z \delta(q_1, B) = (q_2, 1, L)$
$1 q_1 \#$	$q_2 1 1 \#$	$z \delta(q_1, B) = (q_2, 1, L)$
$0 q_2 0$	$q_3 0 0$	$z \delta(q_2, 0) = (q_3, 0, L)$
$1 q_2 0$	$q_3 1 0$	$z \delta(q_2, 0) = (q_3, 0, L)$
$q_2 1$	$0 q_1$	$z \delta(q_2, 1) = (q_1, 0, R)$
$q_2 \#$	$0 q_2 \#$	$z \delta(q_2, B) = (q_2, 0, R)$

Seznam dvojic bez  $B$  symbolu (ve dvou tabulkách)

seznam A	seznam B
#	$\# q_1 0 1 \#$
0	0
1	1
#	#
$0 q_3 0$	$q_3$
$0 q_3 1$	$q_3$
$1 q_3 0$	$q_3$
$1 q_3 1$	$q_3$
$0 q_3$	$q_3$
$1 q_3$	$q_3$
$q_3 0$	$q_3$
$q_3 1$	$q_3$
$q_3 \# \#$	#

# MPCP simulace TM

seznam A	seznam B	zdroj
$q_1 0$	$1 q_2$	$z \delta(q_1, 0) = (q_2, 1, R)$
$0 q_1 1$	$q_2 0 0$	$z \delta(q_1, 1) = (q_2, 0, L)$
$1 q_1 1$	$q_2 1 0$	$z \delta(q_1, 1) = (q_2, 0, L)$
$0 q_1 \#$	$q_2 0 1 \#$	$z \delta(q_1, B) = (q_2, 1, L)$
$1 q_1 \#$	$q_2 1 1 \#$	$z \delta(q_1, B) = (q_2, 1, L)$
$0 q_2 0$	$q_3 0 0$	$z \delta(q_2, 0) = (q_3, 0, L)$
$1 q_2 0$	$q_3 1 0$	$z \delta(q_2, 0) = (q_3, 0, L)$
$q_2 1$	$0 q_1$	$z \delta(q_2, 1) = (q_1, 0, R)$
$q_2 \#$	$0 q_2 \#$	$z \delta(q_2, B) = (q_2, 0, R)$

- $M$  přijímá posloupností  
 $q_1 0 1 \vdash 1 q_2 1 \vdash 1 0 q_1 \vdash 1 q_2 0 1 \vdash q_3 1 0 1$ .

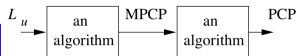
A:  $\# q_1 0 1 \# 1 q_2 1 \# 1 0 q_1 \# 1 q_2 0 1 \# q_3 1 0 1 \# q_3 0 1 \# q_3 1 \# q_3 \# \#$

B:  $\# q_1 0 1 \# 1 q_2 1 \# 1 0 q_1 \# 1 q_2 0 1 \# q_3 1 0 1 \# q_3 0 1 \# q_3 1 \# q_3 \# \#$ .

seznam A	seznam B
$\#$	$\# q_1 0 1 \#$
0	0
1	1
$\#$	$\#$
$0 q_3 0$	$q_3$
$0 q_3 1$	$q_3$
$1 q_3 0$	$q_3$
$1 q_3 1$	$q_3$
$0 q_3$	$q_3$
$1 q_3$	$q_3$
$q_3 0$	$q_3$
$q_3 1$	$q_3$
$q_3 \# \#$	$\#$

# PCP je algoritmicky nerozhodnutelný

Theorem 13.4 (PCP je algoritmicky nerozhodnutelný)



*Postův korespondenční problém PCP je algoritmicky nerozhodnutelný.*

Proof.

Předchozí algoritmus redukuje  $L_u$  na MPCP. Chceme dokázat:

- $M$  přijímá  $w$  právě když zkonstruovaný PCP má iniciální řešení.
- ⇐ Pokud  $w \in L(M)$ , začneme iniciálním párem a simulujeme výpočet  $M$  na  $w$ .
- ⇒ Máme-li iniciální řešení PCP, odpovídá přijímajícímu výpočtu  $M$  nad  $w$ .
- MPCP musí začít první dvojicí.
  - Dokud  $q \notin F$ , mazací pravidla se nepoužijí.
  - Pokud  $q \notin F$ , částečné řešení je tvaru:  
$$\begin{array}{l} A:x \\ B:xy \end{array}, \text{ t.j. } B \text{ je delší než } A$$
  - tedy musel skončit v přijímajícím stavu.

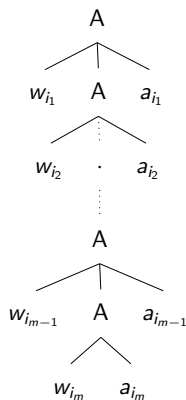


Pro bezkontextové jazyky je algoritmicky rozhodnutelné

- zda dané slovo patří či nepatří do jazyka
  - prázdné slovo zvlášť
  - pak algoritmus CYK
  - nebo otestovat všechny derivace s  $2|w| - 1$  pravidly,
- zda je jazyk prázdný
  - algoritmus redukce gramatiky (ne-nenerujících a nedosažitelných), zjistíme, zda lze z  $S$  generovat terminální slovo

## Theorem 13.5

*Je algoritmicky nerozhodnutelné, zda je bezkontextová gramatika víceznačná.*



Mějme instanci PCP ( $A = w_1, w_2, \dots, w_k, B = x_1, x_2, \dots, x_k$ ), množinu indexů  $a_1, a_2, \dots, a_k \in N$  a tři gramatiky  $G_A, G_B, G_{AB}$ :

$$G_A \quad A \rightarrow w_1 A a_1 | w_2 A a_2 | \dots | w_k A a_k | w_1 a_1 | w_2 a_2 | \dots | w_k a_k$$

$$G_B \quad B \rightarrow x_1 B a_1 | x_2 B a_2 | \dots | x_k B a_k | x_1 a_1 | x_2 a_2 | \dots | x_k a_k$$

$$G_{AB} \quad \{S \rightarrow A | B\} \cup G_A \cup G_B.$$

Gramatika  $G_{AB}$  je víceznačná právě když instance  $(A, B)$  PCP má řešení.

- Každé slovo v  $G_A$  má jednoznačnou derivaci (danou  $a_i$  vpravo). Podobně pro  $B$ .

## Theorem 13.6

Mějme  $G_1, G_2$  bezkontextové gramatiky,  $R$  regulární výraz. Následující problémy jsou algoritmicky nerozhodnutelné:

- 1 Je  $L(G_1) \cap L(G_2) = \emptyset$ ?
- 2 Je  $L(G_1) = T^*$  pro nějakou abecedu  $T$ ?
- 3 Je  $L(G_1) = L(G_2)$ ?
- 4 Je  $L(G_1) = L(R)$ ?
- 5 Je  $L(G_1) \subseteq L(G_2)$ ?
- 6 Je  $L(R) \subseteq L(G_1)$ ?

# Průnik $L(G_1) \cap L(G_2) = \emptyset$

Proof: 1  $L(G_1) \cap L(G_2) = \emptyset$

Převédeme PKP na (1)

- zvolíme nové terminály  $\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  pro kódy indexů

$$G_1 \quad A \rightarrow w_1 A a_1 | w_2 A a_2 | \dots | w_k A a_k | \\ w_1 a_1 | w_2 a_2 | \dots | w_k a_k$$

$$G_2 \quad B \rightarrow x_1 B a_1 | x_2 B a_2 | \dots | x_k B a_k | \\ x_1 a_1 | x_2 a_2 | \dots | x_k a_k$$


- PKP má řešení právě když  $L(G_1) \cap L(G_2) \neq \emptyset$
- první část se musí rovnat, druhá  $(a_i)$  zajišťuje stejné pořadí.



Vše  $L(G) = T^*$

Proof:  $2 L(G) = T^*$

Převédeme PKP na (2):

- zvolíme nové terminály  $\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  pro kódy indexů  
$$\begin{array}{lcl} G_1 & A \rightarrow & w_1 A a_1 | w_2 A a_2 | \dots | w_k A a_k | \\ & & w_1 a_1 | w_2 a_2 | \dots | w_k a_k \\ G_2 & B \rightarrow & x_1 B a_1 | x_2 B a_2 | \dots | x_k B a_k | \\ & & x_1 a_1 | x_2 a_2 | \dots | x_k a_k \end{array}$$
- jazyky  $L(G_1), L(G_2)$  jsou deterministické,
- tedy  $\overline{L(G_1)}, \overline{L(G_2)}$  jsou deterministické CFL a  $\overline{L(G_1)} \cup \overline{L(G_2)}$  je CFL
- máme CFG  $G$  gramatiku s  $L(G) = \overline{L(G_1)} \cup \overline{L(G_2)}$
- PKP má řešení  $\Leftrightarrow L(G_1) \cap L(G_2) \neq \emptyset \Leftrightarrow L(G) = \overline{L(G_1)} \cup \overline{L(G_2)} \neq \Sigma^*$  

- Poznámka:  $L(G) = \emptyset$  je algoritmicky rozhodnutelné.
- CFL nejsou uzavřené na doplněk, pouze deterministické CFL ano.



### Proof: 3-6

Je  $L(G_1) = L(G_2)$ ?    Důkaz: ať  $G_1$  generuje  $\Sigma^*$

Je  $L(G_1) = L(R)$ ?    Důkaz: za  $R$  zvolíme  $\Sigma^*$

Je  $L(G_1) \subseteq L(G_2)$ ?    Důkaz: ať  $G_1$  generuje  $\Sigma^*$

Je  $L(R) \subseteq L(G_1)$ ?    Důkaz: za  $R$  zvolíme  $\Sigma^*$



- Poznámka:  $L(G) \subseteq L(R)$  je algoritmicky rozhodnutelné

$L(G) \subseteq L(R) \Leftrightarrow L(G) \cap \overline{L(R)} = \emptyset$  a zároveň  $(L(G) \cap \overline{L(R)})$  je CFL  
(uzavřenost operací)

Popis nekonečných objektů konečnými prostředky

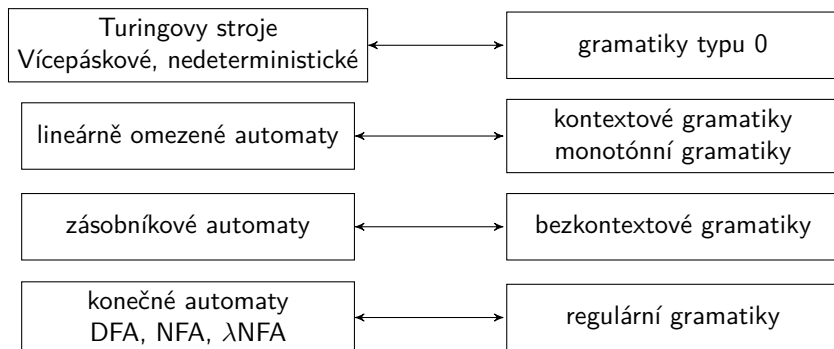
- regulární jazyky
  - konečné automaty (NRA, 2FA)
  - Nerode (rozklad), Kleene (elementární operace), pumpování
- bezkontextové jazyky
  - zásobníkové automaty ( $DPDA \neq PDA$ )
  - pumpování
- kontextové jazyky
  - lineárně omezené automaty
  - monotonie
- rekurzivně spočetné jazyky
  - Turingovy stroje
  - algoritmická nerozhodnutelnost

použití nejen pro práci s jazyky.

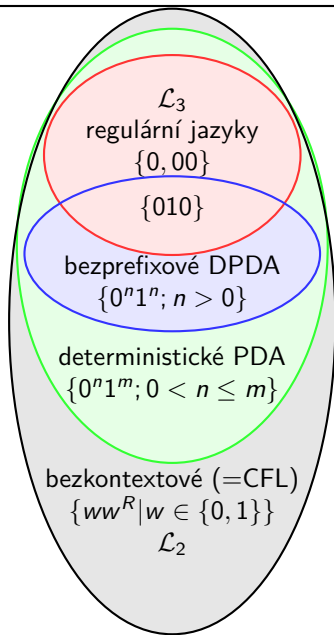
# Přehled kapitol

- 1 Úvod, Iterační lemma pro reg. jazyky
- 2 Redukovaný DFA a ekvivalence automatů, stavů
- 3 Regulární výrazy, Kleeneova věta, Operace zachovávající regularitu
- 4 Substituce, Homomorfismus
- 5 Dvousměrné FA, Mealy a Moore stroje
- 6 Gramatiky, Chomského hierarchie, víceznačnost
- 7 Zásobníkové automaty
- 8 Chomského NF, Pumping Lemma pro CFL
- 9 CYK – náležení do CFL, Deterministické PDA
- 10 Uzávěrové vlastnosti, Dykovy jazyky, Greibachové NF
- 11 Turingův stroj, rozšíření
- 12 Lineárně omezené automaty, Univerzální TM, Diagonální jazyk
- 13 Nerozhodnutelné problémy, Postův korespondenční p.

# Automaty a gramatiky – Shrnutí přednášky



Automaty a gramatiky – Chomského hierarchie



kontextové (=CL)

$$\mathcal{L}_1$$

$$\{a^i b^j c^i | i = 0, 1, \dots\}$$

$$\{ww | w \in \{0, 1\}^*\}$$

rekurzivně  
spočetné

$$\mathcal{L}_0$$

$$L_u = \{(M, w);$$

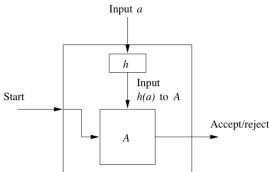
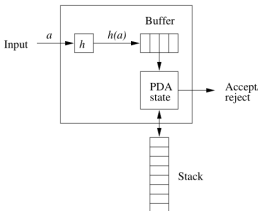
$$\text{TM } M \text{ přijímá } w\}$$

$$L_d = \{w; \text{ TM s kódem } w \text{ nepřijímá vstup } w\}$$

- Pojmy z Figure 1, jazyk rozpoznávaný automatem, generovaný gramatikou, a definice k tomu nutné.
- regulární výrazy, vztah k regulárním jazykům
- CFG, CFL: derivační strom, jednoznačnost/víceznačnost gramatiky a CFL jazyka, Chomského normální tvar gramatiky
- deterministické a nedeterministické zásobníkové automaty  $PDA, L(P), N(P)$ , bezprefixové jazyky
- rekurzivní a rekurzivně spočetné jazyky, Diagonální jazyk  $L_d = \{w; TM \text{ s kódem } w \text{ nepřijímá vstup } w\}$ , Univerzální jazyk (Univerzální Turingův stroj), Postův korespondenční problém a nerozhodnutelné problémy pro CFG.

- Mihyll–Nerodova věta, Pumping lemma pro regulární jazyky, Pumping lemma pro bezkontextové jazyky, Kleeneho věta (algebraická definice regulárních jazyků)
- vztahy pojmů ve Figure 1, i v rámci rámečku, i různých rámečků
- uzávěrové vlastnosti – důkaz ANO, protipříklad NE k Tabulce níže, uzávěrové vlastnosti regulárních a CFL jazyků na řetězcové operace.

# Uzávěrové vlastnosti

jazyk	regulární (RL)	bezkontextové	deterministické CFL
sjednocení průnik	$F = F_1 \times Q_2 \cup Q_1 \times F_2$ $F = F_1 \times F_2$	$S \rightarrow S_1   S_2$ $L = \{0^n 1^n 2^n   n \geq 1\} =$ $= \{0^n 1^n 2^i   n, i \geq 1\} \cap \{0^i 1^n 2^n   n, i \geq 1\}$	$A \cap B = \overline{\overline{A} \cup \overline{B}}$
$\cap$ s RL doplňěk homom.	$F = F_1 \times F_2$ $F = Q_1 - F_1$ Kleene + elem. jazyky + uz.	$F = F_1 \times F_2$ $A \cap B = \overline{\overline{A} \cup \overline{B}}$ a nahrad' $S_a$	$F = F_1 \times F_2$ $F = Q_1 - F_1, Z_0, \text{ cykly}$ $h(0) = h(1) = 0$ cca. $\cup$
inv. hom.			



- Dosažitelné stavy konečného automatu (FA), Rozlišitelné a ekvivalentní stavy FA, Ekvivalence FA, Nalezení reduktu DFA, Podmnožinová konstrukce z NFA
- Odstranění ne—generujících a ne—dosažitelných symbolů CFG gramatiky, Eliminace  $\lambda$  pravidel CFG, Převod CFG na gramatiku v Chomského normální formě, CYK (slovo v CFL).