

Teoretická informatika

Zdeněk Sawa

Katedra informatiky, FEI,
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 2172/15, Ostrava-Poruba 708 00
Česká republika

23. září 2024

Jméno: doc. Ing. Zdeněk Sawa, Ph.D.

E-mail: zdenek.sawa@vsb.cz

Místnost: EA413

Web: <http://www.cs.vsb.cz/sawa/ti>

Na těchto stránkách najdete:

- Informace o předmětu
- Slidy z přednášek
- Zadání příkladů na cvičení
- Učební text (starší, nepokrývá některá témata)
- Aktuální informace
- Odkaz na stránku s animacemi

V rámci MS Teams (tým „*Teoretická informatika 2024/25*“):

- některé další učební texty
- podklady pro referáty

- **Zápočet** (35 bodů):
 - **Referát** (15 bodů) — je nutné získat minimálně 5 bodů
možnost opravy za maximálně 10 bodů,
při opravě je nutné získat minimálně 1 bod
 - **Zápočtová písemka** (20 bodů) — je nutné získat minimálně 10 bodů
bude možnost opravy — maximálně za 17 bodů,
nutné minimum je stále 10 bodů

Celkově je třeba z referátu a zápočtové písemky získat v součtu minimálně 15 bodů.

- **Zkouška** (65 bodů):
 - bude probíhat písemnou formou
 - je nutné získat minimálně 25 bodů

Teoretická informatika — vědní obor na pomezí mezi informatikou a matematikou

- zkoumání obecných otázek týkajících se algoritmů a výpočtů
- zkoumání různých formalismů pro popis algoritmů
- zkoumání různých prostředků pro popis syntaxe a sémantiky formálních jazyků (zejména s důrazem na programovací jazyky)
- matematický přístup k analýze a řešení problémů (dokazování obecně platných matematických tvrzení týkajících se algoritmů)

Příklady některých typických otázek studovaných v teoretické informatice:

- Je možné daný problém řešit pomocí nějakého algoritmu?
- Pokud je možné daný problém řešit pomocí algoritmu, jaká je výpočetní složitost tohoto algoritmu?
- Existuje pro daný problém nějaký efektivní algoritmus, který ho řeší?
- Jak se přesvědčit o tom, že daný algoritmus je skutečně korektním řešením daného problému?
- Jaké instrukce musí umět vykonat stroj, který by mohl provádět daný algoritmus?

Algoritmus — mechanický postup, jak něco spočítat (může být vykonáván počítačem)

Algoritmy slouží k řešení různých **problémů**.

Příklad algoritmického problému:

Vstup: Přirozená čísla a a b .

Výstup: Přirozené číslo c takové, že $c = a + b$.

Algoritmus — mechanický postup, jak něco spočítat (může být vykonáván počítačem)

Algoritmy slouží k řešení různých **problémů**.

Příklad algoritmického problému:

Vstup: Přirozená čísla a a b .

Výstup: Přirozené číslo c takové, že $c = a + b$.

Konkrétní vstup nějakého problému se nazývá **instance** problému.

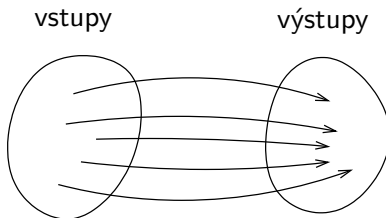
Příklad: Instancí výše uvedeného problému je například dvojice čísel 728 a 34.

Výstupem pro tuto instanci je číslo 762.

Problém

V zadání **problému** musí být určeno:

- co je množinou možných vstupů
- co je množinou možných výstupů
- jaký je vztah mezi vstupy a výstupy

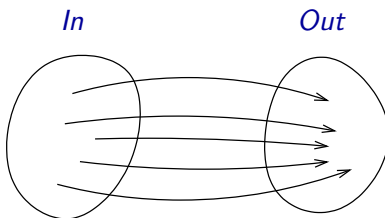


Problém

Formálně tedy můžeme **problém** definovat jako trojici (In, Out, R) , kde:

- In je množina možných vstupů
- Out je množina možných výstupů
- $R \subseteq In \times Out$ je relace přiřazující každému vstupu možné odpovídající výstupy. Tato relace musí splňovat

$$\forall x \in In : \exists y \in Out : R(x, y).$$



Problém „Třídění“

Vstup: Sekvence prvků $a_1, a_2, \dots, a_n$.

Výstup: Prvky sekvence $a_1, a_2, \dots, a_n$ seřazené od nejmenšího po největší.

Příklad instance problému a jí odpovídajícího výstupu:

- Vstup: 8, 13, 3, 10, 1, 4
- Výstup: 1, 3, 4, 8, 10, 13

Poznámka: Pro daný problém často existuje celá řada různých algoritmů, které jej korektně řeší, např. pro problém třídění:

- insertion sort, selection sort, bubble sort, merge sort, quicksort, heapsort, ...

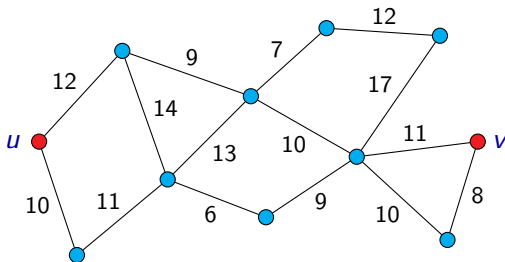
Příklady algoritmických problémů

Problém „Hledání nejkratší cesty v (neorientovaném) grafu“

Vstup: Neorientovaný graf $G = (V, E)$ s ohodnocením hran a dvojice vrcholů $u, v \in V$.

Výstup: Nejkratší cesta z vrcholu u do vrcholu v .
(Nebo informace, že žádná taková cesta neexistuje.)

Příklad:



Algoritmus **řeší** daný problém pokud:

- Se pro každý vstup po konečném počtu kroků zastaví.
- Pro každý vstup vydá správný výstup.

Korektnost algoritmu — ověření toho, že daný algoritmus skutečně řeší daný problém

Výpočetní složitost algoritmu:

- **časová složitost** — jak závisí doba výpočtu na velikosti vstupu
- **prostorová** (nebo též **paměťová**) **složitost** — jak závisí množství použité paměti na velikosti vstupu

Oblast teoretické informatiky zabývající se otázkami týkajícími se **syntaxe**.

- **Abeceda** — množina **symbolů** (nebo též **znaků**)
- **Slovo** — sekvence symbolů z určité abecedy
- **Jazyk** — množina slov

Slova a jazyky se v informatice objevují na mnoha místech:

- Reprezentace vstupních a výstupních dat
- Reprezentace kódu programů
- Manipulace s řetězcí znaků nebo se soubory
- ...

Formálně:

- **Abeceda** — libovolná neprázdná konečná množina **symbolů** (**znaků**)

Příklad: $\Sigma = \{a, b, c, d\}$

- **Slovo** — libovolná konečná posloupnost symbolů z dané abecedy

Příklad: $cabcba$

Množina všech slov nad abecedou Σ se označuje zápisem Σ^* .

Poznámka: Speciálním případem slova je prázdné slovo (tj. slovo délky 0). Pro označení prázdného slova budeme používat symbol ε .

Definice

(Formální) jazyk L v abecedě Σ je nějaká libovolná podmnožina množiny Σ^* , tj. $L \subseteq \Sigma^*$.

Příklad: Předpokládejme, že $\Sigma = \{a, b, c, d\}$:

- Jazyk $L_1 = \{aab, bcca, aaaaa\}$
- Jazyk $L_2 = \{w \in \Sigma^* \mid \text{počet výskytů symbolů } b \text{ ve slově } w \text{ je sudý}\}$

Kódování vstupu a výstupu

U algoritmických problémů často předpokládáme, že vstupy i výstupy jsou kódovány jako slova v nějaké abecedě Σ , tj. $In = Out = \Sigma^*$.

Různé jiné objekty (čísla, posloupnosti čísel, grafy, ...) pak zapisujeme (kódujeme) jako slova v této abecedě.

Příklad: Například u problému „Třídění“ bychom mohli zvolit jako abecedu $\Sigma = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, , \}$.

Vstupem by pak mohlo být například slovo

826,13,3901,128,562

a výstupem slovo

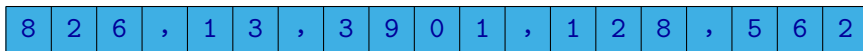
13,128,562,826,3901

Poznámka: Ne každé slovo ze Σ^* musí reprezentovat nějaký vstup. Kódování bychom ale měli zvolit tak, abychom byli schopni snadno poznat ta slova, která nějaký vstup reprezentují.

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

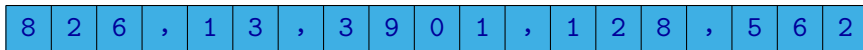


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

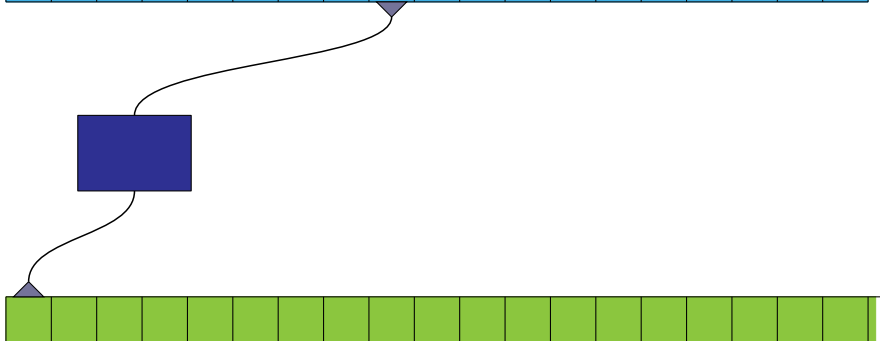
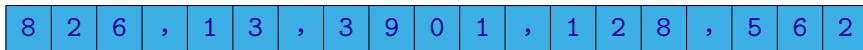


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

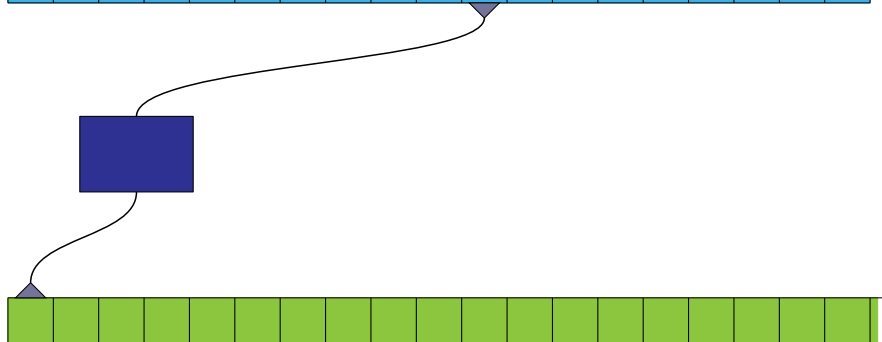


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

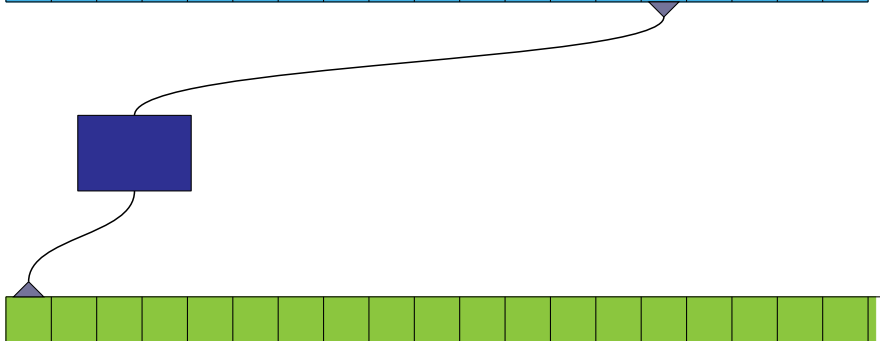
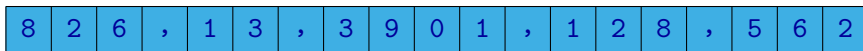


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output



Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

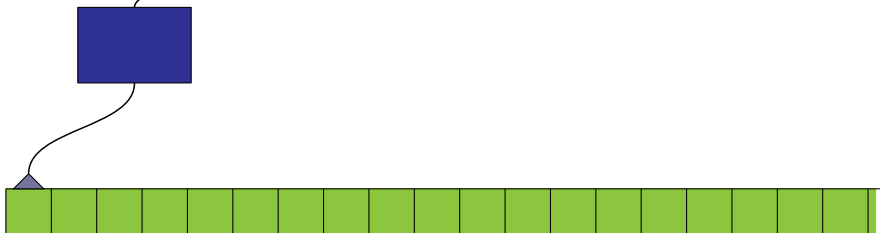
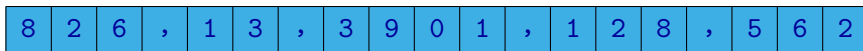


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



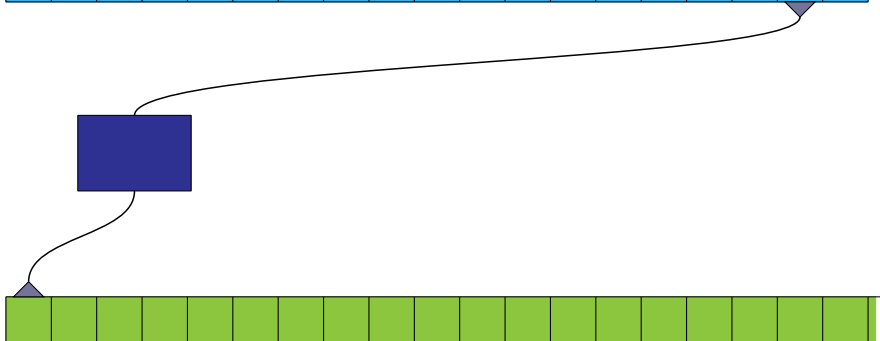
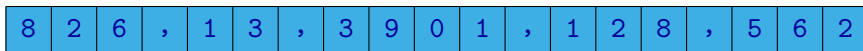
Output



Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

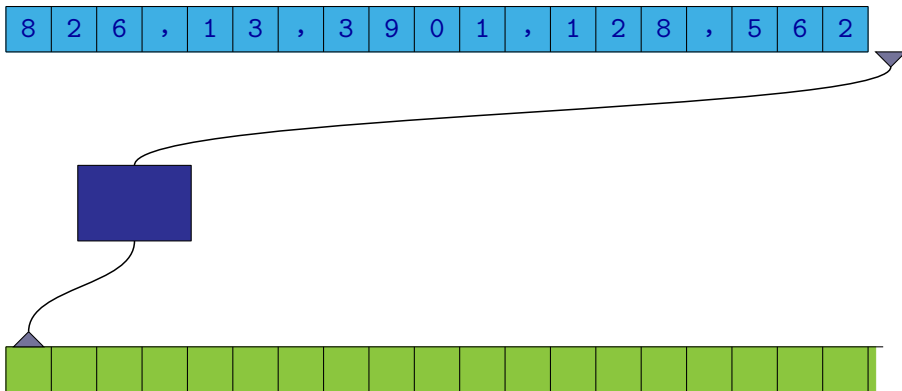


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

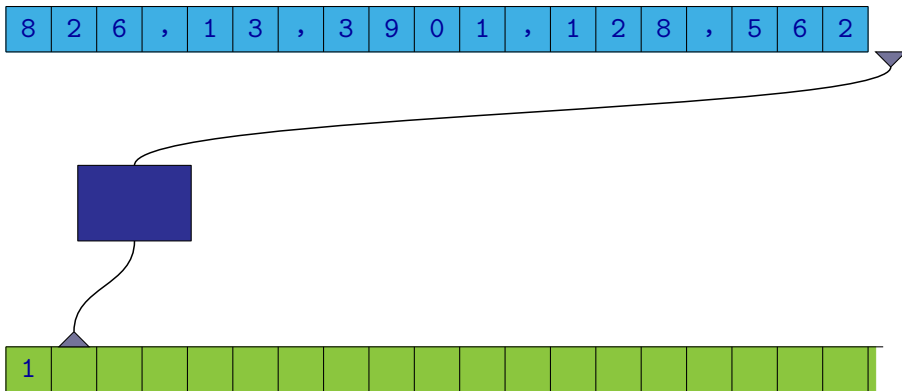


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

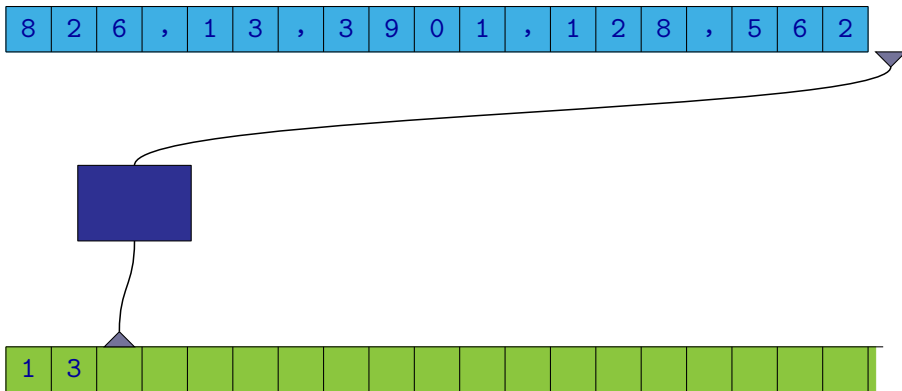


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

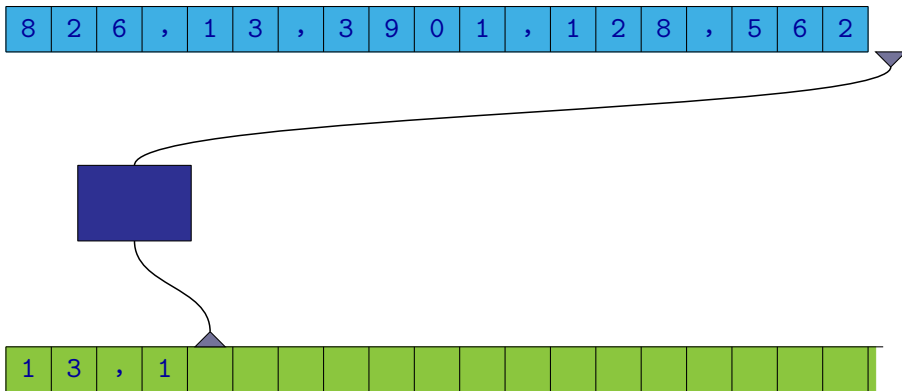


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

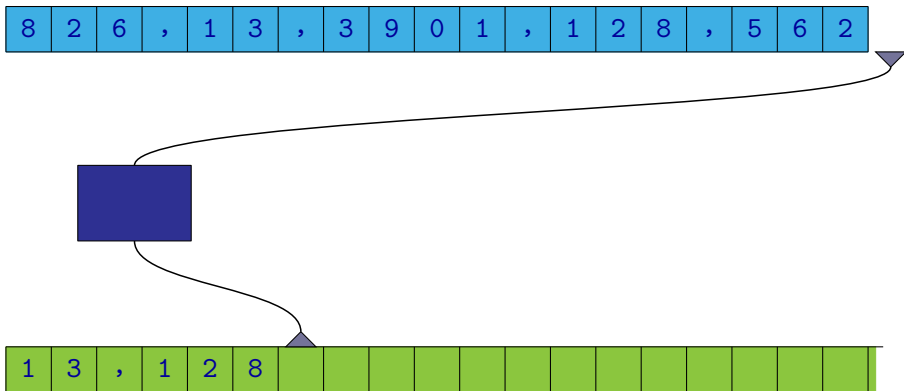


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

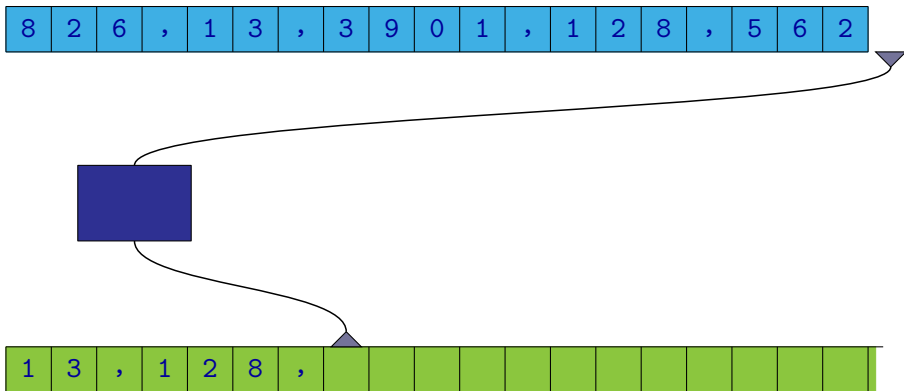


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

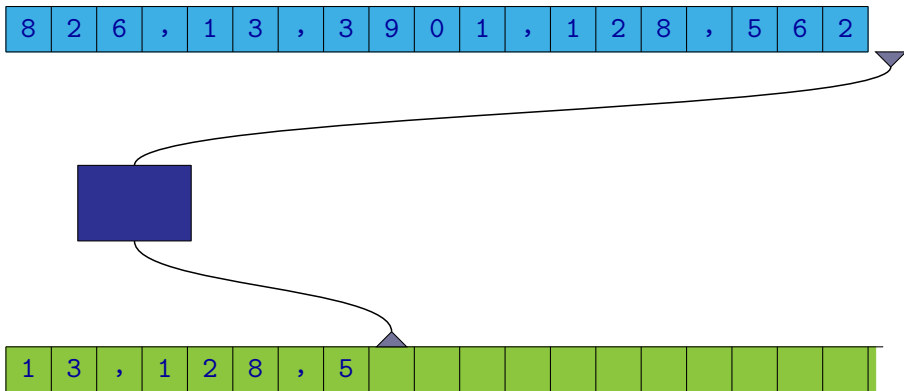


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

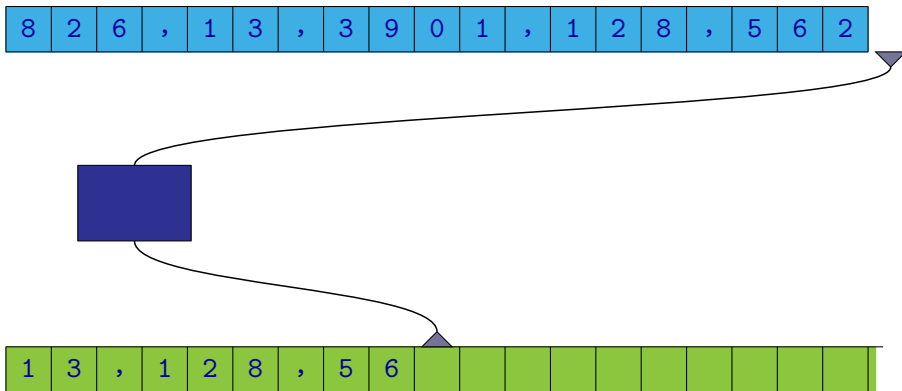


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

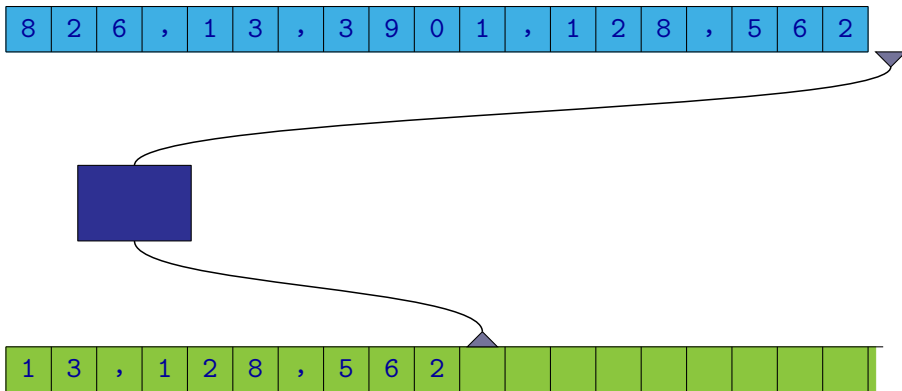


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

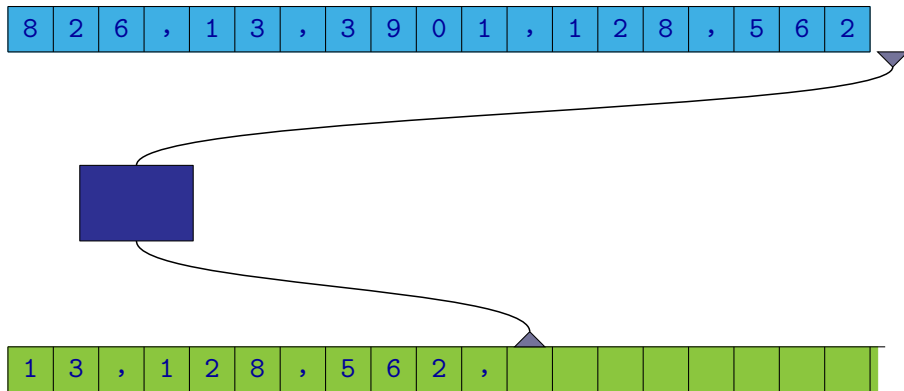


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

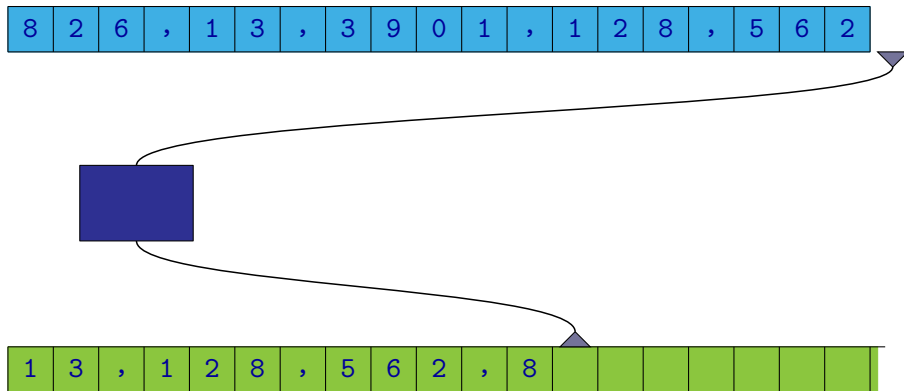


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

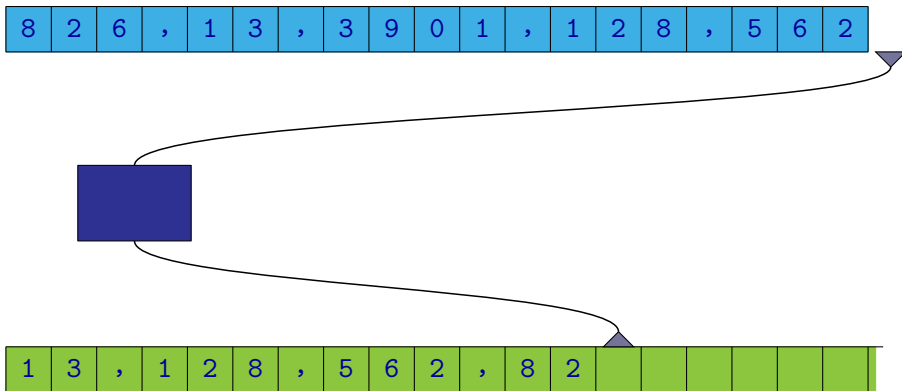


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

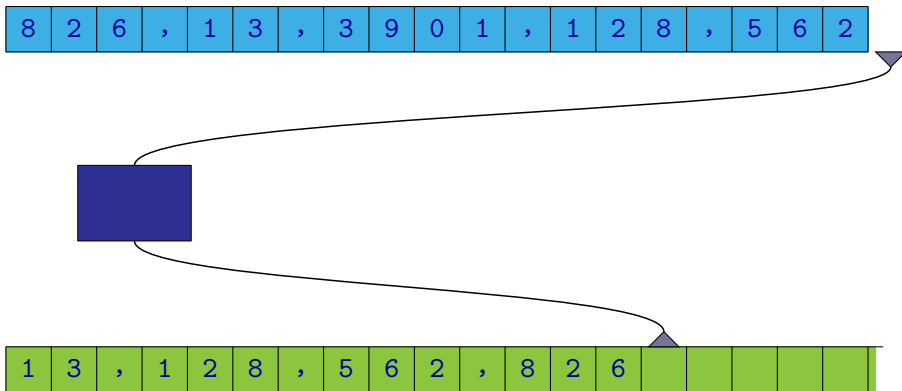


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

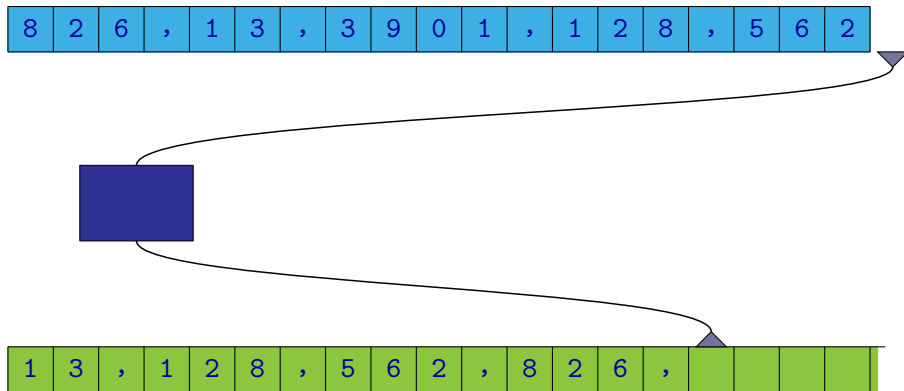


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

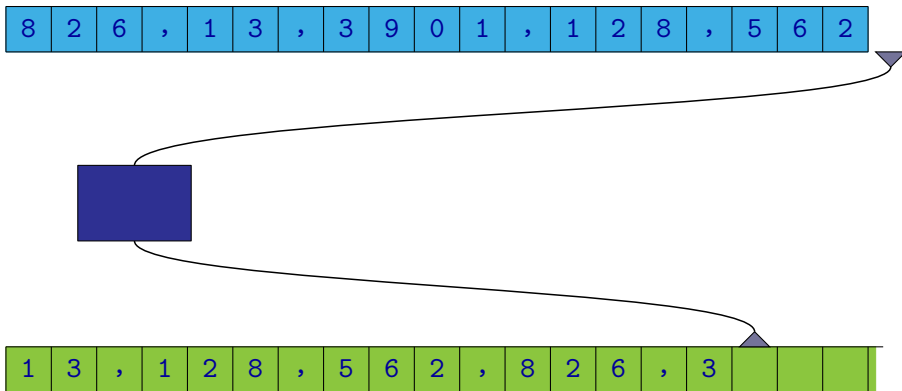


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

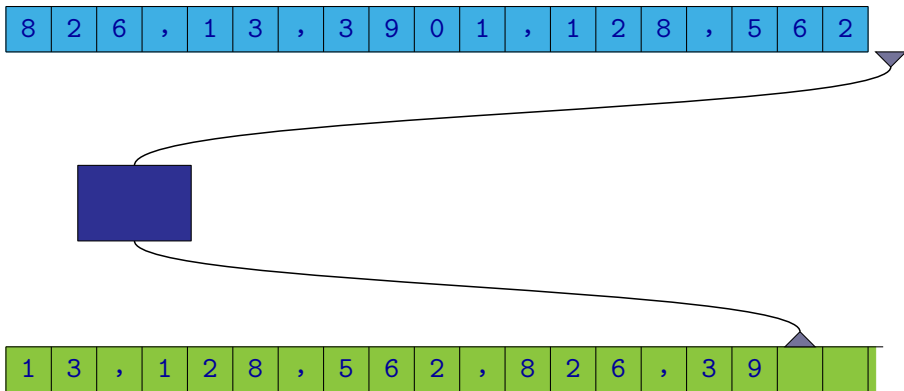


Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input



Output

Činnost algoritmu z hlediska vstupu a výstupu

Předpokládáme, že algoritmus je vykonáván nějakým druhem stroje.

Input

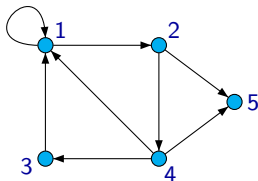


Output

Kódování vstupu a výstupu

Příklad: Pokud je vstupem nějakého problému například graf, můžeme ho reprezentovat jako seznam vrcholů a hran:

Například následující graf



můžeme reprezentovat jako slovo

$(1, 2, 3, 4, 5), ((1, 2), (2, 4), (4, 3), (3, 1), (1, 1), (2, 5), (4, 5), (4, 1))$

v abecedě $\Sigma = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, ,, (,)\}$.

Kódování vstupu a výstupu

Můžeme se omezit na případ, kdy jsou vstupy i výstupy kódovány jako slova v abecedě $\{0, 1\}$ (tj. jako sekvence bitů).

Symbols jakékoli jiné abecedy lze reprezentovat jako sekvence bitů.

Příklad: Abeceda $\{a, b, c, d, e, f, g\}$

a $\leftrightarrow$ 001

b $\leftrightarrow$ 010

c $\leftrightarrow$ 011

d $\leftrightarrow$ 100

e $\leftrightarrow$ 101

f $\leftrightarrow$ 110

g $\leftrightarrow$ 111

Slovo 'defb' můžeme reprezentovat jako '100101110010'.

Na slova v abecedě $\Sigma = \{0, 1\}^*$ (tj. sekvence bitů) se můžeme dívat jako na zápisy čísel v binární soustavě.

Jedním číslem tak můžeme kódovat libovolně dlouhou posloupnost bitů.

Takže celý vstup, resp. výstup, může být kódován jediným (většinou obrovským) přirozeným číslem.

V této variantě tedy můžeme předpokládat, že

$$In = Out = \mathbb{N},$$

kde $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ je množina přirozených čísel.

Kódování vstupu a výstupu

Další alternativou je možnost, kdy vstupy a výstupy nejsou kódovány jako slova v abecedě, nýbrž jako posloupnosti čísel.

Stačí zvolit nějaké kódování, kdy symbolům dané abecedy přiřadíme číselné kódy.

Příklad: Abeceda $\{a, b, c, d, e, f, g\}$

a	$\leftrightarrow$	1
b	$\leftrightarrow$	2
c	$\leftrightarrow$	3
d	$\leftrightarrow$	4
e	$\leftrightarrow$	5
f	$\leftrightarrow$	6
g	$\leftrightarrow$	7

Slovo 'defb' můžeme reprezentovat jako posloupnost $[4, 5, 6, 2]$.

Problém „Prvočíselnost“

Vstup: Přirozené číslo n .

Výstup: ANO pokud je n prvočíslo, NE v opačném případě.

Poznámka: Přirozené číslo n je **prvočíslo**, pokud je větší než 1 a je dělitelné beze zbytku pouze čísly 1 a n .

Prvních několik prvočísel: 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, ...

Problémům, kde množina výstupů je $\{ANO, NE\}$ se říká **rozhodovací problémy**.

Rozhodovací problémy jsou většinou specifikovány tak, že místo popisu toho, co je výstupem, je uvedena otázka.

Příklad:

Problém „Prvočíselnost“

Vstup: Přirozené číslo n .

Otázka: Je n prvočíslo?

Rozhodovací problém

Jednou z možností, jak formálně definovat **rozhodovací problém**, je definovat ho jako dvojici (In, T) , kde:

- In je množina možných vstupů,
- $T \subseteq In$ je množina vstupů, pro které je odpověď **ANO**.

Rozhodovací problémy a jazyky

Pokud se omezíme na to, že vstupy jsou slova z nějaké abecedy Σ , můžeme na rozhodovací problémy pohlížet jako na jazyky.

Jazyk odpovídající danému rozhodovacímu problému je množina těch slov ze Σ^* , která reprezentují ty vstupy, pro něž je odpověď **ANO**.

Tj. do daného jazyka patří slova:

- která jsou zápisem instancí, pro které je odpověď **ANO**,

a nepatří do něj slova:

- která jsou zápisem instancí, pro které je odpověď **NE**, nebo
- která nerepresentují instance daného problému.

Příklad: Jazyk L tvořený těmi slovy ze $\{0, 1\}^*$, která jsou binárním zápisem nějakého prvočísla.

Například $101 \in L$, ale $110 \notin L$.

Další příklad rozhodovacího problému

Problém SAT (splnitelnost booleovských formulí)

Vstup: Booleovská formule φ .

Otázka: Je φ splnitelná?

Poznámka: Formule φ je **splnitelná**, jestliže existuje pravdivostní ohodnocení ν , při kterém je tato formule pravdivá, tj. platí $\nu(\varphi) = 1$.

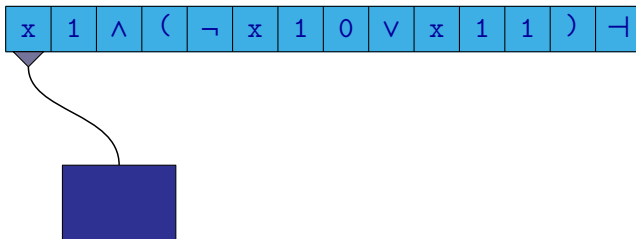
Příklad:

- Formule $\varphi_1 = x_1 \wedge (\neg x_2 \vee x_3)$ je splnitelná
 - např. při následujícím ohodnocení ν je $\nu(\varphi_1) = 1$:
$$\begin{aligned}x_1 &\mapsto 1 \\x_2 &\mapsto 0 \\x_3 &\mapsto 1\end{aligned}$$
- Formule $\varphi_2 = (x_1 \wedge \neg x_1) \vee (\neg x_2 \wedge x_3 \wedge x_2)$ není splnitelná
 - pro každé ohodnocení ν platí $\nu(\varphi_2) = 0$.

Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

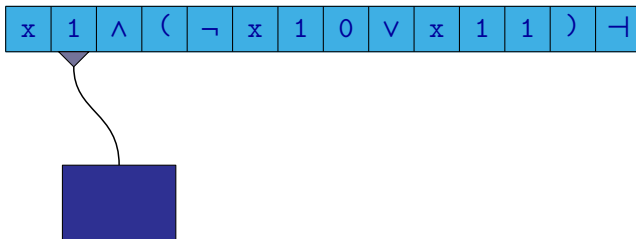
- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

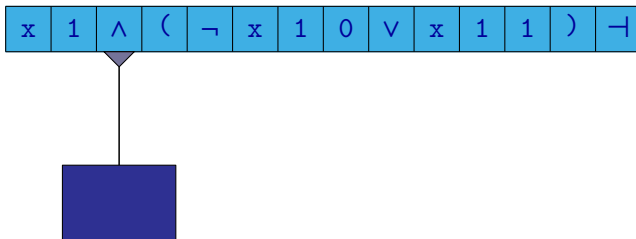
- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

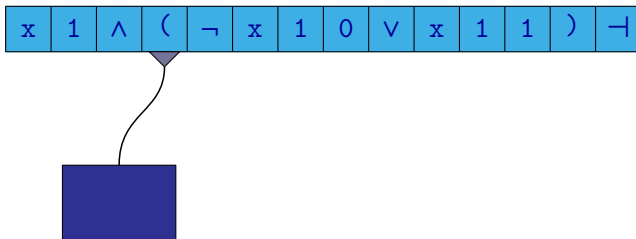
- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

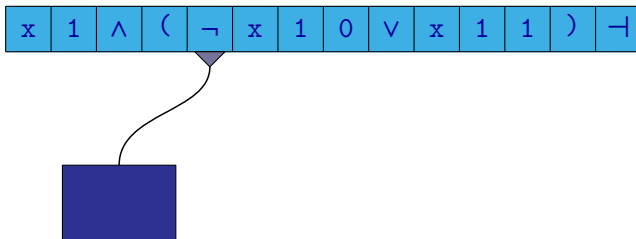
- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**

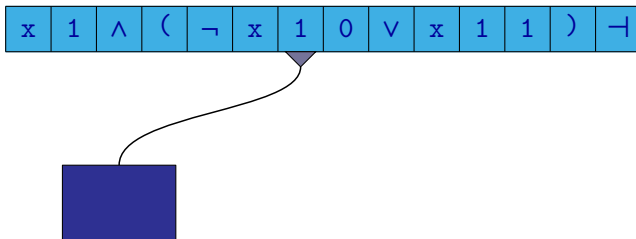
x	1	$\wedge$	(	$\neg$	x	1	0	$\vee$	x	1	1	)	$\neg$
---	---	----------	---	--------	---	---	---	--------	---	---	---	---	--------



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**

x	1	$\wedge$	(	$\neg$	x	1	0	$\vee$	x	1	1	)	$\neg$
---	---	----------	---	--------	---	---	---	--------	---	---	---	---	--------



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**

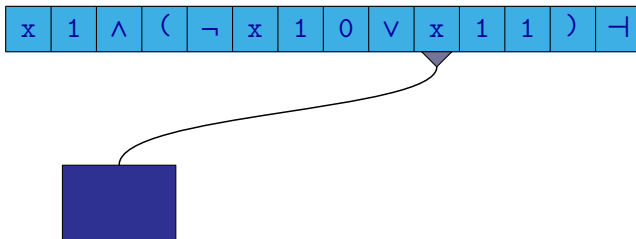
x	1	$\wedge$	(	$\neg$	x	1	0	$\vee$	x	1	1	)	$\neg$
---	---	----------	---	--------	---	---	---	--------	---	---	---	---	--------



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**

x	1	$\wedge$	(	$\neg$	x	1	0	$\vee$	x	1	1	)	$\neg$
---	---	----------	---	--------	---	---	---	--------	---	---	---	---	--------



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**

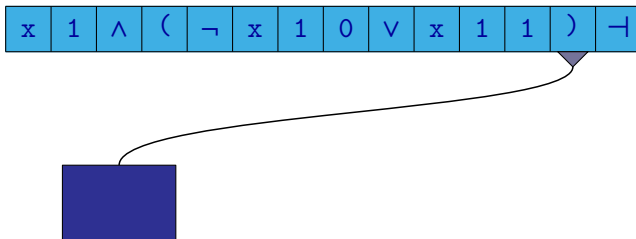
x	1	$\wedge$	(	$\neg$	x	1	0	$\vee$	x	1	1	)	$\neg$
---	---	----------	---	--------	---	---	---	--------	---	---	---	---	--------



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**



Vstup a výstup algoritmu řešícího rozhodovací problém

Vstup a výstup algoritmu řešícího problém SAT:

- zvoleno nějaké vhodné kódování booleovských formulí jako slov v nějaké abecedě
- pro slova, která jsou zápisem splnitelných formulí, dává odpověď **ANO**
- pro slova, která jsou zápisem formulí, které nejsou splnitelné, dává odpověď **NE**
- pro slova, která nerepresentují dobře utvořené formule, dává odpověď **NE**

x	1	∧	(	¬	x	1	0	∨	x	1	1	)	¬
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



ANO

Algoritmy

Co je to algoritmus?

Algoritmus

Algoritmus je mechanický postup skládající se z nějakých jednoduchých elementárních kroků, který pro nějaký zadaný **vstup** vyprodukuje nějaký **výstup**.

Algoritmus může být zadán:

- slovním popisem v přirozeném jazyce
- pseudokódem
- jako počítačový program v nějakém programovacím jazyce
- jako hardwarový obvod
- ...

Příklad: Popis algoritmu pomocí **pseudokódu**:

Algoritmus: Algoritmus pro nalezení největšího prvku v poli

FIND-MAX (A, n):

```
     $k := 0$   
    for  $i := 1$  to  $n - 1$  do  
        if  $A[i] > A[k]$  then  
             $k := i$   
    return  $A[k]$ 
```

Algoritmus

- zpracovává **vstup**
- generuje **výstup**

Z hlediska analýzy toho, jak daný algoritmus funguje, většinou není příliš podstatný rozdíl v tom, jestli algoritmus:

- čte vstupní data z nějakého vstupního zařízení (např. ze souboru na disku, z klávesnice, apod.)
- zapisuje data na nějaké výstupní zařízení (např. do souboru, na obrazovku, apod.)

nebo

- čte vstupní data z paměti (např. jsou mu předány jako parametry)
- zapisuje data na do paměti (např. je vrátí jako návratovou hodnotu)

Výpočet algoritmu

Algoritmus je vykonáván nějakým **strojem** — může to být například:

- skutečný počítač — vykonává instrukce strojového kódu
- virtuální stroj — vykonává instrukce bytekódu
- nějaký idealizovaný matematický model počítače
- ...

Podle typu stroje je určeno:

- s jakým typem dat stroj pracuje
- jak jsou tato data v paměti organizována
- jaké operace je možné s těmito daty provádět

Stroj může být:

- jednoúčelový — vykonává jen jeden algoritmus
- obecnější — algoritmus dostává ve formě **programu**

Výpočet algoritmu

Stroj pracuje po **krocích**.

Informace si typicky může ukládat do nějakého druhu **pracovní paměti**.

Během výpočtu postupně prochází posloupností **konfigurací**.

Konfigurace je celkový popis stavu daného stroje v určitém okamžiku během výpočtu.

Typicky zahrnuje informace o tom:

- jaká instrukce se právě provádí
- jaký je aktuální obsah pracovní paměti

Výpočet:

- začíná v **počáteční konfiguraci** — závisí na vstupu
- zastaví se v **koncové konfiguraci** — je z ní možné zjistit výstup

Řešení problému

Algoritmus **řeší** daný problém, když pro každý vstup daného problému (tj. pro libovolnou vstupní instanci):

- 1 Se po konečném počtu kroků zastaví.
- 2 Vyprodukuje výstup z množiny možných výstupů, který vyhovuje podmínkám uvedeným v zadání problému.

Pro jeden problém může existovat celá řada algoritmů, které jej korektně řeší.

Poznámka: **korektnost algoritmu** — algoritmus řeší daný problém

Předpokládejme, že máme dán nějaký problém P .

Jestliže existuje nějaký algoritmus, který řeší problém P , pak říkáme, že problém P je **algoritmicky řešitelný**.

Jestliže P je rozhodovací problém a jestliže existuje nějaký algoritmus, který problém P řeší, pak říkáme, že problém P je **(algoritmicky) rozhodnutelný**.

Když chceme ukázat, že problém P je algoritmicky řešitelný, stačí ukázat nějaký algoritmus, který ho řeší (a případně ukázat, že daný algoritmus problém P skutečně řeší).

U mnohých problémů je na první pohled zřejmé, že jsou algoritmicky řešitelné, jako třeba:

- Třídění
- Hledání nejkratší cesty v grafu
- Prvočíselnost

kde stačí probrat všechny možnosti (kterých je ve všech těchto případech konečně mnoho), i když takový triviální algoritmus založený na řešení **hrubou silou** nemusí být zrovna efektivní.

Na druhou stranu existuje celá řada problémů, u kterých to tak jasné není.

- Najít algoritmus a dokázat, že řeší daný problém, může být velmi netriviální úkol.
- Algoritmus, který by řešil daný problém, nemusí vůbec existovat.

Nutnost upřesnění pojmu „algorithmus“

Dosavadní definice pojmu algorithmus byla poněkud vágní.

Pokud bychom pro nějaký problém chtěli dokázat, že neexistuje algorithmus, který by daný problém řešil, tak by to s takovou neurčitou definicí pojmu algorithmus asi nešlo.

Intuitivně chápeme, co by měl mít algorithmus za vlastnosti:

- Měl by se skládat z jednoduchých kroků, které je možno vykonávat „mechanicky“, bez porozumění problému.
- Objekty, se kterými algorithmus pracuje, i prováděné operace by měly být konečné.

Nějaká přesnější a konkrétnější definice pojmu algorithmus je také třeba k tomu, abychom mohli mluvit o výpočetní složitosti algoritmu:

- Pokud chceme např. mluvit o počtu operací, které musí algorithmus během výpočtu provést, je třeba nějak přesněji definovat, co přesně budeme považovat za tyto operace.

Můžeme uvažovat různé druhy strojů, které mohou provádět nějaký algoritmus.

Tyto různé druhy strojů se mohou lišit v mnoha ohledech:

- jaké instrukce jsou schopny provádět
- jaký druh dat jsou schopny ukládat do své paměti a jak je tato paměť organizována
- ...

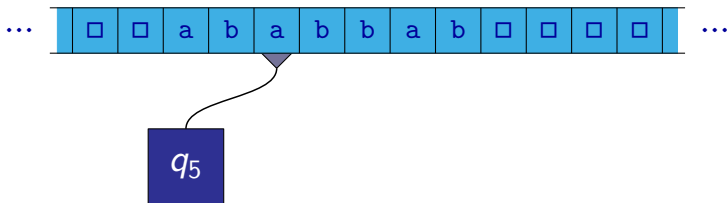
Různé druhy takovýchto strojů se označují jako různé **výpočetní modely**.

Příklady výpočetních modelů:

- Turingovy stroje
- stroje RAM

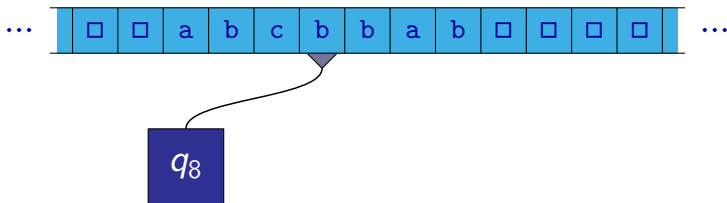
Turingův stroj — zařízení podobné konečnému automatu s následujícími rozdíly:

- pohyb hlavy oběma směry
- možnost zápisu na pásku na aktuální pozici hlavy
- páska je nekonečná



Turingův stroj — zařízení podobné konečnému automatu s následujícími rozdíly:

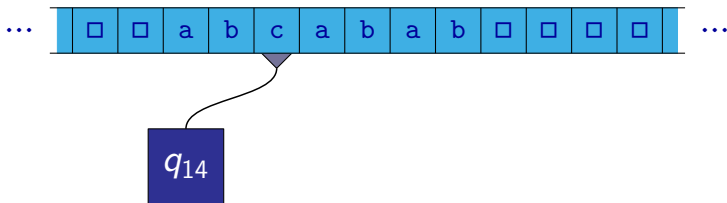
- pohyb hlavy oběma směry
- možnost zápisu na pásku na aktuální pozici hlavy
- páska je nekonečná



Turingův stroj

Turingův stroj — zařízení podobné konečnému automatu s následujícími rozdíly:

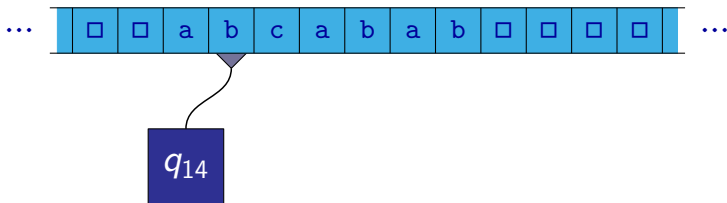
- pohyb hlavy oběma směry
- možnost zápisu na pásku na aktuální pozici hlavy
- páska je nekonečná



Turingův stroj

Turingův stroj — zařízení podobné konečnému automatu s následujícími rozdíly:

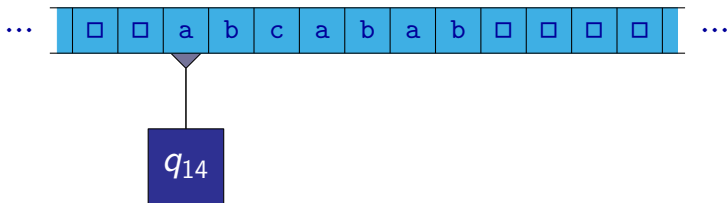
- pohyb hlavy oběma směry
- možnost zápisu na pásku na aktuální pozici hlavy
- páska je nekonečná



Turingův stroj

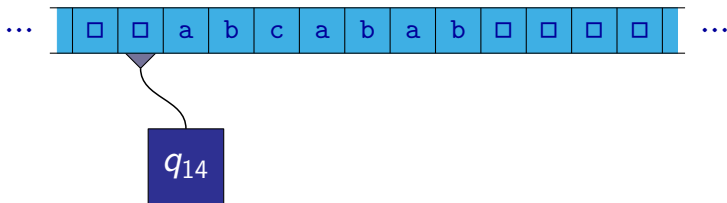
Turingův stroj — zařízení podobné konečnému automatu s následujícími rozdíly:

- pohyb hlavy oběma směry
- možnost zápisu na pásku na aktuální pozici hlavy
- páska je nekonečná



Turingův stroj — zařízení podobné konečnému automatu s následujícími rozdíly:

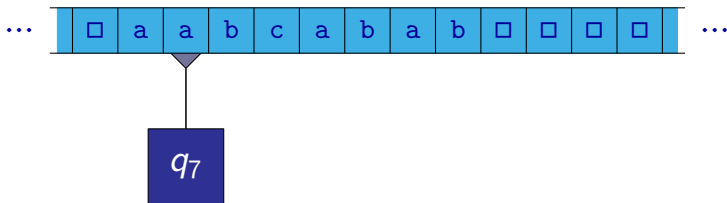
- pohyb hlavy oběma směry
- možnost zápisu na pásku na aktuální pozici hlavy
- páska je nekonečná



Turingův stroj

Turingův stroj — zařízení podobné konečnému automatu s následujícími rozdíly:

- pohyb hlavy oběma směry
- možnost zápisu na pásku na aktuální pozici hlavy
- páska je nekonečná



Alan M. Turing, „On Computable Numbers, with an application to the Entscheidungsproblem“, *Proceedings of the London Mathematical Society*, 42 (1936), pp. 230–265, Erratum: *Ibid.*, 43 (1937), pp. 544–546.

Tento článek přinesl několik zásadních nových myšlenek:

- Turingův stroj navržen jako formalizace intuitivního pojmu *algorithmus*.
- myšlenka **univerzálního Turingova stroje** — tj. konkrétního jednoho stroje, který je schopen simulovat činnost každého jiného Turingova stroje (tj. jeden hardware, na kterém je možné provádět libovolný algoritmus zadaný ve formě programu)
- ukázání toho, že existují dobře definované algoritmické problémy, pro které se dá dokázat, že nemůže existovat žádný algoritmus, který by je řešil

Churchova-Turingova teze

Každý algoritmus je možné realizovat nějakým Turingovým strojem.

Není to věta, kterou by bylo možno dokázat v matematickém smyslu – není formálně definováno, co je to algoritmus.

Je to jeden z možných přístupů, jak neformální pojem **algoritmus** formálně zachytit.

Tezi formulovali nezávisle na sobě v polovině 30. let 20. století Alan Turing a Alonzo Church.

Poznámka: Alonzo Church ve své formulaci nepoužil jako výpočetní model Turingovy stroje, ale **lambda kalkul**.

Další příklady matematických formalismů zachycujících pojem algoritmus:

- stroje RAM
- Minského stroje
- lambda kalkul
- rekurzivní funkce
- ...

Dále můžeme uvést:

- Libovolný (obecný) programovací jazyk (jako např. C, Java, Python, Lisp, Haskell, Prolog apod.).

Všechny tyto modely jsou ekvivalentní z hlediska algoritmů, které jsou schopny realizovat.

Turingovsky úplné výpočetní modely

Jazykům (resp. strojům), které jsou dostatečně obecné na to, aby se do nich (resp. do jejich instrukcí) daly přeložit programy napsané v libovolném jiném programovacím jazyce, se říká **Turingovsky úplné**.

Na první pohled asi není hned úplně zřejmé, že Churchova-Turingova teze skutečně platí, tj. že **každý** algoritmus je opravdu možné realizovat Turingovým strojem (nebo jiným Turingovsky úplným modelem).

Ukážeme si, jak se algoritmus popsany pseudokódem (nebo zapsaný jako program v nějakém vyšším programovacím jazyce) dá postupně přeložit do podoby reprezentované některými dalšími výpočetními modely:

- graf řídicího toku (control-flow graph)
- stroj RAM
- vícepáskový Turingův stroj
- jednopáskový Turingův stroj

Grafy řídicího toku

Algoritmus popsaný pseudokódem

Příklad algoritmu zapsaného **pseudokódem**:

Algoritmus: Algoritmus pro nalezení největšího prvku v poli

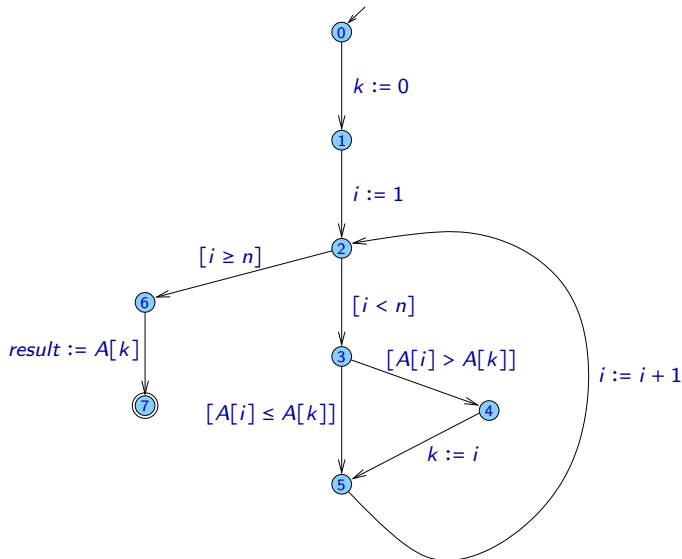
FIND-MAX (A, n):

```
     $k := 0$   
    for  $i := 1$  to  $n - 1$  do  
        if  $A[i] > A[k]$  then  
             $k := i$   
    return  $A[k]$ 
```

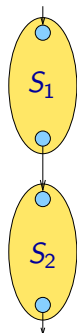
Instrukce v algoritmech je možné zhruba rozdělit na dvě skupiny:

- instrukce přímo pracující s daty:
 - přiřazení
 - vyhodnocení hodnot výrazů v podmínkách
 - čtení vstupu, zápis na výstup
 - ...
- instrukce ovlivňující **řídící tok** — určují, které instrukce se budou provádět, v jakém pořadí, apod.:
 - větvení (if, switch, ...)
 - cykly (while, do .. while, for, ...)
 - uspořádání instrukcí do bloků
 - návraty z podpogramů (return, ...)
 - ...

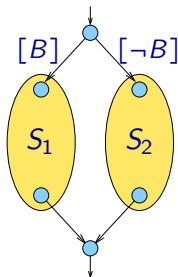
Graf řídicího toku



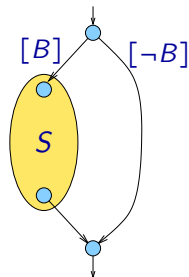
Některé základní konstrukce strukturovaného programování



$S_1; S_2$

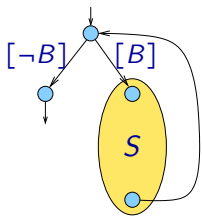


if B then S_1 else S_2

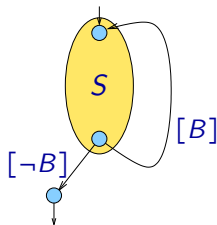


if B then S

Některé základní konstrukce strukturovaného programování

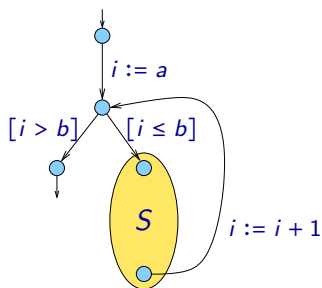


while B **do** S



do S **while** B

Některé základní konstrukce strukturovaného programování



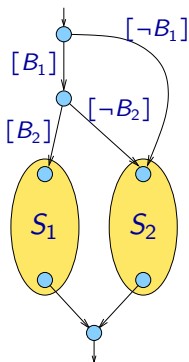
```
 $i := a$   
while  $i \leq b$  do  
   $S$   
   $i := i + 1$ 
```

for $i := a$ **to** b **do** S

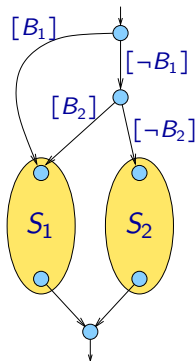
Některé základní konstrukce strukturovaného programování

Zkrácené vyhodnocování složených podmínek, např.:

while $i < n$ **and** $A[i] > x$ **do** ...



if B_1 **and** B_2 **then** S_1 **else** S_2



if B_1 **or** B_2 **then** S_1 **else** S_2

Řídící tok realizovaný pomocí goto

- **goto** ℓ — **nepodmíněný skok**
- **if** B **then goto** ℓ — **podmíněný skok**

Příklad:

```
0:  $k := 0$   
1:  $i := 1$   
2: goto 6  
3: if  $A[i] \leq A[k]$  then goto 5  
4:  $k := i$   
5:  $i := i + 1$   
6: if  $i < n$  then goto 3  
7: return  $A[k]$ 
```

Řídící tok realizovaný pomocí goto

- **goto** ℓ — **nepodmíněný skok**
- **if** B **then goto** ℓ — **podmíněný skok**

Příklad:

```
start:  $k := 0$   
       $i := 1$   
      goto L3  
L1:   if  $A[i] \leq A[k]$  then goto L2  
       $k := i$   
L2:    $i := i + 1$   
L3:   if  $i < n$  then goto L1  
      return  $A[k]$ 
```

Vyhodnocení složitých výrazů

Vyhodnocení složitého výrazu, jako třeba

$$A[i + s] := (B[3 * j + 1] + x) * y + 8$$

může být na nižší úrovni nahrazeno posloupností jednodušších příkazů, jako třeba

```
t1 := i + s  
t2 := 3 * j  
t2 := t2 + 1  
t3 := B[t2]  
t3 := t3 + x  
t3 := t3 * y  
t3 := t3 + 8  
A[t1] := t3
```

Konfigurace — popis celkového stavu stroje v nějakém okamžiku během výpočtu

Příklad: Konfigurace tvaru

$$(q, mem)$$

kde

- q — aktuální řídicí stav
- mem — představuje aktuální obsah paměti stroje — jaké hodnoty jsou momentálně přiřazeny jednotlivým proměnným.

Příklad obsahu paměti mem :

$$\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], \quad n: 5, \quad i: 1, \quad k: 0, \quad result: ? \rangle$$

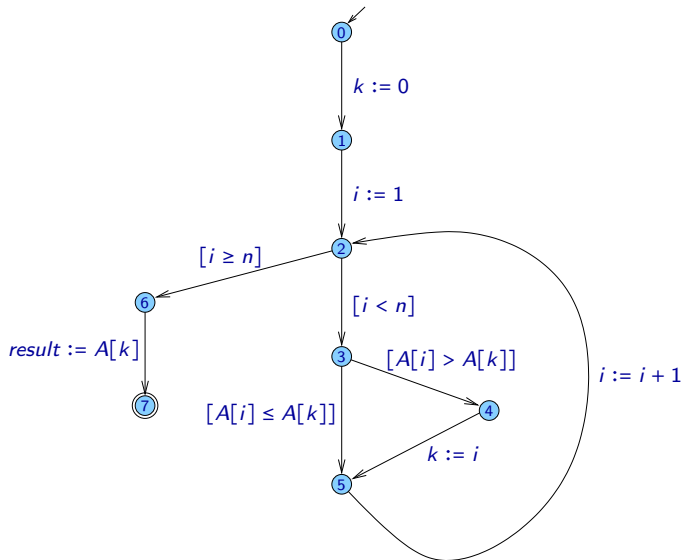
Příklad konfigurace:

$(2, \langle A: [3, 8, 1, 3, 6], \quad n: 5, \quad i: 1, \quad k: 0, \quad result: ? \rangle)$

Výpočet stroje $\mathcal{M}$ provádějícího algoritmus Alg , kde zpracovává vstup w , je posloupnost konfigurací.

- Začíná se v **počáteční konfiguraci**.
- Každým krokem stroj přechází z jedné konfigurace do další.
- Výpočet končí v **koncové konfiguraci**.

Výpočet algoritmu



Výpočet algoritmu

Příklad: Výpočet, kde algoritmus `FIND-MAX` zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : $(0, \langle A: [3, 8, 1, 3, 6], \ n: 5, \ i: ?, \ k: ?, \ result: ? \rangle)$

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)

α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)

α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)

α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{10} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{10} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{11} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{10} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{11} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{12} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{10} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{11} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{12} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{13} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{10} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{11} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{12} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{13} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{14} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{10} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{11} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{12} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{13} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{14} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{15} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 5, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{10} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{11} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{12} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{13} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{14} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{15} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 5, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{16} : (6, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 5, k: 1, result: ? \rangle$)

Příklad: Výpočet, kde algoritmus **FIND-MAX** zpracovává vstup, kde $A = [3, 8, 1, 3, 6]$ a $n = 5$.

α_0 : (0, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: ?, result: ? \rangle$)
 α_1 : (1, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: ?, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_2 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_3 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_4 : (4, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 0, result: ? \rangle$)
 α_5 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 1, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_6 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_7 : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_8 : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 2, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_9 : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{10} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{11} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 3, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{12} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{13} : (3, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{14} : (5, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 4, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{15} : (2, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 5, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{16} : (6, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 5, k: 1, result: ? \rangle$)
 α_{17} : (7, $\langle A: [3, 8, 1, 3, 6], n: 5, i: 5, k: 1, result: 8 \rangle$)

Provedením instrukce l se přejde z konfigurace α do konfigurace α' :

$$\alpha \xrightarrow{l} \alpha'$$

Výpočet může být:

- **Konečný:**

$$\alpha_0 \xrightarrow{l_0} \alpha_1 \xrightarrow{l_1} \alpha_2 \xrightarrow{l_2} \alpha_3 \xrightarrow{l_3} \alpha_4 \xrightarrow{l_4} \dots \xrightarrow{l_{t-2}} \alpha_{t-1} \xrightarrow{l_{t-1}} \alpha_t$$

kde α_t je buď koncová konfigurace nebo konfigurace, kde došlo k chybě a není možné pokračovat

- **Nekonečný:**

$$\alpha_0 \xrightarrow{l_0} \alpha_1 \xrightarrow{l_1} \alpha_2 \xrightarrow{l_2} \alpha_3 \xrightarrow{l_3} \alpha_4 \xrightarrow{l_4} \dots$$

Výpočet je možné popsat dvěma různými způsoby:

- jako posloupnost konfigurací $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots$
- jako posloupnost provedených instrukcí $l_0, l_1, l_2, \dots$

Stroje RAM

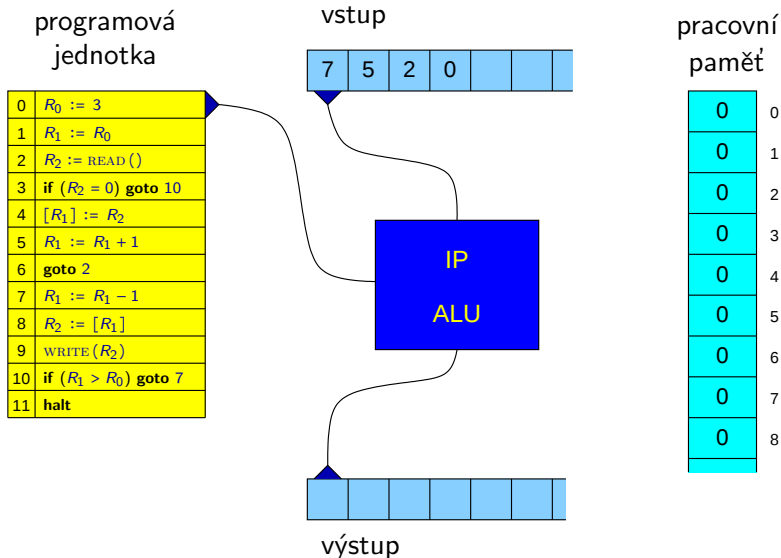
Stroj RAM (Random Access Machine) je idealizovaný model počítače.

Skládá se z těchto částí:

- **Programová jednotka** – obsahuje program stroje RAM a ukazatel na právě prováděnou instrukci
- **Pracovní paměť** tvořená buňkami očíslovanými $0, 1, 2, \dots$
Tyto buňky budeme označovat $R_0, R_1, R_2, \dots$
Obsah buněk je možno číst i do nich zapisovat.
- **Vstupní páska** – je z ní možné pouze číst
- **Výstupní páska** – je na ni možno pouze zapisovat

Buňky paměti i vstupní a výstupní pásky obsahují jako hodnoty celá čísla (tj. prvky množiny $\mathbb{Z}$).

Stroj RAM



Přehled instrukcí:

$R_i := c$	– přiřazení konstanty
$R_i := R_j$	– přiřazení
$R_i := [R_j]$	– load (čtení z paměti)
$[R_i] := R_j$	– store (zápis do paměti)
$R_i := R_j \text{ op } R_k$ nebo $R_i := R_j \text{ op } c$	– aritmetické instrukce, $op \in \{+, -, *, /\}$
if ($R_i \text{ rel } R_j$) goto ℓ nebo if ($R_i \text{ rel } c$) goto ℓ	– podmíněný skok, $rel \in \{=, \neq, \leq, \geq, <, >\}$
goto ℓ	– nepodmíněný skok
$R_i := \text{READ}()$	– čtení ze vstupu
$\text{WRITE}(R_i)$	– zápis na výstup
halt	– zastavení programu

Příklady instrukcí:

$R_5 := 42$

– přiřazení konstanty

$R_{12} := R_3$

– přiřazení

$R_8 := [R_2]$

– load (čtení z paměti)

$[R_{15}] := R_9$

– store (zápis do paměti)

$R_7 := R_3 + R_6$

– aritmetická instrukce

$R_{18} := R_{18} - 1$

– aritmetická instrukce

if ($R_4 \geq R_1$) **goto** 2801

– podmíněný skok

if ($R_2 \neq 0$) **goto** 3581

– podmíněný skok

goto 537

– nepodmíněný skok

$R_{23} := \text{READ}()$

– čtení ze vstupu

$\text{WRITE}(R_{17})$

– zápis na výstup

halt

– zastavení programu

Stroj RAM



```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	?
1	?
2	?
3	?
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM



```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	?
2	?
3	?
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM



```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	3
2	?
3	?
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 $\rightarrow$ **if** ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE(R_2)
 $L_3 : \text{if}$ ($R_1 > R_0$) **goto** L_2
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	3
2	13
3	?
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 if ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE (R_2)
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	3
2	13
3	?
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
    if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
     $[R_1] := R_2$   
     $R_1 := R_1 + 1$   
    goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
     $R_2 := [R_1]$   
    WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if}$  ( $R_1 > R_0$ ) goto  $L_2$   
    halt
```



Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	3
2	13
3	13
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
    if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
     $[R_1] := R_2$   
     $R_1 := R_1 + 1$   
    goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
     $R_2 := [R_1]$   
    WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if}$  ( $R_1 > R_0$ ) goto  $L_2$   
    halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	4
2	13
3	13
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM



```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	4
2	13
3	13
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 $\rightarrow$ **if** ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE(R_2)
 $L_3 : \text{if}$ ($R_1 > R_0$) **goto** L_2
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	4
2	-2
3	13
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 if ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE (R_2)
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	4
2	-2
3	13
4	?
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
    if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
     $[R_1] := R_2$   
     $R_1 := R_1 + 1$   
    goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
     $R_2 := [R_1]$   
    WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
    halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

0	3
1	4
2	-2
3	13
4	-2
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

--	--	--	--	--	--	--

Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

0	3
1	5
2	-2
3	13
4	-2
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

--	--	--	--	--	--	--

Output

Stroj RAM

→ $R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 if ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE (R_2)
 $L_3 : \text{if}$ ($R_1 > R_0$) **goto** L_2
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	5
2	-2
3	13
4	-2
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 $\rightarrow$ **if** ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE(R_2)
 $L_3 : \text{if}$ ($R_1 > R_0$) **goto** L_2
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	5
2	42
3	13
4	-2
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 if ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE (R_2)
 $L_3 : \text{if}$ ($R_1 > R_0$) **goto** L_2
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	5
2	42
3	13
4	-2
5	?
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

0	3
1	5
2	42
3	13
4	-2
5	42
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

--	--	--	--	--	--	--

Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	6
2	42
3	13
4	-2
5	42
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM



```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	6
2	42
3	13
4	-2
5	42
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 $\rightarrow$ **if** ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE (R_2)
 $L_3 : \text{if}$ ($R_1 > R_0$) **goto** L_2
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	6
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
if ($R_2 = 0$) **goto** L_3
→ $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 $\text{WRITE}(R_2)$
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$
halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	6
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	?
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
    if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
     $[R_1] := R_2$   
     $R_1 := R_1 + 1$   
    goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
     $R_2 := [R_1]$   
    WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
    halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

0	3
1	6
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

--	--	--	--	--	--	--

Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
  WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

0	3
1	7
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

--	--	--	--	--	--	--

Output

Stroj RAM

→ $R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 if ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE (R_2)
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	7
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 $\rightarrow$ **if** ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE(R_2)
 $L_3 : \text{if}$ ($R_1 > R_0$) **goto** L_2
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	7
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 if ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE (R_2)
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

Output

0	3
1	7
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	?
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
    if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
     $[R_1] := R_2$   
     $R_1 := R_1 + 1$   
    goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
     $R_2 := [R_1]$   
    WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
    halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

0	3
1	7
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

--	--	--	--	--	--	--

Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

0	3
1	8
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

--	--	--	--	--	--	--

Output

Stroj RAM

→ $R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 if ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE (R_2)
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$
 halt

Input

13	-2	42	5	17	0	
----	----	----	---	----	---	--

--	--	--	--	--	--	--

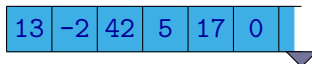
Output

0	3
1	8
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

$R_0 := 3$
 $R_1 := R_0$
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$
 $\rightarrow$ **if** ($R_2 = 0$) **goto** L_3
 $[R_1] := R_2$
 $R_1 := R_1 + 1$
 goto L_1
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$
 $R_2 := [R_1]$
 WRITE(R_2)
 $L_3 : \text{if}$ ($R_1 > R_0$) **goto** L_2
 halt

Input



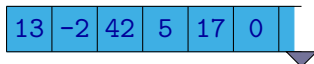
Output

0	3
1	8
2	0
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
→  $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



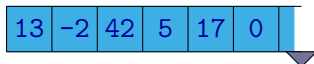
Output

0	3
1	8
2	0
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
→  $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
     $R_2 := [R_1]$   
     $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
      halt
```

Input



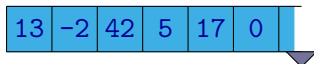
Output

0	3
1	8
2	0
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	7
2	0
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

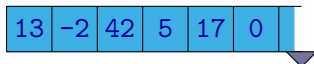


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
       $R_2 := [R_1]$   
      WRITE( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
      halt
```

Input



0	3
1	7
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

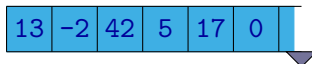


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
→  $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



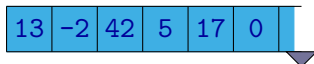
Output

0	3
1	7
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
→  $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
    $R_2 := [R_1]$   
    $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
      halt
```

Input



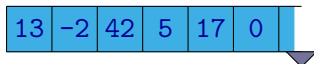
Output

0	3
1	7
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
       $R_2 := [R_1]$   
       $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
      halt
```

Input



0	3
1	6
2	17
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

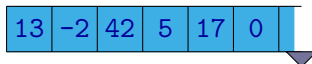


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
  WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	6
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

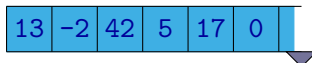


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
→  $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	6
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

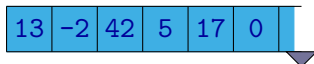


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
→  $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
    $R_2 := [R_1]$   
    $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
      halt
```

Input



0	3
1	6
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

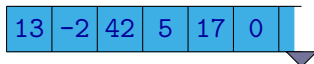


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	5
2	5
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

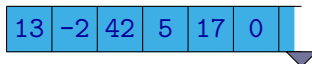


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
  WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	5
2	42
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

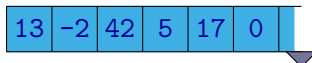


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
→  $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	5
2	42
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

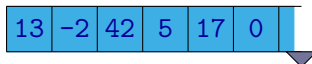


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
→  $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
    $R_2 := [R_1]$   
    $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
      halt
```

Input



0	3
1	5
2	42
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

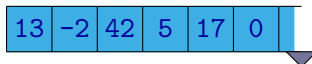


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	4
2	42
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

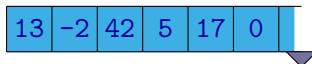


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
  WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	4
2	-2
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

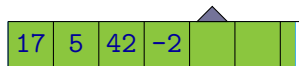
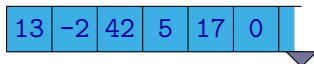


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
→  $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



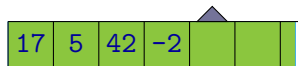
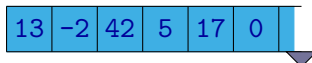
Output

0	3
1	4
2	-2
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
→  $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
    $R_2 := [R_1]$   
    $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
      halt
```

Input



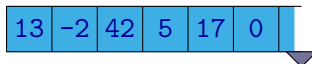
Output

0	3
1	4
2	-2
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

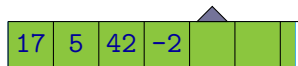
Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



0	3
1	3
2	-2
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

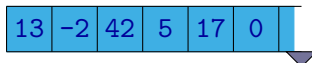


Output

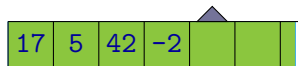
Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
       $R_2 := [R_1]$   
      WRITE ( $R_2$ )  
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
      halt
```

Input



0	3
1	3
2	13
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

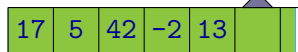
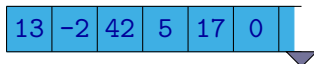


Output

Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
→  $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
  halt
```

Input



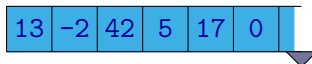
Output

0	3
1	3
2	13
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?

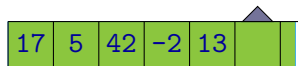
Stroj RAM

```
 $R_0 := 3$   
 $R_1 := R_0$   
 $L_1 : R_2 := \text{READ}()$   
  if ( $R_2 = 0$ ) goto  $L_3$   
   $[R_1] := R_2$   
   $R_1 := R_1 + 1$   
  goto  $L_1$   
 $L_2 : R_1 := R_1 - 1$   
   $R_2 := [R_1]$   
   $\text{WRITE}(R_2)$   
 $L_3 : \text{if } (R_1 > R_0) \text{ goto } L_2$   
halt
```

Input



0	3
1	3
2	13
3	13
4	-2
5	42
6	5
7	17
8	?
9	?
10	?
11	?



Output



Rozdíly oproti skutečnému počítači:

- Velikost paměti není omezena (adresa může být libovolné přirozené číslo).
- Velikost obsahu jednotlivých buněk není omezena (bunčka může obsahovat libovolné celé číslo).
- Čte data sekvenčně ze vstupu, který je tvořen sekvencí celých čísel. Ze vstupu lze pouze číst.
- Zapisuje data sekvenčně na výstup, který je tvořen sekvencí celých čísel. Na výstup je možné pouze zapisovat.

- Operace jako přístup k buňce paměti na adrese menší než nula nebo dělení nulou vedou k chybě — výpočet se (neúspěšně) zastaví.
- Co se týká počátečního obsahu paměti, jsou dvě možnosti, jak ho definovat:
 - Všechny buňky jsou inicializovány hodnotou 0.
 - Čtení obsahu buňky, do které nebylo dosud nic zapsáno, způsobí chybu. Buňky na začátku obsahují speciální hodnotu (označenou zde symbolem '?'), která reprezentuje to, že buňka nebyla dosud inicializována.
- Uvažují se i varianty strojů RAM, kde buňky paměti (a vstupu a výstupu) neobsahují celá čísla (tj. prvky množiny $\mathbb{Z}$), ale mohou obsahovat jen přirozená čísla (tj. prvky množiny $\mathbb{N}$).

Například operace odčítání ($R_i := R_j - R_k$) se pak chová tak, že pokud by výsledkem mělo být záporné číslo, je jako výsledek operace přiřazena hodnota 0.

- Různé varianty strojů RAM se mohou lišit tím, jaké konkrétní operace v aritmetických instrukcích podporují nebo naopak nepodporují.

Například:

- podpora bitových operací (and, or, not, xor, ...), bitový posunů, ...
 - varianta stroje RAM, která nemá operace násobení a dělení
- Mohli bychom také uvažovat variantu stroje RAM, kde místo instrukcí tvaru

if ($R_i \text{ rel } R_j$) **goto** ℓ nebo **if** ($R_i \text{ rel } c$) **goto** ℓ

jsou všechny podmíněné skoky jen tvaru

if ($R_i \text{ rel } 0$) **goto** ℓ

Místo všech relací $\{=, \neq, \leq, \geq, <, >\}$ může být podporována jen nějaká podmnožina z nich, např. $\{=, >\}$.

- V některých variantách stroje RAM nemají vstup a výstup podobu sekvence čísel.

Místo toho pracuje stroj z hlediska vstupu a výstupu s páskami obsahujícími sekvence symbolů z nějaké dané abecedy, např. $\{0, 1\}$.

Stroj má pak například instrukce, které mu umožňují větvit výpočet podle symbolu přečteného ze vstupu.

Vnitřní paměť ovšem i v této variantě pracuje s čísly.

- Pokud má stroj jako výsledek dávat jen odpověď Ano/Ne (tj. přijmout nebo nepřijmout daný vstup), nemusí mít výstupní pásku.

Instrukce **halt** je pak nahrazena instrukcemi **accept** a **reject**.

- Ve standardní definici stroje RAM se většinou neuvažují instrukce skoku na adresu instrukce uloženou v buňce paměti, tj. instrukce typu

goto R_i

Stroj RAM bychom mohli rozšířit o tento druh instrukcí.

- Jako standardní se u stroje RAM bere to, že kód programu není uložen v pracovní paměti, ale má zvláštní samostatnou paměť, která je jen pro čtení.
V průběhu výpočtu se tedy kód programu nemůže měnit.

- Druh stroje podobný stroji RAM, kde je ovšem program uložen v pracovní paměti (instrukce jsou kódovány čísly) a je možné ho průběhu výpočtu měnit, se označuje jako stroj **RASP** (**random-access stored program**).

Stroj RASP tak umožňuje provádět činnost sebemodifikujících se programů.

Implementace algoritmů na stroji RAM

Jako vhodný mezikrok při překladu z vyššího programovacího jazyka do programu pro stroj RAM je možné použít **graf řídicího toku**.

Navíc je potřeba řešit následující věci:

- Kde konkrétně v paměti (na jakých konkrétních adresách) budou uloženy hodnoty jednotlivých proměnných.
- Jak budou konkrétně v paměti uloženy různé složitější datové typy (pole, struktury, ...) — kolik buněk budou zabírat, která buňka bude reprezentovat co, atd.
- S různými objekty v paměti je třeba pracovat pomocí ukazatelů do paměti reprezentovaných čísly — např. pro přístupy k položkám dané struktury (**struct**) či k indexování položek pole je třeba používat pointrovou aritmetiku.
- Složitější operace na datech, které nejsou přímo součástí instrukční sady, je třeba simulovat pomocí jednodušších operací, které k dispozici jsou.

Turingovy stroje

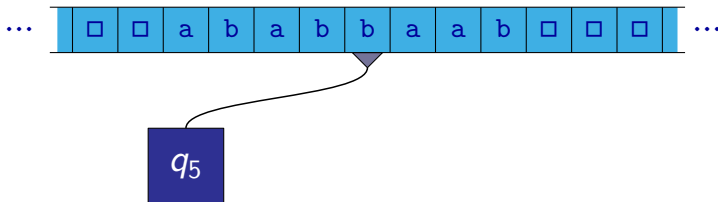
Definice

Formálně je **Turingův stroj** definován jako šestice $\mathcal{M} = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F)$ kde:

- Q je konečná neprázdná množina **stavů**
- Γ je konečná neprázdná množina **páskových symbolů** (**pásková abeceda**)
- $\Sigma \subseteq \Gamma$ je konečná neprázdná množina **vstupních symbolů** (**vstupní abeceda**)
- $\delta : (Q - F) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{-1, 0, +1\}$ je **přechodová funkce**
- $q_0 \in Q$ je **počáteční stav**
- $F \subseteq Q$ je množina **koncových stavů**

Předpokládáme, že v $\Gamma - \Sigma$ je vždy speciální prvek $\square$ označující prázdný znak (blank).

Konfigurace Turingova stroje

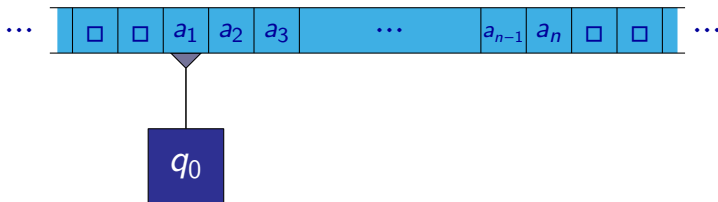


Konfigurace Turingova stroje je dána:

- stavem řídící jednotky
- obsahem pásky
- pozicí hlavy

Konfigurace Turingova stroje

Výpočet Turingova stroje $\mathcal{M} = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F)$ nad slovem $w \in \Sigma^*$, kde $w = a_1 a_2 \cdots a_n$, začíná v **počáteční konfiguraci**:



- stav řídící jednotky je q_0
- na pásce je zapsáno slovo w , zbývající políčka pásky jsou vyplněna prázdnými symboly ($\square$)
- hlava se nachází na prvním symbolu slova w (nebo na symbolu $\square$, pokud je $w = \varepsilon$)

Jeden krok Turingova stroje:

Předpokládejme, že:

- stav řídící jednotky je q
- na políčku, kde se právě nachází hlava, je zapsán symbol b

Řekněme, že $\delta(q, b) = (q', b', d)$, kde $d \in \{-1, 0, +1\}$.

Jeden krok Turingova stroje se provede následovně:

- stav řídící jednotky se změní na q'
- na políčko na pozici hlavy se místo symbolu b zapíše symbol b'
- V závislosti na hodnotě d se hlava posune:
 - pro $d = -1$ se posune o jedno políčko doleva
 - pro $d = +1$ se posune o jedno políčko doprava
 - pro $d = 0$ se pozice hlavy nezmění

- Turingův stroj provádí kroky tak dlouho, dokud stav řídicí jednotky není stav z množiny F .
- Konfigurace, kde stav řídicí jednotky patří do množiny F , jsou **koncové konfigurace**.
- V koncových konfiguracích výpočet končí.
- Výpočet stroje $\mathcal{M}$ nad slovem w může být nekonečný.

Často volíme množinu koncových stavů $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$.

Můžeme pak pro slovo $w \in \Sigma^*$ definovat, zda ho daný Turingův stroj přijímá:

- Pokud je po skončení výpočtu nad slovem w řídicí jednotka ve stavu q_{acc} , stroj slovo w přijímá.
- Pokud je po skončení výpočtu nad slovem w řídicí jednotka ve stavu q_{rej} , stroj slovo w nepřijímá.
- Pokud je výpočet nad slovem w nekonečný, stroj slovo w nepřijímá.

Jazyk $\mathcal{L}(\mathcal{M})$ Turingova stroje $\mathcal{M}$ je množina všech slov nad abecedou Σ^* , která stroj $\mathcal{M}$ přijímá.

Turingův stroj

Jazyk $L \subseteq \Sigma^*$ je Turingovým strojem $\mathcal{M}$ **přijímán** (accepted), jestliže:

- pro každé slovo $w \in \Sigma^*$ platí, že $w \in L$ právě tehdy, když výpočet stroje $\mathcal{M}$ nad w skončí v koncovém stavu q_{acc} .

(Výpočty nad slovy, která nepatří do L , tedy mohou skončit ve stavu q_{rej} nebo být nekonečné.)

Jazyk $L \subseteq \Sigma^*$ je Turingovým strojem $\mathcal{M}$ **rozpoznáván** (recognized), jestliže:

- pro každé slovo $w \in L$ výpočet stroje $\mathcal{M}$ nad w skončí v koncovém stavu q_{acc} .
- pro každé slovo $w \in (\Sigma^* - L)$ výpočet stroje $\mathcal{M}$ nad w skončí v koncovém stavu q_{rej} .

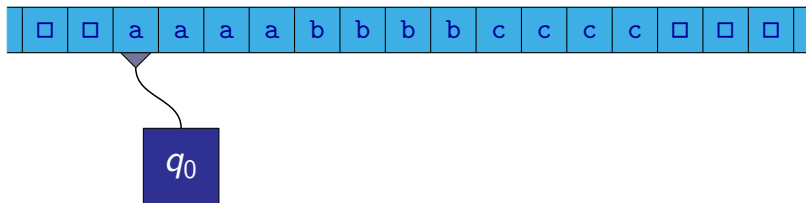
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



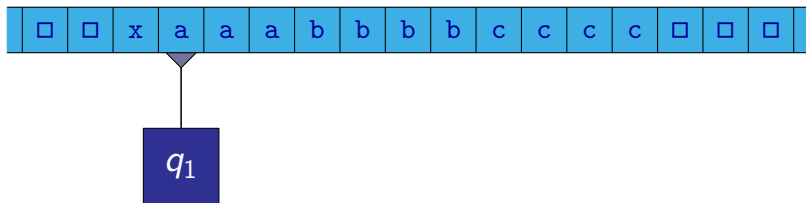
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



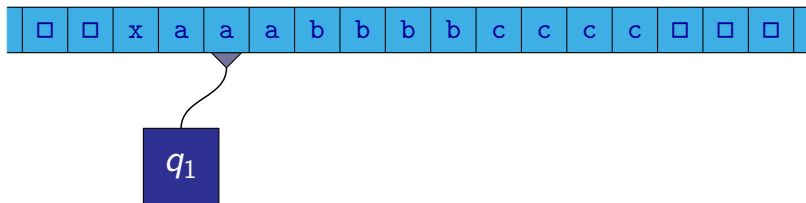
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



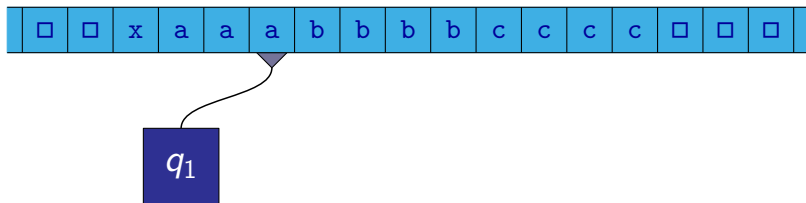
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



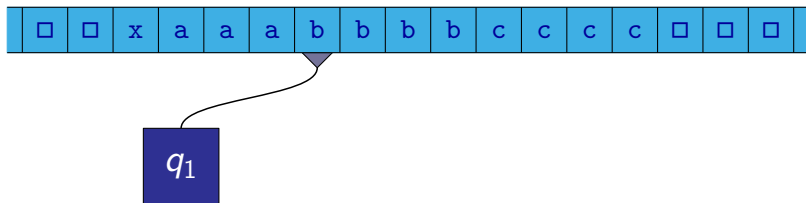
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



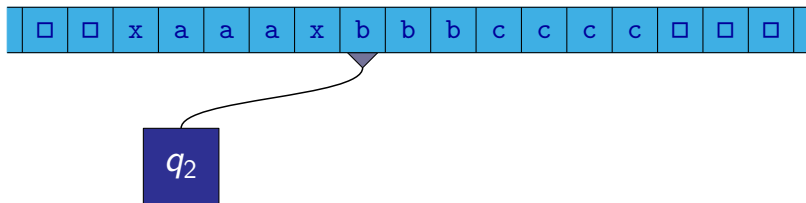
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



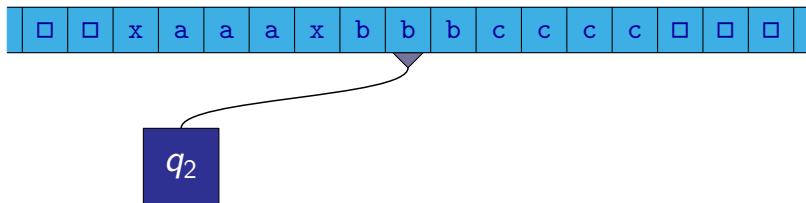
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



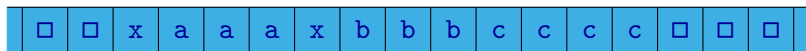
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_2

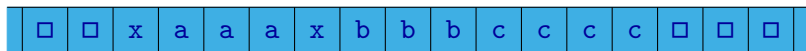
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_2

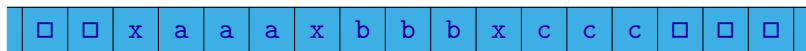
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

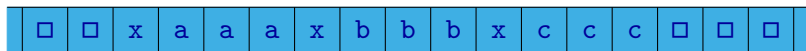
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

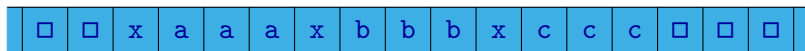
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

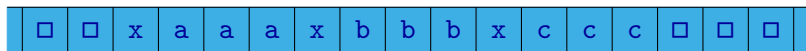
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

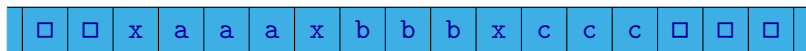
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

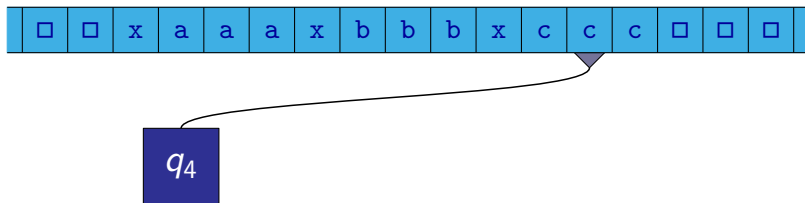
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



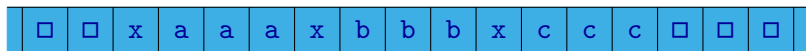
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

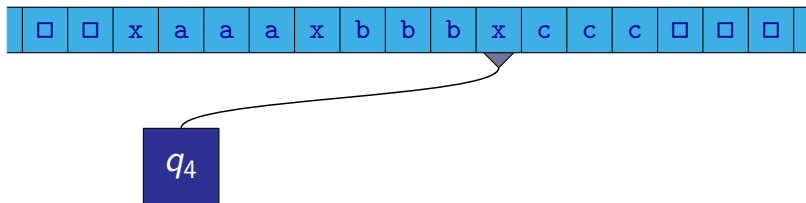
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



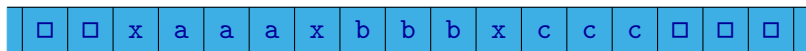
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

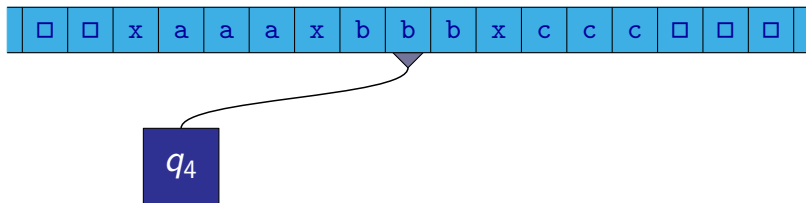
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



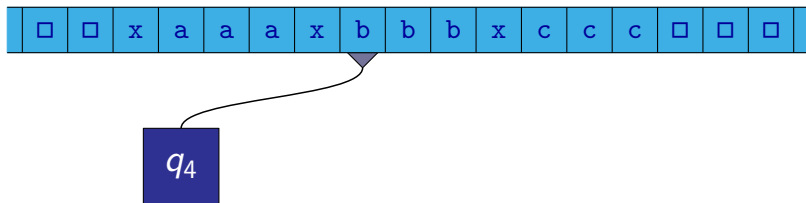
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



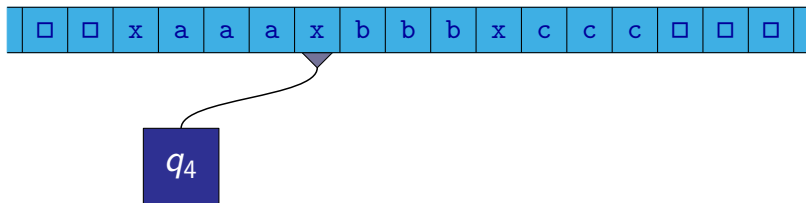
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



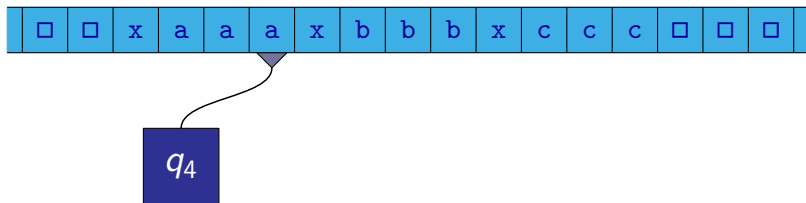
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



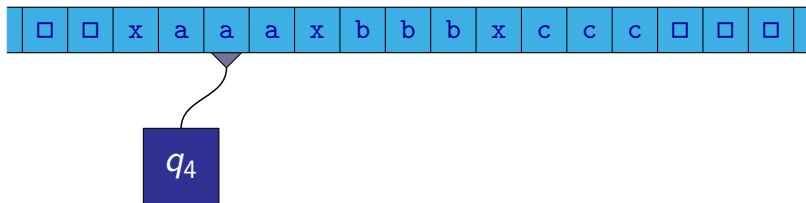
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



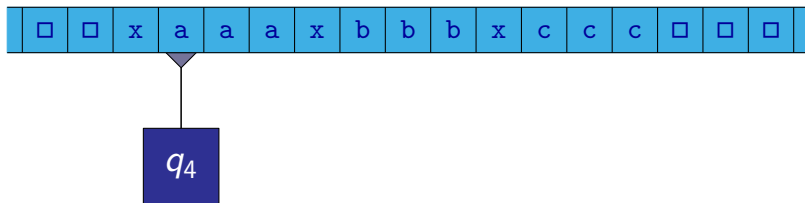
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



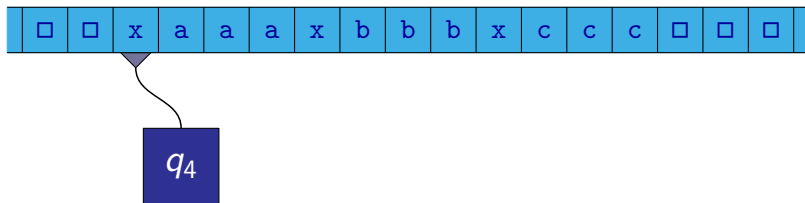
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



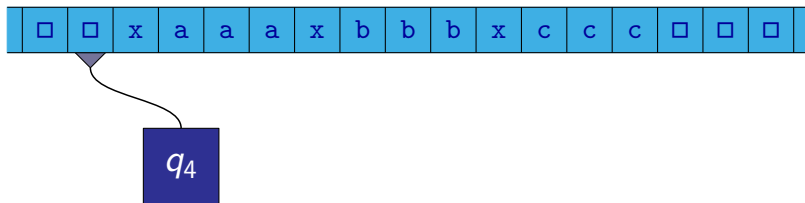
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



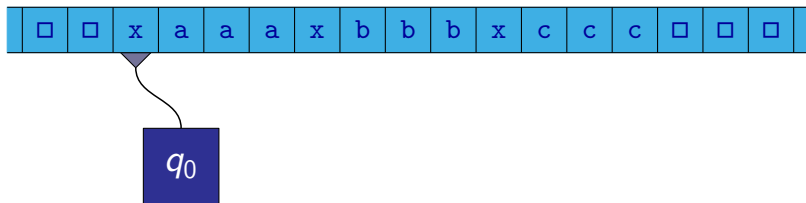
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



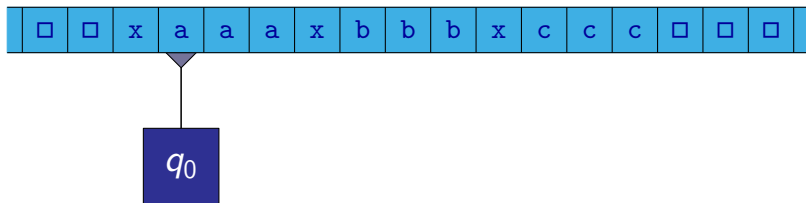
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



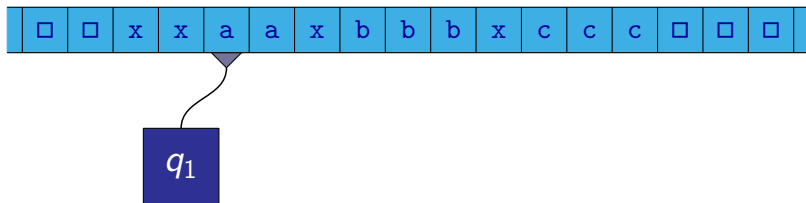
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



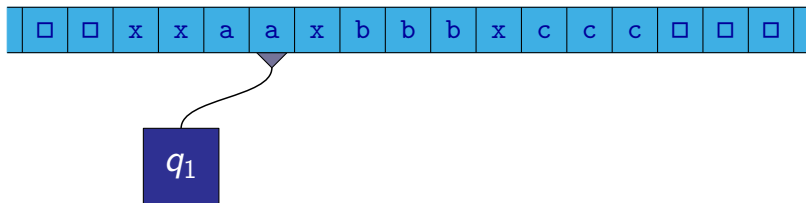
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



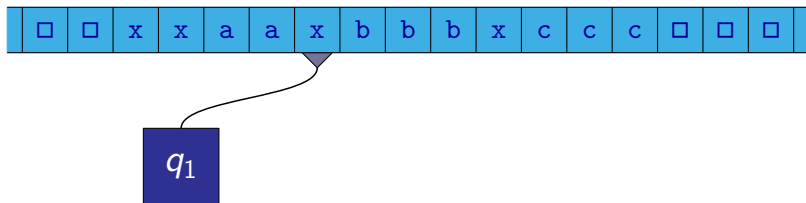
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



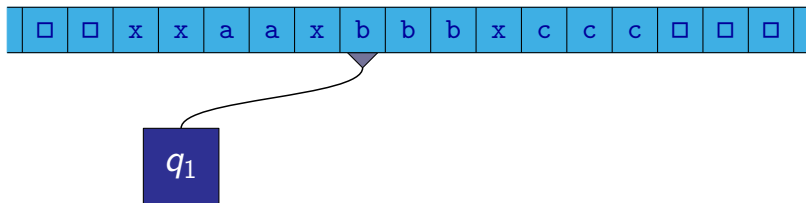
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



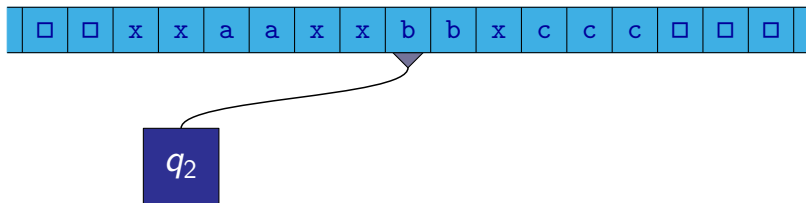
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



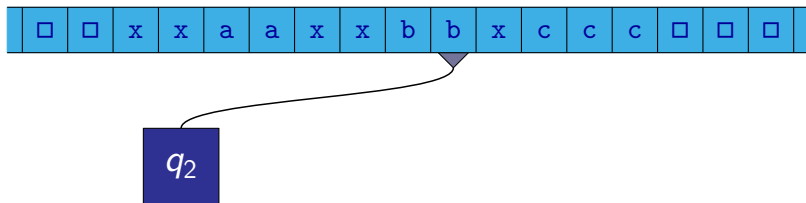
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



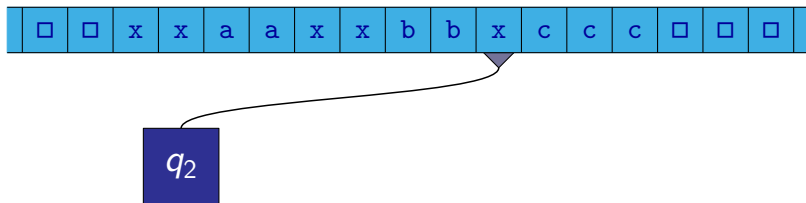
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



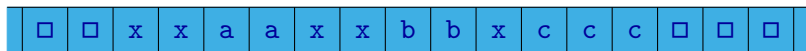
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_2

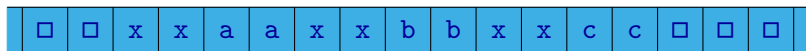
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

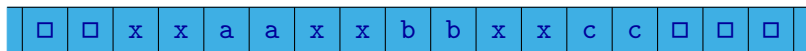
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

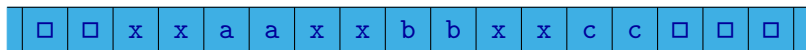
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

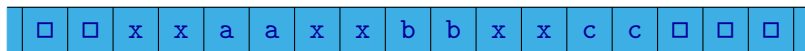
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

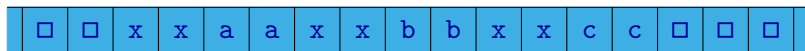
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

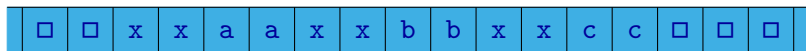
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

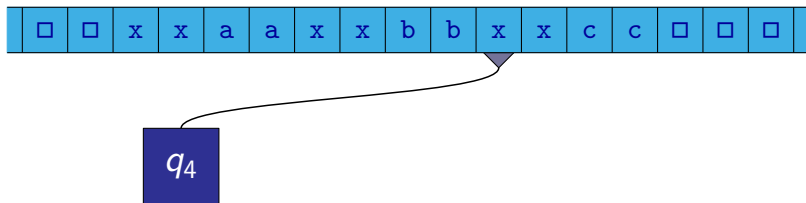
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



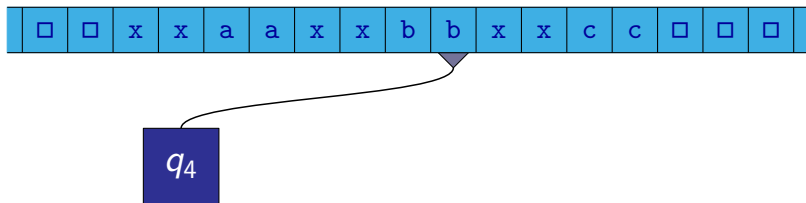
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



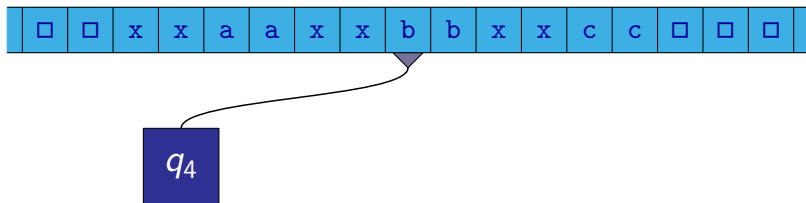
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



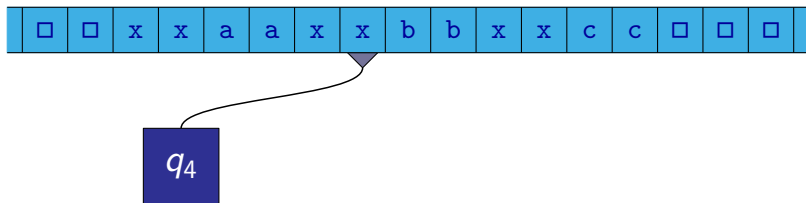
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



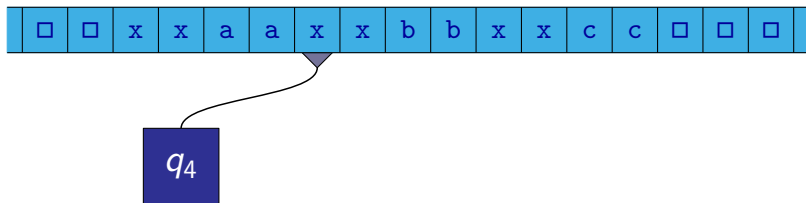
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



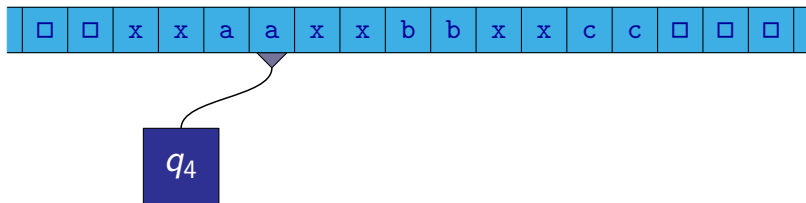
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



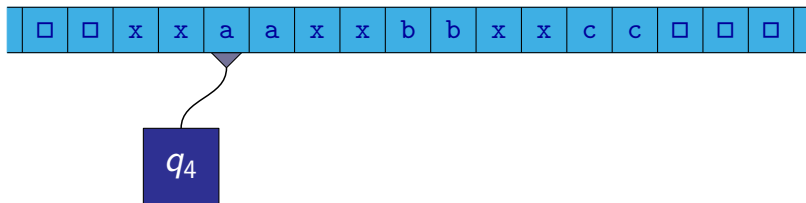
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



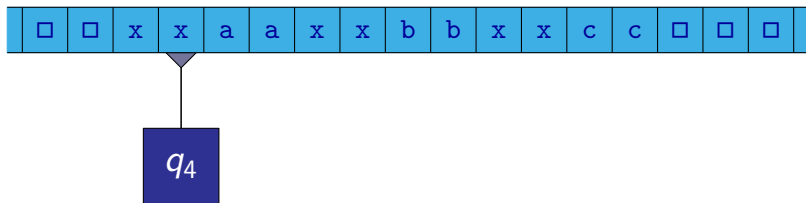
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



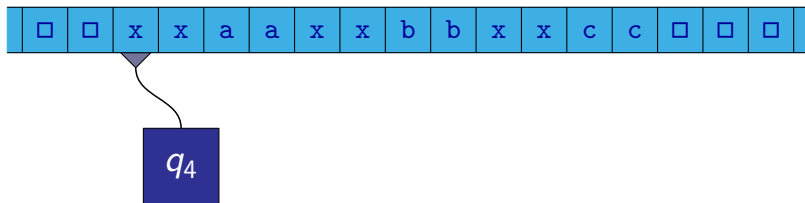
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



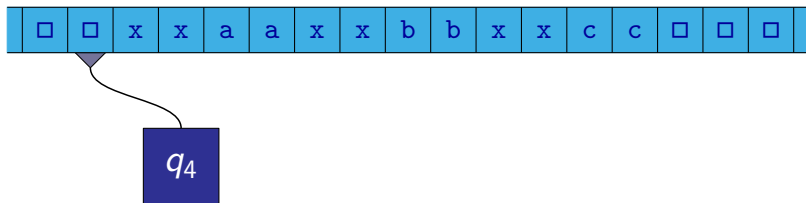
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



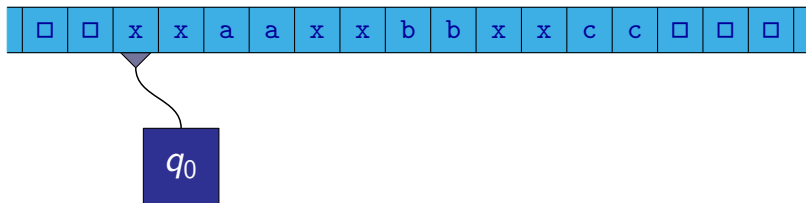
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



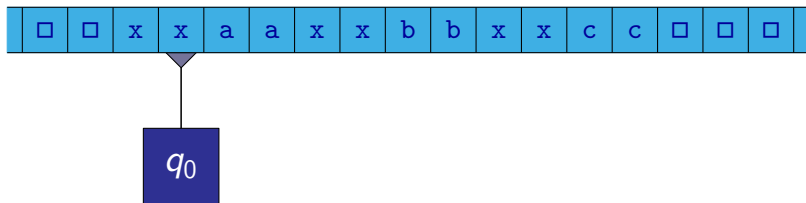
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



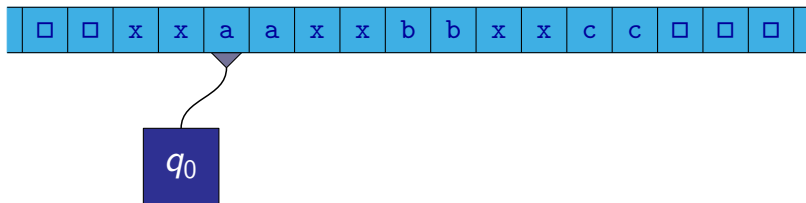
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



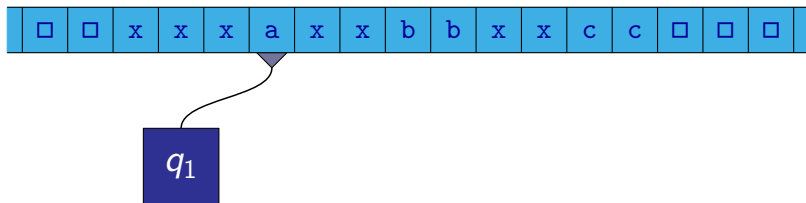
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



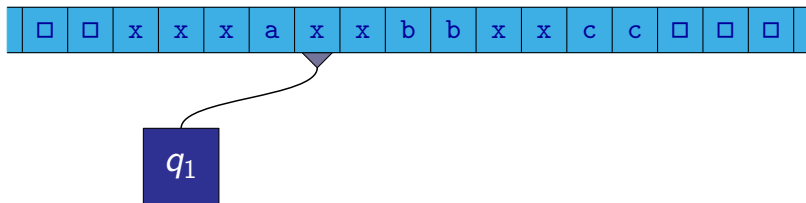
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



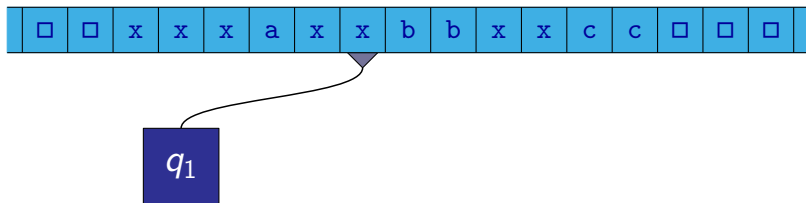
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



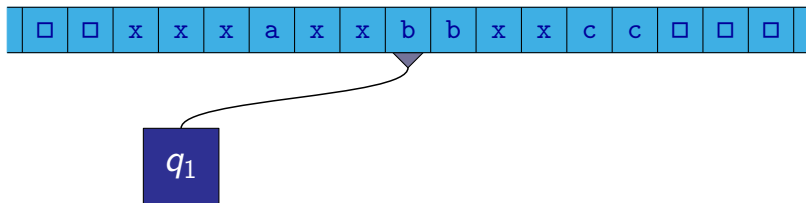
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



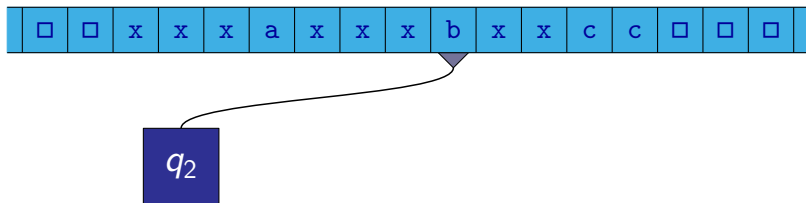
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



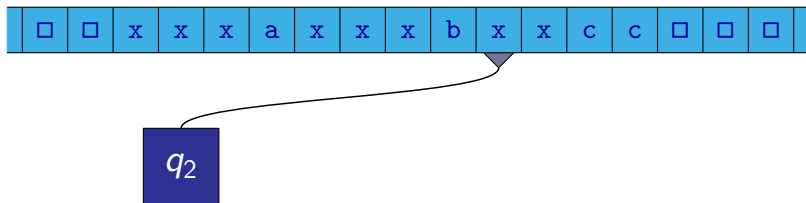
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



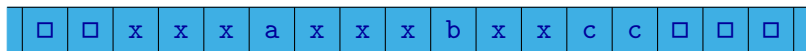
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_2

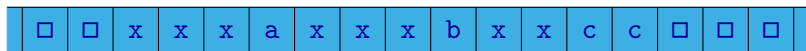
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_2

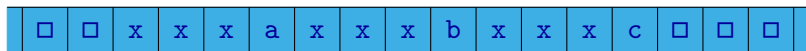
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

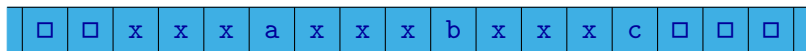
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_3

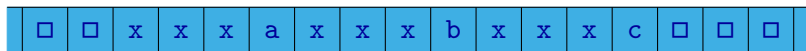
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

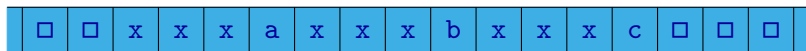
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

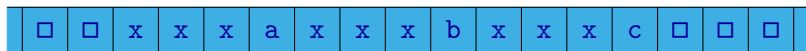
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

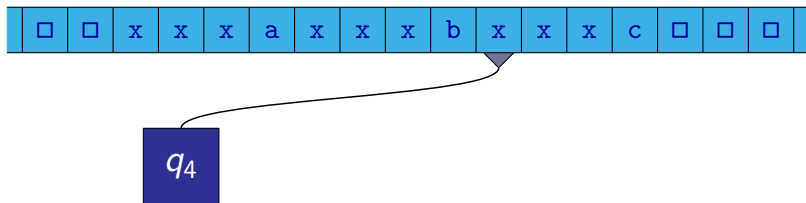
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



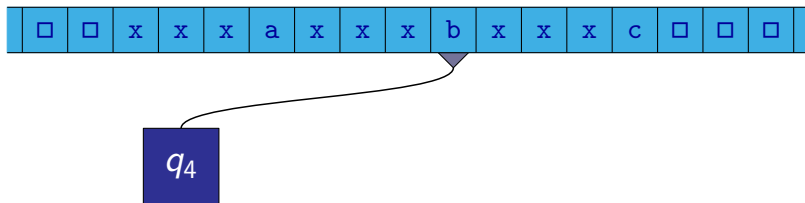
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



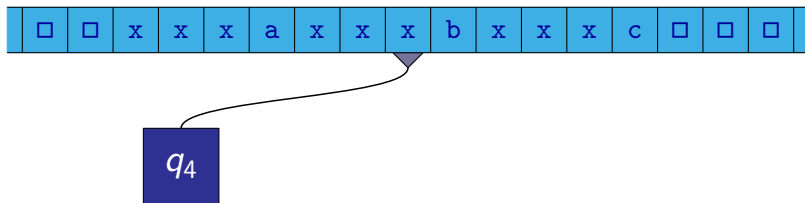
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



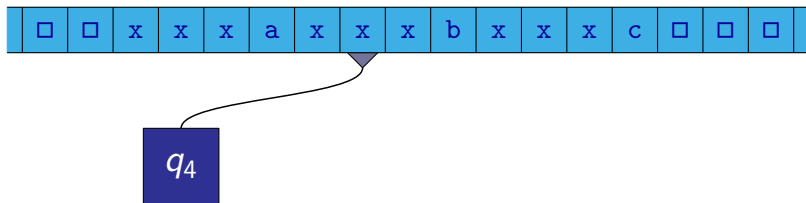
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



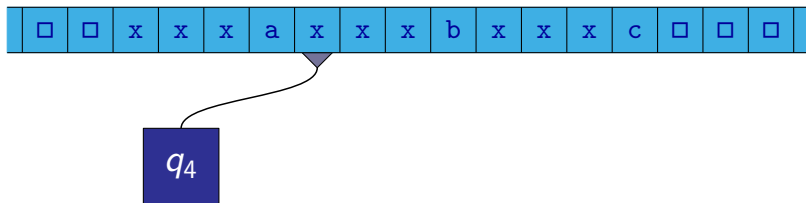
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



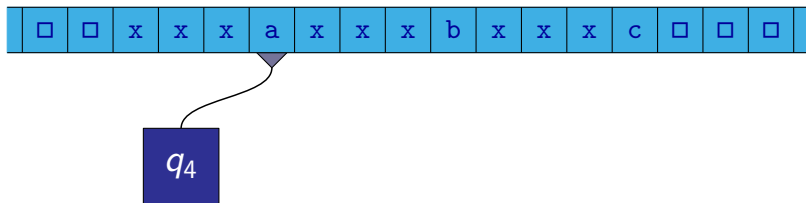
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



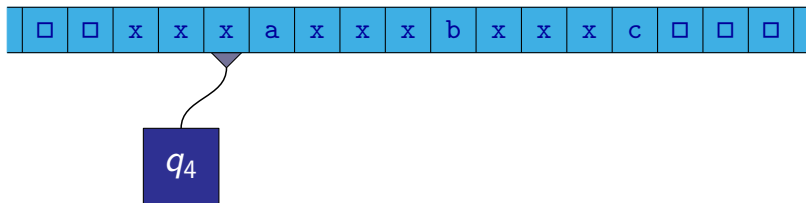
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



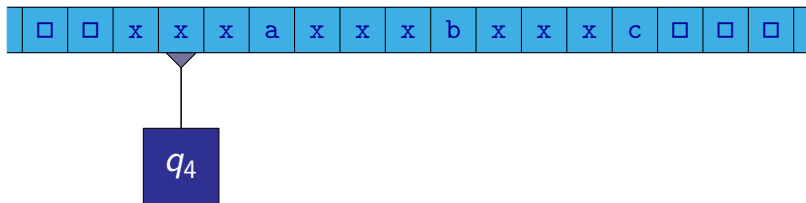
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



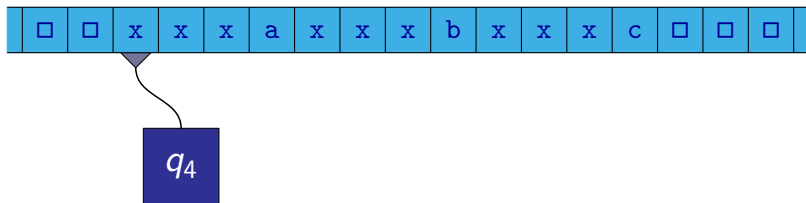
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



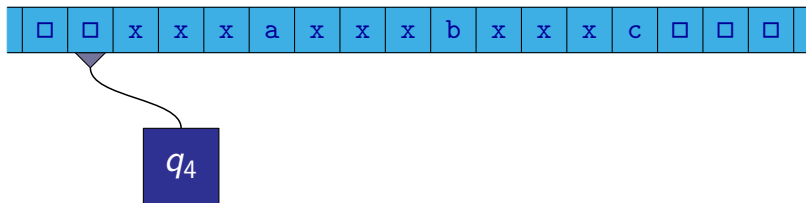
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



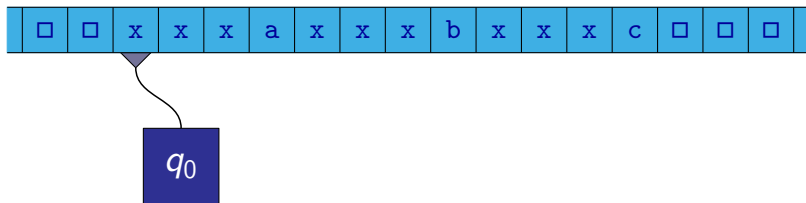
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



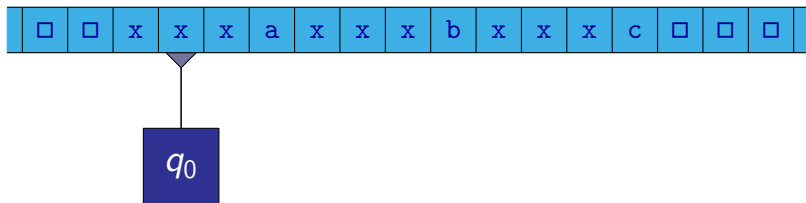
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



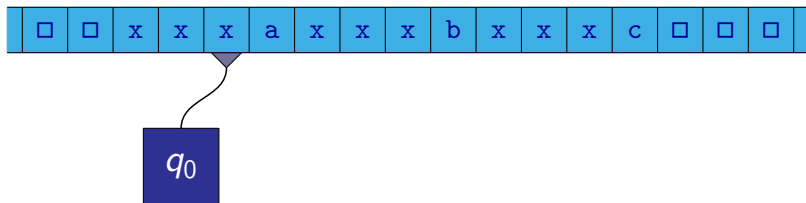
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



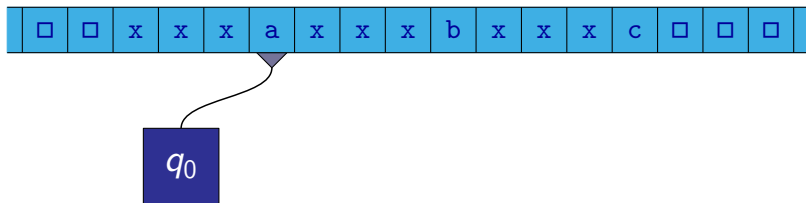
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



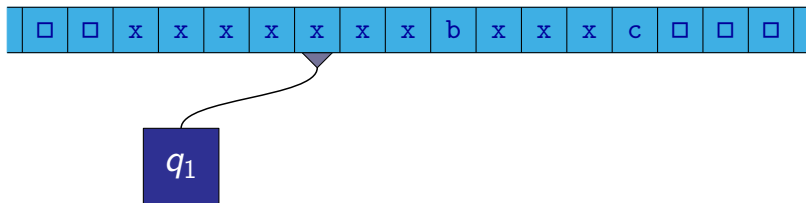
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



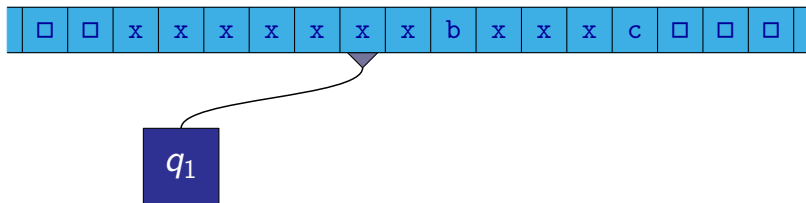
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



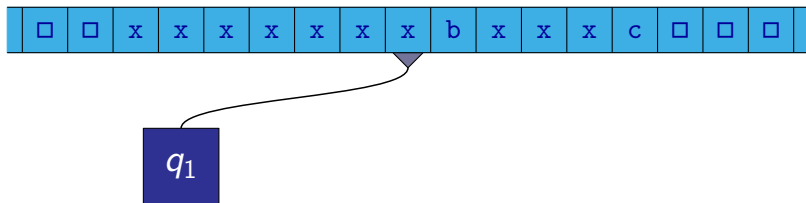
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



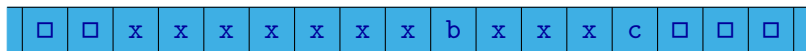
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_1

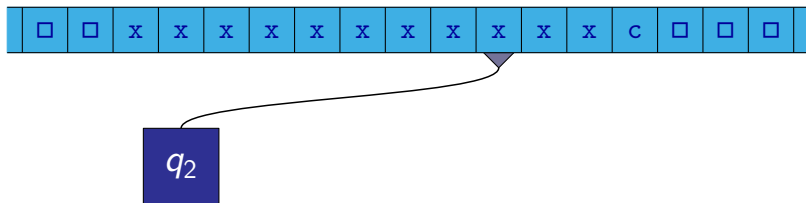
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



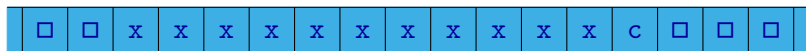
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_2

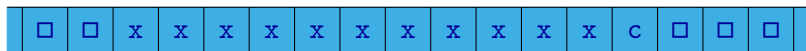
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_2

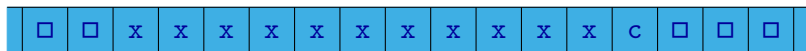
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_2

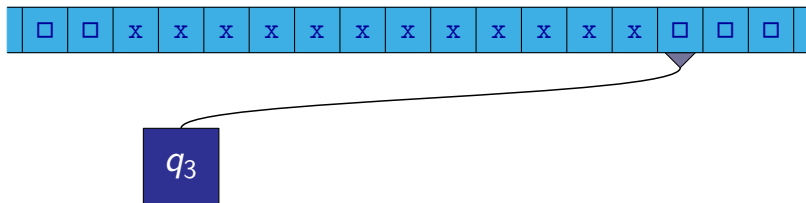
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



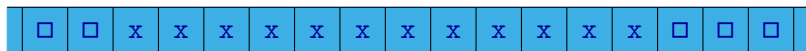
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_4

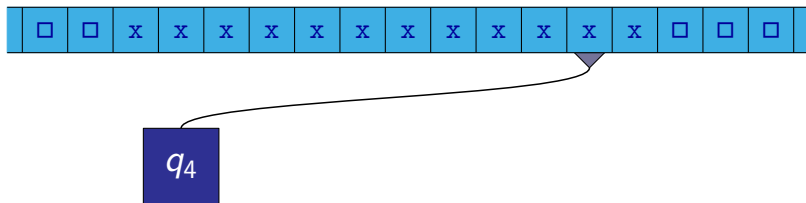
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



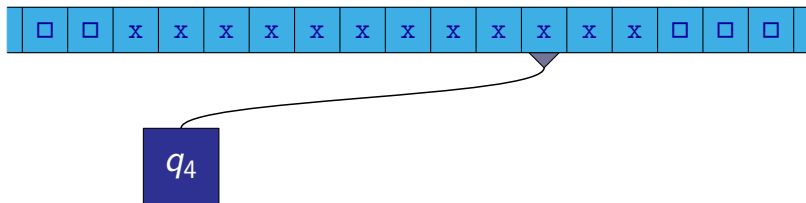
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



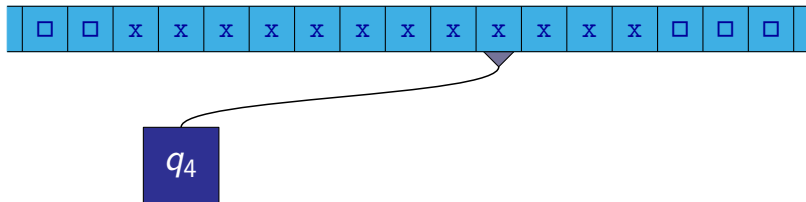
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



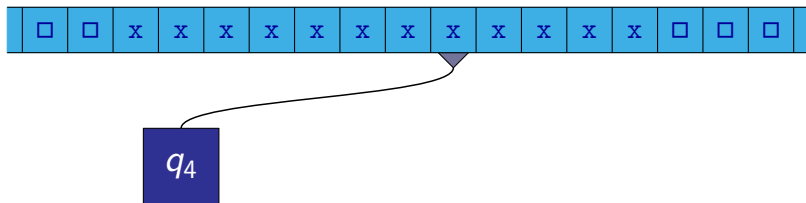
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



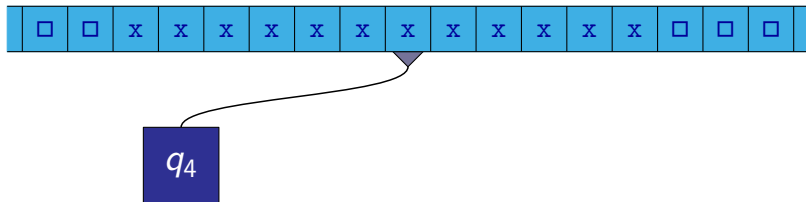
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



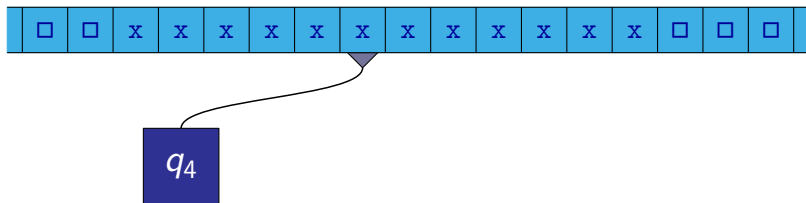
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



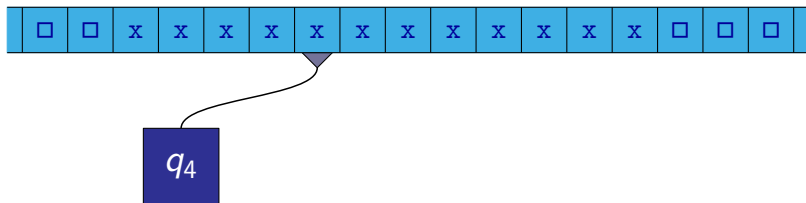
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



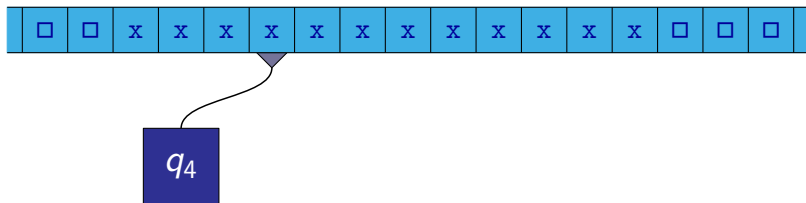
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



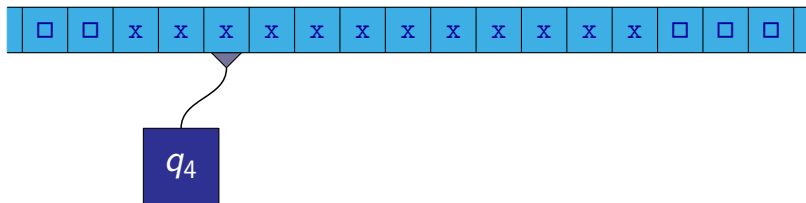
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



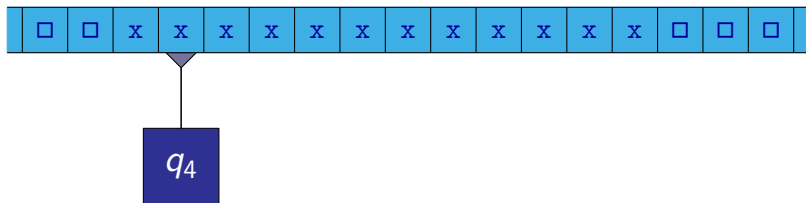
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



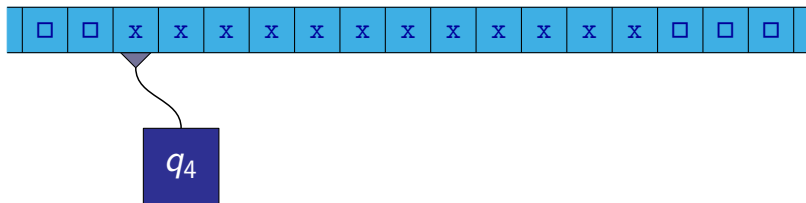
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



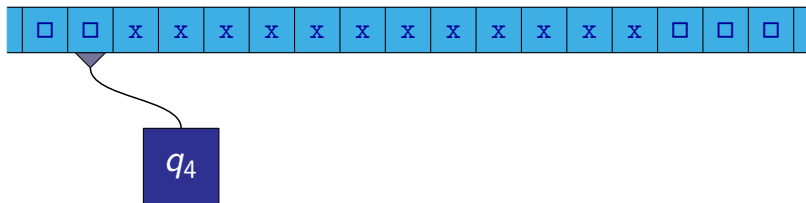
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



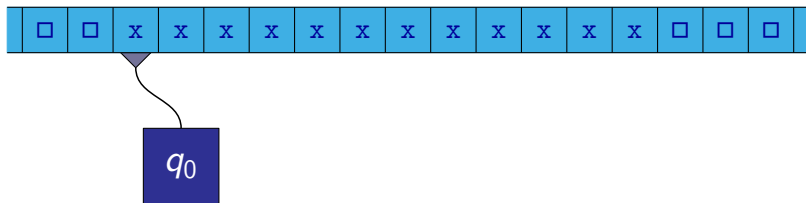
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



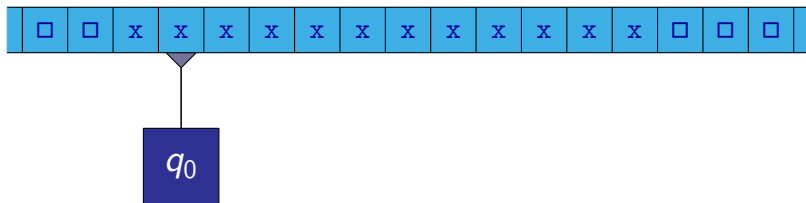
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



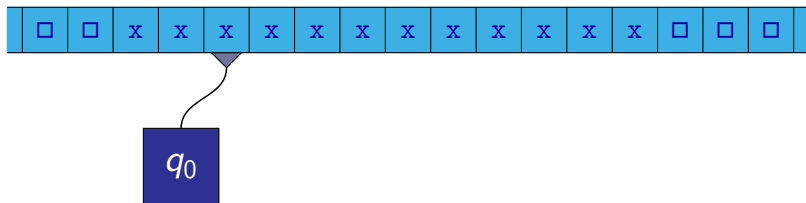
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



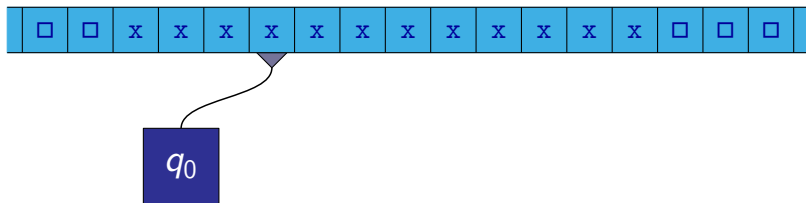
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



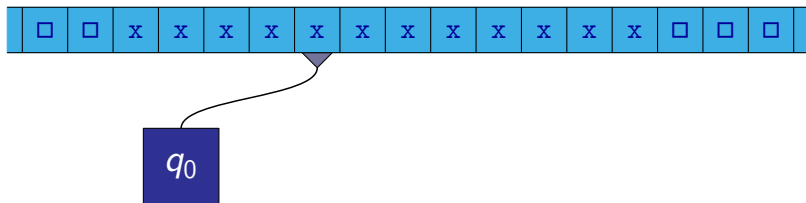
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



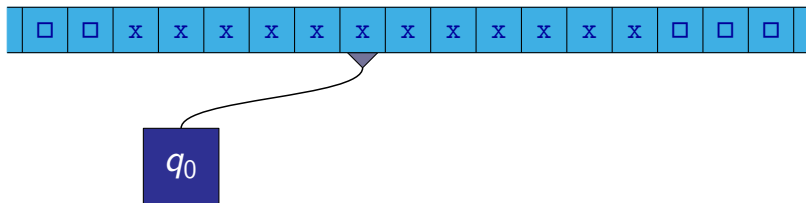
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



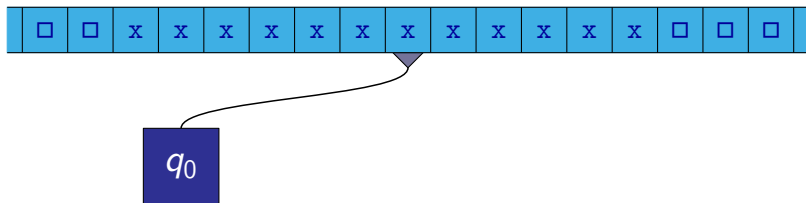
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



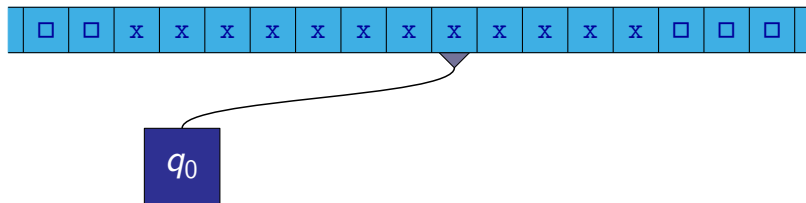
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



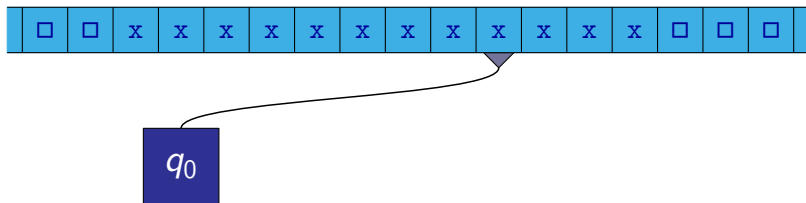
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



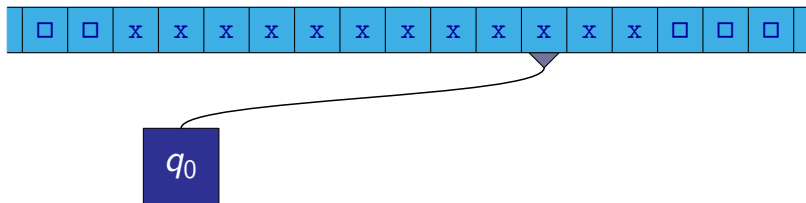
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



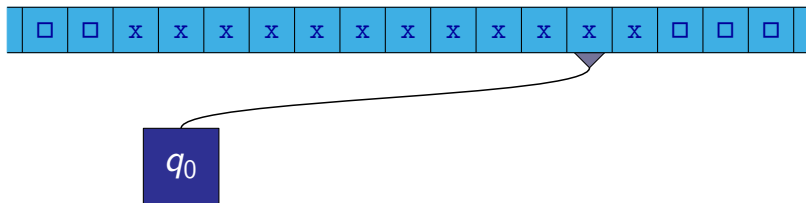
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



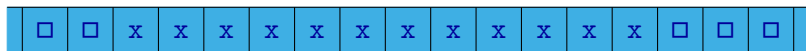
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



q_0

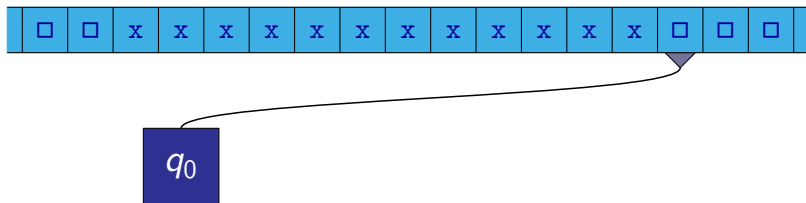
Turingův stroj

Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



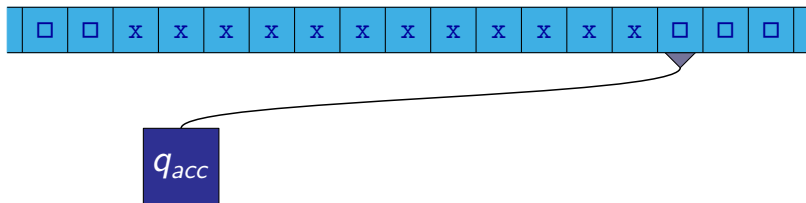
Turingův stroj

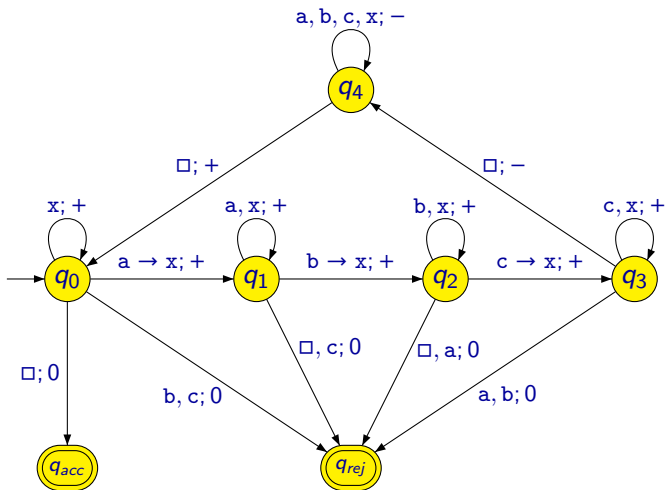
Jazyk $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$

$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_{acc}, q_{rej}\}$ $F = \{q_{acc}, q_{rej}\}$

$\Sigma = \{a, b, c\}$ $\Gamma = \{\square, a, b, c, x\}$

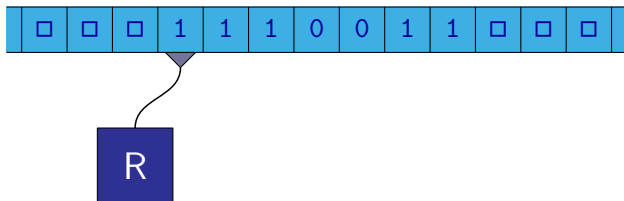
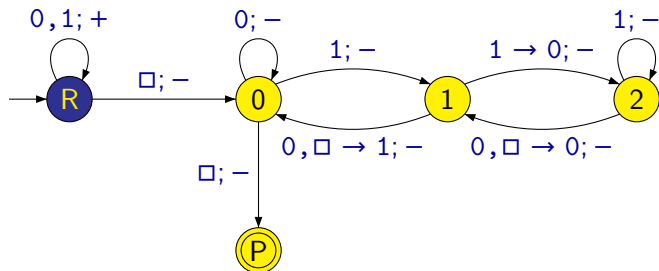
δ	$\square$	a	b	c	x
q_0	$(q_{acc}, \square, 0)$	$(q_1, x, +1)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_0, x, +1)$
q_1	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_1, a, +1)$	$(q_2, x, +1)$	$(q_{rej}, c, 0)$	$(q_1, x, +1)$
q_2	$(q_{rej}, \square, 0)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_2, b, +1)$	$(q_3, x, +1)$	$(q_2, x, +1)$
q_3	$(q_4, \square, -1)$	$(q_{rej}, a, 0)$	$(q_{rej}, b, 0)$	$(q_3, c, +1)$	$(q_3, x, +1)$
q_4	$(q_0, \square, +1)$	$(q_4, a, -1)$	$(q_4, b, -1)$	$(q_4, c, -1)$	$(q_4, x, -1)$



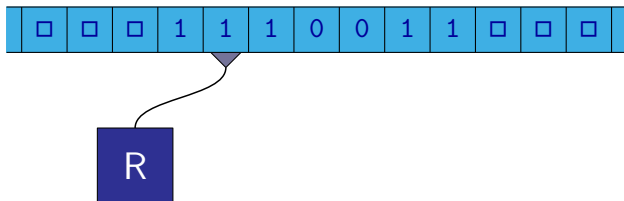
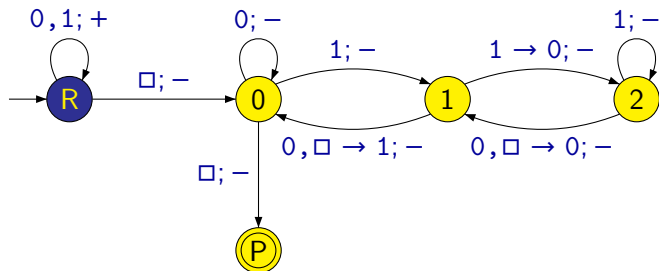


- Turingův stroj nemusí dávat jen odpověď ANO nebo NE, ale může realizovat nějakou funkci, která každému slovu ze Σ^* přiřazuje nějaké jiné slovo (z Γ^*).
- Slovo přiřazené slovu w je slovo, které zůstane zapsáno na pásce po výpočtu nad slovem w , když odstraníme všechny znaky $\square$.

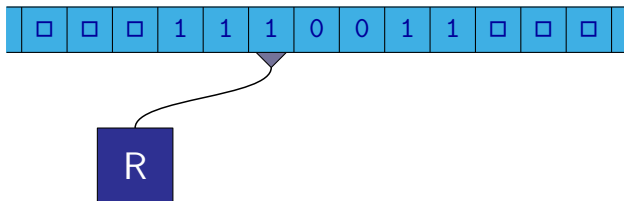
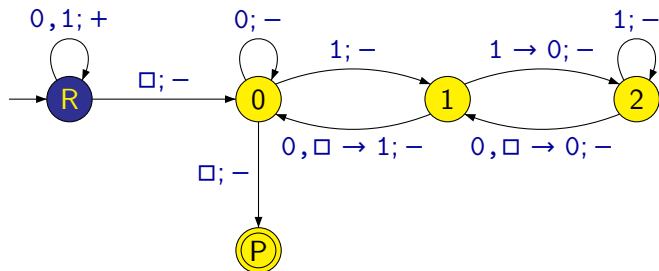
Turingův stroj – násobení třemi



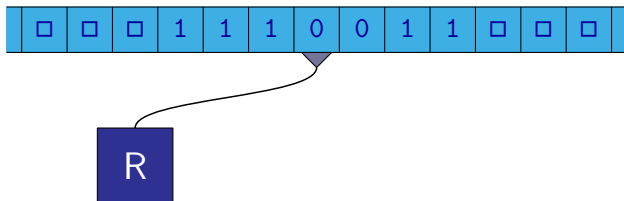
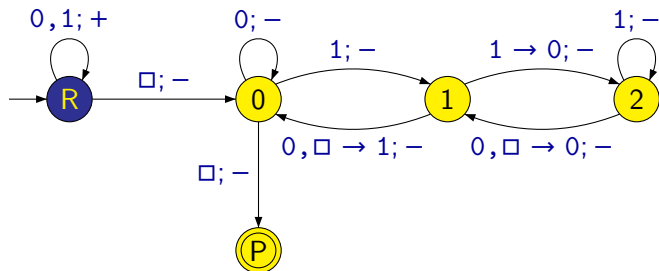
Turingův stroj – násobení třemi



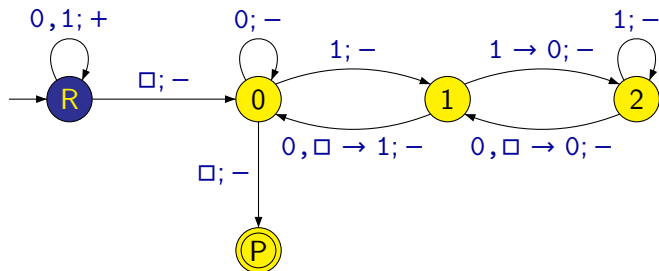
Turingův stroj – násobení třemi



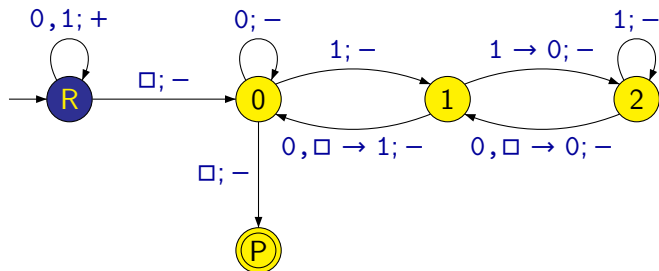
Turingův stroj – násobení třemi



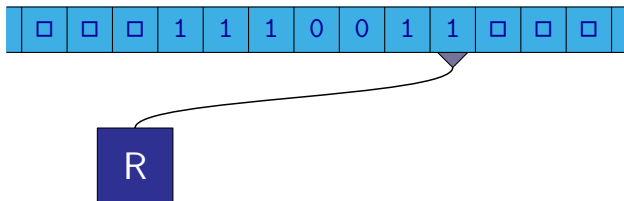
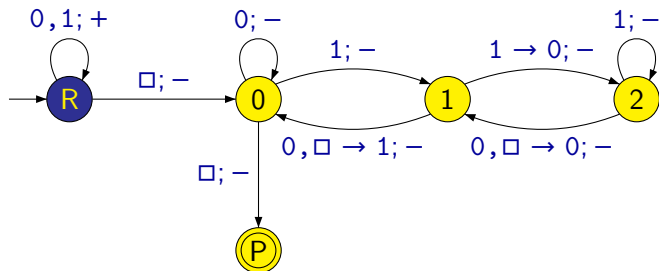
Turingův stroj – násobení třemi



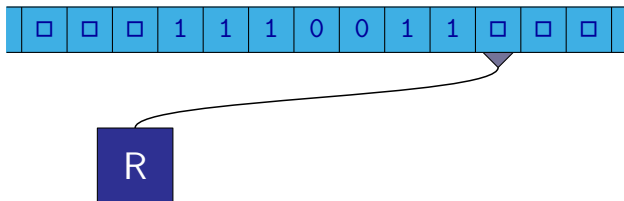
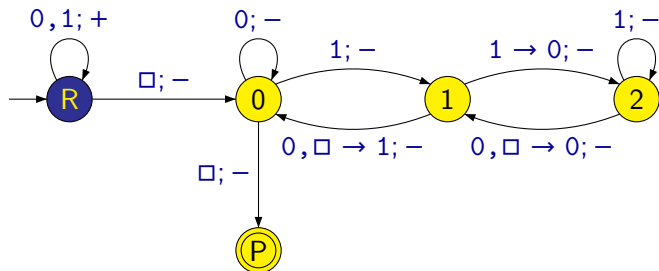
Turingův stroj – násobení třemi



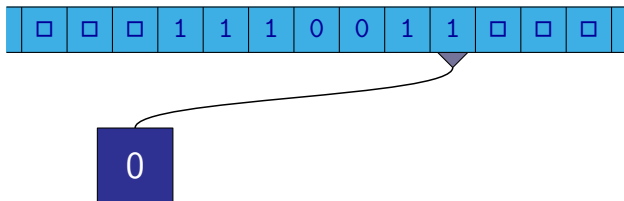
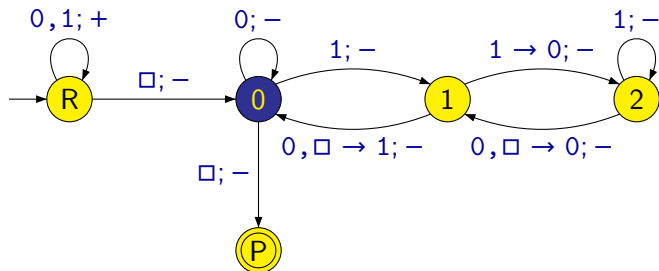
Turingův stroj – násobení třemi



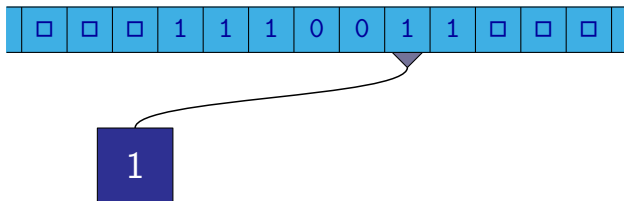
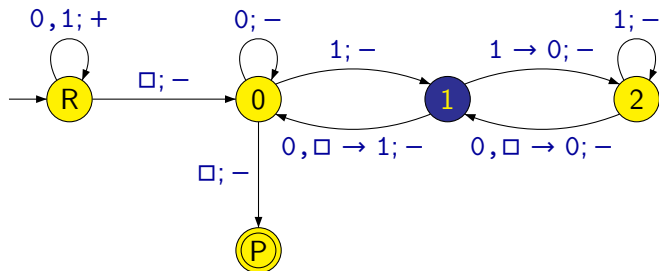
Turingův stroj – násobení třemi



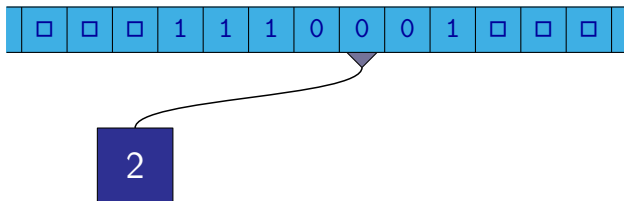
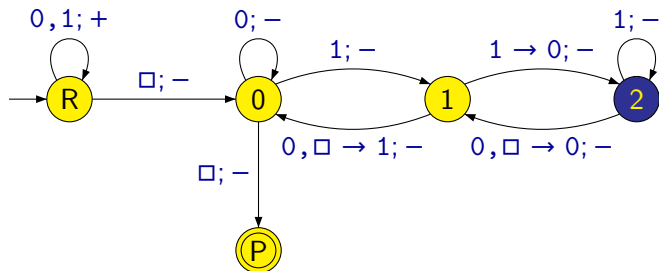
Turingův stroj – násobení třemi



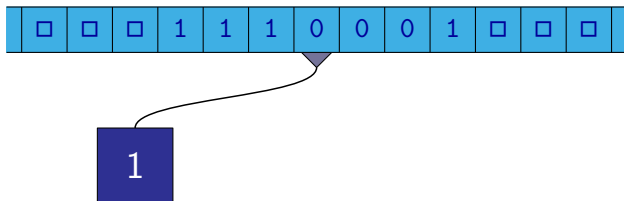
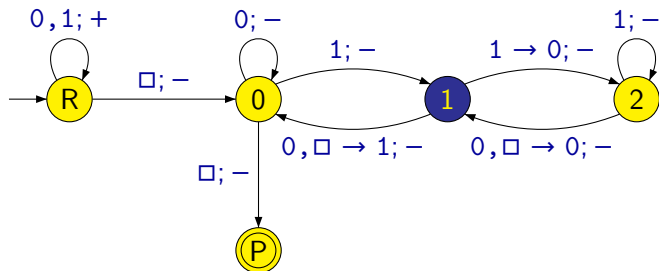
Turingův stroj – násobení třemi



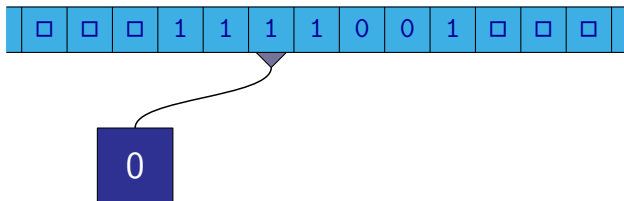
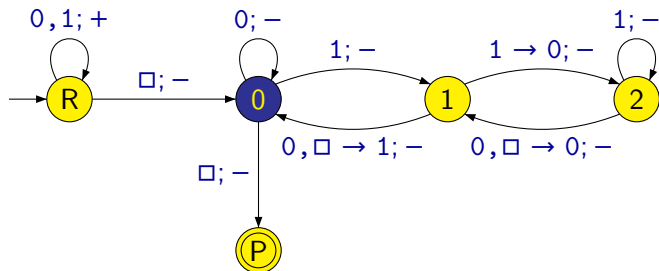
Turingův stroj – násobení třemi



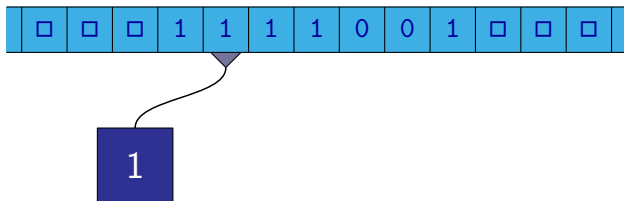
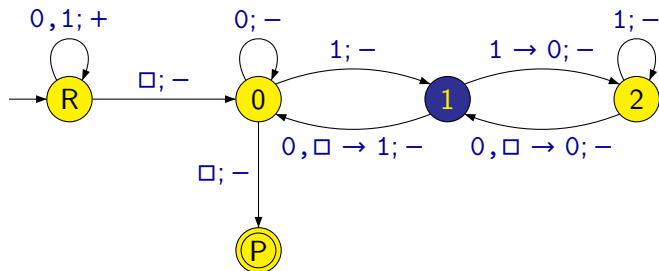
Turingův stroj – násobení třemi



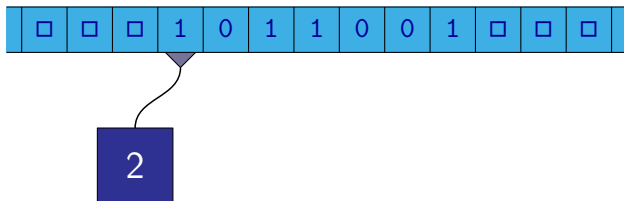
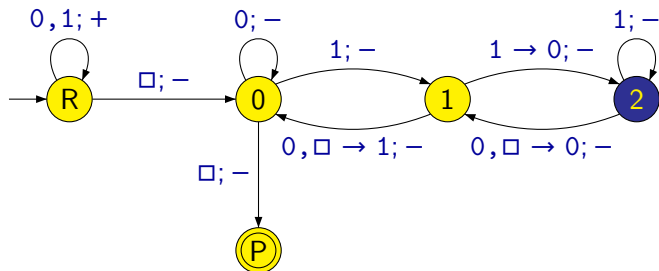
Turingův stroj – násobení třemi



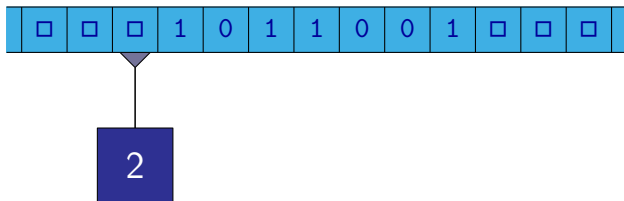
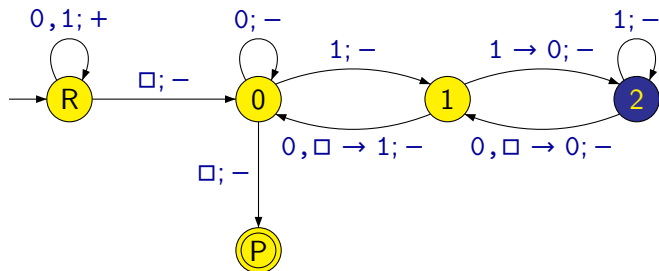
Turingův stroj – násobení třemi



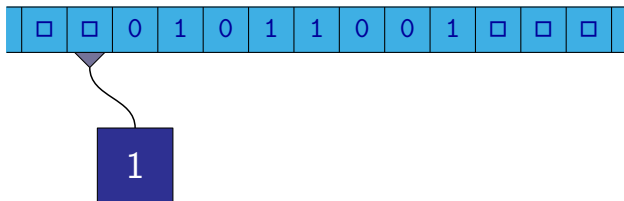
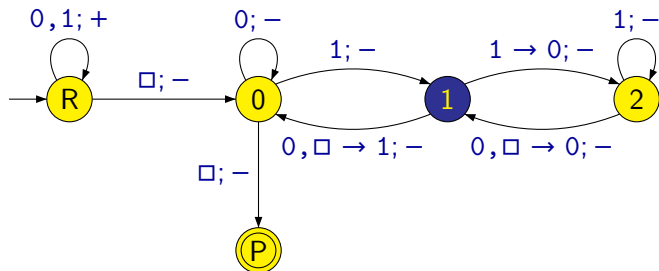
Turingův stroj – násobení třemi



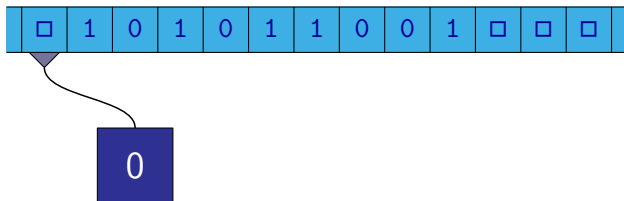
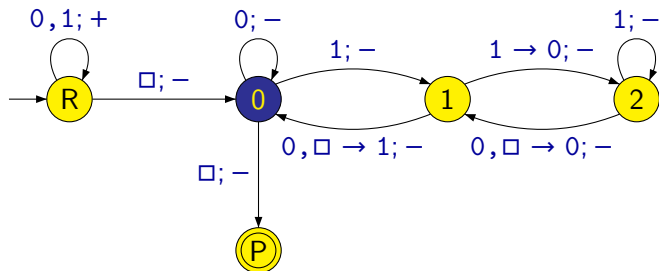
Turingův stroj – násobení třemi



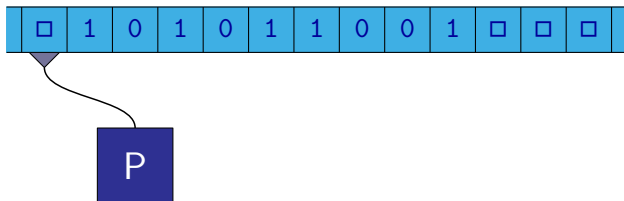
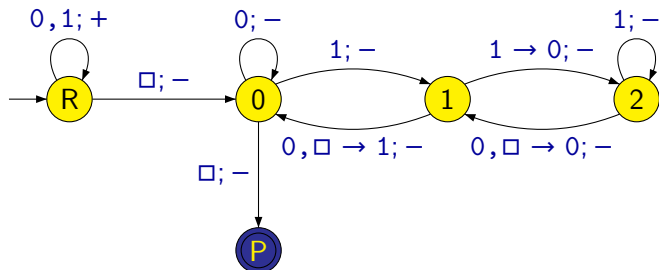
Turingův stroj – násobení třemi



Turingův stroj – násobení třemi



Turingův stroj – násobení třemi

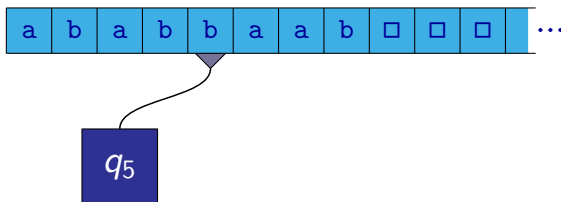


- Dříve uvedená definice Turingova stroje je jen jednou z mnoha možných variant.
- Uvedeme několik příkladů toho, v čem se mohou některé jiné varianty Turingových strojů lišit.
- Prakticky všechny tyto varianty Turingových strojů jsou schopny přijímat či rozpoznávat tytéž jazyky a počítat tytéž funkce.
- Co se týká doby výpočtu a množství použité paměti, mezi různými variantami mohou, ale nemusí být významné rozdíly.

Varianty Turingových strojů

Jednostranně či **oboustranně** nekonečná páska:

- V předchozí definici jsme uvažovali pásku, která je nekonečná jak směrem doleva, tak směrem doprava.
- Místo toho se někdy v definici Turingova stroje uvažuje páska, která je nekonečná jen směrem doprava.

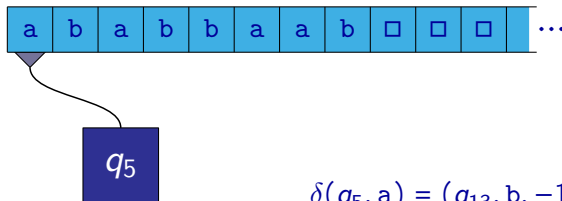


Varianty Turingových strojů

Je třeba nějak definovat, co se má stát, když se hlava nachází na nejlevějším políčku pásky a má se posunout doleva.

Dvě nejběžnější možnosti:

- Nastane „chybový“ stav, kdy se výpočet (neúspěšně) ukončí:

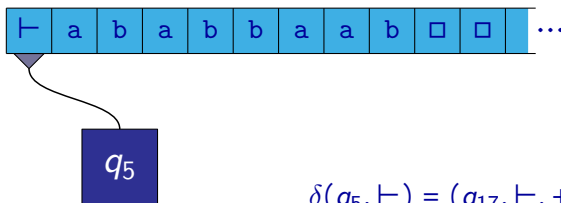


$$\delta(q_5, a) = (q_{13}, b, -1)$$

Variety Turingových strojů

- Na levém konci pásky je „zarážka“ reprezentovaná speciálním symbolem $\vdash \in (\Gamma - \Sigma)$.

Tuto zarážku není možné přepsat a není na ní možný pohyb směrem doleva, tj. pro každé $q \in Q$ platí, že pokud $\delta(q, \vdash) = (q', b, d)$, tak $b = \vdash$ a $d \in \{0, +1\}$.



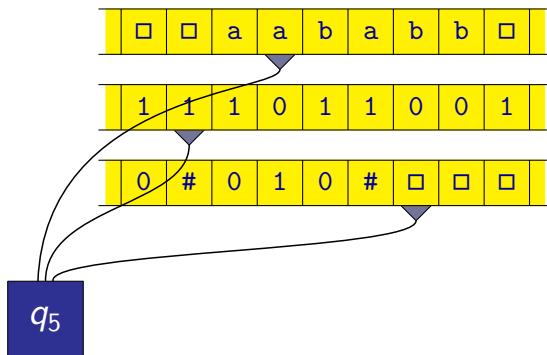
Poznámka: S možností, že výpočet může skončit neúspěšně, protože nastane nějaká chyba, kdy z dané konfigurace není možné pokračovat, ale přitom to není koncová konfigurace, se setkáme i u řady dalších strojů, kterými se budeme zabývat.

Obecně mohou při výpočtu libovolného stroje nastat následující případy:

- Výpočet skončí úspěšně v koncové konfiguraci, která odpovídá korektnímu zastavení.
- Výpočet skončí neúspěšně v konfiguraci, která není koncová, ale není v ní možné pokračovat ve výpočtu — toto chápeme tak, že výpočet skončil chybou.
- Výpočet se nikdy nezastaví.

Varianty Turingových strojů

Často se také uvažují **vícepáskové Turingovy stroje**.



V případě vícepáskového stroje:

- Každá z k pásek má svou vlastní páskovou abecedu, tj. máme páskové abecedy $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_k$.
- Přejchodová funkce δ je typu

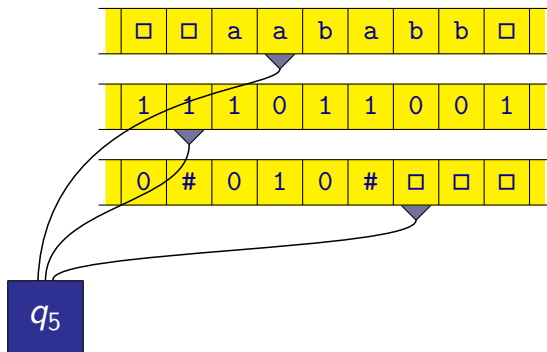
$$(Q - F) \times \Gamma_1 \times \dots \times \Gamma_k \rightarrow Q \times \Gamma_1 \times \{-1, 0, +1\} \times \dots \times \Gamma_k \times \{-1, 0, +1\}$$

Příklad:

$$\delta(q_5, a, 1, \square) = (q_{12}, a, -1, x, 0, 1, +1)$$

Variety Turingových strojů

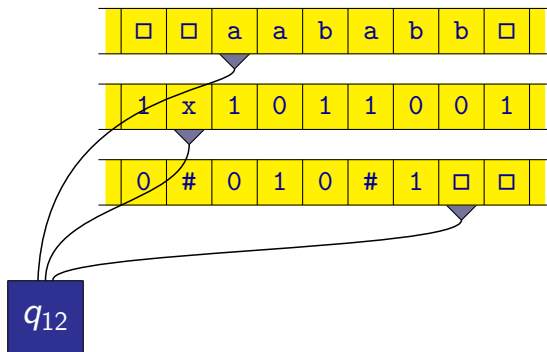
Příklad:



$$\delta(q_5, a, 1, \square) = (q_{12}, a, -1, x, 0, 1, +1)$$

Variety Turingových strojů

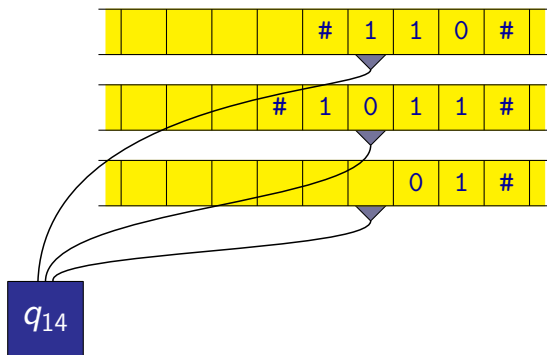
Příklad:



$$\delta(q_5, a, 1, \square) = (q_{12}, a, -1, x, 0, 1, +1)$$

Variety Turingových strojů

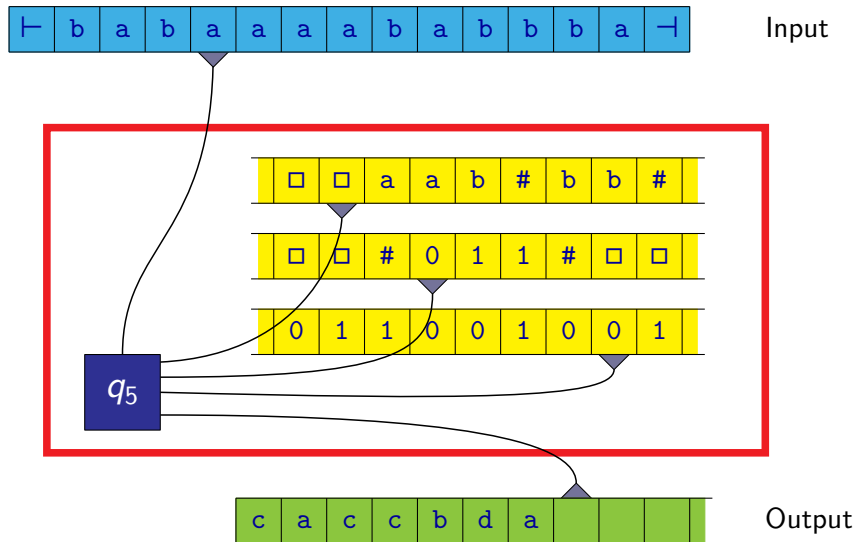
Příklad: Stroj provádějící sčítání dvou binárně zapsaných čísel ohraničených znaky # (např. čísla 6 a 11 budou zapsaná jako slova “#110#” a “#1011#”).



Vícepáskové stroje mají často jednu z pásek vyčleněnu jako vstupní pásku a jednu z pásek jako výstupní pásku. Ostatní pásy pak používají jako pracovní:

- **Vstupní páska** — obsahuje vstupní slovo, není možné na ni zapisovat (je read-only), není nekonečná
- **Pracovní pásy** — je možné z nich číst i na ně zapisovat (jsou typu read/write), na začátku výpočtu jsou prázdné (obsahují pouze symboly $\square$)
- **Výstupní páska** — je na ni možné pouze zapisovat (je write-only), není z ní možné číst, na začátku výpočtu je prázdná, pohyb hlavy je možný jen zleva doprava

Variety Turingových strojů



Pokud má stroj vyčleněnou speciální vstupní pásku (která je read-only), používají se typicky dvě následující varianty:

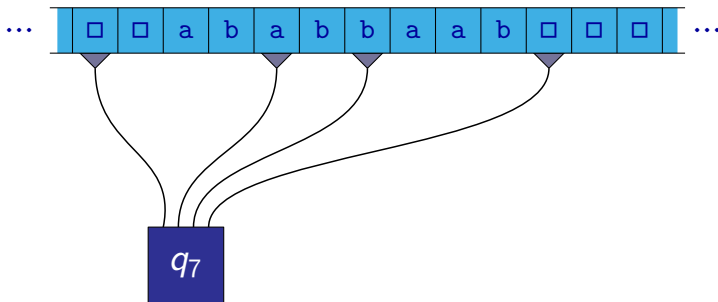
- Na této vstupní pásce je možný pohyb hlavy doleva i doprava.
Vstupní slovo $w \in \Sigma^*$ je v takovém případě ohraničeno zleva a zprava pomocí „zarážek“, tj. speciálních symbolů $\vdash, \dashv \in (\Gamma - \Sigma)$.
- Na vstupní pásce je možný pohyb hlavy pouze zleva doprava.

Poznámka: Varianta s možným pohybem hlavy na obě strany a se zarážkami je obvyklejší.

Pokud nebude řečeno jinak, budeme uvažovat tuto variantu.

Variety Turingových strojů

Místo více pásek je možné též uvažovat **více hlav** na jedné pásce:



V případě více hlav na jedné pásce, je třeba specifikovat:

- Zda se může více hlav nacházet současně na jednom políčku pásky.
- A pokud ano, jak je definováno chování daného stroje v případě, že hlavy nacházející se na stejném políčku budou chtít na toto políčko zapsat rozdílné symboly.
- Zda je daný stroj schopen detekovat to, že se dvě nebo více hlav nacházejí současně na témže políčku.

Poznámka: Samozřejmě obecně můžeme uvažovat stroje s více páskami, kde každá z těchto pásek může být vybavena více hlavami.

Uvažujme stroj s více páskami a s libovolným počtem hlav na každé pásce.

Místo toho, aby stroj pracoval v každém kroku zároveň se všemi hlavami, můžeme jeho činnost popisovat jako „program“ skládající se z jednodušších instrukcí následujících typů:

- posunout danou hlavu o jedno políčko doleva
- posunout danou hlavu o jedno políčko doprava
- zapsat na pozici dané hlavy daný specifikovaný symbol
- přečíst z pozice dané hlavy jeden symbol a provést větvení programu (tj. jít do různých stavů řídicí jednotky) v závislosti na tom, o jaký symbol se jedná

Varianty Turingových strojů

Zatím jsme uvažovali jen **lineární** (jedorozměrné) pásy.

Místo jednorozměrné pásy může mít paměť s políčky (kde každé políčko obsahuje jeden znak z nějaké dané abecedy) nějakou jinou strukturu.

Například:

- dvourozměrná **čtverečková rovina**
— pohyb hlavy do čtyř směrů: doleva, doprava, nahoru, dolů
- d -rozměrná paměť pro nějaké $d = 3, 4, \dots$
(třírozměrná, čtyřrozměrná, atd.)
- paměť organizovaná ve formě (nekonečného) stromu
- ...

Vzájemné simulace mezi různými druhy strojů

Vysvětlení toho, co to znamená, že stroj $\mathcal{M}$ je **simulován** strojem $\mathcal{M}'$:

- Výpočet stroje $\mathcal{M}$ pro vstup w je (konečná nebo nekonečná) posloupnost konfigurací stroje $\mathcal{M}$

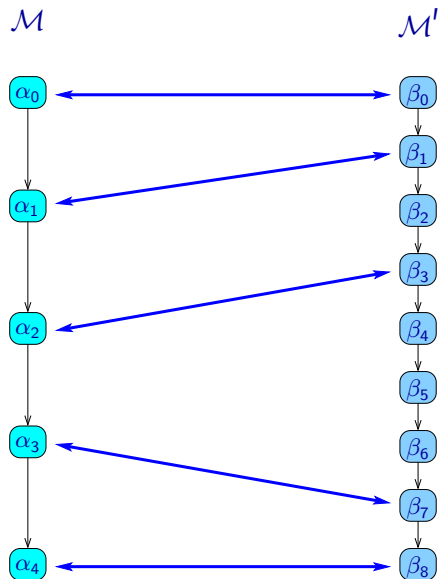
$$\alpha_0 \longrightarrow \alpha_1 \longrightarrow \alpha_2 \longrightarrow \dots$$

- Tomuto výpočtu odpovídá výpočet stroje $\mathcal{M}'$ tvořený konfiguracemi

$$\beta_0 \longrightarrow \beta_1 \longrightarrow \beta_2 \longrightarrow \dots$$

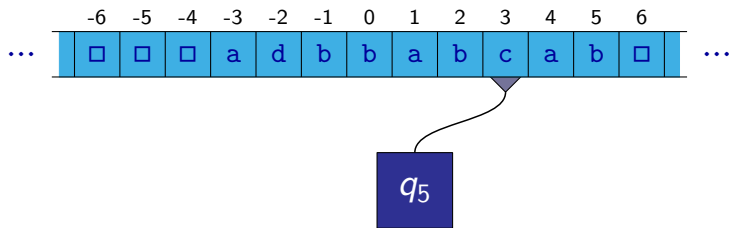
kde každé konfiguraci α_i odpovídá nějaká konfigurace $\beta_{f(i)}$, kde $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ je funkce, pro kterou platí $f(i) \leq f(j)$ pro každé i a j , kde $i < j$.

- Existují funkce mapující vstup w na odpovídající počáteční konfigurace α_0 a β_0 a analogicky funkce mapující koncové konfigurace na výsledek výpočtu.

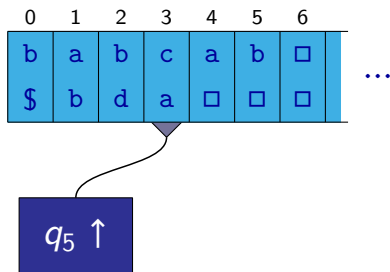


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

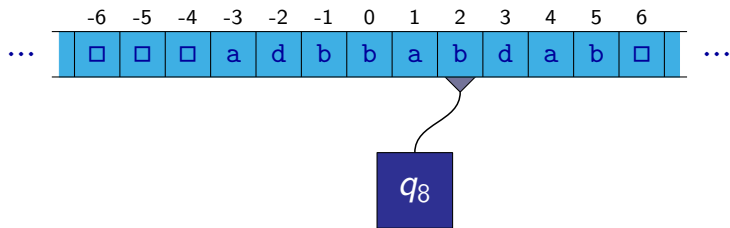


Jednostranně nekonečná páska:

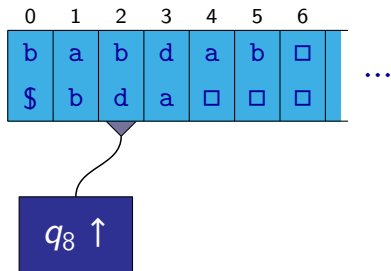


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

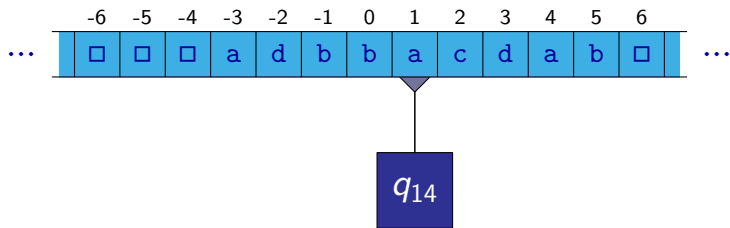


Jednostranně nekonečná páska:

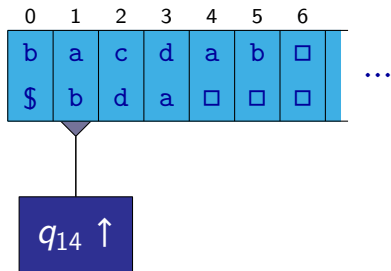


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

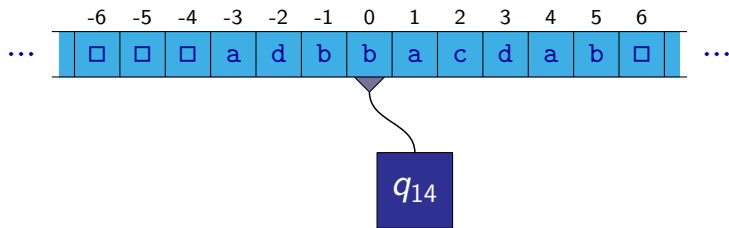


Jednostranně nekonečná páska:

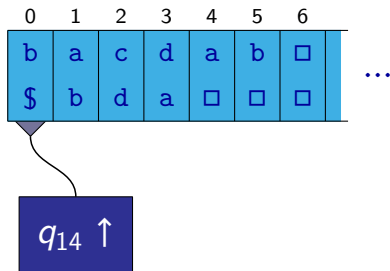


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

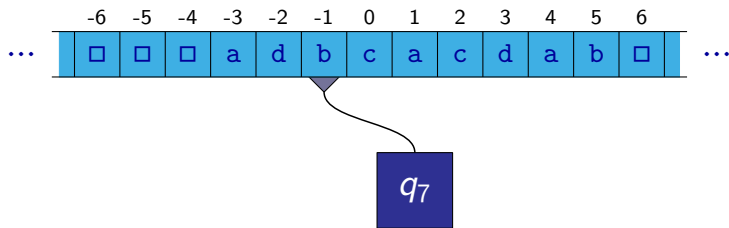


Jednostranně nekonečná páska:

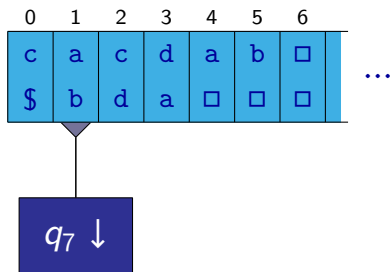


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

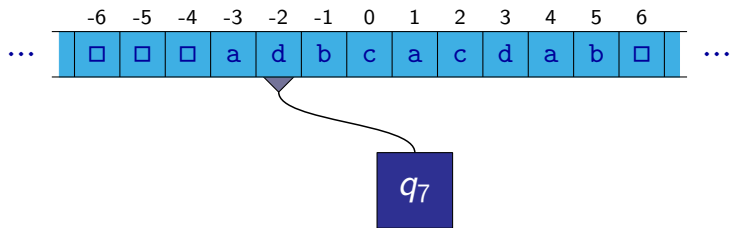


Jednostranně nekonečná páska:

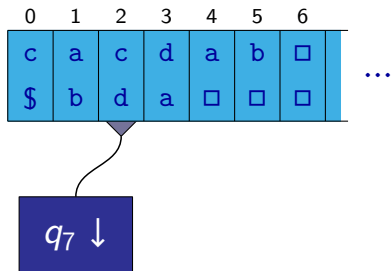


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

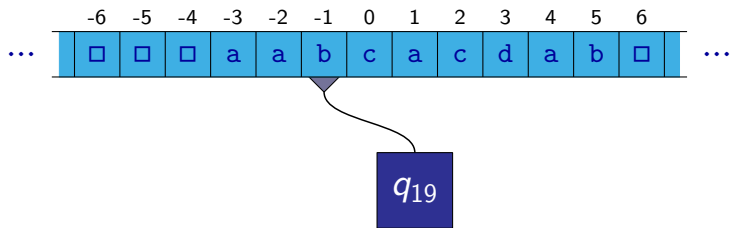


Jednostranně nekonečná páska:

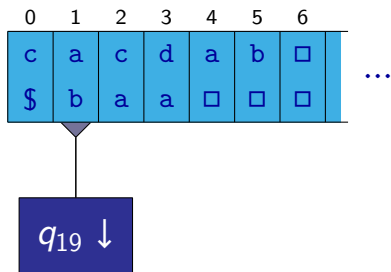


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

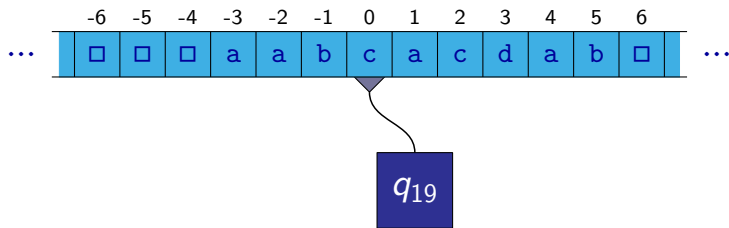


Jednostranně nekonečná páska:

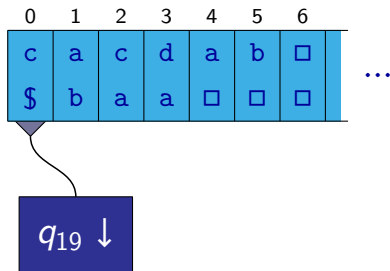


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

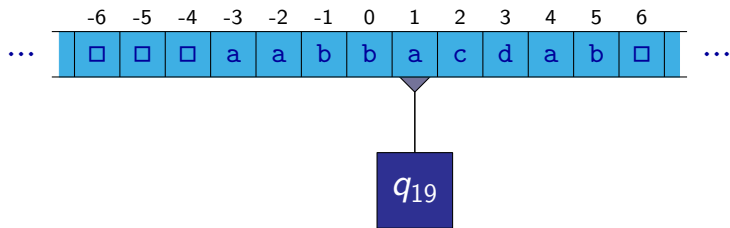


Jednostranně nekonečná páska:

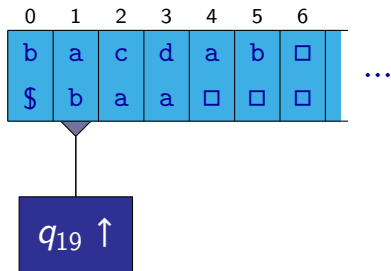


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:

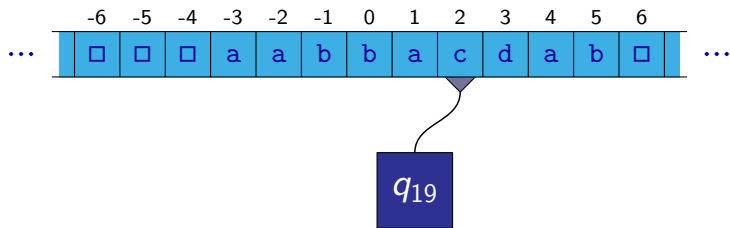


Jednostranně nekonečná páska:

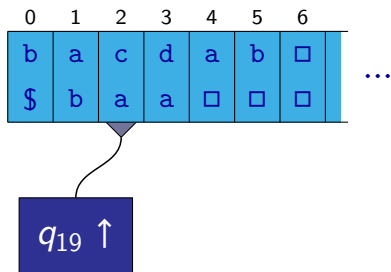


Oboustranně nekonečná páska pomocí jednostranné

Oboustranně nekonečná páska:



Jednostranně nekonečná páska:



Abeceda $\{0, 1\}$

Činnost stroje s libovolnou páskovou abecedou Γ může být simulována strojem s páskovou abecedou $\{0, 1\}$.

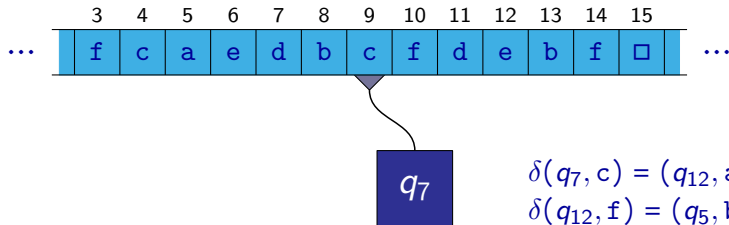
Stačí zvolit nějaké vhodné kódování symbolů abecedy Γ pomocí k -bitových sekvencí.

Příklad: Pásková abeceda $\Gamma = \{\square, a, b, c, d, e, f, g\}$

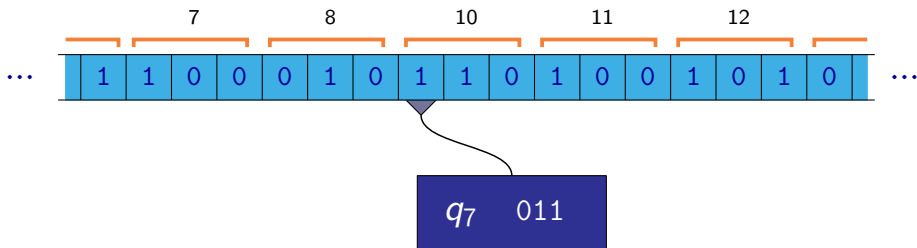
$\square$	$\leftrightarrow$	000
a	$\leftrightarrow$	001
b	$\leftrightarrow$	010
c	$\leftrightarrow$	011
d	$\leftrightarrow$	100
e	$\leftrightarrow$	101
f	$\leftrightarrow$	110
g	$\leftrightarrow$	111

Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :

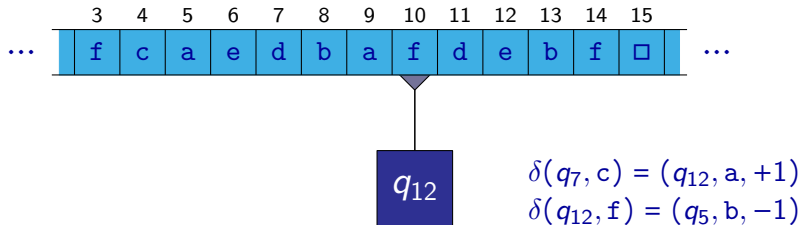


Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:

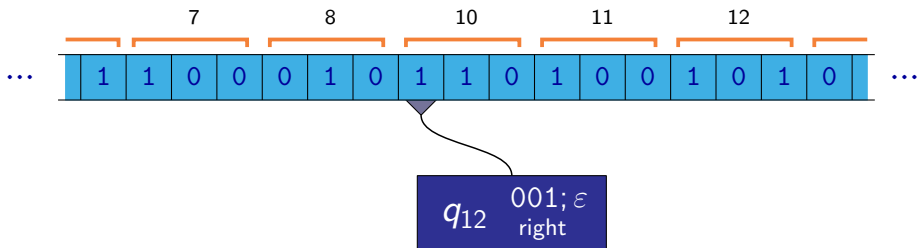


Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :

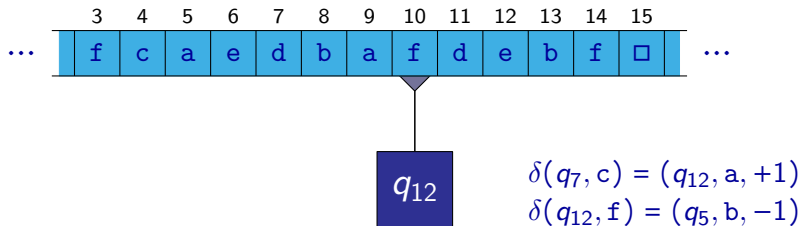


Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:

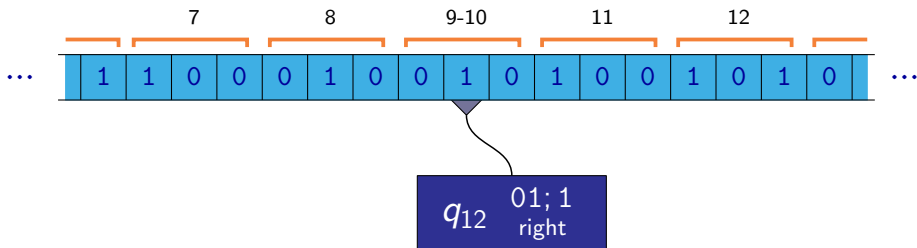


Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :

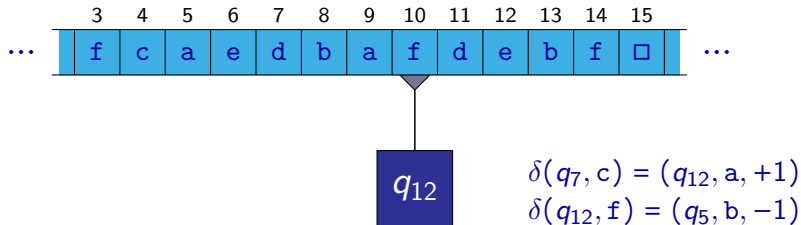


Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:

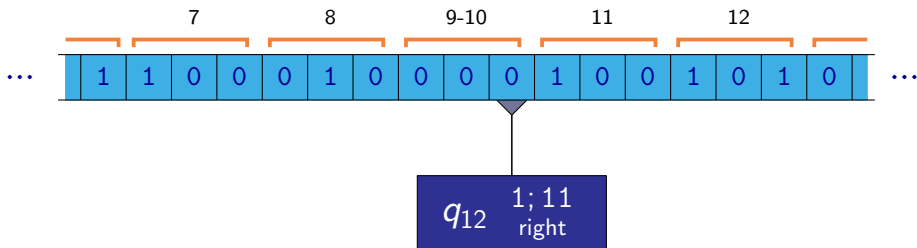


Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :

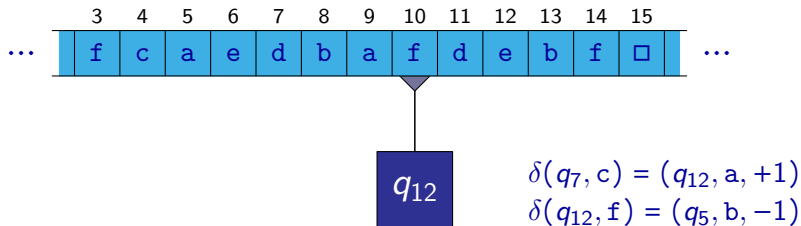


Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:

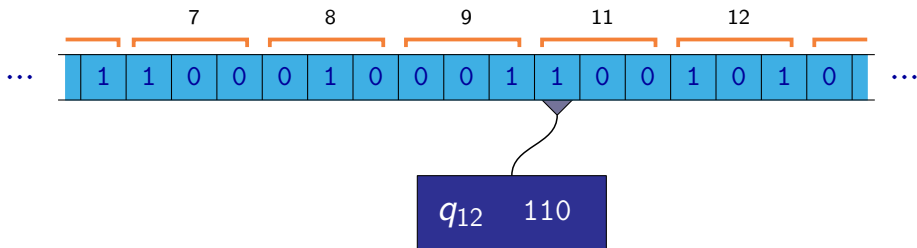


Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :

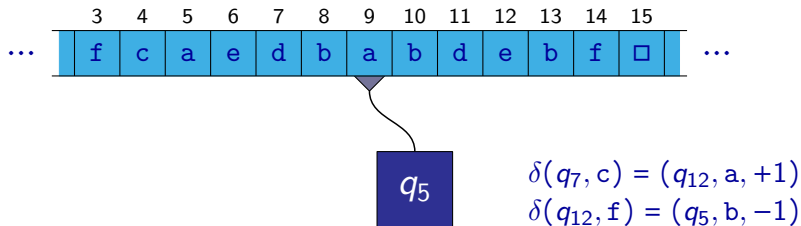


Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:

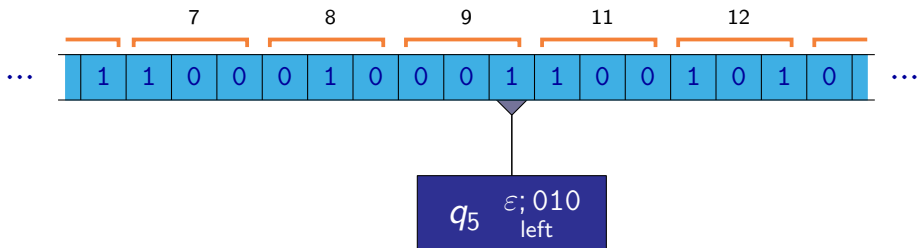


Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :

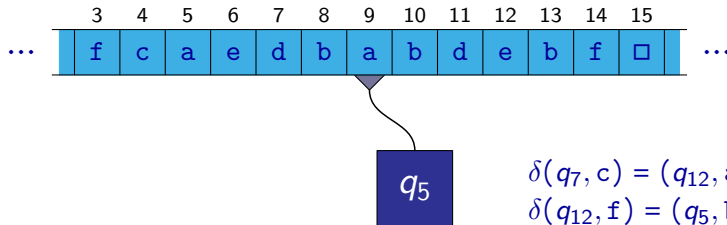


Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:

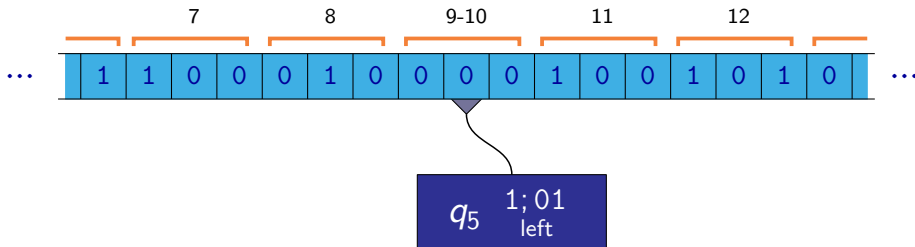


Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :

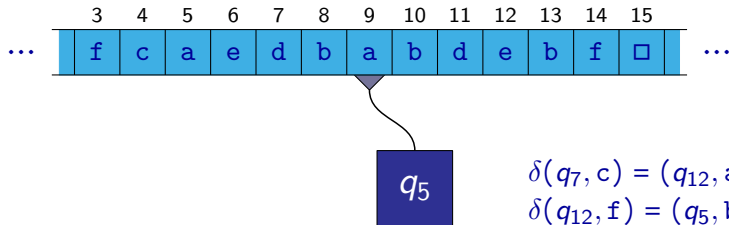


Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:

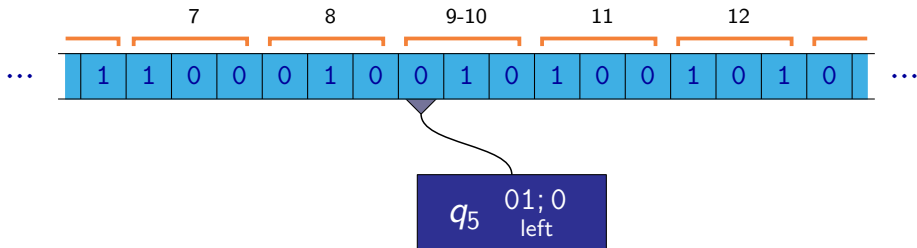


Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :

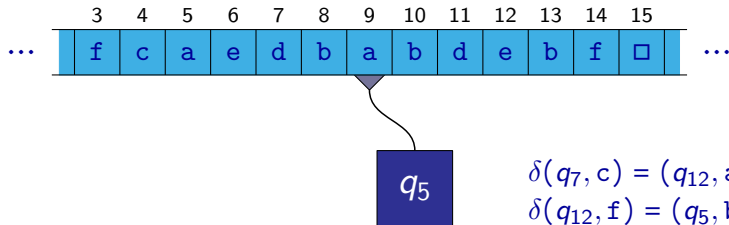


Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:

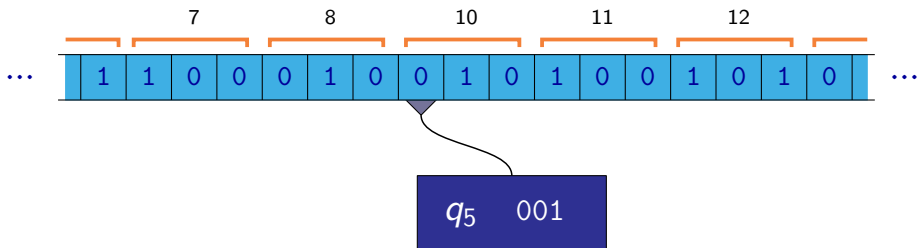


Abeceda $\{0, 1\}$

Stroj s páskovou abecedou Γ :



Stroj s abecedou $\{0, 1\}$:



Při výše uvedené simulaci je jeden krok původního stroje simulován $k + 1$ kroky, kde k je počet bitů kódující jeden symbol abecedy Γ .

Pokud tedy původní stroj provede během výpočtu t kroků, simulující stroj provede $\mathcal{O}(t)$ kroků.

Zmenšení počtu stavů řídicí jednotky

Poznámka: Tak, jako je možné zmenšit páskovou abecedu na pouhé dva symboly za cenu nárůstu velikosti počtu stavů řídicí jednotky, je rovněž možné snížit počet stavů řídicí jednotky:

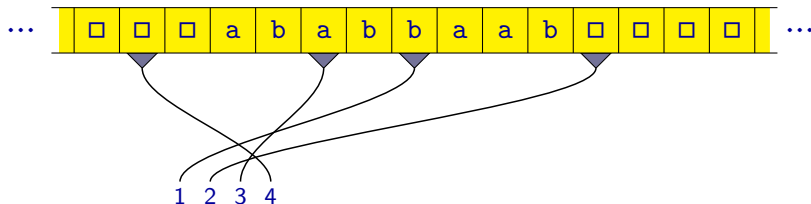
- Činnost libovolného Turingova stroje je možné simulovat Turingovým strojem, který má pouze dva nekonečné stavy řídicí jednotky (a případně nějaké konečné stavy), ovšem za cenu nárůstu velikosti páskové abecedy.

Podobně jako v předchozím případě je jeden krok původního stroje simulován s kroky, kde s je konstanta závisící pouze na počtu stavů řídicí jednotky původního stroje (tj. na velikosti množiny Q).

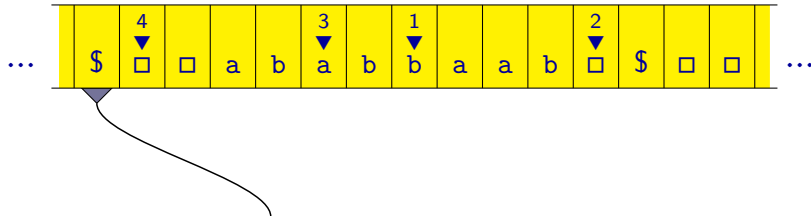
Opět zde tedy platí, že pokud původní stroj provede během výpočtu t kroků, simulující stroj provede $\mathcal{O}(t)$ kroků.

Simulace více hlav na pásce pomocí jedné

Více hlav na pásce:

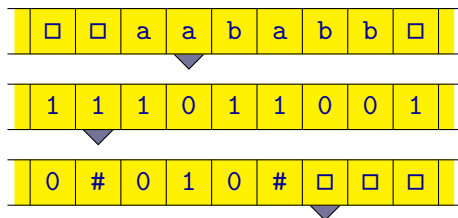


Páska s jednou hlavou:

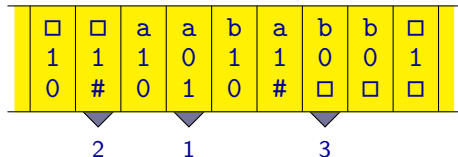


Simulace více pásek pomocí jedné

Více pásek:

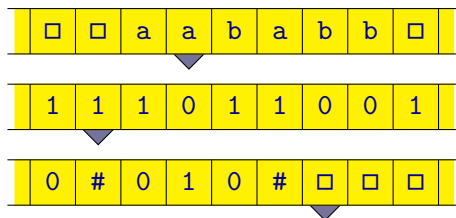


Jedna páska s více hlavami:

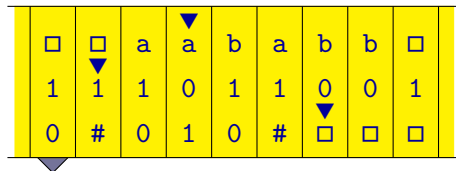


Simulace více pásek pomocí jedné

Více pásek:

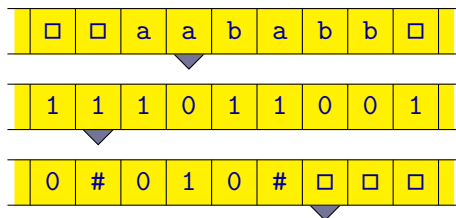


Jedna páska s jednou hlavou: varianta, kde se posunují značky hlav

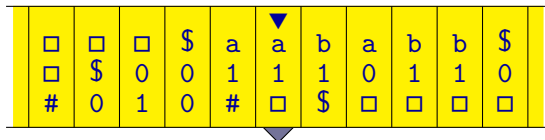


Simulace více pásek pomocí jedné

Více pásek:



Jedna páska s jednou hlavou: varianta, kde se posunují obsahy pásek



Simulace více pásek nebo více hlav pomocí jedné

- Všechny výše uvedené simulace více pásek (nebo jedné pásky s více hlavami) pomocí jedné pásky s jednou hlavou vyžadují pro simulaci jednoho kroku v nejhorším případě až $\mathcal{O}(m)$ kroků, kde m je maximální počet políček, které původní stroj navštívil na libovolné z pásek.
- Pokud původní stroj provedl t kroků, mohl na kterékoli pásce navštívit maximálně t políček.
- Simulace výpočtu, při kterém bylo provedeno t kroků, tedy vyžaduje nejvýše $\mathcal{O}(t^2)$ kroků.

Simulace více pásek nebo více hlav pomocí jedné

Doplňující poznámky:

- Existují algoritmické problémy, které se dají Turingovým strojem se dvěma páskami (nebo se dvěma hlavami na jedné pásce) snadno řešit v lineární čase (tj. počet provedených kroků je v $\mathcal{O}(n)$, kde n je velikost vstupu), ale přitom se pro ně dá dokázat, že jakýkoli Turingův stroj s jednou páskou a jednou hlavou, který by je řešil, musí alespoň pro některé vstupy provést minimálně $\Omega(n^2)$ kroků.

Příklad:

Rozpoznávání palindromů, tj. slov jazyka

$$\{ w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R \}$$

Simulace více pásek nebo více hlav pomocí jedné

- Existují (komplikované a netriviální) způsoby, jak činnost pásky s více hlavami simulovat pomocí více pásek, kde ale každá páska má pouze jednu hlavu, přičemž jeden krok původního stroje je simulován jedním krokem simulujícího stroje.
- Existuje (komplikovaný a netriviální) způsob, jak k pásek simulovat pomocí dvou pásek (kde každá má jen jednu hlavu) takovým způsobem, že pokud výpočet původního stroje trvá t kroků, simulující stroj celkem provede nanejvýš $\mathcal{O}(t \log t)$ kroků.

Stroj RAM a Turingův stroj

Každý program v každém programovacím jazyce by mohl být realizován jako program stroje RAM.

Není složité (i když je to trochu pracné) si rozmyslet, že libovolný algoritmus prováděný strojem RAM je možné realizovat také Turingovým strojem.

Turingův stroj je schopen realizovat libovolný algoritmus, který by bylo možné zapsat jako program v nějakém programovacím jazyce.

Poznámka: A samozřejmě naopak je možné strojem RAM simulovat činnost libovolného Turingova stroje.

Turingův stroj simulující činnost stroje RAM

Při popisu toho, jak simulovat činnost stroje RAM pomocí Turingova stroje, budeme postupovat po menších krocích:

- Ukážeme, jak činnost stroje RAM ve variantě, kterou jsme si popsali, simulovat variantou stroje RAM s poněkud jednoduššími instrukcemi.
- Ukážeme, jak činnost této jednodušší varianty stroje RAM simulovat vícepáskovým Turingovým strojem.
- Už dříve jsme viděli, jak činnosti vícepáskového Turingova stroje simulovat pomocí jednopáskového Turingova stroje.

Jednodušší varianta stroje RAM

Tato jednodušší varianta stroje RAM bude mít kromě pracovní paměti tři **registry**:

- **registr A** — téměř všechny instrukce pracují s tímto registrem, výsledky všech operací se ukládají do tohoto registru

Poznámka: Tento druh registru se často označuje jako **akumulátor**.

- **registr B** — tento registr slouží k uložení druhého operandu pro aritmetické instrukce (první operand je vždy v akumulátoru)
- **registr C** — tento registr slouží k uložení adresy, na kterou bude zapisovat instrukce store

Jednodušší varianta stroje RAM

Přehled instrukcí:

$A := c$	– přiřazení konstanty
$B := A$	– přiřazení do registru B
$C := A$	– přiřazení do registru C
$A := [A]$	– load (čtení z paměti)
$[C] := A$	– store (zápis do paměti)
$A := A \text{ op } B$	– aritmetické instrukce, $op \in \{+, -, *, /\}$
if ($A \text{ rel } 0$) goto ℓ	– podmíněný skok, $rel \in \{=, \neq, \leq, \geq, <, >\}$
goto ℓ	– nepodmíněný skok
$A := \text{READ}()$	– čtení ze vstupu
$\text{WRITE}(A)$	– zápis na výstup
halt	– zastavení programu

Jednodušší varianta stroje RAM

Například instrukce

$$R_5 := 42$$

může být nahrazena posloupností instrukcí:

$$A := 5$$
$$C := A$$
$$A := 42$$
$$[C] := A$$

Jednodušší varianta stroje RAM

Například instrukce

$$R_{12} := R_3$$

může být nahrazena posloupností instrukcí:

$$A := 12$$

$$C := A$$

$$A := 3$$

$$A := [A]$$

$$[C] := A$$

Jednodušší varianta stroje RAM

Například instrukce

$$R_8 := [R_2]$$

může být nahrazena posloupností instrukcí:

$A := 8$

$C := A$

$A := 2$

$A := [A]$

$A := [A]$

$[C] := A$

Jednodušší varianta stroje RAM

Například instrukce

$$[R_{15}] := R_9$$

může být nahrazena posloupností instrukcí:

$A := 15$

$A := [A]$

$C := A$

$A := 9$

$A := [A]$

$[C] := A$

Jednodušší varianta stroje RAM

Například instrukce

$$R_7 := R_3 + R_6$$

může být nahrazena posloupností instrukcí:

$A := 7$

$C := A$

$A := 6$

$A := [A]$

$B := A$

$A := 3$

$A := [A]$

$A := A + B$

$[C] := A$

Jednodušší varianta stroje RAM

Například instrukce

if ($R_4 \geq R_{11}$) **goto** ℓ

může být nahrazena posloupností instrukcí:

$A := 11$

$A := [A]$

$B := A$

$A := 4$

$A := [A]$

$A := A - B$

if ($A \geq 0$) **goto** ℓ

Jednodušší varianta stroje RAM

Například instrukce

$$R_{23} := \text{READ}()$$

může být nahrazena posloupností instrukcí:

$$A := 23$$
$$C := A$$
$$A := \text{READ}()$$
$$[C] := A$$

Jednodušší varianta stroje RAM

Například instrukce

`WRITE ( $R_{17}$ )`

může být nahrazena posloupností instrukcí:

`$A := 17$`

`$A := [A]$`

`WRITE ( $A$ )`

Turingův stroj simulující činnost stroje RAM

Turingův stroj pracuje se slovy nad nějakou abecedou, zatímco stroj RAM s čísly. Čísla ale můžeme zapisovat jako sekvence symbolů a naopak symboly nějaké abecedy můžeme zapisovat jako čísla.

Například následující vstup stroje RAM

5	13	-3	0	6	
---	----	----	---	---	--

může být v případě Turingova stroje reprezentován jako

#	1	0	1	#	1	1	0	1	#	-	1	1	#	0	#	1	1	0	#	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--

Turingův stroj simulující činnost stroje RAM

Turingův stroj simulující činnost stroje RAM bude mít několik pásek:

- Pásku, na které bude uložen obsah pracovní paměti stroje RAM.
- Tři pásky, na kterých budou uloženy hodnoty registrů A , B a C .
(Hodnoty registrů A , B a C budou na těchto páskách zapsány binárně bez vedoucích nul a zleva a zprava budou ohraničeny symboly #.)
- Pásku reprezentující vstupní pásku stroje RAM.
- Pásku reprezentující výstupní pásku stroje RAM.
- Jednu pomocnou pásku používanou při implementaci simulace jednotlivých instrukcí.

Turingův stroj simulující činnost stroje RAM

Turingův stroj si bude v řídící jednotce pamatovat, která instrukce stroje RAM se právě provádí.

Provedení většiny instrukcí není složité:

- $A := c$
zapiše jednotlivé bity konstanty c na pásku registru A
- $B := A$ nebo $C := A$
zkopíruje obsah pásky registru A na pásku registru B nebo C
- **goto** ℓ
změní se jen stav řídící jednotky Turingova stroje
- **if** ($A \text{ rel } 0$) **goto** ℓ , kde $\text{rel} \in \{=, \neq, \leq, \geq, <, >\}$
snadno se otestuje obsah registru A a podle výsledku se změní stav řídící jednotky Turingova stroje

Turingův stroj simulující činnost stroje RAM

- $A := \text{READ}()$

zkopírování hodnoty (ohraničené znaky “#”) ze vstupní pásky na pásku registru A

- $\text{WRITE}(A)$

zkopírování hodnoty registru A na výstupní pásku.

- **halt**

výpočet se zastaví

Turingův stroj simulující činnost stroje RAM

Také aritmetické instrukce jsou poměrně jednoduché, i když o něco složitější než předchozí instrukce:

- $A := A \text{ op } B$, kde $\text{op} \in \{+, -, *, /\}$

Příslušnou operaci (např. sčítání nebo odčítání) provede Turingův stroj bit po bitu, výsledek je ukládán do registru A .

Poznámka: Násobení a dělení je možné realizovat pomocí série sčítání, odčítání a bitových posunů.

Při implementaci násobení a dělení může být potřeba použít pomocnou pásku k ukládání mezivýsledků.

Turingův stroj simulující činnost stroje RAM

Asi nejsložitější je realizace pracovní paměti stroje RAM.

Jednou z možností je pamatovat si jen obsah těch buněk, se kterými stroj RAM v průběhu své činnosti někdy pracoval.

Příklad: Stroj RAM zatím pracoval jen s buňkami 2, 3 a 6:

- Buňka 2 obsahuje hodnotu 11.
- Buňka 3 obsahuje hodnotu -1.
- Buňka 6 obsahuje hodnotu 2.

Obsah pásky Turingova stroje reprezentující buňky paměti stroje RAM bude následující:

\$	#	1	0	:	1	0	1	1	#	1	1	:	-	1	#	1	1	0	:	1	0	#	\$
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Instrukce load, tj. $A := [A]$:

- Turingův stroj bude hledat příslušnou adresu uloženou v registru A na pásce reprezentující obsah paměti stroje RAM.
(Pokud ji nenajde, přidá ji na konec, s tím, že obsahuje hodnotu 0.)
- Příslušnou hodnotu zkopíruje na pásku registru A .

Instrukce store, tj. $[C] := A$:

- Podobně jako u instrukce load se najde příslušné místo na pásce reprezentující pracovní paměť, kde se nachází obsah buňky, jejíž adresa je v registru C .
- Zbytek pásky s obsahem paměti stroje RAM se zkopíruje na pomocnou pásku.
- Na příslušné místo se zkopíruje obsah pásky registru A .
- Zbytek pásky, který byl zkopírován na pomocnou pásku, se zkopíruje zpět (za nově zapsanou hodnotu).

Pásky, zásobníky a čítače

Jsou Turingovsky úplné i nějaké ještě jednodušší stroje než Turingův stroj?
Ukazuje se, že ano.

Všechny následující stroje mají konečnou řídicí jednotku doplněnou o nějaký druh neomezeně velké paměti.

Tato paměť může být tvořena jednou nebo více strukturami, jako jsou třeba:

- **Páska** — čtení a zápis symbolu na aktuální pozici, posun hlavy doleva a doprava

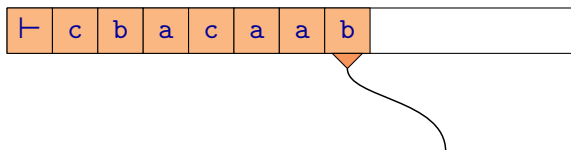
Poznámka: Páska může být jednostranně nebo oboustranně nekonečná.

- **Zásobník** — push, pop, test prázdnosti zásobníku
- **Čítač** — hodnotou je přirozené číslo, operace přičtení nebo odečtení hodnoty jedna, test rovnosti nule

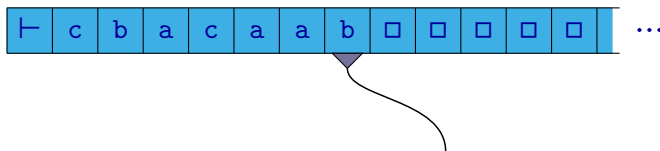
Zásobník

Na zásobník je možné se dívat jako na speciální případ jednostranně nekonečné pásky.

Zásobník:



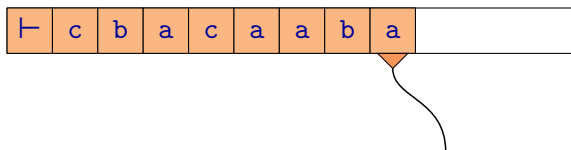
Páska:



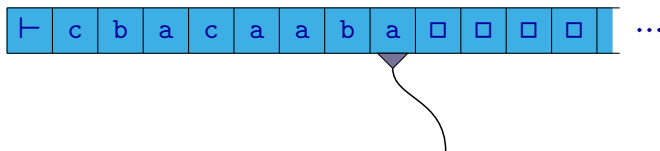
Zásobník

Na zásobník je možné se dívat jako na speciální případ jednostranně nekonečné pásky.

Zásobník:



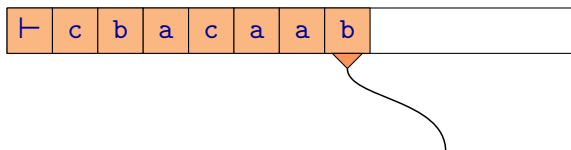
Páska:



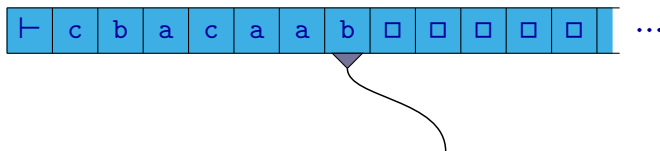
Zásobník

Na zásobník je možné se dívat jako na speciální případ jednostranně nekonečné pásky.

Zásobník:

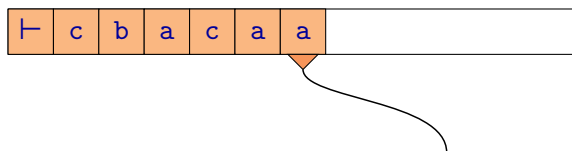


Páska:

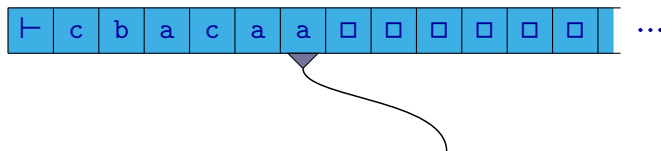


Na zásobník je možné se dívat jako na speciální případ jednostranně nekonečné pásky.

Zásobník:



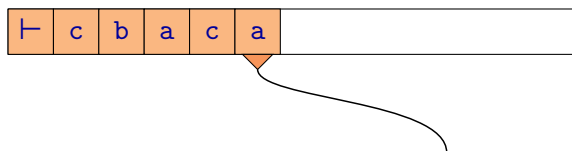
Páska:



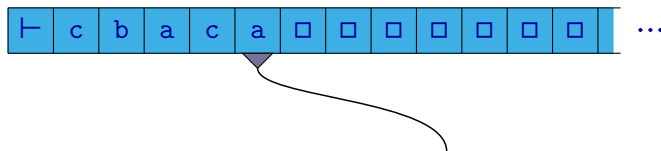
Zásobník

Na zásobník je možné se dívat jako na speciální případ jednostranně nekonečné pásky.

Zásobník:

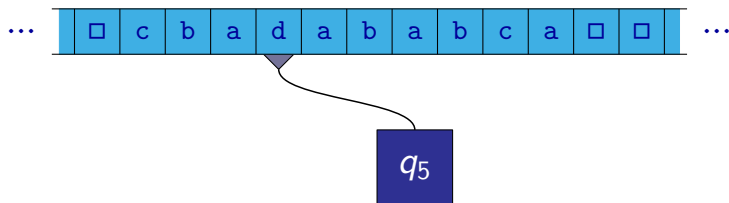


Páska:

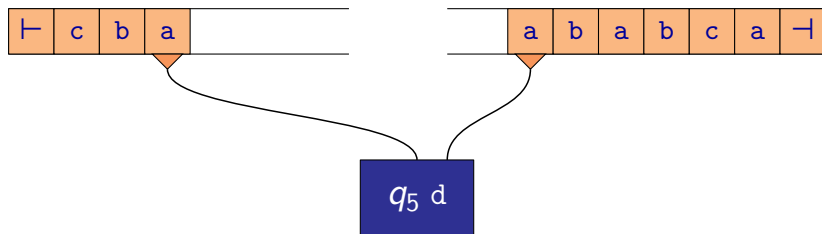


Zásobník

Oboustranně nekonečnou pásku je možné simulovat pomocí dvou zásobníků:

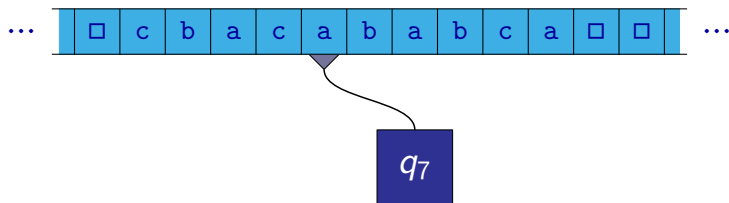


Stroj se dvěma zásobníky:

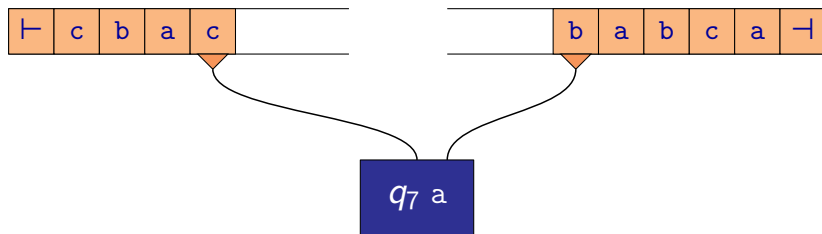


Zásobník

Oboustranně nekonečnou pásku je možné simulovat pomocí dvou zásobníků:



Stroj se dvěma zásobníky:



Čítač — hodnotou čítače může být libovolně velké přirozené číslo, tj. prvek množiny $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$.

Základní operace:

- zvýšení hodnoty o jedna:

$$x := x + 1$$

- snížení hodnoty o jedna:

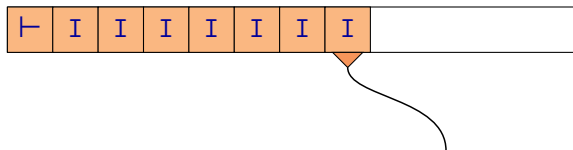
$$x := x - 1$$

- test, jestli je hodnota čítače nula:

if ($x = 0$) **goto** ℓ

Na čítač je možné se dívat jako na speciální případ zásobníku či pásky.

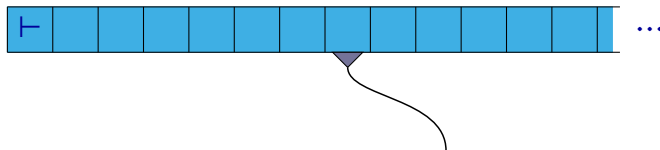
Zásobník:



Čítač:

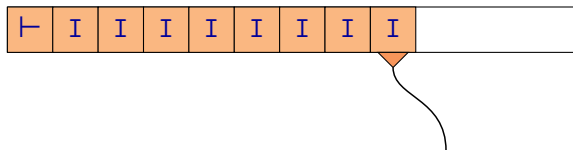


Páska:



Na čítač je možné se dívat jako na speciální případ zásobníku či pásky.

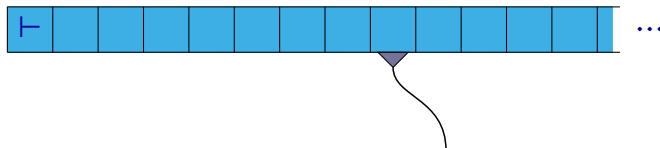
Zásobník:



Čítač:

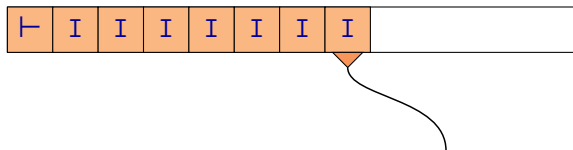


Páska:



Na čítač je možné se dívat jako na speciální případ zásobníku či pásky.

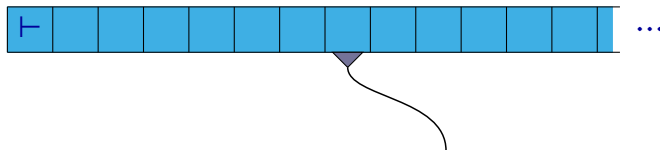
Zásobník:



Čítač:

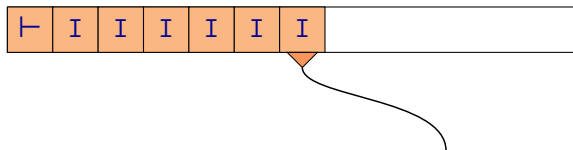


Páska:



Na čítač je možné se dívat jako na speciální případ zásobníku či pásky.

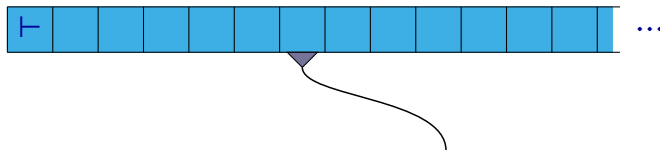
Zásobník:



Čítač:

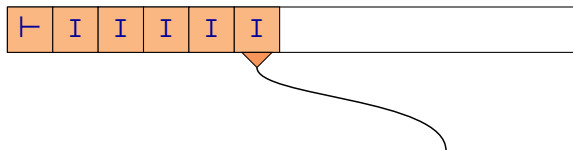
6

Páska:



Na čítač je možné se dívat jako na speciální případ zásobníku či pásky.

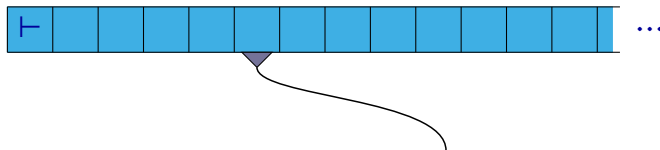
Zásobník:



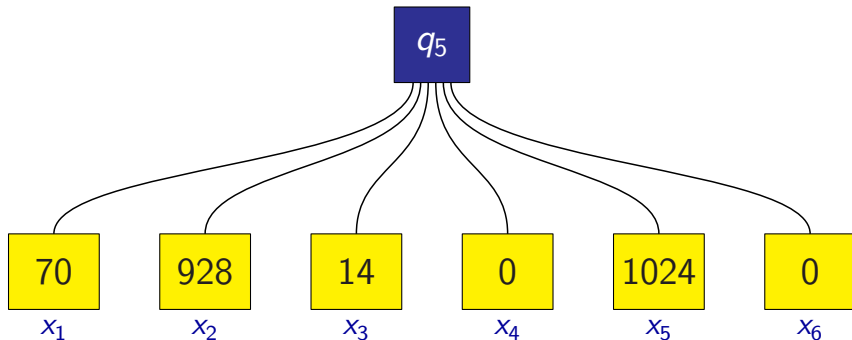
Čítač:

5

Páska:



Minského stroj — stroj, který má konečnou řídicí jednotku a konečný počet čítačů $x_1, x_2, \dots, x_k$:



Poznámka: Pro označení čítačů budeme kromě symbolů $x_1, x_2, \dots$ používat také symboly jako $x, y, z, \dots$

Minského stroj

Na Minského stroj se můžeme dívat jako na program tvořený posloupností instrukcí následujících pěti typů:

- zvýšení hodnoty daného čítače o jedna:

$$x_i := x_i + 1$$

- snížení hodnoty daného čítače o jedna:

$$x_i := x_i - 1$$

- test, jestli je hodnota daného čítače nula:

if ($x_i = 0$) **goto** ℓ

- nepodmíněný skok:

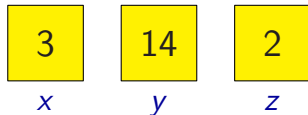
goto ℓ

- zastavení programu:

halt

Vynulování čítače x :

→ $L_1 : \text{if } (x = 0) \text{ goto } L_2$
 $x := x - 1$
 goto L_1
 $L_2 : \dots$



Vynulování čítače x :

→ $L_1 : \text{if } (x = 0) \text{ goto } L_2$
 $x := x - 1$
goto L_1
 $L_2 : \dots$

3

x

14

y

2

z

Vynulování čítače x :

L_1 : **if** ($x = 0$) **goto** L_2
 $x := x - 1$
 **goto** L_1
 L_2 : ...

2

x

14

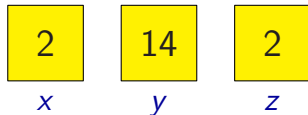
y

2

z

Vynulování čítače x :

→ $L_1 : \text{if } (x = 0) \text{ goto } L_2$
 $x := x - 1$
 goto L_1
 $L_2 : \dots$



Vynulování čítače x :

→ $L_1 : \text{if } (x = 0) \text{ goto } L_2$
 $x := x - 1$
 goto L_1
 $L_2 : \dots$

2

x

14

y

2

z

Vynulování čítače x :

L_1 : **if** ($x = 0$) **goto** L_2
 $x := x - 1$
 **goto** L_1
 L_2 : ...

1

x

14

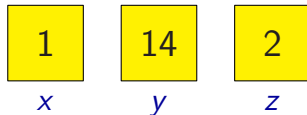
y

2

z

Vynulování čítače x :

→ $L_1 : \text{if } (x = 0) \text{ goto } L_2$
 $x := x - 1$
 goto L_1
 $L_2 : \dots$



Vynulování čítače x :

→ $L_1 : \text{if } (x = 0) \text{ goto } L_2$
 $x := x - 1$
goto L_1
 $L_2 : \dots$

1

x

14

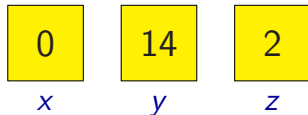
y

2

z

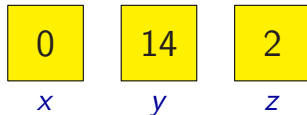
Vynulování čítače x :

L_1 : **if** ($x = 0$) **goto** L_2
 $x := x - 1$
→ **goto** L_1
 L_2 : ...



Vynulování čítače x :

→ $L_1 : \text{if } (x = 0) \text{ goto } L_2$
 $x := x - 1$
 goto L_1
 $L_2 : \dots$



Vynulování čítače x :

L_1 : **if** ($x = 0$) **goto** L_2

$x := x - 1$

goto L_1

→ L_2 : ...

0

x

14

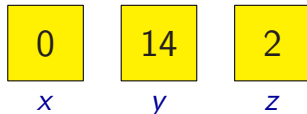
y

2

z

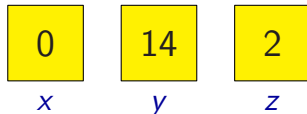
Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

→ $L_2 : \text{if } (z = 0) \text{ goto } L_3$
 $z := z - 1$
 $y := y + 1$
 goto L_1
 $L_3 : \dots$



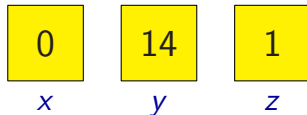
Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

→ $L_2 : \text{if } (z = 0) \text{ goto } L_3$
 $z := z - 1$
 $y := y + 1$
 goto L_1
 $L_3 : \dots$



Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

→ $L_2 : \text{if } (z = 0) \text{ goto } L_3$
 $z := z - 1$
 $y := y + 1$
 goto L_1
 $L_3 : \dots$



Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

L_2 : **if** ($z = 0$) **goto** L_3

$z := z - 1$

$y := y + 1$

goto L_1

L_3 : ...



x



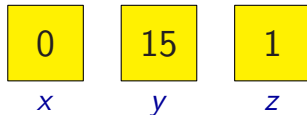
y



z

Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

→ $L_2 : \text{if } (z = 0) \text{ goto } L_3$
 $z := z - 1$
 $y := y + 1$
 goto L_1
 $L_3 : \dots$



Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

→ $L_2 : \text{if } (z = 0) \text{ goto } L_3$
 $z := z - 1$
 $y := y + 1$
 goto L_1
 $L_3 : \dots$

0

x

15

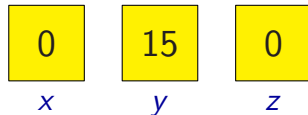
y

1

z

Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

→ $L_2 : \text{if } (z = 0) \text{ goto } L_3$
 $z := z - 1$
 $y := y + 1$
 goto L_1
 $L_3 : \dots$



Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

L_2 : **if** ($z = 0$) **goto** L_3

$z := z - 1$

$y := y + 1$

goto L_1

L_3 : ...



x



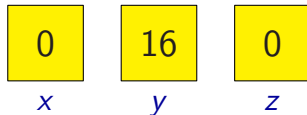
y



z

Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

→ $L_2 : \text{if } (z = 0) \text{ goto } L_3$
 $z := z - 1$
 $y := y + 1$
 goto L_1
 $L_3 : \dots$



Přičtení obsahu čítače z k čítači y (a vynulování čítače z):

L_2 : **if** ($z = 0$) **goto** L_3

$z := z - 1$

$y := y + 1$

goto L_1

→ L_3 : ...

0

x

16

y

0

z

Vynásobení hodnoty čítače x číslem 5:

L_1 : **if** ($x = 0$) **goto** L_2

$x := x - 1$

$y := y + 1$

$y := y + 1$

$y := y + 1$

$y := y + 1$

$y := y + 1$

goto L_1

L_2 : **if** ($y = 0$) **goto** L_3

$y := y - 1$

$x := x + 1$

goto L_2

L_3 : ...

Vydělení hodnoty čítače x číslem 5 a zjištění zbytku po dělení:

```
 $L_1$  : if ( $x = 0$ ) goto  $M_0$   
       $x := x - 1$   
      if ( $x = 0$ ) goto  $M_1$   
       $x := x - 1$   
      if ( $x = 0$ ) goto  $M_2$   
       $x := x - 1$   
      if ( $x = 0$ ) goto  $M_3$   
       $x := x - 1$   
      if ( $x = 0$ ) goto  $M_4$   
       $x := x - 1$   
       $y := y + 1$   
      goto  $L_1$ 
```

Zásobník je možné simulovat pomocí dvou čítačů — hodnota jednoho čítače reprezentuje obsah zásobníku jako číslo, jehož zápis v číselné soustavě o základu $k = |\Gamma| + 1$ (kde Γ je zásobníková abeceda) odpovídá obsahu zásobníku.

- Symbol na vrcholu zásobníku — zbytek po dělení číslem k
- Pop — vydělit číslem k
- Push — vynásobit číslem k a přičíst kód příslušného symbolu

Druhý čítač slouží jako pomocný při provádění výše uvedených operací.

Příklad:

a $\leftrightarrow$ 1

b $\leftrightarrow$ 2

c $\leftrightarrow$ 3

d $\leftrightarrow$ 4

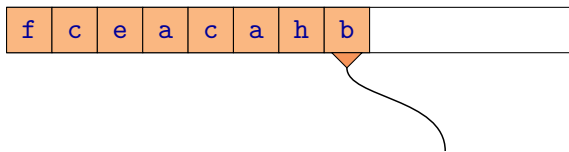
e $\leftrightarrow$ 5

f $\leftrightarrow$ 6

g $\leftrightarrow$ 7

h $\leftrightarrow$ 8

i $\leftrightarrow$ 9



63513182

Příklad:

a $\leftrightarrow$ 1

b $\leftrightarrow$ 2

c $\leftrightarrow$ 3

d $\leftrightarrow$ 4

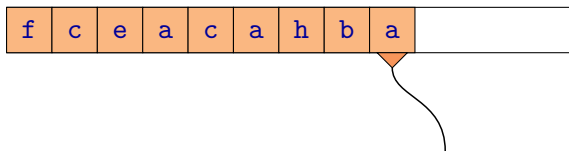
e $\leftrightarrow$ 5

f $\leftrightarrow$ 6

g $\leftrightarrow$ 7

h $\leftrightarrow$ 8

i $\leftrightarrow$ 9



635131821

Příklad:

a $\leftrightarrow$ 1

b $\leftrightarrow$ 2

c $\leftrightarrow$ 3

d $\leftrightarrow$ 4

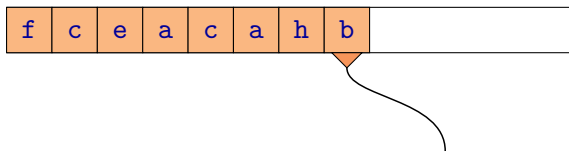
e $\leftrightarrow$ 5

f $\leftrightarrow$ 6

g $\leftrightarrow$ 7

h $\leftrightarrow$ 8

i $\leftrightarrow$ 9



63513182

Příklad:

a $\leftrightarrow$ 1

b $\leftrightarrow$ 2

c $\leftrightarrow$ 3

d $\leftrightarrow$ 4

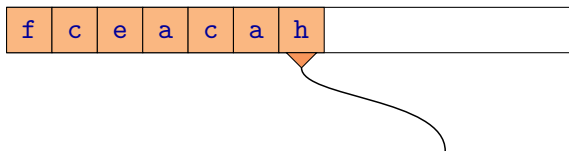
e $\leftrightarrow$ 5

f $\leftrightarrow$ 6

g $\leftrightarrow$ 7

h $\leftrightarrow$ 8

i $\leftrightarrow$ 9



6351318

Příklad:

a $\leftrightarrow$ 1

b $\leftrightarrow$ 2

c $\leftrightarrow$ 3

d $\leftrightarrow$ 4

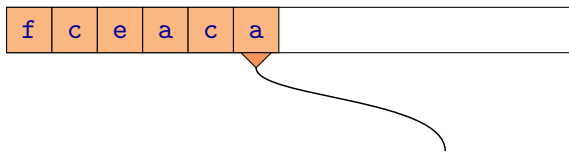
e $\leftrightarrow$ 5

f $\leftrightarrow$ 6

g $\leftrightarrow$ 7

h $\leftrightarrow$ 8

i $\leftrightarrow$ 9



635131

Připomeňme, že oboustranně nekonečnou pásku je možné simulovat pomocí dvou zásobníků.

V Minského stroji může být obsah každého z těchto zásobníků reprezentován jemu odpovídajícím čítačem.

Navíc potřebujeme ještě jeden pomocný čítač pro implementaci operací násobení a dělení na těchto čítačích reprezentujících obsahy zásobníků.

Vidíme, že Turingův stroj s k páskami je možné simulovat Minského strojem s $2k + 1$ čítači.

Libovolný konečný počet čítačů je možné simulovat pomocí dvou čítačů:

- Jeden čítač (označme jej C) reprezentuje hodnoty všech čítačů — např. hodnoty tří čítačů x , y , z mohou být v čítači C reprezentovány jako číslo $2^x 3^y 5^z$.
- Druhý čítač je používán jako pomocný při provádění operací násobení a dělení na čítači C .
- Přičtení jedničky k čítači x je simulováno jako vynásobení čítače C hodnotou 2, přičtení jedničky k čítači y jako vynásobení hodnotou 3, atd.
- Analogicky je odečtení jedničky od čítače x simulováno pomocí vydělení čítače C hodnotou 2, odečtení jedničky od čítače y vydělením hodnotou 3, atd.
- Test podmínky $x = 0$ odpovídá testu, že hodnota C není dělitelná dvěma, atd.

Vidíme, že činnost libovolného Turingova stroje je možné simulovat Minského strojem s dvěma čítači.

Tato simulace je však mimořádně neefektivní:

- Už simulace pásky Turingova stroje pomocí tří čítačů vyžaduje exponenciálně větší počet kroků, než kolik by jich vykonal tento Turingův stroj.
- Simulace činnosti těchto tří čítačů pomocí dvou čítačů tento počet kroků dále exponenciálně zvyšuje.