

DMA Přednáška – Rovnice nad \mathbb{Z} **Definice.**

Pojmem **lineární diofantická rovnice** označujeme libovolnou rovnici typu $ax + by = c$ s neznámými x, y , kde $a, b, c \in \mathbb{Z}$ a vyžadujeme také řešení $x, y \in \mathbb{Z}$.

Věta.

Nechť $a, b, c \in \mathbb{Z}$. Lineární diofantická rovnice $ax + by = c$ má alespoň jedno řešení právě tehdy, když c je násobkem $\gcd(a, b)$.

Definice.

Je-li dána lineární diofantická rovnice $ax + by = c$, pak definujeme její **přidruženou homogenní rovnici** jako $ax + by = 0$.

Věta.

Nechť $a, b, c \in \mathbb{Z}$. Uvažujme lineární diofantickou rovnici $ax + by = c$.

Nechť $(x_p, y_p) \in \mathbb{Z}^2$ je nějaké její **partikulární** řešení.

Dvojice $(x_0, y_0) \in \mathbb{Z}^2$ je řešení této rovnice právě tehdy, když

existuje $(x_h, y_h) \in \mathbb{Z}^2$ takové, že $(x_0, y_0) = (x_p, y_p) + (x_h, y_h)$ a (x_h, y_h) řeší přidruženou homogenní rovnici.

Věta.

Uvažujme rovnici $ax + by = 0$ pro $a, b \in \mathbb{Z}$. Množina všech jejích celočíselných řešení je

$$\left\{ \left(k \frac{b}{\gcd(a, b)}, -k \frac{a}{\gcd(a, b)} \right) : k \in \mathbb{Z} \right\}.$$

Algoritmus pro nalezení všech celočíselných řešení rovnice $ax + by = c$.

0. Například pomocí rozšířeného Euklidova algoritmu najděte $\gcd(a, b) = Aa + Bb$.

1. Jestliže c není násobkem $\gcd(a, b)$, pak řešení rovnice neexistuje.

2. Příklad $\gcd(a, b)$ dělí c :

a) Získanou rovnost $aA + bB = \gcd(a, b)$ vynásobte číslem $c' = \frac{c}{\gcd(a, b)} \in \mathbb{Z}$ tak, aby se zachovaly koeficienty a, b , a dostanete $a(Ac') + b(Bc') = c$, tudíž i jedno partikulární řešení $x_p = Ac', y_p = Bc'$.

b) Přidruženou homogenní rovnici $ax + by = 0$ zkraťte číslem $\gcd(a, b)$ na tvar $a'x + b'y = 0$, což dává řešení $x_h = b'k, y_h = -a'k$ pro $k \in \mathbb{Z}$, popřípadě $x_h = -b'k, y_h = a'k$ pro $k \in \mathbb{Z}$.

c) Sečtením partikulárního a obecného homogenního řešení získáte množinu všech celočíselných řešení

$$x = x_p + kb', \quad y = y_p - ka' \quad \text{pro } k \in \mathbb{Z},$$

popřípadě verzi s mínusem u y_h .

Definice.

Termínem **lineární kongruence** označujeme rovnice typu $ax \equiv b \pmod{n}$, kde $n \in \mathbb{N}$, $a, b \in \mathbb{Z}$ a hledáme celočíselná řešení x .

Věta.

Nechť $n \in \mathbb{N}$. Uvažujme kongruenci $ax \equiv b \pmod{n}$ pro nějaká $a, b \in \mathbb{Z}$, nechť x_p je nějaké její řešení.

Číslo $x_0 \in \mathbb{Z}$ je řešením kongruence $ax \equiv b \pmod{n}$ právě tehdy, když existuje $x_h \in \mathbb{Z}$, které splňuje $x_0 = x_p + x_h$ a je řešením přidružené homogenní rovnice $ax \equiv 0 \pmod{n}$.

Fakt.

Nechť $n \in \mathbb{N}$. Uvažujme $a, b \in \mathbb{Z}$. Číslo $x_0 \in \mathbb{Z}$ řeší lineární kongruenci $ax \equiv b \pmod{n}$ právě tehdy, když pro nějaké $y_0 \in \mathbb{Z}$ řeší vektor (x_0, y_0) diofantickou rovnici $ax + ny = b$.

Věta.

Nechť $n \in \mathbb{N}$, uvažujme $a, b \in \mathbb{Z}$.

(i) Jestliže b není násobkem $\gcd(a, n)$, tak řešení rovnice $ax \equiv b \pmod{n}$ neexistuje.

(ii) Jestliže $\gcd(a, n)$ dělí b , tak rovnice $ax \equiv b \pmod{n}$ má nějaké řešení $x_p \in \mathbb{Z}$. Označme $n' = \frac{n}{\gcd(a, n)}$. Množina všech řešení lineární kongruence $ax \equiv b \pmod{n}$ je

$$\{x_p + kn' : k \in \mathbb{Z}\}.$$

- Množinu všech řešení rovnice $a \odot x = b$ v \mathbb{Z}_n získáme tak, že v množině všech řešení kongruence $ax \equiv b \pmod{n}$ nahradíme všechna čísla jejich zbytky po dělení n neboli jejich kongruentními zástupci z množiny \mathbb{Z}_n .

Věta.

Nechť $n \in \mathbb{N}$, uvažujme rovnici $ax = b$ v \mathbb{Z}_n pro nějaká $a, b \in \mathbb{Z}_n$.

(i) Jestliže $\gcd(a, n)$ nedělí b , pak řešení neexistuje.

(ii) Předpokládejme, že $\gcd(a, n)$ dělí b . Nechť $x_p \in \mathbb{Z}$ řeší kongruenci $ax \equiv b \pmod{n}$, označme $n' = \frac{n}{\gcd(a, n)}$.

Nechť $x_0 = \min\{x_p + kn' : k \in \mathbb{Z} \text{ a } x_p + kn' \geq 0\}$. Pak množina všech řešení rovnice $ax = b$ v \mathbb{Z}_n je

$$\{x_0 + in' : i = 0, 1, \dots, \gcd(a, n) - 1\}.$$

Jde o $\gcd(a, n)$ různých čísel.

Soustavy lineárních kongruencí:

Jsou dány moduly $n_1, \dots, n_m \in \mathbb{N}$ a pravé strany $b_1, \dots, b_m \in \mathbb{Z}$. Hledáme celá čísla x taková, že

$$\begin{aligned} x &\equiv b_1 \pmod{n_1} \\ x &\equiv b_2 \pmod{n_2} \\ &\vdots \\ x &\equiv b_m \pmod{n_m}. \end{aligned}$$

Věta.

Uvažujme moduly $n_1, n_2, \dots, n_m \in \mathbb{N}$ a čísla $b_1, b_2, \dots, b_m \in \mathbb{Z}$.

Nechť x_p je nějaké řešení soustavy kongruencí

$$\begin{aligned} x &\equiv b_1 \pmod{n_1} \\ x &\equiv b_2 \pmod{n_2} \\ &\vdots \\ x &\equiv b_m \pmod{n_m}. \end{aligned}$$

Číslo x_0 je také řešením této soustavy právě tehdy, pokud existuje číslo x_h takové, že $x_0 = x_p + x_h$ a x_h je řešením přidružené homogenní soustavy kongruencí

$$\begin{aligned} x &\equiv 0 \pmod{n_1} \\ x &\equiv 0 \pmod{n_2} \\ &\vdots \\ x &\equiv 0 \pmod{n_m}. \end{aligned}$$

Věta. (Čínská věta o zbytcích)

Nechť $n_1, n_2, \dots, n_m \in \mathbb{N}$, $b_1, b_2, \dots, b_m \in \mathbb{Z}$. Uvažujme soustavu rovnic

$$\begin{aligned} x &\equiv b_1 \pmod{n_1} \\ x &\equiv b_2 \pmod{n_2} \\ &\vdots \\ x &\equiv b_m \pmod{n_m}. \end{aligned}$$

Jestliže jsou všechna čísla n_i po dvou nesoudělná, pak má tato soustava řešení $x_0 \in \mathbb{Z}$. Množina všech řešení je $\{x_0 + kn : k \in \mathbb{Z}\}$, kde $n = n_1 n_2 \cdots n_m$.

Algoritmus pro řešení soustavy kongruencí $x \equiv b_1 \pmod{n_1}, x \equiv b_2 \pmod{n_2}, \dots, x \equiv b_m \pmod{n_m}$ pro případ, že jsou všechna čísla n_i po dvou nesoudělná.

1. Označte $n = n_1 n_2 \cdots n_m$ a $N_i = \frac{n}{n_i}$ pro všechna i .
2. Pro každé i najděte inverzní číslo k_i N_i vzhledem k násobení modulo n_i .
3. Necht' $x_p = \sum_{i=1}^m b_i N_i k_i$. Množina všech řešení soustavy je $\{x_p + kn : k \in \mathbb{Z}\}$.