

Matematyka dyskretna - teoria

Jan Rodziewicz-Bielewicz, Wydział Informatyki ZUT

April 18, 2019

7 Teoria liczb

Zadanie domowe:

1. Przypomnieć sobie cechy podzielności przez 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11.
2. Zapoznać się z algorytmem Euklidesa (wersja z dzieleniem) oraz rozszerzonym algorytmem Euklidesa.

Definicja 37. Liczbę naturalną p nazywamy **pierwszą**, jeżeli posiada dokładne dwa dzielniki naturalne: 1 oraz p . Zbiór wszystkich liczb pierwszych oznaczany jest symbolem \mathbb{P} ($\mathbb{P} = \{2, 3, 5, 7, 11, \dots\}$).

Definicja 38. Liczbę naturalną $n > 1$ nazywamy **złożoną**, jeżeli posiada więcej niż 2 dzielniki naturalne.

Definicja 39. Mówimy, że liczba całkowita m **dzieli** liczbę całkowitą a , jeżeli istnieje taka liczba całkowita n , że $m \cdot n = a$. Jeżeli $m \neq 0$, liczbę tę nazywamy **dzielnikiem** lub **wielokrotnością** a .

Twierdzenie 110. (Podstawowe własności podzielności) Niech $a, m, n \in \mathbb{Z}$ oraz $m \neq 0$. Wówczas:

1. Jeżeli $m|a$ i $a|b$, to $m|b$ (przechodność)
2. $a|a$
3. Jeżeli $m|b$ i $b \in \mathbb{Z}$, to $m|ab$
4. Jeżeli $a|b$ oraz $b \neq 0$, to $|a| \leq |b|$
5. Jeżeli $a|b$ i $b|a$ to $b = a$ lub $b = -a$.
6. Jeżeli $m|a$ i $m|b$ to $m|a \pm b$
7. Jeżeli $p \in \mathbb{P}$ dzieli iloczyn ab , to $p|a \vee p|b$
8. Jeżeli $p \in \mathbb{P}$ dzieli iloczyn $a_1 \cdot \dots \cdot a_n$, to p dzieli przynajmniej jedną z liczb a_1, \dots, a_n

Twierdzenie 111. (O dzieleniu z resztą) Niech $a, b \in \mathbb{Z}$ oraz $b \neq 0$. Istnieją wówczas liczby całkowite q, r takie że:

$$a = bq + r, 0 \leq r < |b|$$

Przy tym b dzieli a wtedy i tylko wtedy gdy $r = 0$.

Definicja 40. **Największym wspólnym dzielnikiem (NWD)** liczb całkowitych a i b nazywamy największą liczbę naturalną d , taką że $d|a$ i $d|b$. Używamy oznaczenia $d = NWD(a, b)$ lub krótko $d = (a, b)$.

Twierdzenie 112. (Podstawowe własności NWD) Niech $a, b \in \mathbb{Z}$, $a \neq 0 \vee b \neq 0$. Wówczas:

1. $NWD(a, b) = a \Leftrightarrow b|a$
2. $NWD(a, a + 1) = 1$
3. $NWD(a, 0) = |a|$ ($a \neq 0$)
4. Jeżeli $m = nq + r$, to $NWD(m, n) = NWD(n, r)$ (algorytm Euklidesa)

5. Jeżeli $NWD(an, bn) = dn$, to $NWD(a, b) = d$
6. Jeżeli $d = NWD(a, b)$ to istnieją α, β takie, że $\alpha a + \beta b = d$ ($NWD(a, b)$ jest kombinacją liniową a i b).

Definicja 41. Liczby całkowite a i b nazywamy **względnie pierwszymi**, jeżeli $NWD(a, b) = 1$.

Twierdzenie 113. (Zasadnicze Twierdzenie Arytmetyki) Każda liczba naturalna $n > 1$ da się przedstawić jednoznacznie (z dokładnością co do kolejności czynników) w postaci:

$$n = p_1 p_2 \dots p_k$$

gdzie $k \geq 1$, a p_1, \dots, p_k są liczbami pierwszymi.

Wniosek Każda liczba naturalna $n > 1$ da się przedstawić jednoznacznie (z dokładnością co do kolejności czynników) w postaci iloczynu $n = p_1^{\alpha_1} \dots p_k^{\alpha_k}$, gdzie $k \geq 1$, a p_1, \dots, p_k są różnymi liczbami pierwszymi (tzw. rozkład kanoniczy).

Definicja 42. Niech $n \in \mathbb{N}$. **Funkcja Eulera** $\phi(n)$ określa, ile jest liczb naturalnych nie większych od n i względnie pierwszych z n :

$$\phi(n) = |\{a \in \mathbb{N} : a \leq n \wedge NWD(a, n) = 1\}|$$

Przymuje się, że $\phi(1) = 1$.

Twierdzenie 114. (Własności funkcji Eulera) Niech $p, q \in \mathbb{P}$ Wówczas:

1. $\phi(p^a) = p^{a-1}(p-1)$
2. $\phi(p) = p-1$
3. $\phi(p \cdot q) = p \cdot q$

Dodatkowo, jeżeli p_1, p_2, \dots, p_k są parami względnie pierwsze, to funkcja jest multiplikatywna:

$$\phi(p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k) = \phi(p_1) \cdot \phi(p_2) \cdot \dots \cdot \phi(p_k)$$

Definicja 43. Mówimy, że liczby całkowite a oraz b **przystają** (inaczej: są kongruentne) modulo liczba n , jeżeli $n|a-b$ (jeżeli dają tą samą resztę z dzielenia przez n). Zapisujemy to krótko:

$$a \equiv b \pmod{n} \text{ lub } a \equiv b < n >$$

Twierdzenie 115. (Własności kongruencji) Niech $a, b, c \in \mathbb{Z}$, $k, n \in \mathbb{N}$. Wówczas:

1. $(a \equiv c \pmod{n}) \wedge (b \equiv c \pmod{n}) \Rightarrow a \equiv c \pmod{n}$
2. $(a \equiv b \pmod{n}) \wedge (c \equiv d \pmod{n}) \Rightarrow a \pm c \equiv b \pm d \pmod{n}$
3. $(a \equiv b \pmod{n}) \wedge (c \equiv d \pmod{n}) \Rightarrow ac \equiv bd \pmod{n}$
4. $(a + b \equiv c \pmod{n}) \Leftrightarrow a \equiv c - b \pmod{n}$
5. $a \pm kn \equiv a \pmod{n}$
6. $a \equiv b \pmod{n} \Rightarrow a^n \equiv b^n \pmod{n}$
7. $a \equiv b \pmod{n} \Rightarrow ak \equiv bk \pmod{nk}$
8. $(a \equiv b \pmod{n}) \wedge (a = a_1 d \wedge b = b_1 d \wedge n = n_1 d) \Rightarrow a_1 \equiv b_1 \pmod{n}$
9. $(a \equiv b \pmod{n_1}) \wedge (a \equiv b \pmod{n_2}) \wedge \dots \wedge (a \equiv b \pmod{n_k}) \Rightarrow a \equiv b \pmod{n}$, gdzie $n = n_1 n_2 \dots n_k$

Definicja 44. Rozważmy zbiór reszt z dzielenia przez n i oznaczmy go jako $\mathbb{Z}_n = \{0, \dots, n-1\}$. Niech $a \in \mathbb{Z}_n$. **Elementem przeciwnym** do a nazywamy $-a \in \mathbb{Z}_n$, taki że $a + (-a) \equiv 0 \pmod{n}$. Definiujemy również **element odwrotny** do a (o ile istnieje), oznaczany jako a^{-1} , taki że $a \cdot a^{-1} \equiv 1 \pmod{n}$.

Algorytm rozwiązywania kongruencji w postaci $ax \equiv b \pmod{n}$

1. Obliczyć $d = \text{NWD}(a, n)$

2. Jeżeli:

(a) $d = 1$ to równanie ma dokładnie jedno rozwiązanie. Można je wyznaczyć mnożąc kongruencję przez a^{-1} .

(b) $d > 1 \wedge \sim d|b$ to równanie nie ma rozwiązań.

(c) $d > 1 \wedge d|b$ to równanie ma dokładnie d rozwiązań, które wyznaczają się z użyciem wzoru:

$$x_{k+1} \equiv (n_1 k + \alpha) \pmod{n}$$

gdzie $k = 0, 1, \dots, d-1$, a α jest rozwiązaniem równania $a_1 x \equiv b_1 \pmod{n_1}$, gdzie $n = \frac{n}{d}$, $a_1 = \frac{a}{d}$, $b_1 = \frac{b}{d}$

Twierdzenie 116. (Chińskie Twierdzenie o resztach) Jeżeli liczby całkowite n_1, \dots, n_k są parami względnie pierwsze, to układ równań:

$$\begin{cases} x \equiv a_1 \pmod{n_1} \\ x \equiv a_2 \pmod{n_2} \\ \dots \\ x \equiv a_k \pmod{n_k} \end{cases}$$

ma jednoznaczne rozwiązanie w zbiorze \mathbb{Z}_n , gdzie $n = n_1 \cdot \dots \cdot n_k$.

Do wyznaczenia rozwiązania służy algorytm Gaussa:

$$x \equiv \sum_{i=1}^k a_i \cdot N_i \cdot M_i \pmod{n}$$

gdzie $N_i = \frac{n}{n_i}$, $M_i = N_i^{-1} \pmod{n_i}$

Twierdzenie 117. (Eulera) Niech $a \in \mathbb{Z}$, $n \in \mathbb{N}$ oraz a i n są względnie pierwsze ($\text{NWD}(a, n) = 1$). Wówczas:

$$a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n}$$

Wniosek Jeżeli n jest iloczynem dwóch różnych liczb pierwszych i $r \equiv s \pmod{\phi(n)}$ to:

$$a^r \equiv a^s \pmod{n}$$

Twierdzenie 118. (Małe Twierdzenie Fermata) Niech $a \in \mathbb{Z}$, $p \in \mathbb{P}$ oraz a i p są względnie pierwsze ($\text{NWD}(a, p) = 1$). Wówczas:

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

Wniosek 1. $a^p \equiv a \pmod{p}$

Wniosek 2. $n \equiv m \pmod{p-1} \Rightarrow a^n \equiv a^m \pmod{p}$

Definicja 44. Rozpatrzmy kongruencję $x^2 \equiv a \pmod{p}$, gdzie $a \not\equiv 0 \pmod{p}$ oraz $p \in \mathbb{P} \setminus \{2\}$. Jeśli równanie to posiada rozwiązanie, a nazywamy **resztą kwadratową** modulo p . W przeciwnym razie a nazywamy **nieresztą kwadratową**. Zbiór reszt kwadratowych modulo p oznaczamy Q_p , a niereszt \overline{Q}_p

Definicja 45. **Symbolem Legendre'a** nazywamy wyrażenie:

$$\left(\frac{a}{p}\right) = \begin{cases} 0, & \text{gd}y \ p|a \\ 1, & \text{gd}y \ a \in Q_p \\ -1, & \text{gd}y \ a \in \overline{Q}_p \end{cases}$$

Jeśli $\left(\frac{a}{p}\right) = 1$, to równanie $x^2 \equiv a \pmod{p}$ ma rozwiązanie.

Definicja 46. Niech n będzie liczbą nieparzystą o rozkładzie kanonicznym $n = p_1^{\alpha_1} \dots p_k^{\alpha_k}$. **Symbol Jacobiego** definiujemy następująco:

$$\left(\frac{x}{n}\right) = \prod_{i=1}^k \left(\frac{x}{p_i}\right)^{\alpha_i}$$

Twierdzenie 119. (Własności symbolu Legendre'a) Niech $p, q \in \mathbb{P}$. Wówczas:

1. $\left(\frac{ab}{p}\right) = \left(\frac{a}{p}\right) \left(\frac{b}{p}\right)$
2. $a \equiv b \pmod{p} \Rightarrow \left(\frac{a}{p}\right) = \left(\frac{b}{p}\right)$
3. $\left(\frac{1}{p}\right) = 1$
4. $\left(\frac{-1}{p}\right) = (-1)^{\frac{p-1}{2}}$
5. $\left(\frac{2}{p}\right) = (-1)^{\frac{p^2-1}{8}}$
6. $\left(\frac{a^n}{p}\right) = \left(\frac{a}{p}\right)^n$
7. $\left(\frac{p}{q}\right)^2 = 1$
8. $p \neq q \Rightarrow \left(\frac{q}{p}\right) \left(\frac{p}{q}\right) = (-1)^{\frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2}}$ lub $\left(\frac{q}{p}\right) = (-1)^{\frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2}} \left(\frac{p}{q}\right)$ (prawo wzajemności)

References

- [1] Larisa Dobryakova, *Matematyka dyskretna*. Lulu, 2012.
- [2] Grzegorz Szki biel, Czesław Wowk, *Zadania z arytmetyki szkolnej i teorii liczb*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, 2001.
- [3] Władysław Narkiewicz *Teoria liczb*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2003.
- [4] Kenneth A. Ross, Charles R. B. Wright, *Matematyka dyskretna*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.