

PAWEŁ GŁADKI

Algebra

<http://www.math.us.edu.pl/~pgladki/>

Zasady zaliczania przedmiotu:

2 kolokwia, każde warte 15 punktów, 2 sprawdziany, każdy warty 6 punktów, aktywność na zajęciach, warta 3 punkty, zadania domowe, warte 15 punktów, egzamin, warty 40 punktów.

Do egzaminu przystępują tylko te osoby, które uzyskają zaliczenie z ćwiczeń. Warunkiem zaliczenia ćwiczeń jest zdobycie co najmniej 30 punktów. Warunkiem zdania egzaminu jest zdobycie co najmniej 60 punktów.

Każde kolokwium będzie trwało 90 minut, każdy sprawdzian 20 minut, a egzamin końcowy 180 minut.

Sprawdziany odbędą się na zajęciach:

- ▶ **18 marca**
- ▶ **22 kwietnia**

Kolokwia odbędą się na zajęciach:

- ▶ **8 kwietnia**
- ▶ **6 maja**

Zadania domowe:

Do każdego wykładanego tematu został opracowany zestaw zadań, który należy rozwiązać w Moodle:

`http://el2.us.edu.pl/wmfich/`

→ **Inne matematyka**

→ **Algebra dla WliNoM (studia niestacjonarne)**

Dostępnych jest 5 zadań domowych, które będzie należało rozwiązać w następujących tygodniach:

- ▶ **11 – 18 marca**
- ▶ **18 – 25 marca**
- ▶ **8 – 15 kwietnia**
- ▶ **22 – 29 kwietnia**
- ▶ **6 – 13 maja**

Każdy zestaw składa się z 15 zadań, które zostaną udostępnione w każdą sobotę, w którą odbywać się będą zajęcia i które muszą zostać rozwiązane nie później niż do kolejnej soboty.

Na każdy zestaw zadań obowiązuje limit czasowy: każdy student będzie miał 6 godzin od otwarcia testu do jego ukończenia.

Plan wykładu:

- Wykład 1 NWD, NWW i algorytm Euklidesa. Grupa, pierścień, ciało. Izomorfizmy algebr.
- Wykład 2 Ciało liczb zespolonych. Układy równań liniowych.
- Wykład 3 Algebra macierzy. Działania na macierzach. Wyznaczniki.
- Wykład 4 Przestrzenie linowe. Podprzestrzenie. Liniowa niezależność. Warstwy i przestrzenie ilorazowe. Sumy i sumy proste podprzestrzeni.
- Wykład 5 Baza i wymiar. Struktura zbioru rozwiązań układu równań liniowych.

Literatura:

1. G. Banaszak, W. Gajda, *Elementy algebry liniowej, cz.I*, WNT 2002.
2. G. Banaszak, W. Gajda, *Elementy algebry liniowej, cz.II*, WNT 2002.
3. A. Białynicki-Birula, *Algebra*, PWN 1971.
4. A. Białynicki-Birula, *Algebra liniowa z geometrią*, PWN 1976.
5. N. W. Jefimow, E. R. Rozendorn, *Algebra liniowa wraz z geometrią wielowymiarową*, PWN 1976.
6. A. J . Kostrykin, *Wstęp do algebry, cz.I: Podstawowe struktury algebraiczne*, PWN 2004.
7. A. J . Kostrykin, *Wstęp do algebry, cz.II: Algebra liniowa*, PWN 2004.

Zbiory zadań:

1. L. Jeśmianowicz , J. Łoś, *Zbiór zadań z algebry*, PWN 1975 oraz 1981.
2. A. I . Kostrykin (red.), *Zbiór zadań z algebry*, PWN 2005.
3. D. K. Fadiejew, I . S. Sominskij, *Sbornik zadacz po wyższej algebrze*, Moskwa 1977 (w jęz. rosyjskim).
4. S. Przybyło, A. Szlachetowski, *Algebra i wielowymiarowa geometria analityczna w zadaniach*, WNT 1992.

NWD, NWW
i algorytm Euklidesa

Twierdzenie o dzieleniu z resztą

Niech $a, b \in \mathbb{Z}$, $b \neq 0$. Wówczas istnieje dokładnie jedna para liczb całkowitych $q, r \in \mathbb{Z}$ taka, że

$$a = qb + r \text{ oraz } 0 \leq r < |b|.$$

Dowód:

Pokażemy najpierw istnienie stosownej pary.

Założmy, że $b > 0$ i zdefiniujmy

$$q = \left[\frac{a}{b} \right] \text{ oraz } r = a - bq.$$

Wówczas $q \leq \frac{a}{b} < q + 1$.

Zatem $bq \leq a < bq + b$.

Stąd $0 \leq r = a - bq < b = |b|$.

W przypadku, gdy $b < 0$, definiujemy

$$q = - \left[\frac{a}{|b|} \right] \text{ oraz } r = a - bq$$

i dalej rozumujemy analogicznie.

Pozostaje wykazać jednoznaczność wyboru powyższej pary.

Założmy, że $a = bq_1 + r_1 = bq_2 + r_2$, gdzie $0 \leq r_1, r_2 < |b|$.

Wówczas $r_2 - r_1 = b(q_1 - q_2)$.

Jeśli $r_2 - r_1 \neq 0$, to wówczas $|b| \leq |r_2 - r_1| \leq \max\{r_1, r_2\} < |b|$.

Zatem $r_2 - r_1 = 0$ i w konsekwencji $q_1 - q_2 = 0$. $\square$

Definicja:

Niech $a, b \in \mathbb{Z}$, $b \neq 0$, niech $q, r \in \mathbb{Z}$ będą jednoznacznie wyznaczonymi liczbami całkowitymi takimi, że

$$a = qb + r \text{ i } 0 \leq r < |b|.$$

Liczbę q nazywamy **niepełnym ilorazem** z dzielenia a przez b , zaś liczbę r **resztą** z dzielenia a przez b .

Przykłady:

1. Niech $a = 26$, $b = 11$. Bez trudu sprawdzamy, że wówczas $q = 2$ oraz $r = 4$.
2. Niech $a = -26$, $b = 11$. Wówczas $q = -3$, a $r = 7$; w szczególności nie możemy powiedzieć, że resztą z dzielenia -26 przez 11 jest -4 , gdyż wprowadzie $-26 = -2 \cdot 11 - 4$, ale $-4 < 0$.

Definicja:

Niech $a, b \in \mathbb{Z}$. Mówimy, że b **dzieli** a (lub że a **jest podzielna przez** b), jeśli dla pewnej liczby całkowitej $q \in \mathbb{Z}$ zachodzi $a = bq$, co oznaczamy $b|a$. W przeciwnym razie piszemy $b \nmid a$. Liczbę q nazywamy **ilorazem** z dzielenia a przez b .

Przykłady:

3. Jest jasne, że $2|4$, $3|18$, $-8|16$ i $157|0$.
4. Bezpośrednio z definicji podzielności wynika też, że $0|a$ wtedy i tylko wtedy, gdy $a = 0$. Widzimy wszakże, że iloraz z dzielenia 0 przez 0 nie jest jednoznacznie określony.

Twierdzenie:

Niech $a, b, c \in \mathbb{Z}$. Wówczas:

1. $a|a$;
2. $a|b \wedge b|c \Rightarrow a|c$;
3. $a|b \wedge b|a \Rightarrow a = b \vee a = -b$;
4. $a|0$;
5. $1|a$;
6. $a|b \Rightarrow a|bc$;
7. $a|b \wedge a|c \Rightarrow a|b + c$.

Dowód:

Udowodnimy dla przykładu część (3) twierdzenia.

Jeżeli $a = 0$, to $a|b$ wtedy i tylko wtedy, gdy $b = 0$, a więc $a = b$.

Podobnie, gdy $b = 0$, to $a = b = 0$, założmy więc, że $a, b \neq 0$.

Niech $b = q_1 a$ i $a = q_2 b$, dla pewnych $q_1, q_2 \in \mathbb{Z}$.

W szczególności $q_1, q_2 \neq 0$.

Wówczas $b = q_1 q_2 b$.

Zatem $q_1 q_2 = 1$.

Stąd $q_1 = q_2 = 1$ lub $q_1 = q_2 = -1$. $\square$

Definicja:

Niech $a_1, \dots, a_k \in \mathbb{Z}$, $k \geq 2$.

Liczbę $d \in \mathbb{N}$ taką, że

1. $d|a_1, \dots, d|a_k$,
2. $e|a_1, \dots, e|a_k \Rightarrow e|d$,

nazywamy **największym wspólnym dzielnikiem** liczb $a_1, \dots, a_k$ i oznaczamy $NWD(a_1, \dots, a_k)$.

Liczbę $m \in \mathbb{N}$ taką, że

1. $a_1|m, \dots, a_k|m$,
2. $a_1|n, \dots, a_k|n \Rightarrow m|n$,

nazywamy **najmniejszą wspólną wielokrotnością** liczb $a_1, \dots, a_k$ i oznaczamy $NWW(a_1, \dots, a_k)$.

Przykład:

5. Sprawdzamy, że $NWD(24, 36) = 12$. Zauważmy, że, na przykład, $6|24$ i $6|36$, ale oczywiście $6 \neq NWD(24, 36)$. Ponadto $NWW(24, 36) = 72$. Podobnie zauważmy, że $24|144$ i $36|144$, ale $144 \neq NWW(24, 36)$.

Twierdzenie:

Niech $a, b \in \mathbb{N}$. Wówczas $NWD(a, b) \cdot NWW(a, b) = a \cdot b$.

Dowód:

Rozważmy $\frac{ab}{NWD(a,b)}$.

Ponieważ $a, b, NWD(a, b) \in \mathbb{N}$, widzimy, że $\frac{ab}{NWD(a,b)} \geq 0$.

Ponadto $\frac{ab}{NWD(a,b)} \in \mathbb{Z}$.

Niech $NWD(a, b)q_1 = a$, dla pewnej liczby $q_1 \in \mathbb{N}$.

Wówczas $\frac{ab}{NWD(a,b)} = \frac{NWD(a,b)q_1 b}{NWD(a,b)} = q_1 b$, a więc $b \mid \frac{ab}{NWD(a,b)}$.

Analogicznie $a \mid \frac{ab}{NWD(a,b)}$.

Wobec tego $NWW(a, b) \mid \frac{ab}{NWD(a,b)}$, czyli

$NWW(a, b)NWD(a, b) \mid ab$.

Rozważmy $\frac{ab}{NWW(a,b)}$.

Zauważmy, że $\frac{ab}{NWW(a,b)} \in \mathbb{N}$.

Niech $NWW(a, b) = s_1 a$, dla pewnej liczby $s_1 \in \mathbb{N}$.

Wówczas $\frac{ab}{NWW(a,b)} = \frac{ab}{s_1 a} = \frac{b}{s_1}$.

Wobec tego $\frac{ab}{NWW(a,b)} \mid b$.

Analogicznie $\frac{ab}{NWW(a,b)} \mid a$.

Wobec tego $\frac{ab}{NWW(a,b)} \mid NWD(a, b)$, czyli

$ab \mid NWW(a, b)NWD(a, b)$. $\square$

Przykład:

6. Odwołując się do poprzedniego przykładu sprawdzamy, że $NWD(24, 36)NWW(24, 36) = 12 \cdot 72 = 864 = 24 \cdot 36$.

Twierdzenie (algorytm Euklidesa):

Niech $a, b \in \mathbb{Z}$ i niech

$$a = q_1 b + r_1, \text{ dla } 0 < r_1 < |b|, q_1, r_1 \in \mathbb{Z},$$

$$b = q_2 r_1 + r_2, \text{ dla } 0 < r_2 < r_1, q_2, r_2 \in \mathbb{Z},$$

$$r_1 = q_3 r_2 + r_3, \text{ dla } 0 < r_3 < r_2, q_3, r_3 \in \mathbb{Z},$$

$$\vdots$$

$$r_{n-2} = q_n r_{n-1} + r_n, \text{ dla } 0 < r_n < r_{n-1}, q_n, r_n \in \mathbb{Z},$$

$$r_{n-1} = q_{n+1} r_n, \text{ dla } q_{n+1} \in \mathbb{Z}.$$

Wówczas $r_n = \text{NWD}(a, b)$.

Dowód:

Algorytm zawsze się zatrzymuje, bo jest tylko skończenie wiele liczb naturalnych w przedziale $[0, |b|]$.

Niech $d = \text{NWD}(a, b)$.

Sprawdzamy, że kolejno

$$r_n | r_{n-1}, r_n | r_{n-2}, \dots, r_n | r_1, r_n | b, r_n | a,$$

a więc w szczególności $r_n | d$.

Podobnie, $d | a$ i $d | b$, a więc kolejno

$$d | r_1, d | r_2, \dots, d | r_{n-1}, d | r_n.$$

Ponieważ zarówno d jak i r_n są liczbami dodatnimi, oraz równocześnie $d | r_n$ i $r_n | d$, więc $d = r_n$. $\square$

Przykład:

7. Zastosujemy algorytm Euklidesa, aby obliczyć $NWD(66, 48)$.
Wykonując kolejne kroki algorytmu otrzymujemy:

$$66 = 1 \cdot 48 + 18$$

$$48 = 2 \cdot 18 + 12$$

$$18 = 1 \cdot 12 + 6$$

$$12 = 2 \cdot 6,$$

a więc $NWD(66, 48) = 6$.

Przykłady:

9. Główna zaleta w stosowaniu algorytmu Euklidesa w porównaniu ze znanym ze szkoły średniej "algorytmem" polegającym na wypisaniu wszystkich dzielników liczb, dla których chcemy znaleźć największy wspólny dzielnik, polega na tym, że nie potrzebujemy rozkładać liczb na czynniki pierwsze.

W istocie, nie musimy nawet wiedzieć, czy są to liczby pierwsze, czy złożone.

Jako przykład rozważmy tak zwane **liczby Fermata**.

W liście do Frénicle de Bessy z 1640 roku Fermat wyraził przypuszczenie, że wszystkie liczby postaci $F_n = 2^{2^n} + 1$ są pierwsze. Jest tak w istocie dla małych n :

$$F_0 = 2^{2^0} + 1 = 3,$$

$$F_1 = 2^{2^1} + 1 = 5,$$

$$F_2 = 2^{2^2} + 1 = 17,$$

$$F_3 = 2^{2^3} + 1 = 257,$$

$$F_4 = 2^{2^4} + 1 = 65537,$$

ale już Euler w 1733 roku udowodnił, że liczba F_5 jest złożona i pokazał, że 641 jest jej dzielnikiem pierwszym:

$$F_5 = 2^{2^5} + 1 = 4294967297 = 641 \cdot 6700417.$$

W 1909 roku Klein pokazał, że F_7 nie jest pierwsza, ale dopiero w 1970 roku Morrison i Brillhart znaleźli jej dzielnik pierwszy.

Podobnie, Selfridge i Hurwitz udowodnili, że F_{14} nie jest liczbą pierwszą, ale do dziś nie są znane żadne dzielniki pierwsze liczby F_{14} .

Pierwsze dwa przykłady liczb Fermata, dla których nie tylko nie znamy dzielników pierwszych, ale o których nie wiemy nawet, czy są pierwsze, czy złożone, to F_{22} i F_{24} .

Stosując algorytm Euklidesa możemy jednak łatwo i szybko sprawdzić, że ich największym wspólnym dzielnikiem jest 1.

Istotnie:

$$\begin{aligned}2^{2^{24}} + 1 &= (2^{2^{22}})^4 + 1 = [(2^{2^{22}} + 1) - 1]^4 + 1 = \\&= (2^{2^{22}} + 1)^4 - 4(2^{2^{22}} + 1)^3 + 6(2^{2^{22}} + 1)^2 - 4(2^{2^{22}} + 1) + 1 \\&= [(2^{2^{22}} + 1)^3 - 4(2^{2^{22}} + 1)^2 + 6(2^{2^{22}} + 1) - 4](2^{2^{22}} + 1) + 2 \\2^{2^{22}} + 1 &= 2^{2^{22}-1}2 + 1, \\2 &= 2 \cdot 1,\end{aligned}$$

a zatem $NWD(F_{22}, F_{24}) = 1$.

9. Dane wygenerowane przez algorytm Euklidesa pozwalają wyznaczyć liczby całkowite x i y takie, że

$$66x + 48y = NWD(66, 48).$$

Istotnie, zaczynając od przedostatniego kroku i kolejno podstawiając otrzymujemy:

$$\begin{aligned} 6 &= 18 - 12 \\ &= 18 - (48 - 2 \cdot 18) = 3 \cdot 18 - 48 \\ &= 3(66 - 48) - 48 = 3 \cdot 66 - 4 \cdot 48, \end{aligned}$$

a więc $x = 3$ i $y = -4$.

Uwaga:

Niech $a, b, c \in \mathbb{Z}$. Algorytm Euklidesa dostarcza metody rozwiązywania równań

$$ax + by = c$$

w liczbach całkowitych.

Twierdzenie:

Niech $a, b, c \in \mathbb{Z}$. Równanie

$$ax + by = c$$

ma rozwiązanie w liczbach całkowitych wtedy i tylko wtedy, gdy $d = \text{NWD}(a, b) \mid c$.

Dowód:

$(\Rightarrow)$: Załóżmy, że $ax_0 + by_0 = c$, dla pewnych liczb $x_0, y_0 \in \mathbb{Z}$.
Wówczas, skoro $d|a$ i $d|b$, więc $d|ax_0$ i $d|by_0$, a zatem również $d|ax_0 + by_0 = c$.

($\Leftarrow$) : Załóżmy, że $d|c$ i niech $q \in \mathbb{Z}$ będzie taką liczbą, że $dq = c$.
Stosując algorytm Euklidesa znajdujemy liczby całkowite $x_1, y_1 \in \mathbb{Z}$
takie, że $ax_1 + by_1 = d$.
Wówczas $aqx_1 + bqy_1 = c$. $\square$

Przykład:

10. Rozwiążemy równanie $66x + 48y = 18$. Na podstawie poprzedniego przykładu wiemy już, że $66 \cdot 3 + 48 \cdot (-3) = 6$, a więc $66 \cdot 9 + 48 \cdot (-12) = 18$.

Twierdzenie:

Niech $a, b, c \in \mathbb{Z}$ i niech $d = \text{NWD}(a, b) | c$. Niech $x_0, y_0 \in \mathbb{Z}$ będą rozwiązaniami równania $ax + by = c$. Wówczas wszystkie całkowite rozwiązania tego równania dane są przez

$$x = x_0 + \frac{bt}{d} \text{ oraz } y = y_0 - \frac{at}{d}, t \in \mathbb{Z}.$$

Dowód:

Sprawdzamy, że

$$a \left(x_0 + \frac{bt}{d} \right) + b \left(y_0 - \frac{at}{d} \right) = ax_0 + by_0 = c.$$

Dalej, niech $x, y \in \mathbb{Z}$ będzie rozwiązaniem równania $ax + by = c$.

Wtedy $ax + by = c = ax_0 + by_0$.

Stąd $a(x - x_0) = b(y_0 - y)$.

Jeżeli $a = a_1d$ i $b = b_1d$, dla pewnych $a_1, b_1 \in \mathbb{Z}$, to wówczas też

$a_1(x - x_0) = b_1(y_0 - y)$.

Ponieważ $\text{NWD}(a_1, b_1) = 1$, więc $b_1 | x - x_0$.

Niech $x - x_0 = b_1t$, dla pewnego $t \in \mathbb{Z}$.

Stąd $x = x_0 + b_1t = x_0 + \frac{bt}{d}$.

Ponadto $a_1b_1t = b_1(y_0 - y)$, skąd $y = y_0 - \frac{at}{d}$. $\square$

Przykład:

11. Wszystkie rozwiązania równania

$$66x + 48y = 18$$

wyrażą się wzorami

$$x = 9 + 8t, y = -12 - 11t, t \in \mathbb{Z}.$$

Grupy, pierścienie i ciała

Definicja:

Niech A będzie niepustym zbiorem.

Działaniem wewnętrznym (lub, krótko, **działaniem**) w zbiorze A nazywamy funkcję $*$: $A \times A \rightarrow A$.

Niech ponadto B będzie niepustym zbiorem.

Działaniem zewnętrznym w zbiorze A nazywamy funkcję $*$: $B \times A \rightarrow A$.

Uwaga:

To, że w zbiorze A określono działanie wewnętrzne $*$ w szczególności oznacza, że:

1. $\forall x, y \in A [*(x, y) \text{ istnieje}],$
2. $\forall x, y \in A [*(x, y) \in A].$

Zamiast $*(x, y)$ będziemy na ogół pisać $x * y$.

Podobnie, jeśli $B \neq \emptyset$, to to, że w zbiorze A określono działanie zewnętrzne $\diamond$ w szczególności oznacza, że:

1. $\forall a \in B \forall x \in A [\diamond(a, x) \text{ istnieje}],$
2. $\forall a \in B \forall x \in A [\diamond(a, x) \in A].$

Zamiast $\diamond(a, x)$ będziemy na ogół pisać $a \diamond x$.

Na tym wykładzie będziemy zajmować się prawie wyłącznie działaniami wewnętrznymi.

Przykłady:

1. Dodawanie liczb naturalnych jest działaniem w zbiorze $\mathbb{N}$.
2. Mnożenie liczb naturalnych jest działaniem w zbiorze $\mathbb{N}$.
3. Odejmowanie i dzielenie nie są działaniami w zbiorze $\mathbb{N}$:
 $3 - 5 \notin \mathbb{N}$ oraz $1 \div 2 \notin \mathbb{N}$. Z drugiej strony, odejmowanie jest działaniem w $\mathbb{Z}$, a dzielenie jest działaniem w $\mathbb{Q} \setminus \{0\}$.
4. Mnożenie wektorów na płaszczyźnie przez skalary rzeczywiste jest przykładem działania zewnętrznego.

Definicja:

Niech A będzie niepustym zbiorem, a $*$ i $\circ$ działaniami w A .

1. Mówimy, że $*$ jest **łączne**, jeżeli

$$\forall x, y, z \in A [x * (y * z) = (x * y) * z].$$

2. Mówimy, że $*$ jest **przemienne**, jeżeli

$$\forall x, y \in A [x * y = y * x].$$

3. Mówimy, że $*$ ma **element neutralny** e , jeżeli

$$\forall x \in A [x * e = e * x = x].$$

4. Mówimy, że y jest **elementem odwrotnym** do x , jeżeli

$$x * y = y * x = e.$$

5. Mówimy, że $\circ$ jest **rozdzielne względem $*$** , jeżeli

$$\forall x, y, z \in A [x \circ (y * z) = x \circ y * x \circ z].$$

Przykłady:

5. Dodawanie i mnożenie liczb naturalnych są łączne i przemienne. 0 jest elementem neutralnym dodawania, a 1 jest elementem neutralnym mnożenia. Ponadto mnożenie jest rozdzielne względem dodawania. 1 nie ma elementu odwrotnego względem dodawania, a 2 nie ma elementu odwrotnego względem mnożenia.

6. Rozważmy dodawanie i mnożenie liczb całkowitych. Każda liczba całkowita ma element odwrotny względem dodawania, ale 2 nie ma elementu odwrotnego względem mnożenia.

7. Rozważmy dodawanie i mnożenie liczb wymiernych. Każda liczba wymierna ma element odwrotny względem dodawania i każda niezerowa liczba wymierna ma element odwrotny względem mnożenia.

Definicja:

1. **Algebrą** nazywamy system $(A, *_1, \dots, *_n, B_1, \dots, B_m, \diamond_1, \dots, \diamond_m)$, gdzie A jest niepustym zbiorem, $*_1, \dots, *_n$ działaniami wewnętrznymi w zbiorze A , a $\diamond_1, \dots, \diamond_m$ działaniami zewnętrznymi w zbiorze A (wraz z odpowiadającymi im zbiorami $B_1, \dots, B_m$).

2. **Grupą** nazywamy algebrę $(G, *)$, gdzie $*$ jest łączne, ma element neutralny i każdy element w zbiorze G ma element odwrotny. Jeżeli ponadto $*$ jest przemienne, to grupę $(G, *)$ nazywamy **przemienne** (lub **abelową**).

3. **Pierścieniem** nazywamy algebrę $(R, +, \cdot)$, gdzie $(R, +)$ jest grupą abelową, a $\cdot$ jest łączne i rozdzielne względem $+$. Jeżeli $\cdot$ jest przemienne, to $(R, +, \cdot)$ nazywamy **pierścieniem przemiennym**. Jeżeli $\cdot$ ma element neutralny 1, to $(R, +, \cdot)$ nazywamy **pierścieniem z jedynką**. W tym wykładzie ograniczymy się do pierścieni przemiennych z jedynką, które będziemy krótko nazywać pierścieniami.

4. **Ciałem** nazywamy pierścień przemienny z jedyneką $(F, +, \cdot)$, w którym $0 \neq 1$, przy czym 0 oznacza element neutralny $+$, a 1 to element neutralny $\cdot$ i taki, że każdy $\neq 0$ element ma element odwrotny względem $\cdot$.

Przykłady:

8. $(\mathbb{Z}, +)$, $(\mathbb{Q}, +)$, $(\mathbb{R}, +)$ są przykładami grup przemennych.
 $(\mathbb{N}, +)$ nie jest grupą.
Podobnie $(\mathbb{Q}^*, \cdot)$, $(\mathbb{R}^*, \cdot)$, gdzie $A^* = A \setminus \{0\}$, są grupami przemennymi. $(\mathbb{N}^*, \cdot)$ i $(\mathbb{Z}^*, \cdot)$ nie są grupami.

9. $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$, $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$, $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ są przykładami pierścieni.

10. $(\mathbb{Q}_+, \cdot)$, $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ są przykładami ciał.
 $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ nie jest ciałem.

Definicja:

Niech $n \in \mathbb{N}$ i oznaczmy przez $\mathbb{Z}_n = \{0, 1, \dots, n-1\}$.
W zbiorze $\mathbb{Z}_n$ definiujemy **dodawanie modulo n** :

$$x \oplus_n y = \text{reszta z dzielenia } x + y \text{ przez } n$$

oraz **mnożenie modulo n** :

$$x \otimes_n y = \text{reszta z dzielenia } x \cdot y \text{ przez } n.$$

Przykłady:

11. Sprawdzamy, że $2 \oplus_5 2 = 4$, $2 \oplus_5 4 = 1$, $2 \oplus_5 3 = 0$,
 $3 \oplus_6 5 = 2$ i $98 \oplus_{100} 2 = 0$.
12. Podobnie, $2 \otimes_5 2 = 4$, $2 \otimes_5 4 = 3$, $2 \otimes_5 3 = 1$, $3 \otimes_6 2 = 0$ i
 $98 \otimes_{100} 2 = 96$.

Twierdzenie:

Niech $n \in \mathbb{N}$.

1. $(\mathbb{Z}_n, \oplus_n)$ jest grupą przemienną.
2. $(\mathbb{Z}_n^*, \otimes_n)$ jest grupą przemienną, o ile n jest liczbą pierwszą.
3. $(\mathbb{Z}_n, \oplus_n, \otimes_n)$ jest pierścieniem.
4. $(\mathbb{Z}_n, \oplus_n, \otimes_n)$ jest ciałem, o ile n jest liczbą pierwszą.

Dowód:

Sprawdzenie wszystkich aksjomatów jest dość czasochłonne, ale proste.

Ograniczymy się do pokazania, że jeśli n jest liczbą pierwszą, to każdy element $x \in \mathbb{Z}_n^*$ ma element odwrotny względem $\otimes_n$.

Ustalmy $x \in \mathbb{Z}_n^*$.

Chcemy pokazać, że istnieje $y \in \mathbb{Z}_n^*$ taki, że $x \otimes_n y = 1$, to znaczy

$$xy = 1 + qn,$$

dla pewnej liczby całkowitej $q \in \mathbb{Z}$.

Jest to równoważne pokazaniu, że równanie

$$xy - qn = 1$$

ma rozwiązanie w liczbach całkowitych.

Ponieważ n jest liczbą pierwszą, a zatem $\text{NWD}(x, n) = 1$, równanie to istotnie ma rozwiązanie. $\square$

W dowolnej grupie $(G, *)$ wprowadzamy oznaczenie

$$\prod_{i=1}^n x_i = x_1 * \dots * x_n.$$

W szczególności $\prod_{i=1}^n x = x^n$. Tradycyjnie używamy w teorii grup dwóch równoległych terminologii: addytywnej i mnożymy, według następującego schematu:

Definicja	Notacja addytywna	Notacja mnożymy
działanie	$+$ dodawanie suma	$\cdot$ mnożenie iloczyn
element neutralny	0 zero	1 jedynka
potęga	nx wielokrotność	x^n potęga
element odwrotny	$-x$ element przeciwny	x^{-1} element odwrotny

Twierdzenie:

Niech $(G, *)$ będzie grupą. Wówczas:

1. element neutralny e jest wyznaczony jednoznacznie;
2. $\prod_{i=1}^m x_i * \prod_{j=1}^n x_j = \prod_{j=1}^{m+n} x_j$, dla $x_1, \dots, x_{m+n} \in G$;
3. $x^{m+n} = x^m x^n$, dla $x \in G$;
4. $(x^m)^n = x^{mn}$, dla $x \in G$;
5. element odwrotny jest wyznaczony jednoznacznie;
6. $(x_1^{n_1} * \dots * x_k^{n_k})^{-1} = x_k^{-n_k} * \dots * x_1^{-n_1}$, dla $x_1, \dots, x_k \in G$;
7. $(x^{-1})^{-1} = x$, dla $x \in G$;
8. $(x^{-1} * y * x)^n = x^{-1} * y^n * x$, dla $x, y \in G$;
9. jeżeli $x * y = x * z$, to $y = z$.

Dowód:

Udowodnimy dla przykładu część (1): jeśli e i e' są dwoma elementami neutralnymi, to wówczas

$$e = e * e' = e'. \square$$

W dowolnym pierścieniu $(R, +, \cdot)$ wprowadzamy oznaczenia:

$$xy + z = (x \cdot y) + z,$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = x_1 + \dots + x_n, \sum_{i=1}^0 x_i = 0,$$

$$\prod_{i=1}^n x_i = x_1 \cdot \dots \cdot x_n, \prod_{i=1}^0 x_i = 1,$$

$$nx = \sum_{i=1}^n x, x^n = \prod_{i=1}^n x.$$

Twierdzenie:

Niech $(R, +, \cdot)$ będzie pierścieniem, niech $x, y, z \in R$, $n, m \in \mathbb{N}$.

Wówczas:

1. $-(-x) = x$;
2. $-(x + y) = -x - y$;
3. $n(mx) = nm x$;
4. $nx + mx = (n + m)x$;
5. $0x = x0 = 0$;
6. $(-1)x = -x$;
7. $(-x)y = -(xy) = x(-y)$;
8. $(-x)(-y) = xy$;
9. $x(y - z) = xy - xz$;
10. $(x - y)z = xz - yz$;
11. jeżeli $x + y = x + z$, to wówczas $y = z$;
12. $x^n x^m = x^{n+m}$;
13. $(x^n)^m = x^{nm}$;
14. $(x + y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^{n-k} y^k$.

Dowód:

Udowodnimy dla przykładu część (5):

$$0x + 0x = (0 + 0)x = 0x$$

a zatem $0x = 0$. $\square$

Izomorfizmy algebr

Przykłady:

1. Działania w grupach często wygodnie jest zapisywać w **tabelkach Cayleya**.

Na przykład tabelka działań w grupie $(\mathbb{Z}_5^*, \otimes_5)$ wygląda następująco:

$\otimes_5$	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	4	1	3
3	3	1	4	2
4	4	3	2	1

2. W naszych rozważaniach nie będziemy ograniczać się tylko do przykładów grup liczbowych.

Jako przykład grupy "nielichbowej" rozważmy tak zwaną **grupę symetryczną**.

Niech $n \in \mathbb{N}$ i oznaczmy przez $S(n)$ zbiór wszystkich bijekcji zbioru $\{1, \dots, n\}$ na samego siebie.

Na przykład dla $n = 3$ elementy zbioru $S(3)$ to następujące funkcje, które, dla wygody oznaczeń, zdefiniujemy za pomocą tabel:

id_3 :	<table> <tr><td>x</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>$id_3(x)$</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> </table>	x	1	2	3	$id_3(x)$	1	2	3	o_1 :	<table> <tr><td>x</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>$t_1(x)$</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td></tr> </table>	x	1	2	3	$t_1(x)$	2	3	1
x	1	2	3																
$id_3(x)$	1	2	3																
x	1	2	3																
$t_1(x)$	2	3	1																
o_2 :	<table> <tr><td>x</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>$t_2(x)$</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> </table>	x	1	2	3	$t_2(x)$	3	1	2	s_1 :	<table> <tr><td>x</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>$s_1(x)$</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td></tr> </table>	x	1	2	3	$s_1(x)$	1	3	2
x	1	2	3																
$t_2(x)$	3	1	2																
x	1	2	3																
$s_1(x)$	1	3	2																
s_2 :	<table> <tr><td>x</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>$s_2(x)$</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	x	1	2	3	$s_2(x)$	3	2	1	s_3 :	<table> <tr><td>x</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>$s_3(x)$</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> </table>	x	1	2	3	$s_3(x)$	2	1	3
x	1	2	3																
$s_2(x)$	3	2	1																
x	1	2	3																
$s_3(x)$	2	1	3																

Tym samym $S(3) = \{id_3, o_1, o_2, s_1, s_2, s_3\}$.

W zbiorze $S(n)$ definiujemy działanie $\circ$ wzorem

$$f \circ g(x) = f(g(x)), \text{ dla } x \in \{1, \dots, n\}.$$

Okazuje się, że algebra $(S(n), \circ)$ jest grupą.

Na przykład tabelka działań w grupie $S(3)$ wygląda następująco:

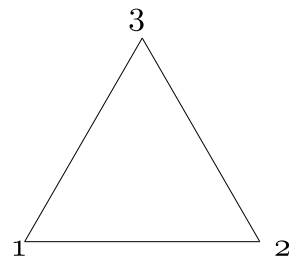
$\circ$	id_3	o_1	o_2	s_1	s_2	s_3
id_3	id_3	o_1	o_2	s_1	s_2	s_3
o_1	o_1	o_2	id_3	s_2	s_3	s_1
o_2	o_2	id_3	o_1	s_3	s_1	s_2
s_1	s_1	s_3	s_2	id_3	o_2	o_1
s_2	s_2	s_1	s_3	o_1	id_3	o_2
s_3	s_3	s_2	s_1	o_2	o_1	id_3

Widzimy, że jest to przykład grupy nieprzemiennej: $s_1 \circ o_1 = s_2$, ale $o_1 \circ s_1 = s_3$.

3. Innym przykładem grupy "nieliczbowej" jest **grupa izometrii własnych n -kąta foremnego**, którą będziemy oznaczać przez $D(n)$.

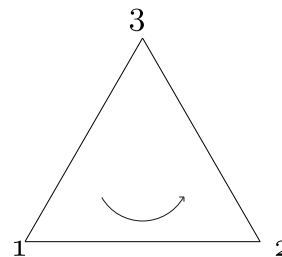
Na przykład dla $n = 3$ grupa $D(3)$ składa się z następujących izometrii trójkąta równobocznego:

$ID_3 :$



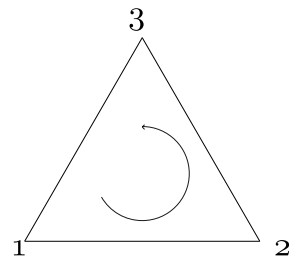
identyczność

$O_1 :$



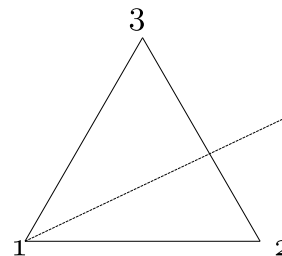
obrót o 120°

$O_2 :$



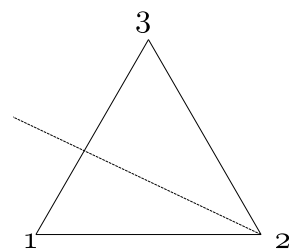
obrót o 240°

$S_1 :$



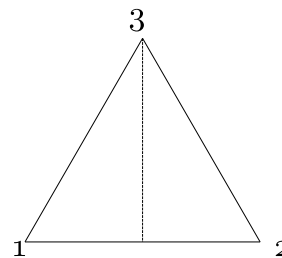
symetria względem
symetralnej przechodzącej
przez wierzchołek 1

$S_2 :$



symetria względem
symetralnej przechodzącej
przez wierzchołek 2

$S_3 :$



symetria względem
symetralnej przechodzącej
przez wierzchołek 3

Działaniem grupowym jest składanie izometrii.

Na przykład tabelka działań w grupie $D(3)$ wygląda następująco:

$\circ$	ID_3	O_1	O_2	S_1	S_2	S_3
ID_3	ID_3	O_1	O_2	S_1	S_2	S_3
O_1	O_1	O_2	ID_3	S_2	S_3	S_1
O_2	O_2	ID_3	O_1	S_3	S_1	S_2
S_1	S_1	S_3	S_2	ID_3	O_2	O_1
S_2	S_2	S_1	S_3	O_1	ID_3	O_2
S_3	S_3	S_2	S_1	O_2	O_1	ID_3

Tak jak w poprzednim przykładzie, grupy $D(n)$ nie są przemienne.

Definicja:

Niech $(G_1, *_1)$ i $(G_2, *_2)$ będą grupami. Funkcję $f : G_1 \rightarrow G_2$ nazywamy **izomorfizmem grup**, jeżeli jest bijekcją i spełniony jest warunek

$$\forall x, y \in G_1 [f(x *_1 y) = f(x) *_2 f(y)].$$

Jeżeli istnieje izomorfizm $f : G_1 \rightarrow G_2$, to grupy G_1 i G_2 nazywamy **izomorficznymi**, co oznaczamy przez $G_1 \cong G_2$.

Przykład:

4. Grupy $S(3)$ i $D(3)$ są izomorficzne.

Istotnie, rozważmy funkcję $f : S(3) \rightarrow D(3)$, którą, dla wygody oznaczeń, zdefiniujemy tabelką jako:

σ	id_3	o_1	o_2	s_1	s_2	s_3
$f(\sigma)$	ID_3	O_1	O_2	S_1	S_2	S_3

Oczywiście jest to bijekcja.

Porównując tabelki działań w $S(3)$ i $D(3)$ widzimy, że jest to też izomorfizm grup.

Definicja:

Niech $(R_1, +_1, \cdot_1)$ i $(R_2, +_2, \cdot_2)$ będą pierścieniami. Funkcję $f : R_1 \rightarrow R_2$ nazywamy **izomorfizmem pierścieni**, jeżeli jest bijekcją i spełnione są warunki:

- ▶ $\forall x, y \in R_1 [f(x +_1 y) = f(x) +_2 f(y)],$
- ▶ $\forall x, y \in R_1 [f(x \cdot_1 y) = f(x) \cdot_2 f(y)],$
- ▶ $f(1_{R_1}) = 1_{R_2},$

gdzie 1_{R_1} oznacza jedynkę pierścienia R_1 , a 1_{R_2} jedynkę pierścienia R_2 . Jeżeli istnieje izomorfizm $f : R_1 \rightarrow R_2$, to pierścienie R_1 i R_2 nazywamy **izomorficznymi**, co oznaczamy przez $R_1 \cong R_2$.

Definicja:

Niech $(F_1, +_1, \cdot_1)$ i $(F_2, +_2, \cdot_2)$ będą ciałami. Funkcję $f : F_1 \rightarrow F_2$ nazywamy **izomorfizmem ciał**, jeżeli jest bijekcją i spełnione są warunki:

- ▶ $\forall x, y \in F_1 [f(x +_1 y) = f(x) +_2 f(y)],$
- ▶ $\forall x, y \in F_1 [f(x \cdot_1 y) = f(x) \cdot_2 f(y)],$
- ▶ $f(1_{F_1}) = 1_{F_2},$

gdzie 1_{F_1} oznacza jedynekę ciała F_1 , a 1_{F_2} jedynekę ciała F_2 . Jeżeli istnieje izomorfizm $f : F_1 \rightarrow F_2$, to ciała F_1 i F_2 nazywamy **izomorficznymi**, co oznaczamy przez $F_1 \cong F_2$.