

Algebra

MICHAŁ DOBRANOWSKI

semestr zimowy 2022
v0.5

Poniższy skrypt zawiera materiał obejmujący wykłady z Algebry prowadzone przez dr hab. Jakuba Przybyło na I semestrze Informatyki na AGH oraz tematy, które uznałem za warte uwagi podczas własnych studiów nad tematem.

Spis treści

1	Liczy zespolone	2
1.1	Działania na liczbach zespolonych	2
1.2	Interpretacja geometryczna liczb zespolonych	3
1.3	Pierwiastkowanie liczb zespolonych	4
1.4	Postać wykładnicza	4
2	Relacje	5
2.1	Porządki	6
3	Struktury algebraiczne	9
3.1	Grupy	10
3.2	Pierścienie i ciała	11
3.3	Morfizmy	13
3.4	Przestrzenie wektorowe	14

§1 Liczy zespolone

Definicja 1.1. Liczba zespolona z to uporządkowana para liczb rzeczywistych. Pierwszy element tej pary to **część rzeczywista**, oznaczana symbolem $\operatorname{Re}(z)$, a drugi to **część urojona**, oznaczana symbolem $\operatorname{Im}(z)$. Zbiór liczb zespolonych oznaczamy przez \mathbb{C} .

Liczy zespolone można reprezentować w kilku postaciach, jedna z nich to **postać algebraiczna**. Używając jej, liczba $z = (x, y)$ jest zapisywana jako

$$z = x + iy,$$

gdzie i nazywamy **jednostką urojoną**, która spełnia

$$i^2 = -1.$$

§1.1 Działania na liczbach zespolonych

Niech $z_1 = x_1 + iy_1$ oraz $z_2 = x_2 + iy_2$. Określamy:

- dodawanie $z_1 + z_2 = x_1 + x_2 + i(y_1 + y_2)$
- mnożenie $z_1 z_2 = x_1 x_2 + ix_1 y_2 + ix_2 y_1 + i^2 y_1 y_2$
 $= x_1 x_2 - y_1 y_2 + i(x_1 y_2 + x_2 y_1)$

Wniosek 1.2

Dodawanie i mnożenie liczb zespolonych jest przemienne i łączne. Mnożenie jest rozdzielne względem dodawania.

Definicja 1.3. Sprzężenie liczby zespolonej $z = x + iy$ to liczba $\bar{z} = x - iy$.

Definicja 1.4. Moduł liczby zespolonej $z = x + iy$ to liczba $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Zachodzi pewna własność, wynikająca ze wzoru skróconego mnożenia:

$$\begin{aligned} z\bar{z} &= (x + iy)(x - iy) = x^2 - i^2 y^2 = x^2 + y^2 \\ z\bar{z} &= |z|^2 \end{aligned} \tag{1}$$

Powyższa liczba jest liczbą rzeczywistą, więc znaleźliśmy prosty sposób na dzielenie liczb zespolonych przez siebie, mnożąc licznik i mianownik przez sprzężenie mianownika. Na przykład:

$$\frac{1 + 2i}{-1 - i} = \frac{(1 + 2i)(-1 + i)}{(-1 - i)(-1 + i)} = \frac{-3 - i}{2} = -\frac{3}{2} - \frac{i}{2}.$$

Lemat 1.5

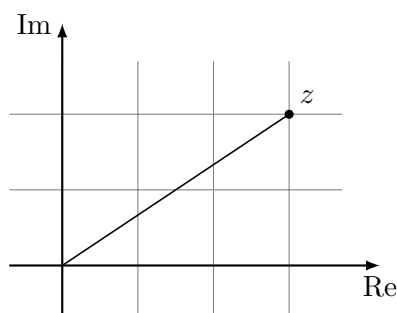
Oprócz $z\bar{z} = |z|^2$, zachodzą również równości:

- $|\bar{z}| = |z|$
- $\overline{z_1 + z_2} = \bar{z}_1 + \bar{z}_2$
- $\overline{z_1 z_2} = \bar{z}_1 \cdot \bar{z}_2$
- $|z_1 z_2| = |z_1| |z_2|$

Ich dowody można w łatwy sposób przeprowadzić z definicji poszczególnych działań.

§1.2 Interpretacja geometryczna liczb zespolonych

Liczyby zespolone można interpretować jako punkty na **płaszczyźnie zespolonej**. Dla przykładu liczba $z = 3 + 2i$.



Fakt 1.6. Moduł liczby zespolonej z to długość wektora wodzącego tej liczby na płaszczyźnie zespolonej.

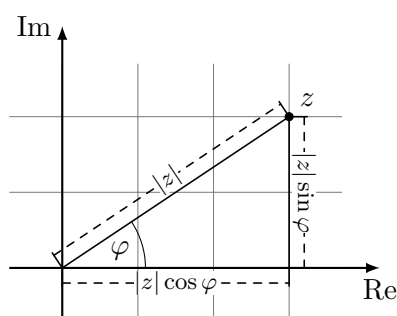
Dowód. Wynika to z twierdzenia Pitagorasa oraz definicji modułu (1.4). \square

Możemy wyprowadzić **postać trygonometryczną** liczby zespolonej, która, zamiast dwóch współrzędnych, będzie operować na długości wektora wodzącego oraz kącie skierowanym. Mamy więc

$$z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

gdzie φ to miara kąta skierowanego między wektorem wodzącym liczby zespolonej z a osią liczb rzeczywistych. Ten kąt nazywany jest **argumentem** i oznaczany przez $\text{Arg}(z)$. Argument nie jest określony jednoznacznie – dowolne dwa argumenty jednej liczby różnią się o wielokrotność 2π . Jeśli argument jest w przedziale $[0, 2\pi)$, to mówimy, że jest to **argument główny** liczby z i oznaczamy $\arg(z)$.

Za pomocą podstawowej trygonometrii możemy łatwo zamieniać postać algebraiczną i trygonometryczną między sobą.



$$\text{Re } z = |z| \cos \varphi, \quad \text{Im } z = |z| \sin \varphi \quad (2)$$

Na potrzeby dalszych rozważań przyjmujemy, że $\arg(0) = 0$.

Fakt 1.7. Odległość między liczbami z_1 i z_2 na płaszczyźnie zespolonej wynosi $|z_1 - z_2|$.

Lemat 1.8

Zachodzą następujące nierówności:

- $|z_1 + z_2| \leq |z_1| + |z_2|$
- $||z_1| - |z_2|| \leq |z_1 - z_2|$

Możemy łatwo mnożyć dwie liczby zespolone w postaci trygonometrycznej przez siebie za pomocą poniższego wzoru.

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &= |z_1|(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)|z_2|(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2) \\ &= |z_1||z_2|(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + i(\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \sin \varphi_1 \cos \varphi_2)) \quad (3) \\ &= |z_1||z_2|(\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)) \end{aligned}$$

Stosując wzór 3 n razy otrzymujemy dowód następującego twierdzenia.

Twierdzenie 1.9 (Wzór de Moivre'a)

Dla $z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ oraz $n \in \mathbb{Z}$ zachodzi równość

$$z^n = |z|^n(\cos n\varphi + i \sin n\varphi)$$

Wzór de Moivre'a zapewnia prosty sposób na potęgowanie liczb zespolonych. Dlatego, mając za zadanie obliczyć

$$(-2\sqrt{3} - 2i)^{16}$$

najłatwiej będzie zmienić postać liczby do postaci trygonometrycznej, a następnie skorzystać z twierdzenia 1.9.

§1.3 Pierwiastkowanie liczb zespolonych

Definicja 1.10 (Pierwiastek liczby zespolonej). Jeśli z jest liczbą zespoloną, to $\sqrt[n]{z}$ jest zbiorem wszystkich takich $w \in \mathbb{C}$, że $w^n = z$.

Korzystając ze wzoru de Moivre'a (twierdzenie 1.9) łatwo wyprowadzić wzór

$$\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{|z|} \left(\cos \frac{\varphi + 2k\pi}{n} + i \sin \frac{\varphi + 2k\pi}{n} \right), k \in \mathbb{Z} \quad (4)$$

Fakt 1.11. Pierwiastków n -tego stopnia z $z \neq 0$ jest dokładnie n i leżą one w równych odstępach na okręgu o środku w 0 i promieniu $\sqrt[n]{|z|}$.

Dowód. Dla $k \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ liczba z równości 4 będzie przyjmować różne wartości (wynika to z okresowości funkcji trygonometrycznych). Liczby te będą na wspomnianym okręgu (to wynika wprost z postaci trygonometrycznej), a ich argumenty główne różnić będzie wielokrotność $\frac{2\pi}{n}$. \square

§1.4 Postać wykładnicza

Postać $z = |z|e^{i\varphi}$ liczby zespolonej będziemy nazywać **postacią wykładniczą** tej liczby.

Twierdzenie 1.12 (Wzór Eulera)

Dla każdego $\varphi \in \mathbb{R}$ zachodzi

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi.$$

Dowód. Weźmy $z = \cos \varphi + i \sin \varphi$. Różniczkując po zmiennej φ otrzymujemy

$$\frac{dz}{d\varphi} = -\sin \varphi + i \cos \varphi = iz$$

$$\therefore \frac{dz}{z} = id\varphi.$$

Po obustronnym całkowaniu mamy

$$\int \frac{dz}{z} = \int id\varphi$$

$$\ln z = i\varphi + c$$

$$e^{\ln z} = e^{i\varphi+c}$$

$$z = e^{i\varphi+c}.$$

Podstawiając $\varphi = 0$ otrzymujemy $1 = e^c$, skąd mamy $c = 0$, co kończy dowód. \square

§2 Relacje

Definicja 2.1. Relacja to trójka $\mathcal{R} = (X, \text{gr}\mathcal{R}, Y)$, gdzie X i Y są zbiorami, a $\text{gr}\mathcal{R} \subset X \times Y$.

Zbiór X nazywamy **naddziedzina**, Y **zapasem**, $\text{gr}\mathcal{R}$ to **wykres** relacji. Piszemy, że $x\mathcal{R}y$, jeśli $(x, y) \in \text{gr}\mathcal{R}$. **Dziedzina** relacji \mathcal{R} to zbiór

$$D_{\mathcal{R}} = \{x \in X : \exists y \in Y : x\mathcal{R}y\},$$

a jej **przeciwdziedzina** to zbiór

$$C_{\mathcal{R}} = \{y \in Y : \exists x \in X : x\mathcal{R}y\}.$$

Definicja 2.2. Relacja odwrotna do relacji $\mathcal{R} = (X, \text{gr}\mathcal{R}, Y)$ to taka relacja $\mathcal{R}^{-1} = (Y, \text{gr}\mathcal{R}^{-1}, X)$, że

$$\text{gr}\mathcal{R}^{-1} = \{(y, x) \in Y \times X : (x, y) \in \text{gr}\mathcal{R}\}.$$

Definicja 2.3. Złożeniem relacji $\mathcal{R} = (X, \text{gr}\mathcal{R}, Y)$ z relacją $\mathcal{S} = (Y, \text{gr}\mathcal{S}, Z)$ nazywamy relację

$$\mathcal{R} \circ \mathcal{S} = (X, \text{gr}(\mathcal{R} \circ \mathcal{S}), Z),$$

gdzie

$$\text{gr}(\mathcal{R} \circ \mathcal{S}) = \{(x, z) \in X \times Z : \exists y \in Y : x\mathcal{R}y \wedge y\mathcal{S}z\}.$$

Definicja 2.4 (rodzaje relacji). Relacja $\mathcal{R} = (X, \text{gr}\mathcal{R}, X)$ jest:

- **zwrotna** $\Leftrightarrow \forall x \in X : x\mathcal{R}x$,
- **symetryczna** $\Leftrightarrow \forall x, y \in X : x\mathcal{R}y \Rightarrow y\mathcal{R}x$,

- **antysymetryczna** $\Leftrightarrow \forall x, y \in X : x\mathcal{R}y \wedge y\mathcal{R}x \Rightarrow x = y$,
- **asymetryczna** $\Leftrightarrow \forall x, y \in X : x\mathcal{R}y \Rightarrow \neg y\mathcal{R}x$,
- **przechodnia** $\Leftrightarrow \forall x, y, z \in X : x\mathcal{R}y \wedge y\mathcal{R}z \Rightarrow x\mathcal{R}z$,
- **spójna** $\Leftrightarrow \forall x, y \in X : x\mathcal{R}y \vee y\mathcal{R}x \vee x = y$.

Definicja 2.5. Relacja równoważności to relacja $\mathcal{R} = (X, \text{gr}\mathcal{R}, X)$, która jest zwrotna, przechodnia i symetryczna.

Definicja 2.6. Jeżeli (X, \mathcal{R}) zbiorem z relacją równoważności, to dla każdego $x \in X$ klasą abstrakcji (klasą równoważności) tego elementu nazywamy zbiór

$$[x] = \{y \in X : x\mathcal{R}y\}.$$

Definicja 2.7. Zbiór ilorazowy relacji \mathcal{R} to zbiór klas abstrakcji tej relacji; przyjmujemy oznaczenie

$$X/\mathcal{R} = \{[x] : x \in X\}.$$

Twierdzenie 2.8

Niech (X, \mathcal{R}) będzie zbiorem z relacją równoważności. Wtedy

$$\forall x, y \in X : [x] \neq [y] \Leftrightarrow [x] \cap [y] = \emptyset.$$

Dowód wystarczalności. Załóżmy przez sprzeczność, że $[x] \cap [y] \neq \emptyset$, a więc $\exists z \in X : x\mathcal{R}z \wedge y\mathcal{R}z$. Teraz weźmy dowolny element $a \in [x]$. Mamy więc $x\mathcal{R}a$. Korzystając z symetryczności i przechodniości relacji \mathcal{R} mamy

$$\begin{aligned} a\mathcal{R}x \wedge x\mathcal{R}z \wedge z\mathcal{R}y, \\ \therefore y\mathcal{R}a. \end{aligned}$$

Z tego wynika, że $[x] \subset [y]$. Analogicznie (przyjmując na początku $a \in [y]$) dostaniemy, że $[y] \subset [x]$, więc $[x] = [y]$, co jest sprzeczne z założeniem.

Dowód konieczności. Załóżmy przez sprzeczność, że $[x] = [y]$. Wtedy $[x] \cap [y] = [x] \cap [x] = [x]$ nie może być zbiorem pustym, ponieważ ze zwrotności relacji \mathcal{R} wynika, że $x\mathcal{R}x$, więc $[x]$ to zbiór przynajmniej jednoelementowy. \square

Z powyższego twierdzenia wynika, że relacja równoważności w danym zbiorze X dzieli ten zbiór na niepuste i rozłączne podzbiory, których suma daje cały zbiór X .

§2.1 Porządki

Definicja 2.9. Porządek (częściowy) to relacja $\mathcal{R} = (X, \text{gr}\mathcal{R}, X)$, która jest zwrotna, przechodnia i antysymetryczna. Zbiór X nazywamy zbiorem (częściowo) uporządkowanym.

Definicja 2.10. Porządek liniowy (totalny) to porządek, który jest spójny.

Niech (X, \preceq) będzie zbiorem z porządkiem częściowym. Wtedy **element największy** $\overline{M} \in X$ zbioru X to taki element, że

$$\forall x \in X : x \preceq \overline{M},$$

a **element maksymalny** $M_{\max} \in X$ to taki element, że

$$\forall x \in X : (M_{\max} \preceq x) \Rightarrow (M_{\max} = x).$$

Uwaga 2.11. Analogicznie można zdefiniować **element najmniejszy** \bar{m} :

$$\forall x \in X : \bar{m} \preceq x$$

oraz **element minimalny** m_{\min} :

$$\forall x \in X : x \preceq m_{\min} \Rightarrow (x = m_{\min})$$

Twierdzenie 2.12

Niech (X, \preceq) będzie zbiorem z porządkiem częściowym. Jeśli w zbiorze X istnieje element największy, to jest on jedyny.

Dowód. Załóżmy przeciwnie, że istnieją dwa elementy największe M_1, M_2 . Z definicji zachodzi

$$M_1 \preceq M_2$$

oraz

$$M_2 \preceq M_1,$$

co jest sprzeczne z antysymetrycznością porządków. \square

Twierdzenie 2.13

Niech (X, \preceq) będzie zbiorem z porządkiem częściowym. Jeśli $M \in X$ jest elementem największym zbioru X , to jest on jedynym elementem maksymalnym tego zbioru.

Dowód. Skoro M jest elementem największym, to poprzednik implikacji w definicji elementu maksymalnego będzie prawdziwy tylko dla $x = M$, więc sama implikacja zawsze będzie prawdziwa. \square

Fakt 2.14. W zbiorach z porządkiem totalnym pojęcia elementu największego i maksymalnego oraz najmniejszego i minimalnego są tożsame ze sobą. Wynika to ze spójności porządków totalnych.

Niech (X, \preceq) będzie zbiorem uporządkowanym, a zbiór $A \subset X$ jego podzbiorem. Element $M \in X$ jest **majorantą** (ograniczeniem górnym) zbioru A jeśli

$$\forall x \in A : x \preceq M.$$

Kresem górnym (supremum) zbioru A (w zbiorze X) jest element najmniejszy zbioru majorant. Oznaczamy go symbolem

$$\sup A.$$

Uwaga 2.15. Analogicznie można zdefiniować **minorantę** (ograniczenie dolne) $m \in X$ zbioru $A \subset X$:

$$\forall x \in A : m \preceq x$$

oraz **kres dolny** (infimum) tego zbioru (jest nim element największy zbioru minorant), który oznaczamy symbolem

$$\inf A.$$

Twierdzenie 2.16

Niech (X, \preceq) będzie zbiorem z porządkiem częściowym oraz $A \subset X$. Jeśli A ma element największy, to jest on również supremum tego zbioru.

Dowód. Z definicji majoranty wynika, że element największy zbioru A jest również jego majorantą. Każda majoranta $M \in X$ zbioru A oczywiście jest „większa” niż dowolny element zbioru A (w tym również jego element największy \overline{M}), to znaczy

$$\forall M : \overline{M} \preceq M,$$

z czego wynika, że \overline{M} jest elementem najmniejszym zbioru majorant zbioru A , a więc supremum tego zbioru. \square

Wniosek 2.17

Jeśli zbiór częściowo uporządkowany X ma supremum, które nie należy do tego zbioru, to zbiór X nie ma elementu największego.

Dowód. Ponieważ dowolny zbiór (na mocy twierdzenia 2.12) ma co najwyżej jedno supremum, to gdyby zbiór X miał element największy, to na mocy twierdzenia 2.16 byłoby ono również supremum, które należy do zbioru X . \square

Przykład 2.18

Weźmy zbiór liniowo uporządkowany (\mathbb{R}, \leq) oraz jego podzbiór $A = [0, 1) \subset \mathbb{R}$. Zbiór majorant zbioru A to przedział $[1, \infty)$, a jego najmniejszy element (a zarazem supremum zbioru A) to liczba 1. Mamy więc

$$\sup A = 1.$$

Liczba 1 nie należy jednak do zbioru A , więc, na mocy wniosku 2.17, element największy (a z faktu 2.14 również maksymalny) nie istnieje.

Przykład 2.19

Weźmy zbiór częściowo uporządkowany (\mathbb{C}, \preceq) , gdzie zdefiniujemy

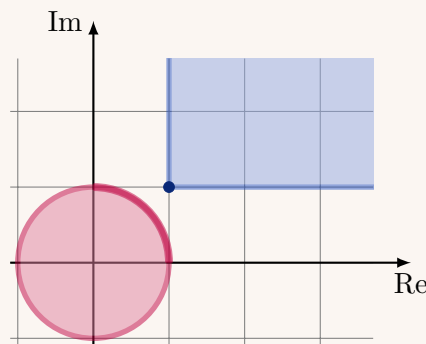
$$x \preceq y \Leftrightarrow \operatorname{Re} x \leq \operatorname{Re} y \wedge \operatorname{Im} x \leq \operatorname{Im} y.$$

Oczywiście niektóre elementy nie będą w tym porządku porównywalne, na przykład 1 oraz i .

Weźmy również podzbiór $A \subset \mathbb{C}$ taki, że

$$A = \{z : |z| \leq 1\}.$$

Na rysunku zaznaczono **zbiór A** , **zbiór majorant M zbioru A** , supremum zbioru A oraz **zbiór elementów maksymalnych** (jako ćwierćokrąg). Na mocy wniosku 2.17 element największy nie istnieje.



Definicja 2.20. Łańcuch to taki podzbiór $C \subset X$, że (X, \preceq) jest zbiorem z porządkiem częściowym, a (C, \preceq) jest zbiorem z porządkiem liniowym.

Definicja 2.21. Silny porządek to relacja, która jest przechodnia i asymetryczna. Silnie uporządkowany zbiór X oznaczamy przez $(X, <)$.

§3 Struktury algebraiczne

Działaniem (wewnętrznym) w zbiorze A nazwiemy każde odwzorowanie h takie, że

$$h : A \times A \rightarrow A.$$

Działaniem zewnętrznym w zbiorze A jest odwzorowanie

$$h : F \times A \rightarrow A.$$

Jeśli zamiast h weźmiemy jakiś symbol, na przykład \circ , to zamiast $h(a, b)$ będziemy pisać $a \circ b$.

Definicja 3.1 (rodzaje działań). W zbiorze z działaniem (A, \circ) działanie \circ jest:

- **łączne** $\Leftrightarrow \forall x, y, z \in A : (x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z)$,
- **przemienne** $\Leftrightarrow \forall x, y \in A : x \circ y = y \circ x$.

Jeśli dla pewnego elementu $e \in A$ zachodzi

$$\forall x \in A : x \circ e = e \circ x = x,$$

to e jest **elementem neutralnym**.

Fakt 3.2. Jeżeli w zbiorze A z działaniem \circ istnieje element neutralny, to jest on jedyny.

Dowód. Jeśli mielibyśmy dwa elementy neutralne e_1, e_2 to mamy

$$e_1 \circ e_2 = e_1 = e_2.$$

□

Jeżeli istnieje element neutralny $e \in A$ działania \circ , to **elementem symetrycznym** do $x \in A$ jest taki element $x' \in A$, że

$$x \circ x' = e = x' \circ x.$$

Lemat 3.3

Jeśli działanie \circ jest łączne w zbiorze A i istnieje element neutralny $e \in A$, to jeśli dany element $x \in A$ ma element symetryczny, to jest on jedyny oraz zachodzi $(x')' = x$.

Dowód. Jeśli mielibyśmy dwa elementy symetryczne x'_1, x'_2 , to mamy

$$x'_1 = x'_1 \circ e = x'_1 \circ (x \circ x'_2) = (x'_1 \circ x) \circ x'_2 = e \circ x'_2 = x'_2.$$

Ponadto z definicji elementu symetrycznego mamy

$$x' \circ x = e$$

oraz

$$x' \circ (x')' = e,$$

a więc x jest elementem symetrycznym x' , ergo $(x')' = x$.

□

§3.1 Grupy

Definicja 3.4. Grupa to para (A, \circ) , gdzie A jest zbiorem, a działanie \circ jest:

1. wewnętrzne,
2. łączne,
3. ma element neutralny,
4. a każdy element $x \in A$ ma element symetryczny.

Definicja 3.5. Grupa abelowa (przemienna) to grupa, w której działanie \circ jest przemienne.

Przykład 3.6

Przykłady grup:

1. $(\mathbb{Z}, +)$ – grupa abelowa,
2. $(\mathbb{Z}_n, +_n)$ – grupa abelowa^a,
3. (\mathbb{Q}_+, \cdot) – grupa abelowa,
4. grupą nieabelową jest grupa obrotów danego obiektu o 90° względem dowolnej z trzech osi.

^agdzie \mathbb{Z}_n oznacza zbiór $\{0, 1, \dots, n-1\}$, a $+_n$ operację dodawania modulo n

Twierdzenie 3.7

$(\mathbb{Z}_n \setminus \{0\}, \cdot_n)$ jest grupą wtedy i tylko wtedy, gdy $n \geq 2$ jest liczbą pierwszą.

Łatwo sprawdzić, że mnożenie modulo n w zbiorze $\mathbb{Z}_n \setminus \{0\}$ jest wewnętrzne i łączne. Ma również element neutralny 1. Będziemy więc dowodzić jedynie istnienia elementu symetrycznego dla każdego elementu.

Dowód wystarczalności. Załóżmy przeciwnie, że istnieje $k \in \mathbb{Z}_n \setminus \{0, 1\}$ takie, że $k \mid n$. Skoro $(\mathbb{Z}_n \setminus \{0\}, \cdot_n)$ jest grupą, to k ma element symetryczny k^{-1} . Zachodzi więc

$$kk^{-1} \equiv 1 \pmod{n},$$

czyli inaczej

$$\exists m \in \mathbb{Z} : kk^{-1} - 1 = mn.$$

Co jednak prowadzi do sprzeczności, ponieważ

$$kk^{-1} - 1 \not\equiv mn \pmod{k}$$

$$-1 \not\equiv 0 \pmod{k}.$$

Dowód dostateczności. Skoro n jest liczbą pierwszą, to z małego twierdzenia Fermata mamy

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

dla każdego $a \in \mathbb{Z}_n \setminus \{0\}$. Z tego wynika, że dla dowolnego elementu a jego elementem symetrycznym będzie a^{n-2} . \square

§3.2 Pierścień i ciało

Definicja 3.8. Pierścień to trójka $(P, \circ, *)$, gdzie P jest zbiorem, $\circ, *$ to działania wewnętrzne oraz

1. (P, \circ) jest grupą abelową
2. działanie $*$ jest łączne
3. działanie $*$ jest rozdzielne względem \circ , czyli

$$\forall x, y, z \in P : \begin{aligned} (x \circ y) * z &= (x * z) \circ (y * z), \\ x * (y \circ z) &= (x * y) \circ (x * z). \end{aligned}$$

Definicja 3.9. Pierścień przemienny to pierścień $(P, \circ, *)$, w którym $*$ jest działaniem przemiennym¹.

Pierwsze działanie w pierścieniu nazywamy **działaniem addytywnym** i oznaczamy przez $+$. Element neutralny tego działania nazywamy zerem ($\mathbf{0}$), a element symetryczny do elementu x nazywamy elementem przeciwnym i oznaczamy $-x$.

Drugie działanie nazywamy **działaniem multiplikatywnym** i oznaczamy przez \cdot . Jeśli w P dodatkowo istnieje element neutralny tego działania, to ten element nazywamy jedyneką ($\mathbf{1}$), a pierścień nazywamy **pierścieniem z jedyneką**. Element symetryczny do elementu x nazywamy elementem odwrotnym i oznaczamy x^{-1} .

¹wtedy też rozdzielność prawo- i lewostronna stają się tożsame

Definicja 3.10. Dzielnikiem zera jest taki element pierścienia $a \neq 0$, że istnieje niezerowy element b , dla którego zachodzi $a \cdot b = 0$.

Definicja 3.11. Pierścień całkowity to pierścień z jedyneką, w którym nie ma dzielników zera.

Lemat 3.12

W pierścieniach całkowitych zachodzi **własność skracania**, to znaczy, że dla elementów pierścienia a, b, c przy $c \neq 0$ zachodzi

$$ac = bc \Rightarrow a = b.$$

Dowód. Jeśli $ac = bc$, to $ac - bc = 0$. Z rozdzielności dostajemy

$$(a - b)c = 0.$$

W pierścieniu całkowitym nie ma jednak dzielników zera, więc $a - b = 0$, co dowodzi tezy. \square

Definicja 3.13. Ciało to pierścień z jedyneką, w którym dla każdego elementu $x \neq 0$ istnieje element odwrotny x^{-1} .

Ciałem przemennym będzie ciało, w którym działanie \cdot jest przemienne. Niektórzy autorzy utożsamiają pojęcie ciała z ciałem przemennym.

Można zauważyć, że struktura $(K, +, \cdot)$ jest ciałem (przemennym) jeżeli:

1. $(K, +)$ jest grupą abelową,
2. $(K \setminus \{0\}, \cdot)$ jest grupą (przemenną),
3. zachodzi warunek rozdzielności \cdot względem $+$.

Lemat 3.14

Dla każdego elementu ciała a zachodzi $a \cdot 0 = 0$.

Dowód.

$$\begin{aligned} a \cdot 0 &= a \cdot (0 + 0) \\ a \cdot 0 &= a \cdot 0 + a \cdot 0 \\ a \cdot 0 + -a \cdot 0 &= a \cdot 0 + a \cdot 0 + -a \cdot 0 \\ 0 &= a \cdot 0 + 0 \\ 0 &= a \cdot 0 \end{aligned}$$

\square

Twierdzenie 3.15

Każde ciało jest pierścieniem całkowitym.

Dowód. Załóżmy przeciwnie, że istnieją dzielniki zera, czyli takie dwa elementy ciała x, y , że $x, y \neq \mathbf{0}$ oraz $x \cdot y = \mathbf{0}$. Mamy

$$\begin{aligned}x \cdot y &= \mathbf{0} \\x^{-1} \cdot x \cdot y &= x^{-1} \cdot \mathbf{0} \\y &= x^{-1} \cdot \mathbf{0},\end{aligned}$$

co, na mocy lematu 3.14, jest sprzecznością z założeniem. \square

Twierdzenie 3.16

Każdy skończony pierścień całkowity jest ciałem.

Dowód. Załóżmy przeciwnie, że istnieje element pierścienia $a \neq \mathbf{0}$, który nie ma elementu odwrotnego. Rozważmy iloczyny aa_1, aa_2, aa_3, \dots elementu a ze wszystkimi innymi elementami pierścienia (w tym z $\mathbf{1}$). Z założenia nie ma wśród nich jedynki, więc, skoro \cdot jest działaniem wewnętrznym, to z zasady szufladkowej istnieją takie $a_k \neq a_l$, że $aa_k = aa_l$. To stwierdzenie jest jednak sprzecznością na mocy lematu 3.12, ponieważ rozważamy pierścienie całkowite, w których nie ma dzielników zera. \square

Przykład 3.17

Przykłady pierścieni i ciał:

- $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ – pierścień całkowity, który nie jest ciałem (nie ma dzielników zera, ale często elementy odwrotne nie zawierają się w zbiorze \mathbb{Z}),
- $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ – ciało liczb wymiernych,
- $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ – ciało liczb rzeczywistych,
- $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ – ciało liczb zespolonych,
- $(\mathbb{Z}_n, +_n, \cdot_n)$ – pierścień przemienny z jedynką.

Wniosek 3.18 (z twierdzenia 3.7)

Pierścień $(\mathbb{Z}_n, +_n, \cdot_n)$ jest ciałem wtedy i tylko wtedy, gdy n jest liczbą pierwszą.

§3.3 Morfizmy

Definicja 3.19. Homomorfizmem grupy $(A_1, +)$ w grupę (A_2, \oplus) jest takie odwzorowanie $h : A_1 \rightarrow A_2$, że

$$\forall x, y \in A_1 : h(x + y) = h(x) \oplus h(y).$$

Fakt 3.20. Jeśli $h : A_1 \rightarrow A_2$ jest homomorfizmem grupy $(A_1, +)$ w (A_2, \oplus) , to

1. $e \in A_1$ jest elementem neutralnym w $(A_1, +) \implies h(e) \in A_2$ jest elementem neutralnym w (A_2, \oplus) ,
2. $\forall x \in A_1 : h(x') = h(x)'$.

Definicja 3.21. Izomorfizm między grupami $(A_1, +), (A_2, \oplus)$ jest homomorfizmem bi-jektywnym. Jeśli taki izomorfizm istnieje, to dwie grupy nazywamy izomorficznymi.

Definicja 3.22. Automorfizm to izomorfizm struktury na samą siebie.

Analogicznie definiujemy morfizmy między pierścieniami i ciałami (wtedy równość z definicji 3.19 musi zachodzić dla obydwu działań).

Przykład 3.23

Przykłady morfizmów:

- $h(x) = x^2$ jest homomorfizmem grupy $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$ w (\mathbb{R}_+, \cdot) ,
- $h(x) = e^x$ jest izomorfizmem grupy $(\mathbb{R}, +)$ w (\mathbb{R}_+, \cdot) , ponieważ

$$h(x + y) = e^{x+y} = e^x \cdot e^y = h(x) \cdot g(y),$$

- $h(z) = \bar{z}$ jest automorfizmem grupy $(\mathbb{C}, +)$.

Na podobnej zasadzie jak w przykładzie drugim, można pokazać izomorfizm grupy $(\mathbb{Z}_n, +_n)$ z grupą pierwiastków n -tego stopnia z jedności względem mnożenia $(\mu_n(\mathbb{C}), \cdot)$. Biorąc funkcję $h(x) = \cos(\frac{2\pi}{n}x) + i \sin(\frac{2\pi}{n}x)$, mamy

$$\begin{aligned} h(x + y) &= \cos(\frac{2\pi}{n}(x + y)) + i \sin(\frac{2\pi}{n}(x + y)) \\ &= (\cos(\frac{2\pi}{n}x) + i \sin(\frac{2\pi}{n}x)) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{n}y) + i \sin(\frac{2\pi}{n}y)) = h(x) \cdot h(y) \end{aligned}$$

§3.4 Przestrzenie wektorowe

Definicja 3.24. Przestrzeń wektorowa (liniowa) nad ciałem (K, \oplus, \otimes) to struktura $(V, K, +, \cdot)$, gdzie

1. $(V, +)$ jest grupą abelową,
2. działanie $\cdot : K \times V \rightarrow V$ jest zewnętrzne
3. działanie \cdot jest rozdzielne względem działania $+$, to znaczy

$$\forall_{u,v \in V} \quad \forall_{\alpha \in K} \quad \alpha \cdot (u + v) = (\alpha \cdot u) + (\alpha \cdot v),$$

4. zachodzi „rozdzielność” działania \cdot względem $+$ i \oplus , to znaczy

$$\forall_{v \in V} \quad \forall_{\alpha, \beta \in K} \quad (\alpha \oplus \beta) \cdot v = (\alpha \cdot v) + (\beta \cdot v),$$

5. zachodzi „łączność” działań \cdot i \otimes , to znaczy

$$\forall_{v \in V} \quad \forall_{\alpha, \beta \in K} \quad (\alpha \otimes \beta) \cdot v = \alpha \cdot (\beta \cdot v),$$

6. jedynka z ciała (K, \oplus, \otimes) jest elementem neutralnym również dla działania \cdot , to znaczy

$$\forall_{v \in V} \quad \mathbf{1} \cdot v = v.$$

Elementy zbioru V nazywamy **wektorami**, a zbioru K – **skalarami**. Często zamiast przestrzeni $(V, K, +, \cdot)$ piszemy o przestrzeni V , a zamiast symboli \oplus, \otimes piszemy po prostu $+, \cdot$. Element neutralny dodawania wektorów to wektor zerowy $\vec{0}$.

Przykład 3.25

Przestrzenią wektorową nad ciałem liczb rzeczywistych jest struktura $(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}, +, \cdot)$, często oznaczana jako $\mathbb{R}^n(\mathbb{R})$, gdzie

- $(x_1, x_2, \dots, x_n) + (y_1, y_2, \dots, y_n) = (x_1 + y_1, \dots, x_n + y_n)$,
- $\alpha \cdot (x_1, x_2, \dots, x_n) = (\alpha x_1, \alpha x_2, \dots, \alpha x_n)$.

Przykład 3.26

Jeśli przez $\mathbb{R}[x]_n$ oznaczymy zbiór wielomianów rzeczywistych o stopniu równym co najwyżej n , to struktura

$$(\mathbb{R}[x]_n, \mathbb{R}, +, \cdot)$$

będzie przestrzenią liniową.

Twierdzenie 3.27

W przestrzeni liniowej $(V, K, +, \cdot)$ dla każdych $u, v \in V$ oraz $\alpha, \beta \in K$ zachodzą następujące własności:

1. $\mathbf{0} \cdot v = \bar{0}$,
2. $\alpha \cdot \bar{0} = \bar{0}$,
3. $(-\alpha) \cdot v = -(\alpha \cdot v)$,
4. $\alpha \cdot (-v) = -(\alpha \cdot v)$,
5. $\alpha \cdot v = \bar{0} \Leftrightarrow (\alpha = \mathbf{0} \vee v = \bar{0})$,
6. $\alpha \cdot u = \alpha \cdot v \Rightarrow u = v$, dla $\alpha \neq \mathbf{0}$,
7. $\alpha \cdot v = \beta \cdot v \Rightarrow \alpha = \beta$, dla $v \neq \bar{0}$.

Dowód. W dowodach wszystkich własności posługujemy się wyłącznie definicją przestrzeni wektorowej (3.24), wektora zerowego oraz poprzednimi w kolejności udowodnionymi własnościami.

1. $v + \mathbf{0} \cdot v = \mathbf{1} \cdot v + \mathbf{0} \cdot v = (\mathbf{1} + \mathbf{0}) \cdot v = v = v + \bar{0}$
 $\therefore \mathbf{0} \cdot v = \bar{0}$
2. $\alpha \cdot \bar{0} = \alpha \cdot (\bar{0} + \bar{0}) = \alpha \cdot \bar{0} + \alpha \cdot \bar{0}$
 $\therefore \bar{0} = \alpha \cdot \bar{0}$
3. $\bar{0} = \alpha \cdot v - (\alpha \cdot v)$ oraz $\bar{0} = \mathbf{0} \cdot v = (\alpha - \alpha) \cdot v = \alpha \cdot v + (-\alpha) \cdot v$
 $\therefore -(\alpha \cdot v) = (-\alpha) \cdot v$
4. $\bar{0} = \alpha \cdot v - (\alpha \cdot v)$ oraz $\bar{0} = \alpha \cdot \bar{0} = \alpha \cdot (v - v) = \alpha \cdot v + \alpha \cdot (-v)$
 $\therefore -(\alpha \cdot v) = \alpha \cdot (-v)$
5. implikacja \Leftarrow (konieczność) trywialna; implikacja \Rightarrow (dostateczność) wynika z tego, że jeśli założymy, że $\alpha \neq \mathbf{0}, v \neq \bar{0}$, to mamy

$$\alpha \cdot (u + v) = \alpha \cdot u + \alpha \cdot v = \alpha \cdot u.$$

Mnożąc przez α^{-1} (które istnieje, bo $(K, +, \cdot)$ jest ciałem) otrzymujemy

$$u + v = u,$$

a dodając obustronnie $-u$ (które istnieje z definicji 3.24) dochodzimy do sprzeczności z założeniem

$$v = \bar{0}.$$

6. dowód analogiczny do dowodu lematu 3.12,
7. dowód analogiczny do dowodu lematu 3.12.

□

Definicja 3.28. Podprzestrzeń liniowa $(U, K, +, \cdot)$ to taka struktura, że

1. $(V, K, +, \cdot)$ jest przestrzenią liniową oraz $U \subset V, U \neq \emptyset$,
2. $\forall_{u,v \in U} (u + v) \in U$,
3. $\forall_{\alpha \in K} \forall_{u \in U} (\alpha \cdot u) \in U$.

Fakt 3.29 (Równoważna charakterystyka podprzestrzeni). Dwa ostatnie warunki z powyższej definicji są równoważne warunkowi:

$$\forall_{\alpha, \beta \in K} \forall_{u, v \in V} \alpha \cdot u + \beta \cdot v \in U.$$

Dowód. Implikacja w jedną stronę jest trywialna, w drugą stronę można ją udowodnić przez stwierdzenie, że każdy wektor ma wektor przeciwny (bo z definicji 3.24 $(V, +)$ jest grupą abelową) oraz że pod α, β można podstawić $\mathbf{1}$ (i znowu użyć definicji 3.24). □

Definicja 3.30. Kombinacja liniowa wektorów v_1, v_2, \dots, v_n to wektor

$$\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_n v_n,$$

gdzie skalary $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ nazywamy współczynnikami tej kombinacji.

Definicja 3.31. Wektory v_1, v_2, \dots, v_n są liniowo niezależne, jeśli dla każdego ciągu współczynników α zachodzi implikacja

$$\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_n v_n = \bar{0} \Rightarrow \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n = 0.$$

Mówimy również, że wektory są liniowo zależne, jeśli nie są liniowo niezależne.

Przykład 3.32

W przestrzeni wektorowej $\mathbb{R}^3(\mathbb{R})$ weźmy wektory

$$u = (3, 2, -1), v = (1, -2, 1), w = (1, 1, 1).$$

Rozwiązujemy układ równań $\alpha u + \beta v + \gamma w = \bar{0} \Rightarrow$

$$\begin{cases} 3\alpha + \beta + \gamma = 0 \\ 2\alpha - 2\beta + \gamma = 0 \\ -\alpha + \beta + \gamma = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 4\alpha = 0 \\ 2\alpha - 2\beta + \gamma = 0 \\ -\alpha + \beta + \gamma = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = 0 \\ -2\beta + \gamma = 0 \\ \beta + \gamma = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = 0 \\ \gamma = 0 \end{cases}$$

pokazując, że wektory u, v, w są liniowo niezależne.

Twierdzenie 3.33

Wektory v_1, \dots, v_n są liniowo zależne wtedy i tylko wtedy, gdy przynajmniej jeden jest kombinacją liniową pozostałych.

Dowód. Jeśli istnieje taki ciąg $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, że $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\} \neq \{0\}$ oraz

$$\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_n v_n = \bar{0},$$

to bez straty ogólności możemy przyjąć, że $\alpha_n \neq 0$. Równoważnie przekształcamy równość do postaci

$$\begin{aligned} \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_{n-1} v_{n-1} &= -\alpha_n v_n \\ \frac{-\alpha_1}{\alpha_n} v_1 + \frac{-\alpha_2}{\alpha_n} v_2 + \dots + \frac{-\alpha_{n-1}}{\alpha_n} v_{n-1} &= v_n, \end{aligned}$$

więc otrzymujemy równoważność między założeniem i stwierdzeniem, że v_n jest kombinacją liniową wektorów $\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$. \square

Twierdzenie 3.34

Jeśli wektory v_1, v_2, \dots, v_n są liniowo niezależne oraz wektor u jest kombinacją liniową tych wektorów, to współczynniki tej kombinacji są wyznaczone jednoznacznie.

Dowód. Weźmy takie ciągi (α_n) i (β_n) , że

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_n v_n \\ u &= \beta_1 v_1 + \beta_2 v_2 + \dots + \beta_n v_n \end{aligned}$$

Mamy

$$u - u = \bar{0} = (\alpha_1 - \beta_1) v_1 + (\alpha_2 - \beta_2) v_2 + \dots + (\alpha_n - \beta_n) v_n$$

co, skoro v_1, v_2, \dots, v_n są liniowo niezależne, dowodzi, że dla każdego i zachodzi $\alpha_i - \beta_i = 0$, więc ciągi (α_n) i (β_n) są równe. \square

Definicja 3.35. Powłoka liniowa zbioru $A \subset V, A \neq \emptyset$, gdzie V jest przestrzenią wektorową nad ciałem K to zbiór

$$\text{Lin } A = \{v = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_k v_k : \alpha_i \in K, v_i \in A\}$$

$\text{Lin } A$ jest podprzestrzenią przestrzeni A nazywaną podprzestrzenią generowaną przez zbiór A . Dla danego zbioru A mówimy, że **rozpin**a on przestrzeń wektorową V , jeśli $\text{Lin } A = V$.

Definicja 3.36. Baza B przestrzeni wektorowej V to taki zbiór, że $\text{Lin } B = V$ oraz wszystkie wektory w B są liniowo niezależne.

B jest bazą danej przestrzeni liniowej wtedy i tylko wtedy, gdy B jest maksymalnym (w sensie inkluzji) zbiorem wektorów liniowo niezależnych oraz wtedy i tylko wtedy, gdy B jest minimalnym (w sensie inkluzji) zbiorem wektorów rozpinających. Przestrzeń $\{\bar{0}\}$ nie ma bazy.

Twierdzenie 3.37

Każde dwie bazy danej przestrzeni wektorowej są równoliczne.

Dowód. Weźmy dwie bazy A, B przestrzeni liniowej V oraz niech $|A| = k$. Załóżmy przeciwnie, że $|B| > k, B = \{b_1, b_2, \dots, b_k, \dots\}$. Skoro A jest bazą przestrzeni V , to każdy wektor ze zbioru B jest kombinacją liniową wektorów ze zbioru A , czyli

$$b_1 = \alpha_1 a_1 + \alpha_2 a_2 + \dots + \alpha_k a_k.$$

Bez straty ogólności możemy założyć, że $\alpha_1 \neq 0$ (ponieważ wszystkie nie mogą być zerowe). Wtedy

$$a_1 = \frac{1}{\alpha_1} b_1 + \frac{-\alpha_2}{\alpha_1} a_2 + \dots + \frac{-\alpha_k}{\alpha_1} a_k,$$

a więc a_1 jest kombinacją liniową wektorów ze zbioru $A \cup \{b_1\} \setminus \{a_1\}$. Wektory z tego zbioru oczywiście rozpinają całą przestrzeń liniową V oraz są liniowo niezależne (wszystkie a_2, a_3, \dots, a_k są liniowo niezależne, a b_1 jest liniowo niezależny od nich, ponieważ założyliśmy, że $\alpha_1 \neq 0$). Z tego powodu zbiór $A \cup \{b_1\} \setminus \{a_1\}$ jest bazą. Kontynuujemy rozumowanie, pokazując, że zbiór

$$A \cup \{b_1, b_2, \dots, b_k\} \setminus \{a_1, a_2, \dots, a_k\} = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$$

jest bazą. Z tego powodu każdy wektor b_{k+1}, b_{k+2}, \dots jest liniowo zależny od $\{b_1, \dots, b_k\}$, więc dochodzimy do sprzeczności z założeniem, że B jest bazą. \square

Definicja 3.38. Wymiar $\dim V$ przestrzeni wektorowej V to liczność bazy tej przestrzeni. Jeśli $V = \{\vec{0}\}$, to $\dim V = 0$.

Przykład 3.39

Przestrzeń $(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}, +, \cdot)$ jest przestrzenią skończenie wymiarową z

$$\dim \mathbb{R}^n = n,$$

natomiast $(\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R}), \mathbb{R}, +, \cdot)$ jest przestrzenią nieskończenie wymiarową, więc

$$\dim(\mathcal{F}(\mathbb{R}, \mathbb{R})) = \infty.$$

Definicja 3.40. Reper bazowy to baza, w której ustaliliśmy kolejność wektorów.

Jeśli $B = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ jest reperem bazowym przestrzeni wektorowej V , to dla dowolnego wektora

$$v = \alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2 + \dots + \alpha_n e_n$$

skalary α_i nazwiemy **współrzednymi** wektora v w bazie B i zapiszemy

$$v = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]_B.$$

Definicja 3.41. Baza kanoniczna to reper bazowy przestrzeni $\mathbb{R}^n(\mathbb{R})$, w którym

$$B_k = ((1, 0, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, \dots, 0), (0, 0, 0, \dots, 1)).$$

Łatwo uzasadnić, że jeśli $\dim V = n$, to każdy zbiór $n + 1$ wektorów jest liniowo zależny, a każdy zbiór n wektorów jest liniowo niezależny wtedy i tylko wtedy, gdy generuje przestrzeń V .

Twierdzenie 3.42

Niech V będzie przestrzenią skończenie wymiarową, a U jej podprzestrzenią. Wówczas

$$\dim U = \dim V \quad \Leftrightarrow \quad U = V.$$

Implikacja w lewą stronę jest trywialna, pokażemy implikację w prawo.

Dowód. Jeśli weźmiemy pewną bazę B przestrzeni U i zachodzi warunek $\dim U = \dim V$, to, zgodnie z tym co powiedzieliśmy wcześniej, jest ona również bazą przestrzeni V , ponieważ $U \subset V$, z czego wynika teza. \square

Przykład 3.43

Przykłady przestrzeni wektorowych wraz z wymiarami:

- dla $(\mathbb{K}^n, \mathbb{K}, +, \cdot)$ przy $\mathbb{K} = \mathbb{R}, \mathbb{C}, \dots$ mamy $\dim \mathbb{K}^n = n$,
- dla $(\mathbb{C}^n, \mathbb{R}, +, \cdot)$ mamy $\dim \mathbb{C}^n = 2n$.

Definicja 3.44. Suma podprzestrzeni V_1, V_2 przestrzeni V to zbiór

$$V_1 + V_2 = \{v = v_1 + v_2 : v_1 \in V_1, v_2 \in V_2\}.$$

Fakt 3.45. Jeśli V_1, V_2 są podprzestrzeniami przestrzeni V , to $V_1 \cap V_2$ jest podprzestrzenią przestrzeni V .

Uwaga 3.46. O ile $V_1 \cap V_2$ oraz $V_1 + V_2$ (z definicji) są przestrzeniami, o tyle już $V_1 \cup V_2$ na ogół nią nie jest, więc nie będziemy raczej używać tego zapisu.

Definicja 3.47. Suma prosta $V_1 \oplus V_2$ dwóch podprzestrzeni przestrzeni V to taka suma $V_1 + V_2$, że zachodzi warunek

$$\forall_{v \in V_1 + V_2} \quad \exists!_{v_1 \in V_1} \quad \exists!_{v_2 \in V_2} \quad v = v_1 + v_2.$$

Twierdzenie 3.48

Suma dwóch podprzestrzeni jest sumą prostą wtedy i tylko wtedy, gdy ich częścią wspólną jest zbiór $\{\bar{0}\}$.

Dowód. Jeśli część wspólna dwóch podprzestrzeni jest równa $\{\bar{0}\}$, to ich bazy są rozłączne, a więc teza wynika z twierdzenia 3.34. \square

Definicja 3.49. Przestrzeń uzupełniająca V_2 podprzestrzeni V_1 przestrzeni V to taka przestrzeń, że

$$V_1 \oplus V_2 = V.$$

Fakt 3.50. Dla każdej podprzestrzeni dowolnej przestrzeni istnieje przestrzeń uzupełniająca.

Twierdzenie 3.51

Dla skończone wymiarowych podprzestrzeni V_1, V_2 przestrzeni wektorowej V zachodzi

$$\dim(V_1 + V_2) = \dim V_1 + \dim V_2 - \dim(V_1 \cap V_2),$$

a w szczególności

$$V = V_1 \oplus V_2 \Rightarrow \dim V = \dim V_1 + \dim V_2.$$

Dowód. Możemy wziąć bazę B przestrzeni V oraz bazy B_1, B_2 odpowiednio podprzestrzeni V_1, V_2 takie, że $B_1, B_2 \subset B$. Oczywiście jest, że

$$|B_1 \cup B_2| = |B_1| + |B_2| - |B_1 \cap B_2|,$$

więc z definicji sumy podprzestrzeni (3.44) i twierdzenia 3.37 wynika teza. \square