

4. WYKŁAD 4: PIERŚCIEŃ WIELOMIANÓW.

Definicja 4.1. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem.

- (1) Element $x \in R$ taki, że

$$\exists y \in R \setminus \{0\} (x \cdot y = 0)$$

nazywamy **dzielnikiem zera**. Zbiór wszystkich dzielników zera oznaczamy $\mathcal{D}(R)$.

- (2) Element $x \in R$ taki, który nie jest dzielnikiem zera, nazywamy **elementem regularnym**.

Przykłady:

- (1) Rozważmy dowolny pierścień $(R, +, \cdot)$. Element 0 jest zawsze dzielnikiem zera, nazywamy go **niewłaściwym** dzielnikiem zera. Każdy inny dzielnik nazywać będziemy **właściwym** dzielnikiem zera.
- (2) Rozważmy pierścień $\mathbb{Z}_6$. Wówczas elementy 0, 2, 3, 4 są dzielnikami zera, a elementy 1, 5 są regularne.
- (3) Rozważmy pierścień $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$. Wówczas elementy $(1, 0)$ i $(0, 1)$ są dzielnikami zera.

Twierdzenie 4.2. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem, niech $x, y, z \in R$. Wówczas:

- (1) $x \cdot y = 0 \Rightarrow x \in \mathcal{D}(R) \vee y \in \mathcal{D}(R)$;
 (2) jeśli x jest regularny, to

$$x \cdot y = 0 \Rightarrow x = 0;$$

- (3) jeśli x jest regularny, to

$$x \cdot y = x \cdot z \Rightarrow y = z.$$

Przykład:

- (4) Rozważmy pierścień $\mathbb{Z}_6$. Wówczas $3 \cdot 2 = 3 \cdot 4$, ale $2 \neq 4$.

Definicja 4.3. Pierścień bez właściwych dzielników zera nazywamy **pierścieniem całkowitym** (lub dziedziną całkowitości).

Przykład:

- (5) Przykładami pierścieni całkowitych są $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Z}_5$, czy ogólnie $\mathbb{Z}_p$, gdzie p jest liczbą pierwszą.

Uwaga 4.4. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem. **Wielomianem** zmiennej x o współczynnikach w pierścieniu R będziemy nazywali wyrażenie o postaci

$$a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n,$$

gdzie $n \in \mathbb{N}$ oraz $a_0, \dots, a_n \in R$.

Dwa wielomiany uważamy za **równe** wtedy i tylko wtedy, gdy różnią się tylko o składniki postaci $0 \cdot x^i$, gdzie $i \in \mathbb{N}$.

Będziemy mówili, że wielomian $f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$ jest **stopnia** n , gdy $a_n \neq 0$. Umowa ta nie określa stopnia wielomianu 0, przyjmujemy więc dodatkowo, że stopniem wielomianu 0 jest $-\infty$. Stopień wielomianu f będziemy oznaczać przez $\deg(f)$.

Wielomiany stopnia 1 będziemy nazywać **liniowymi**, a wielomiany stopnia 2 **kwadratowymi**.

Dla wielomianu $f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$ współczynnik a_n nazywamy **najstarszym** (lub **największym**) współczynnikiem. Jeżeli najstarszy współczynnik równy jest 1, to wielomian f nazywamy **unormowanym**.

W zbiorze wszystkich wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R definiujemy dodawanie $+$ i mnożenie $\cdot$, kładąc dla dowolnych wielomianów $f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$ oraz $g = b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m$

$$f + g = \begin{cases} (a_0 + b_0) + (a_1 + b_1)x + \dots + (a_n + b_n)x^n + b_{n+1}x^{n+1} + \dots + b_mx^m, & \text{gdy } m > n, \\ (a_0 + b_0) + (a_1 + b_1)x + \dots + (a_n + b_n)x^n, & \text{gdy } m = n, \\ (a_0 + b_0) + (a_1 + b_1)x + \dots + (a_m + b_m)x^m + a_{m+1}x^{m+1} + \dots + a_nx^n, & \text{gdy } m < n, \end{cases}$$

$$f \cdot g = c_0 + c_1x + \dots + c_{n+m}x^{n+m},$$

gdzie

$$c_i = \sum_{k=0}^i a_{i-k}b_k,$$

dla $i \in \{0, \dots, n+m\}$. Ponadto wyróżniamy wielomian 0 jako element neutralny dodawania oraz wielomian 1 jako element neutralny mnożenia. Wówczas zbiór wszystkich wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R z tak określonymi działaniami i wyróżnionymi elementami jest pierścieniem przemiennym z jedynką. Pierścień ten będziemy nazywali **pierścieniem wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R** i będziemy oznaczali przez $R[x]$.

Uwaga 4.5. Przy liczeniu stopni wielomianów przyjmujemy następującą umowę notacyjną:

- $\forall n \in \mathbb{N}(n > -\infty)$,
- $(-\infty) + (-\infty) = -\infty$,
- $\forall n \in \mathbb{N}(-\infty + n = -\infty)$.

Uwaga 4.6. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem, $(R[x], +, \cdot)$ pierścieniem wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R . Niech ponadto

$$f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \in R[x] \text{ oraz } g = b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m \in R[x].$$

Wówczas:

- (1) $\deg(f + g) \leq \max\{\deg(f), \deg(g)\}$;
- (2) jeśli

$$\deg(f) \neq \deg(g),$$

to

$$\deg(f + g) = \max\{\deg(f), \deg(g)\};$$

- (3) $\deg(fg) \leq \deg(f) + \deg(g)$;
- (4) jeśli

$$f \neq 0 \wedge g \neq 0 \wedge (a_n \text{ jest regularny} \vee b_m \text{ jest regularny}),$$

to

$$\deg(fg) = \deg(f) + \deg(g);$$

- (5) jeśli

$$f \neq 0 \wedge g \neq 0 \wedge R \text{ jest pierścieniem całkowitym},$$

to

$$\deg(fg) = \deg(f) + \deg(g).$$

Dowód. (1) Niech $h = f + g = \sum_{k=0}^{\infty} c_k x^k$, przy czym $c_k = 0$ dla prawie wszystkich $k \in \mathbb{N}$. Ustalmy $k > \max\{n, m\} = \max\{\deg(f), \deg(g)\}$. Wówczas:

$$c_k = a_k + b_k = 0 + 0 = 0.$$

Wobec tego $\deg(f + g) \leq \max\{\deg(f), \deg(g)\}$.

(2) Oczywiste.

(3) Niech $h = f \cdot g = \sum_{k=0}^{\infty} c_k x^k$, przy czym $c_k = 0$ dla prawie wszystkich $k \in \mathbb{N}$. Ustalmy $k > n + m = \deg(f) + \deg(g)$. Mamy

$$c_k = \sum_{i=0}^k a_{k-i} b_i.$$

Jeżeli $i \in \{0, \dots, m\}$, to $k - i \in \{n + 1, \dots, k\}$, więc $a_{k-i} = 0$. Podobnie, jeżeli $i \in \{m + 1, \dots, k\}$, to $b_i = 0$. Zatem $c_k = 0$, a więc $\deg(fg) \leq \deg(f) + \deg(g)$.

(4) Niech $h = f \cdot g = \sum_{k=0}^{\infty} c_k x^k$, przy czym $c_k = 0$ dla prawie wszystkich $k \in \mathbb{N}$. Mamy

$$\begin{aligned} c_{n+m} &= \sum_{i=0}^{n+m} a_{n+m-i} b_i \\ &= \underbrace{a_{n+m}}_{=0} b_0 + \underbrace{a_{n+m-1}}_{=0} b_1 + \dots + a_n b_m + a_{n-1} \underbrace{b_{m+1}}_{=0} + \dots + a_0 \underbrace{b_{n+m}}_{=0} \\ &= a_n b_m. \end{aligned}$$

Ponieważ a_n lub b_m jest regularny, więc $c_{n+m} \neq 0$.

(5) Wynika wprost z (4). □

Wniosek 4.7. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem, $(R[x], +, \cdot)$ pierścieniem wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R . Niech ponadto

$$f = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n \in R[x].$$

Wówczas:

- (1) jeśli a_n jest regularny w R , to f jest regularny w $R[x]$;
- (2) każdy wielomian unormowany jest elementem regularnym w $R[x]$;
- (3) jeśli R jest całkowity, to $R[x]$ jest całkowity.

Twierdzenie 4.8 (o dzieleniu wielomianów z resztą). Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem, $(R[x], +, \cdot)$ pierścieniem wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R . Niech ponadto

$$f = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n \in R[x] \text{ oraz } g = b_0 + b_1 x + \dots + b_m x^m \in R[x].$$

Wówczas istnieją liczba $l \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ oraz wielomiany $q, r \in R[x]$ takie, że

$$a_n^l \cdot g = q \cdot f + r$$

oraz $\deg(r) < \deg(f)$.

Dowód. Jeżeli $\deg(g) = m < n = \deg(f)$, to kładziemy $l = 0$, $q = 0$, $r = g$.

Jeżeli $\deg(g) = m = n = \deg(f)$, to $l = 1$, $q = b_m$, $r = a_n g - b_m f$. Istotnie, zauważmy że wówczas $\deg(r) < n = \deg(f)$.

Jeżeli $\deg(g) = m > n = \deg(f)$, to dowód prowadzimy metodą indukcji względem $\deg(g) = m$. Załóżmy, że dla $m_1 \in \{n+1, \dots, m-1\}$ i dla wielomianów postaci

$$g_1 = b'_0 + b'_1x + \dots + b_{m'}x^{m'} \in R[x]$$

istnieją liczba $l_1 \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ oraz wielomiany $q_1, r_1 \in R[x]$ takie, że

$$a_n^{l_1} \cdot g_1 = q_1 \cdot f + r_1$$

oraz $\deg(r_1) < \deg(f)$. Połóżmy

$$g_1 = a_n g - b_m x^{m-n} f.$$

Wówczas

$$\deg(g_1) \in \{n+1, \dots, m-1\},$$

zatem istnieją liczba $l_1 \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ oraz wielomiany $q_1, r_1 \in R[x]$ takie, że

$$a_n^{l_1} \cdot g_1 = q_1 \cdot f + r_1 \text{ oraz } \deg(r_1) < \deg(f),$$

czyli

$$a_n^{l_1} \cdot (a_n g - b_m x^{m-n} f) = q_1 \cdot f + r_1 \text{ oraz } \deg(r_1) < \deg(f),$$

lub równoważnie

$$a_n^{l_1+1} g = (q_1 + a_n^{l_1} b_m x^{m-n}) \cdot f + r_1 \text{ oraz } \deg(r_1) < \deg(f).$$

Tym samym kładąc $l = l_1 + 1$, $q = q_1 + a_n^{l_1} b_m x^{m-n}$ oraz $r = r_1$ otrzymujemy tezę. $\square$

Wniosek 4.9. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem, $(R[x], +, \cdot)$ pierścieniem wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R . Niech ponadto

$$f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \in R[x] \text{ oraz } g = b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m \in R[x].$$

Wówczas:

- (1) jeśli $a_n = 1$, to istnieją wielomiany $q, r \in R[x]$ takie, że

$$g = q \cdot f + r$$

oraz $\deg(r) < \deg(f)$;

- (2) jeśli R jest ciałem, to istnieją wielomiany $q, r \in R[x]$ takie, że

$$g = q \cdot f + r$$

oraz $\deg(r) < \deg(f)$;

Dowód. (1) Oczywiście.

- (2) Jeżeli R jest ciałem, to istnieje element $a_n^{-1} \in R$, a więc taki, że $a_n^{-1}a_n = 1$. Wobec tego istnieją wielomiany $q_1, r_1 \in R[x]$ takie, że

$$g_1 = q_1 \cdot a_n^{-1} f + r_1$$

oraz $\deg(r_1) < \deg(a_n^{-1} f) = \deg(f)$. Zatem kładąc $q = q_1 a_n^{-1}$ oraz $r = r_1$ otrzymujemy tezę. $\square$

Twierdzenie 4.10 (o jednoznaczności dzielenia z resztą). Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem, $(R[x], +, \cdot)$ pierścieniem wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R . Niech ponadto

$$f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \in R[x] \text{ oraz } g = b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m \in R[x].$$

Jeśli a_n jest regularny, to istnieje co najwyżej jedna para takich wielomianów $q, r \in R[x]$, że

$$g = q \cdot f + r$$

oraz $\deg(r) < \deg(f)$.

Dowód. Niech

$$\begin{aligned} g &= q_1 \cdot f + r_1, \deg(r_1) < \deg f, q_1, r_1 \in R[x], \\ g &= q_2 \cdot f + r_2, \deg(r_2) < \deg f, q_2, r_2 \in R[x]. \end{aligned}$$

Stąd

$$0 = (q_1 - q_2)f + (r_1 - r_2),$$

lub równoważnie

$$r_2 - r_1 = (q_1 - q_2)f.$$

Wobec Uwagi 4.6:

$$\deg(f) > \max\{\deg(r_1), \deg(r_2)\} \geq \deg(r_2 - r_1) = \deg((q_1 - q_2)f) = \deg(q_1 - q_2) + \deg(f).$$

Tym samym $\deg(q_1 - q_2) = -\infty$, a więc $q_1 - q_2 = 0$, skąd też $r_2 = r_1$. $\square$

Wniosek 4.11. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem, $(R[x], +, \cdot)$ pierścieniem wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R . Niech ponadto

$$f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \in R[x] \text{ oraz } g = b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m \in R[x].$$

(1) Jeżeli R jest całkowity, to istnieje co najwyżej jedna para takich wielomianów $q, r \in R[x]$, że

$$g = q \cdot f + r$$

$$\text{oraz } \deg(r) < \deg(f).$$

(2) Jeżeli $a_n = 1$, to istnieje dokładnie jedna para takich wielomianów $q, r \in R[x]$, że

$$g = q \cdot f + r$$

$$\text{oraz } \deg(r) < \deg(f).$$

(3) Jeżeli R jest ciałem, to istnieje dokładnie jedna para takich wielomianów $q, r \in R[x]$, że

$$g = q \cdot f + r$$

$$\text{oraz } \deg(r) < \deg(f).$$

Definicja 4.12. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem, $(R[x], +, \cdot)$ pierścieniem wielomianów zmiennej x o współczynnikach z pierścienia R . Niech ponadto

$$f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \in R[x] \text{ oraz } g = b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m \in R[x].$$

Jeżeli istnieje dokładnie jedna para takich wielomianów $q, r \in R[x]$, że

$$g = q \cdot f + r$$

oraz $\deg(r) < \deg(f)$ to mówimy, że w pierścieniu $R[x]$ wykonalne jest **dzielenie z resztą** wielomianu g przez f . Wielomian q nazywamy wówczas **niepełnym ilorazem**, a wielomian r **resztą** z dzielenia.

Uwaga 4.13. Niech $(R, +, \cdot)$ będzie dowolnym pierścieniem. Wielomianem zmiennych $x_1, \dots, x_n$ o współczynnikach z pierścienia R będziemy nazywali wyrażenie postaci

$$\sum_{i_1, \dots, i_n \leq m} a_{i_1 \dots i_n} x_1^{i_1} \dots x_n^{i_n},$$

gdzie $m \in \mathbb{N}$, wskaźniki $i_1, \dots, i_n \in \mathbb{N}$ przebiegają wszystkie liczby nie większe niż m oraz $a_{i_1 \dots i_n} \in R$.

Dwa wielomiany uważamy za **równe**, gdy różnią się jedynie o składniki postaci $0 \cdot x_1^{i_1} \dots x_n^{i_n}$, gdzie $i_1, \dots, i_n \in \mathbb{N}$.

Będziemy mówili, że wielomian $f = \sum_{i_1, \dots, i_n \leq m} a_{i_1 \dots i_n} x_1^{i_1} \dots x_n^{i_n}$ jest **stopnia** r , gdy istnieje taki różny od zera współczynnik $a_{i_1 \dots i_n}$, że $i_1 + \dots + i_n = r$ i $a_{i_j \dots j_n} = 0$ o ile $j_1 + \dots + j_n > r$. Umowa ta nie określa stopnia wielomianu 0, przyjmujemy więc dodatkowo, że stopniem wielomianu 0 jest $-\infty$. Stopień wielomianu f będziemy oznaczać przez $\deg(f)$.

Wielomiany stopnia 1 będziemy nazywali **liniowymi**, a wielomiany stopnia 2 **kwadratowymi**.

Wielomian postaci $ax_1^{i_1} \dots x_n^{i_n}$, gdzie $a \in R$ oraz $i_1, \dots, i_n \in \mathbb{N}$ nazywamy **jednomianem**.

W zbiorze wszystkich wielomianów zmiennych $x_1, \dots, x_n$ o współczynnikach z pierścienia R definiujemy dodawanie $+$ i mnożenie $\cdot$, kładąc dla dowolnych wielomianów $f = \sum_{i_1, \dots, i_n \leq m} a_{i_1 \dots i_n} x_1^{i_1} \dots x_n^{i_n}$ oraz $g = \sum_{j_1, \dots, j_n \leq r} b_{j_1 \dots j_n} x_1^{j_1} \dots x_n^{j_n}$:

$$f + g = \sum_{k_1, \dots, k_n \leq \max\{m, r\}} c_{k_1 \dots k_n} x_1^{k_1} \dots x_n^{k_n},$$

gdzie

$$c_{k_1 \dots k_n} = \begin{cases} a_{k_1 \dots k_n} + b_{k_1 \dots k_n}, & \text{gdy } k_1, \dots, k_n \leq \max\{m, r\}, \\ a_{k_1 \dots k_n}, & \text{gdy, dla pewnego wskaźnika } k_i (i \in \{1, \dots, n\}), k_i > r, \text{ ale } k_1, \dots, k_n < m, \\ b_{k_1 \dots k_n}, & \text{gdy, dla pewnego wskaźnika } k_i (i \in \{1, \dots, n\}), k_i > m, \text{ ale } k_1, \dots, k_n < r, \end{cases}$$

oraz

$$f \cdot g = \sum_{k_1, \dots, k_n \leq m+r} c_{k_1 \dots k_n} x_1^{k_1} \dots x_n^{k_n},$$

gdzie

$$c_{k_1 \dots k_n} = \sum_{0 \leq l_1 \leq k_1, \dots, 0 \leq l_n \leq k_n} a_{k_1 - l_1, \dots, k_n - l_n} b_{l_1, \dots, l_n}.$$

Ponadto wyróżniamy wielomian 0 jako element neutralny dodawania oraz wielomian 1 jako element neutralny mnożenia. Wówczas zbiór wszystkich wielomianów zmiennych $x_1, \dots, x_n$ o współczynnikach z pierścienia R z tak określonymi działaniami i wyróżnionymi elementami jest pierścieniem przemienym z jedynką. Pierścień ten będziemy nazywali **pierścieniem wielomianów zmiennych** $x_1, \dots, x_n$ o współczynnikach z pierścienia R i będziemy oznaczali przez $R[x_1, \dots, x_n]$.