

# Prsten Gaussovih cijelih brojeva i primjene

---

**Novak, Iva**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:944862>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



# Prsten Gaussovih cijelih brojeva i primjene

---

**Novak, Iva**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:944862>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-20**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET**  
**MATEMATIČKI ODSJEK**

Iva Novak

**PRSTEN GAUSSOVIH CIJELIH  
BROJEVA I PRIMJENE**

Diplomski rad

Voditelj rada:  
prof. dr. sc. Goran Muić,  
dr. sc. Sonja Žunar

Zagreb, 2020.

Ovaj diplomski rad obranjen je dana \_\_\_\_\_ pred ispitnim povjerenstvom u sastavu:

1. \_\_\_\_\_, predsjednik
2. \_\_\_\_\_, član
3. \_\_\_\_\_, član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom \_\_\_\_\_.

Potpisi članova povjerenstva:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

# Sadržaj

<b>Sadržaj</b>	<b>iii</b>
<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Osnovni pojmovi</b>	<b>2</b>
<b>2 Prsten Gaussovih cijelih brojeva</b>	<b>5</b>
2.1 Norma . . . . .	5
2.2 Invertibilnost . . . . .	6
<b>3 Dijeljenje u <math>\mathbb{Z}[i]</math></b>	<b>8</b>
3.1 Djeljivost . . . . .	8
3.2 Dijeljenje s ostatkom . . . . .	10
3.3 Euklidov algoritam . . . . .	14
3.4 Bezoutov teorem . . . . .	18
<b>4 Faktorizacija</b>	<b>22</b>
4.1 Prosti Gaussovi cijeli brojevi . . . . .	22
4.2 Jedinstvenost faktorizacije . . . . .	24
<b>5 Primjena <math>\mathbb{Z}[i]</math> na aritmetiku u <math>\mathbb{Z}</math></b>	<b>27</b>
5.1 Prosti brojevi . . . . .	27
5.2 Primitivne Pitagorine trojke . . . . .	31
5.3 Cjelobrojna rješenja . . . . .	36
<b>Bibliografija</b>	<b>39</b>

# Uvod

U ovom diplomskom radu bavit ćemo se Gaussovima cijelim brojevima i primjenom istih u matematici. Johann Carl Friedrich Gauss bio je njemački matematičar i astronom čiji je rad u matematici vrlo cijenjen, a to se najviše može vidjeti u području algebre, teorije brojeva i diferencijalnoj geometriji.

Prsten Gaussovih cijelih brojeva, u oznaci  $\mathbb{Z}[i]$ , generalizacija je prstena cijelih brojeva  $\mathbb{Z}$  pa su kao takvi Gaussovi cijeli brojevi zadržali većinu svojstava cijelih brojeva. Konkretno rečeno, svaki element prstena  $\mathbb{Z}[i]$  ima jedinstven rastav na proste faktore. Također, prsten  $\mathbb{Z}[i]$  od velike je koristi za proučavanje sume dvaju kvadrata. To je zato što u  $\mathbb{Z}[i]$  možemo faktorizirati sumu dvaju kvadrata cijelih brojeva u linearne faktore, tj. za sve  $x, y \in \mathbb{Z}$  imamo  $x^2 + y^2 = (x - yi)(x + yi)$ .

U ovom diplomskom radu definirat ćemo Gaussove cijele brojeve i proučiti njihova svojstva. Govorit će se o njihovoj normi i invertibilnosti, a pomoću primjera vidjet će se njihova razlika u odnosu na cijele brojeve.

U drugom dijelu riječ će biti o dijeljenju (bez i s ostatkom) u  $\mathbb{Z}[i]$ , a u tu svrhu osvrnut ćemo se i na Euklidov algoritam te Bezoutov teorem.

U trećem dijelu govorit će se o faktorizaciji Gaussovih cijelih brojeva. Definirat će se prosti i složeni Gaussovi cijeli brojevi te će se iskazati i dokazati teorem o jedinstvenoj faktorizaciji.

Na kraju, dat će se nekoliko primjena  $\mathbb{Z}[i]$  na aritmetiku u  $\mathbb{Z}$ . Konkretno, promatrat ćemo proste brojeve u  $\mathbb{Z}$  te iskoristiti Gaussove cijele brojeve za dokazivanje tvrdnje da se prost broj u  $\mathbb{Z}$  može zapisati kao suma dvaju kvadrata najviše na jedan način. Govorit će se i o primjeni  $\mathbb{Z}[i]$  na klasifikaciju primitivnih Pitagorinih trojki te na određivanje cjelobrojnih rješenja jednadžbi  $a^2 + b^2 = c^3$  i  $y^2 + 1 = x^3$ .

# Poglavlje 1

## Osnovni pojmovi

U ovom poglavlju navodimo pojmove koji su važni za razumijevanje ovog rada.

**Definicija 1.0.1.** *Neprazan skup  $R = (R, +, \cdot)$  zovemo **prsten** ukoliko za operacije zbrajanja  $+$  :  $R \times R \rightarrow R$  i množenja  $\cdot$  :  $R \times R \rightarrow R$  vrijedi:*

- $(R, +)$  je komutativna grupa s neutralom  $0 = 0_R$
- $(R, \cdot)$  je polugrupa, odnosno množenje je asocijativno
- vrijedi distributivnost množenja prema zbrajanju:

$$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z, \quad \forall x, y, z \in R$$

$$(x + y) \cdot z = x \cdot z + y \cdot z, \quad \forall x, y, z \in R$$

Element  $0 = 0_R$ , neutral u grupi  $(R, +)$ , zovemo nula prstena  $R$ .  
Ako postoji jedinični element (jedinica)  $1 = 1_R \in R$  takav da je

$$1 \cdot x = x \cdot 1 = x, \quad \forall x \in R,$$

tada kažemo da je  $R$  **prsten s jedinicom**.

Prsten  $R$  je **komutativan prsten** ako je

$$x \cdot y = y \cdot x, \quad \forall x, y \in R,$$

inače govorimo o nekomutativnom prstenu.

**Definicija 1.0.2.** Skup  $S \subseteq R$ , gdje je  $R$  neki prsten, je **potprsten** od  $R$  ako je  $S = (S, +, \cdot)$  i sam prsten. Drugim riječima,  $S$  je potprsten od  $R$  ako vrijede sljedeća dva uvjeta:

- $(\forall x, y \in S): x - y \in S$  (tj.,  $(S, +)$  je grupa);
- $(\forall x, y \in S): x \cdot y \in S$  (tj.,  $(S, \cdot)$  je grupoid).

**Definicija 1.0.3.** Neka je  $R$  prsten. Element  $0 \neq \lambda \in R$  (tj.  $0 \neq \rho \in R$ ) takav da je

$$\lambda x = 0 \quad (\text{tj. } x\rho = 0), \quad \text{za neki } 0 \neq x \in R$$

zove se lijevi (tj. desni) djelitelj nule.

$R$  je **integralna domena (domena)**, ako nema ni lijevih ni desnih djelitelja nule.

U nastavku, neka je  $\mathcal{A}$  komutativan prsten s jedinicom.

**Definicija 1.0.4.** Prsten  $\mathcal{A}$  je **Euklidova domena** ako je integralna domena i ako postoji neka funkcija  $\lambda : \mathcal{A} \setminus 0 \rightarrow \mathbb{N}_0$  takva da za nju vrijedi:

Ako su elementi  $A, B \in \mathcal{A}$ , gdje je  $B \neq 0$ , onda postoje neki elementi  $C, D \in \mathcal{A}$  takvi da je  $A = BC + D$ , gdje je  $D = 0$  ili  $\lambda(D) < \lambda(B)$ .

**Napomena 1.0.5.** Ako je prsten  $\mathcal{A}$  Euklidova domena, postoji "konstruktivna metoda" traženja najvećeg zajedničkog djelitelja dvaju elementa  $a, b \in \mathcal{A}$ . Ta metoda je Euklidov algoritam.

**Definicija 1.0.6.** Za elemente  $x, y \in \mathcal{A}$ ,  $y \neq 0$ , kažemo da "y dijeli x", pišemo  $y \mid x$  ako

$$\exists c \in \mathcal{A} : x = yc.$$

Element  $c \in \mathcal{A}$  je **ireducibilan** ako je ispunjeno:

- $0 \neq c \notin \mathcal{A}^x$ ,
- Ako je  $c = ab$ , onda je ili  $a \in \mathcal{A}^x$  ili je  $b \in \mathcal{A}^x$ .

Odnosno, element je ireducibilan ako je nenul neinvertibilan element koji se ne može zapisati kao produkt dva neinvertibilna elementa.

**Napomena 1.0.7.**  $\mathcal{A}^x :=$  grupa invertibilnih elemenata u prstenu  $\mathcal{A}$ .

Element  $p \in \mathcal{A}$  je **prost** ako je ispunjeno:

- $0 \neq p \notin \mathcal{A}^x$ ,
- Ako  $p \mid ab$ , onda ili  $p \mid a$  ili  $p \mid b$ .



Odnosno, element je prost ako je nenul neinvertibilan element koji ima svojstvo da ako dijeli produkt dva elementa, onda on dijeli barem jedan od faktora.

**Definicija 1.0.8.** Kažemo da su elementi  $a, b \in \mathcal{A}$  *asocirani* i koristimo oznaku  $a \sim b$ , ako:

$$\exists u \in \mathcal{A}^\times : a = ub.$$

**Definicija 1.0.9.** Integralna domena  $\mathcal{A}$  je *faktorijalan prsten (faktorizacijski prsten, domena jedinstvene faktorizacije)* ako vrijedi:

- (Egzistencija rastava)  
Za svaki  $a \in \mathcal{A}$ ,  $0 \neq a \notin \mathcal{A}^\times$ , postoji rastav

$$a = c_1 \cdots c_n,$$

gdje su  $c_i \in \mathcal{A}$  ireducibilni elementi.

- (Jedinstvenost rastava)  
Ako imamo dva rastava  $a = c_1 \cdots c_n = e_1 \cdots e_m$ , onda je  $m = n$  i postoji neka permutacija  $\sigma \in S_n$  tako da je  $c_i \sim e_{\sigma(i)}$ .

Iz [3, Propozicija 3.8] slijedi sljedeća propozicija:

**Propozicija 1.0.10.** Neka je  $\mathcal{A}$  faktorijalan prsten. Tada je  $a \in \mathcal{A}$  ireducibilan ako i samo ako je prost.

Sve definicije i tvrdnje preuzete su iz [5].

## Poglavlje 2

# Prsten Gaussovih cijelih brojeva

Prsten Gaussovih cijelih brojeva je potprsten

$$\mathbb{Z}[i] = \{a + bi : a, b \in \mathbb{Z}\}$$

od  $\mathbb{C}$ , gdje je  $i = \sqrt{-1}$ .

Kao njegovu prvu prednost u odnosu na prsten  $\mathbb{Z}$  primijetimo sljedeće: polinom  $x^2 + y^2$  ne može se zapisati kao produkt linearnih polinoma s koeficijentima u  $\mathbb{Z}$ , ali može se zapisati kao produkt

$$x^2 + y^2 = (x - yi)(x + yi)$$

linearnih polinoma s koeficijentima u  $\mathbb{Z}[i]$ .

Pogledajmo na primjeru. Neka je zadan prirodan broj 5. Vrijedi:

$$5 = 2^2 + 1^2 = (2 + i)(2 - i).$$

Iz ove jednostavne činjenice proizlaze neke važne primjene prstena  $\mathbb{Z}[i]$  u teoriji brojeva, neke od kojih ćemo proučiti u ovom radu.

### 2.1 Norma

**Definicija 2.1.1.** Neka je  $\alpha = a + bi \in \mathbb{Z}[i]$ . Preslikavanje  $\mathcal{N} : \mathbb{Z}[i] \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\}$  zadano s

$$\mathcal{N}(\alpha) = \alpha\bar{\alpha} = (a + bi)(a - bi) = a^2 + b^2$$

nazivamo normom na  $\mathbb{Z}[i]$ .

Za tako definiranu funkciju vrijedi:

1.  $\mathcal{N}(\alpha) > 0, \forall \alpha \in \mathbb{Z}[i] \setminus \{0\}$ ,
2.  $\mathcal{N}(\alpha) = 0 \Leftrightarrow \alpha = 0$ .

Primjerice ako imamo  $\alpha = 3 + 8i$ , tada norma iznosi  $\mathcal{N}(3 + 8i) = 3^2 + 8^2 = 9 + 64 = 73$ . Općenito, za svaki  $m \in \mathbb{Z}$  je  $\mathcal{N}(m) = m^2$ . Posebno,  $\mathcal{N}(1) = 1$ .

Sljedeći teorem govori o svojstvu multiplikativnosti norme.

**Teorem 2.1.2.** *Za sve  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$  vrijedi:  $N(\alpha\beta) = N(\alpha)N(\beta)$ , odnosno, norma je multiplikativna.*

*Dokaz.* Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ .

Tada vrijedi:

$$N(\alpha\beta) = (\alpha\beta)\overline{(\alpha\beta)} = (\alpha\beta)(\overline{\alpha}\overline{\beta}) = (\alpha\overline{\alpha})(\beta\overline{\beta}) = N(\alpha)N(\beta).$$

□

Neka su  $\alpha = a + bi$ ,  $\beta = c + di \in \mathbb{Z}[i]$ . Prema teoremu 2.1.2. znamo da vrijedi:

$$N(\alpha\beta) = N(\alpha)N(\beta).$$

Uvrštavanjem  $\alpha$  i  $\beta$  u gornju jednakost i njezinim sređivanjem dobivamo

$$(ac - bd)^2 + (ad + bc)^2 = (a^2 + b^2)(c^2 + d^2).$$

Gornju jednakost nazivamo Diofantov identitet. Diofant<sup>1</sup> se bavio teorijom brojeva, posebice sumom dvaju kvadrata. Znao je da je produkt suma dvaju kvadrata opet suma dvaju kvadrata. Ovdje se može primijetiti da neka svojstva prstena  $\mathbb{Z}[i]$  imaju daleke korijene, jer ih je poznao Diofant koji je živio u 3. st. nove ere.

## 2.2 Invertibilnost

**Definicija 2.2.1.** *Element  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  zovemo invertibilnim elementom ako postoji  $\beta \in \mathbb{Z}[i]$  takav da vrijedi  $\alpha\beta = \beta\alpha = 1$ . Element  $\beta$  označavamo sa  $\alpha^{-1}$ , tj.  $\beta = \alpha^{-1}$ , i nazivamo ga multiplikativni inverz od  $\alpha$ .*

Važna primjena teorema 2.1.2., koji smo spomenuli u prethodnom poglavlju, je pri određivanju Gaussovih cijelih brojeva koji imaju multiplikativni inverz u  $\mathbb{Z}$ . Ideja je iskoristiti normu kako bi se odredili invertibilni elementi.

**Propozicija 2.2.2.**  *$\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  je invertibilan akko je  $N(\alpha) = 1$ .*

*Dokaz.* Neka je  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  invertibilni element. Prema definiciji 2.2.1. znamo da postoji  $\beta \in \mathbb{Z}[i]$  td. vrijedi  $\alpha\beta = 1$ . Uočimo da mora vrijediti da su  $\alpha \neq 0$  i  $\beta \neq 0$ .

Prema teoremu 2.1.2. imamo

$$N(\alpha)N(\beta) = N(\alpha\beta) = N(1) = 1$$

---

<sup>1</sup>Diofant (3. st. n. e.) - starogrčki matematičar

i  $\mathcal{N}(\alpha), \mathcal{N}(\beta) \in \mathbb{N}$  pa slijedi da je

$$\mathcal{N}(\alpha) = \mathcal{N}(\beta) = 1.$$

Obratno, pretpostavimo da je  $\mathcal{N}(\alpha) = 1$ . Tada vrijedi da je  $\alpha\bar{\alpha} = 1$ . Sada slijedi da je  $\bar{\alpha} = \alpha^{-1}$ . Prema definiciji 2.2.1. slijedi da je  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  invertibilan.  $\square$

**Korolar 2.2.3.** *Jedini invertibilni elementi u  $\mathbb{Z}[i]$  su  $\pm 1$  i  $\pm i$ .*

*Dokaz.* Trebamo pokazati da su  $\pm 1$  i  $\pm i$  jedini invertibilni elementi. Neka je  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\alpha = a + bi$ , invertibilan. Tada po propoziciji 2.2.2. vrijedi  $\mathcal{N}(\alpha) = 1$ , odnosno

$$1 = \mathcal{N}(\alpha) = \mathcal{N}(\alpha)\mathcal{N}(\bar{\alpha}) = (a + bi)(a - bi) = a^2 + b^2.$$

Uočimo da mora vrijediti  $a = 0$  ili  $b = 0$ . U protivnom, ako je  $a \neq 0$  i  $b \neq 0$ , tada bi imali  $|a + bi| > 1$  i  $|a - bi| > 1$ . To bi značilo da je  $(a + bi)(a - bi) \geq 2$  što nije moguće. Sada razlikujemo dva slučaja:

1. slučaj:  $a = 0$  i  $b = \pm 1$ , tada je  $\alpha = i$  ili  $\alpha = -i$
2. slučaj:  $a = \pm 1$  i  $b = 0$ , tada je  $\alpha = 1$  ili  $\alpha = -1$ .

Znači da su jedini invertibilni elementi u  $\mathbb{Z}[i]$   $\pm 1$  i  $\pm i$ .  $\square$

Invertibilne elemente u  $\mathbb{Z}[i]$  iz prethodnog korolara još zovemo jedinice.

Sada možemo usporediti prsten cijelih brojeva  $\mathbb{Z}$  i prsten Gaussovih cijelih brojeva  $\mathbb{Z}[i]$ .

U prstenu  $\mathbb{Z}$ , analogon norme je apsolutna vrijednost broja, a invertibilni elementi su  $-1$  i  $1$ . Iz činjenice da je  $|\alpha| = |\beta|$  za  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}$  slijedi da je  $\alpha = \pm\beta$ .

Međutim, situacija je drugačija u  $\mathbb{Z}[i]$ . Ako je  $\mathcal{N}(\alpha) = \mathcal{N}(\beta)$  za  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ , ne mora značiti da je  $\alpha = n \cdot \beta$ , gdje je  $n \in \{-1, 1, -i, i\}$ .

**Primjer 2.2.4.** *Neka je  $\alpha = 2 + 6i$ ,  $\beta = 2 - 6i$ . Jednostavnim računom dobivamo da je  $\mathcal{N}(\alpha) = \mathcal{N}(\beta) = 40$ , ali ne postoji  $n \in \{-1, 1, -i, i\}$  tako da je  $\alpha = n \cdot \beta$ .*

# Poglavlje 3

## Dijeljenje u $\mathbb{Z}[i]$

### 3.1 Djeljivost

Pitanje djeljivosti u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$  možemo proučavati na isti način kao pitanje djeljivosti u prstenu  $\mathbb{Z}$ . Djeljivost se definira na prirodan način, sljedećom definicijom koja je poseban slučaj Definicije 1.0.6.

**Definicija 3.1.1.** *Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\beta \neq 0$ . Ako postoji  $\gamma \in \mathbb{Z}[i]$  takav da je  $\alpha = \beta\gamma$ , onda kažemo da  $\beta$  dijeli  $\alpha$  ili da je  $\alpha$  djeljiv sa  $\beta$ , i pišemo  $\beta \mid \alpha$ .*

Element  $\alpha$  iz definicije nazivamo djeljenik, a element  $\beta$  nazivamo djelitelj. Njihov rezultat  $\gamma$  pri dijeljenju nazivamo količnik.

Sada ćemo kroz tri primjera vidjeti situacije kada  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  jest odnosno nije djeljiv sa  $\beta \in \mathbb{Z}[i]$ .

**Primjer 3.1.2.** *Kako je*

$$10 + 5i = (3 + 4i)(2 - i)$$

*zaključujemo da  $(3 + 4i) \mid (10 + 5i)$ .*

**Primjer 3.1.3.** *Provjerimo je li  $\alpha = 19 + 7i$  djeljiv s  $\beta = 4 + i$ .*

*Imamo:*

$$\frac{19 + 7i}{4 + i} = \frac{19 + 7i}{4 + i} \cdot \frac{4 - i}{4 - i} = \frac{83 + 9i}{17} = \frac{83}{17} + \frac{9}{17}i \notin \mathbb{Z}[i].$$

*Realni i imaginarni dio su  $\frac{83}{17}$  i  $\frac{9}{17}$ , a to nisu cijeli brojevi. Zaključujemo da  $\beta \nmid \alpha$ .*

**Primjer 3.1.4.** *Provjerimo je li  $\alpha = 31 + 34i$  djeljiv s  $\beta = 5 - 2i$ .*

*Imamo:*

$$\frac{31 + 34i}{5 - 2i} = \frac{31 + 34i}{5 - 2i} \cdot \frac{5 + 2i}{5 + 2i} = \frac{87 + 232i}{29} = \frac{87}{29} + \frac{232}{29}i = 3 + 8i.$$

*Realni i imaginarni dio su cijeli brojevi pa zaključujemo da  $\beta \mid \alpha$ .*

Sljedeći teorem dat će odgovor na pitanje kada je Gaussov cijeli broj djeljiv cijelim brojem.

**Teorem 3.1.5.** *Gaussov cijeli broj  $\alpha = a + bi$  djeljiv je cijelim brojem  $c \in \mathbb{Z}$  akko  $c \mid a$  i  $c \mid b$  u  $\mathbb{Z}$ .*

*Dokaz.* Neka je Gaussov cijeli broj  $\alpha = a + bi$  djeljiv s  $c \in \mathbb{Z} \subset \mathbb{Z}[i]$ . Po definiciji djeljivosti, znamo da postoji  $\beta = d + ei \in \mathbb{Z}[i]$  takav da je  $\alpha = c\beta = c(d + ei)$ . Tada je

$$\alpha = a + bi = cd + (ce)i.$$

Sada izjednačimo realni dio s realnim te imaginarni dio s imaginarnim i dobivamo:

$$a = cd \text{ i } b = ce,$$

iz čega možemo zaključiti da  $c \mid a$  i  $c \mid b$  u  $\mathbb{Z}$ .

Obrat trivijalno vrijedi. □

**Napomena 3.1.6.** *Ako u teoremu 3.1.5. uzmemo da je  $b = 0$ , odnosno  $\alpha = a$ , dobivamo da se dijeljenje između cijelih brojeva ne mijenja kada smo u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$ . Preciznije rečeno, za  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}$ ,  $\beta \mid \alpha$  u  $\mathbb{Z}[i]$  akko  $\beta \mid \alpha$  u  $\mathbb{Z}$ .*

**Teorem 3.1.7.** *Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ . Ako  $\beta$  dijeli  $\alpha$  u  $\mathbb{Z}[i]$ , onda  $N(\beta)$  dijeli  $N(\alpha)$  u  $\mathbb{Z}$ .*

*Dokaz.* Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$  i neka  $\beta \mid \alpha$ . Po definiciji djeljivosti znamo da postoji neki  $c \in \mathbb{Z}[i]$  tako da je  $\alpha = c\beta$ . Tada je

$$N(\alpha) = N(c\beta) = N(c)N(\beta),$$

a iz ovoga možemo vidjeti da  $N(\beta) \mid N(\alpha)$ . □

**Napomena 3.1.8.** *Uočimo da obrat teorema 3.1.7. ne vrijedi. Pogledajmo primjer.*

**Primjer 3.1.9.** Neka je  $\alpha = 8 + 6i$  i  $\beta = 2 + i$ . Tada je  $N(\alpha) = 100$ ,  $N(\beta) = 5$ . Vidimo da  $N(\beta) \mid N(\alpha)$ , ali

$$\frac{8 + 6i}{2 + i} = \frac{8 + 6i}{2 + i} \cdot \frac{2 - i}{2 - i} = \frac{22 + 4i}{5} = \frac{22}{5} + \frac{4}{5}i \notin \mathbb{Z}[i]$$

iz čega slijedi da  $\beta \nmid \alpha$ .

**Korolar 3.1.10.** Gaussov cijeli broj ima parnu normu akko je višekratnik od  $1 + i$ .

*Dokaz.* Neka je  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  i neka je  $\alpha$  višekratnik od  $1 + i$ , odnosno  $(1 + i) \mid \alpha$ . Iz teorema 3.1.7. slijedi da  $N(1 + i) \mid N(\alpha)$ . Uočimo da je  $N(1 + i) = 2$  iz čega vidimo da  $2 \mid N(\alpha)$ , odnosno  $N(\alpha)$  je paran broj.

Obratno, pretpostavimo da Gaussov cijeli broj  $\alpha = a + bi$  ima parnu normu, tj.

$$a^2 + b^2 \equiv 0 \pmod{2}.$$

Tada su  $a, b$  oba parni ili oba neparni brojevi, što u oba slučaja znači da je

$$a \equiv b \pmod{2}.$$

Želimo Gaussov cijeli broj  $\alpha$  napisati u obliku  $a + bi = (1 + i)(c + di)$ ,  $c, d \in \mathbb{Z}$ .

To je isto kao i:

$$a + bi = (c - d) + (c + d)i.$$

Uzmimo da je  $c = \frac{a+b}{2}$  i  $d = \frac{b-a}{2}$  i dobijemo upravo ono što smo trebali pokazati, tj.  $(1 + i) \mid \alpha$ . □

## 3.2 Dijeljenje s ostatkom

Na početku ćemo iskazati teorem o dijeljenju s ostatkom koji nećemo tada dokazati. Kroz primjere ćemo doći do modificiranog teorema o dijeljenju s ostatkom u  $\mathbb{Z}$ , koji ćemo i dokazati. Konačno, vratit ćemo se na teorem o dijeljenju s ostatkom te ga dokazati.

**Teorem 3.2.1.** Za  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\beta \neq 0$ , postoje  $\gamma, \delta \in \mathbb{Z}[i]$  takvi da je  $\alpha = \beta\gamma + \delta$  i  $N(\delta) < N(\beta)$ . Štoviše, možemo izabrati  $\delta$  takav da je  $N(\delta) \leq \frac{1}{2}N(\beta)$ .

Gaussov cijeli broj  $\gamma$  iz teorema zovemo količnik (kvocijent), a  $\delta$  zovemo ostatak. Norma ostatka je omeđena, preciznije, vrijedi  $0 \leq N(\delta) < N(\beta)$ .

**Primjer 3.2.2.** Neka su  $\alpha = 27 - 23i$ ,  $\beta = 8 + i$ . Trebamo odrediti  $\gamma$ ,  $\delta$  takve da je  $\alpha = \beta\gamma + \delta$ . Ideja je pogledati omjer  $\frac{\alpha}{\beta}$  i racionalizirati nazivnik.

Imamo:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha\bar{\beta}}{\beta\bar{\beta}} = \frac{(27 - 23i)(8 - i)}{65} = \frac{193 - 211i}{65} = \frac{193}{65} - \frac{211}{65}i.$$

Dijeleći s ostatkom u prstenu  $\mathbb{Z}$  dobivamo:

$$\begin{aligned} \frac{193}{65} &= 2 + \frac{63}{65}, \\ -\frac{211}{65} &= -4 + \frac{49}{65}. \end{aligned}$$

Iz ovih jednakosti vidimo da je prirodan kandidat za naš količnik  $\gamma = 2 - 4i$ . Dalje trebamo izračunati ostatak. Kako je  $\alpha = \beta\gamma + \delta$ , slijedi da je  $\delta = \alpha - \beta\gamma$ .

Imamo:

$$\delta = \alpha - \beta\gamma = (27 - 23i) - (8 + i)(2 - 4i) = 7 + 7i.$$

Sada možemo uočiti da je:

$$N(\delta) > N(\beta) = 65.$$

Izbor ovakvih  $\gamma, \delta$  nije dobar zato što želimo da nam bude  $N(\beta) > N(\delta)$ .

Promijenit ćemo pristup odabiru  $\gamma$ . Zamijenit ćemo  $193 : 65 \approx 2.969$  i  $-211 : 65 \approx -3.246$  najbližim cijelim brojem. Uočimo da je količnik u prvom slučaju tada 3, a u drugom slučaju je -3. Sada imamo  $\gamma = 3 - 3i$ .

Uvrstimo  $\gamma = 3 - 3i$  u izraz  $\delta = \alpha - \beta\gamma$  i dobivamo  $\delta = -2i$ .

Sada imamo:  $N(\delta) = 4 < N(\beta) = 65$ .

U standardnom teoremu o dijeljenju s ostatkom u prstenu  $\mathbb{Z}$  ostatak bi nam uvijek bio nenegativan broj. Postupak kojim smo riješili prethodni primjer dopustio nam je da ostatak bude negativan cijeli broj. Taj postupak u vezi je s modificiranim teoremom o dijeljenju s ostatkom koji ćemo precizno iskazati i dokazati.

Ostatak dobiven modificiranim teoremom o dijeljenju s ostatkom, po apsolutnoj vrijednosti manji je ili jednak ostatku koji bismo dobili kada bismo radili standardnim postupkom.



**Teorem 3.2.3.** (Modificirani teorem o dijeljenju s ostatkom u  $\mathbb{Z}$ ).

Neka je  $a \in \mathbb{Z}$  i  $b \in \mathbb{N}$ . Tada postoje cijeli brojevi  $q$  i  $r$  takvi da vrijedi

$$a = bq + r, |r| \leq \frac{1}{2}b.$$

*Dokaz.* Neka je  $q$  najbliži cijeli broj broju  $\frac{a}{b}$ . Tada je

$$\left|q - \frac{a}{b}\right| \leq \frac{1}{2}.$$

Definiramo  $r = a - bq$ . Sada slijedi  $a = bq + r$  i

$$|r| = |a - bq| = \left|\left(\frac{a}{b} - q\right)b\right| = \left|\frac{a}{b} - q\right|b = \left|q - \frac{a}{b}\right|b \leq \frac{1}{2}b.$$

□

Sada se možemo vratiti na početak i dokazati teorem 3.2.1.

*Dokaz.* (Teorem 3.2.1.)

Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\beta \neq 0$ . Želimo konstruirati  $\gamma, \delta \in \mathbb{Z}[i]$  takve da je  $\alpha = \beta\gamma + \delta$ ,  $\mathcal{N}(\delta) \leq \frac{1}{2}\mathcal{N}(\beta)$ .

Neka je

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha\bar{\beta}}{\beta\bar{\beta}} = \frac{a + bi}{\mathcal{N}(\beta)}, \quad \alpha\bar{\beta} = a + bi.$$

Koristeći modificirani teorem o dijeljenju s ostatkom u  $\mathbb{Z}$ , podijelimo  $a$  i  $b$  s  $\mathcal{N}(\beta)$ .

Dobivamo

$$a = \mathcal{N}(\beta)q_1 + r_1, \quad q_1 \in \mathbb{Z}, \quad 0 \leq |r_1| \leq \frac{1}{2}\mathcal{N}(\beta),$$

$$b = \mathcal{N}(\beta)q_2 + r_2, \quad q_2 \in \mathbb{Z}, \quad 0 \leq |r_2| \leq \frac{1}{2}\mathcal{N}(\beta).$$

Tako dobivene  $a, b$  vratimo u izraz  $\frac{\alpha}{\beta}$ :

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\mathcal{N}(\beta)q_1 + r_1 + (\mathcal{N}(\beta)q_2 + r_2)i}{\mathcal{N}(\beta)} = q_1 + q_2i + \frac{r_1 + r_2i}{\mathcal{N}(\beta)}$$

Kako je  $\mathcal{N}(\beta) = \beta\bar{\beta}$ , stavljanjem da je  $\gamma = q_1 + q_2i$  slijedi da je

$$\frac{\alpha}{\beta} = \gamma + \frac{r_1 + r_2i}{\beta\bar{\beta}}.$$

Množenjem ove jednakosti s  $\beta$  dobivamo:

$$\alpha = \gamma\beta + \frac{r_1 + r_2i}{\beta}.$$

iz čega slijedi da je

$$\alpha - \gamma\beta = \frac{r_1 + r_2i}{\beta}.$$

Kako su  $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{Z}[i]$ , tada je i  $\frac{r_1+r_2i}{\beta} \in \mathbb{Z}[i]$ . Označimo  $\delta = \alpha - \gamma\beta = \frac{r_1+r_2i}{\beta}$ .

Još trebamo pokazati da je  $\mathcal{N}(\delta) \leq \frac{1}{2}\mathcal{N}(\beta)$ .

Kako je

$$\alpha - \gamma\beta = \frac{r_1 + r_2i}{\beta},$$

zaključujemo da je

$$\mathcal{N}(\alpha - \gamma\beta) = \mathcal{N}\left(\frac{r_1 + r_2i}{\beta}\right).$$

Znamo da je  $\mathcal{N}(\beta) = \mathcal{N}(\bar{\beta})$  pa imamo:

$$\mathcal{N}(\alpha - \gamma\beta) = \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{\mathcal{N}(\beta)}\right).$$

Budući da je

$$0 \leq |r_k| \leq \frac{1}{2}\mathcal{N}(\beta), \quad k = 1, 2,$$

slijedi da je

$$\mathcal{N}(\alpha - \gamma\beta) \leq \frac{\frac{1}{4}\mathcal{N}(\beta)^2 + \frac{1}{4}\mathcal{N}(\beta)^2}{\mathcal{N}(\beta)} = \frac{1}{2}\mathcal{N}(\beta).$$

□

**Primjer 3.2.4.** Neka je  $\alpha = 41 + 24i$  i  $\beta = 11 - 2i$ . Trebamo pronaći  $\gamma, \delta \in \mathbb{Z}[i]$  takve da je  $\alpha = \beta\gamma + \delta$ .

Slijedi da je:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{41 + 24i}{11 - 2i} \cdot \frac{11 + 2i}{11 + 2i} = \frac{403 + 346i}{125}.$$

Uočavamo da je

$$403 : 125 \approx 3.224, \quad 346 : 125 \approx 2.768.$$

Zaključujemo da je  $\gamma = 3 + 3i$ , a ostatak  $\delta = (41 + 24i) - (11 - 2i)(3 + 3i) = 2 - 3i$ .

Uočimo da vrijedi  $\mathcal{N}(\delta) = 13 < \frac{1}{2}\mathcal{N}(\beta) = \frac{125}{2}$ .

Zanimljiva razlika između teorema o dijeljenju s ostatkom u  $\mathbb{Z}[i]$  i (uobičajenog) teorema o dijeljenju s ostatkom u  $\mathbb{Z}$  je ta da kvocijent i ostatak nisu jedinstveni u  $\mathbb{Z}[i]$ . Pogledajmo sljedeći primjer.

**Primjer 3.2.5.** Neka je  $\alpha = 1 + 8i$  i  $\beta = 2 - 4i$ .

Tada je

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha\bar{\beta}}{N(\beta)} = \frac{-30 + 20i}{20} = -\frac{3}{2} + i.$$

Uočavamo da je  $-3 : 2 = -1.5$  što leži na sredini između brojeva  $-2$  i  $-1$ . Imamo dvije mogućnosti za kvocijent:  $\gamma_1 = -1 + i$  i  $\gamma_2 = -2 + i$ .

U prvom slučaju dobivamo

$$\delta_1 = 1 + 8i - (2 - 4i)(-1 + i) = -1 + 2i.$$

Vidimo da vrijedi:  $N(\delta_1) = 5 < \frac{1}{2}N(\beta) = 10$ .

U drugom slučaju dobivamo

$$\delta_2 = 1 + 8i - (2 - 4i)(-2 + i) = 1 - 2i.$$

Vidimo da vrijedi:  $N(\delta_2) = 5 < \frac{1}{2}N(\beta) = 10$ .

Nedostatak jedinstvenosti kvocijenta i ostatka u dijeljenju u  $\mathbb{Z}[i]$  ne utječe na korisnost dijeljenja. Štoviše, ako gledamo  $\mathbb{Z}$ , jedinstvenost kvocijenta i ostatka u uobičajenom teoremu o dijeljenju je nevažna kod primjene npr. u Euklidovom<sup>1</sup> algoritmu. U sljedećem poglavlju riječ će biti upravo o Euklidovom algoritmu.

### 3.3 Euklidov algoritam

Na početku navodimo definicije koje su nužne za razumijevanje ovog poglavlja.

**Definicija 3.3.1.** Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ . Zajednički djelitelj Gaussovih cijelih brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  je svaki  $\gamma \in \mathbb{Z}[i]$  sa svojstvom da  $\gamma \mid \alpha$  i  $\gamma \mid \beta$ .

**Definicija 3.3.2.** Najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$  zajednički je djelitelj od  $\alpha$  i  $\beta$  s najvećom normom.

<sup>1</sup>Euklid (4.-3.st.pr.Kr.) - starogrčki matematičar

**Definicija 3.3.3.** Kažemo da su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$  relativno prosti ako su im jedini zajednički djelitelji invertibilni elementi.

Odgovor na pitanje kako odrediti najveći zajednički djelitelj dvaju Gaussovih cijelih brojeva, dat će Euklidov algoritam. U nastavku navodi se iskaz i dokaz Euklidovog algoritma.

**Teorem 3.3.4. (Euklidov algoritam)** Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\alpha, \beta \neq 0$ . Rekurzivnom primjenom teorema o dijeljenju s ostatkom na  $\alpha$  i  $\beta$  pa na djelitelj i ostatak sve dok ostatak nije nula, dobivamo sljedeći niz jednakosti:

$$\alpha = \beta\gamma_1 + \delta_1, \quad \mathcal{N}(\delta_1) < \mathcal{N}(\beta), \quad (1)$$

$$\beta = \delta_1\gamma_2 + \delta_2, \quad \mathcal{N}(\delta_2) < \mathcal{N}(\delta_1), \quad (2)$$

$$\delta_1 = \delta_2\gamma_3 + \delta_3, \quad \mathcal{N}(\delta_3) < \mathcal{N}(\delta_2), \quad (3)$$

$$\vdots$$

$$\delta_{n-2} = \delta_{n-1}\gamma_n + \delta_n, \quad \mathcal{N}(\delta_n) < \mathcal{N}(\delta_{n-1}), \quad (4)$$

$$\delta_{n-1} = \delta_n\gamma_{n+1} + 0. \quad (5)$$

Zadnji ostatak različit od nule je najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ .

*Dokaz.* Dokaz je identičan uobičajenom dokazu Euklidovog algoritma u prstenu  $\mathbb{Z}$  pa će se zato prikazati nešto kraća argumentacija.

Iz (1) možemo zaključiti da svaki zajednički djelitelj od  $\alpha$  i  $\beta$  dijeli  $\delta_1$ . Isti zaključak primijenimo na (2) pa možemo zaključiti da svaki zajednički djelitelj od  $\alpha$  i  $\beta$  dijeli  $\delta_2$ . Analognim zaključivanjem iz preostalog niza jednakosti, zaključujemo da svaki zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  dijeli svaki  $\delta_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Posebno, svaki zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  dijeli  $\delta_n$ .

S druge strane, iz zadnje jednakosti (5) slijedi da  $\delta_n$  dijeli  $\delta_{n-1}$  pa sada iz (4) slijedi da  $\delta_n$  dijeli  $\delta_{n-2}$ . Analognim zaključivanjem kroz cijeli niz jednakosti, možemo zaključiti da je  $\delta_n$  zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ . Kako je on zajednički djelitelj koji je djeljiv sa svakim drugim zajedničkim djeliteljem brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ , tada slijedi da je on maksimalne norme.  $\square$

**Primjer 3.3.5.** Odredimo najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha = 32 + 9i$  i  $\beta = 4 + 11i$ . Primjenom Euklidovog algoritma dobivamo

$$32 + 9i = (4 + 11i)(2 - 2i) + 2 - 5i$$

$$4 + 11i = (2 - 5i)(-2 + i) + 3 - i$$

$$2 - 5i = (3 - i)(1 - i) - i$$

$$3 - i = (-i)(1 - 3i) + 0.$$

Uočavamo da je najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  jednak  $-i$ . Prema definiciji 3.3.3. zaključujemo da su  $\alpha$  i  $\beta$  relativno prosti.

Pogledajmo primjer u kojem najveći zajednički djelitelj nije jedan od invertibilnih elemenata u  $\mathbb{Z}[i]$ .

**Primjer 3.3.6.** Odredimo najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha = 11 + 3i$  i  $\beta = 1 + 8i$ . Primjenom Euklidovog algoritma dobivamo

$$11 + 3i = (1 + 8i)(1 - i) + 2 - 4i$$

$$1 + 8i = (2 - 4i)(-1 + i) - 1 + 2i$$

$$2 - 4i = (-1 + 2i)(-2) + 0.$$

Uočavamo da je najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  jednak  $-1 + 2i$ . No, najveći zajednički djelitelj danih brojeva je  $i$  i  $1 - 2i$  zato što je:

$$11 + 3i = (1 + 8i)(1 - i) + 2 - 4i$$

$$1 + 8i = (2 - 4i)(-2 + i) + 1 - 2i$$

$$2 - 4i = (1 - 2i)(2) + 0.$$

Dobili smo dva različita najveća zajednička djelitelja brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ . Međutim, pogledamo li bolje, uočavamo da je  $-1 + 2i = (-1)(1 - 2i)$ .

**Napomena 3.3.7.** U daljnjem tekstu, najveći zajednički djelitelj brojeva  $a$  i  $b$  u prstenu cijelih brojeva  $\mathbb{Z}$ , označavat ćemo s  $(a, b)$ .

Uočimo sljedeće. Ako je  $\gamma$  najveći zajednički djelitelj Gaussovih cijelih brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ , onda  $\mathcal{N}(\gamma) \mid \mathcal{N}(\alpha)$  i  $\mathcal{N}(\gamma) \mid \mathcal{N}(\beta)$ . Odnosno  $\mathcal{N}(\gamma)$  dijeli  $(\mathcal{N}(\alpha), \mathcal{N}(\beta))$ . Međutim, može se dogoditi da je  $\mathcal{N}(\gamma) < (\mathcal{N}(\alpha), \mathcal{N}(\beta))$ . Pogledajmo primjer.

**Primjer 3.3.8.** Neka su  $\alpha = 11 + 3i$  i  $\beta = 1 + 8i$ .  
Vidimo da je  $N(\alpha) = 130$  i  $N(\beta) = 65$ . Slijedi da je

$$(N(\alpha), N(\beta)) = (130, 65) = 65.$$

Najveći zajednički djelitelj danih Gaussovih cijelih brojeva je  $\gamma = -1 + 2i$ , a njegova norma je  $N(\gamma) = 5$ . Očito je da je:

$$N(\gamma) = 5 < 65 = (N(\alpha), N(\beta)).$$

**Napomena 3.3.9.** Pretpostavimo da za Gaussove cijele brojeve  $\alpha$  i  $\beta$  vrijedi da su njihove norme relativno proste u prstenu  $\mathbb{Z}$ , tj. vrijedi  $(N(\alpha), N(\beta)) = 1$ . Također,  $\gamma$  je najveći zajednički djelitelj od  $\alpha$  i  $\beta$ . Tada  $\gamma \mid \alpha$  i  $\gamma \mid \beta$ , iz čega slijedi da  $N(\gamma) \mid N(\alpha)$  i  $N(\gamma) \mid N(\beta)$ . Zaključujemo da je  $N(\gamma) = 1$ , odnosno  $\gamma = \lambda$ ,  $\lambda \in \{\pm 1, \pm i\}$ .

**Primjer 3.3.10.** Neka je  $\alpha = 24 - 9i$  i  $\beta = 5 + 7i$ . Vidimo da je:

$$N(\alpha) = 657, N(\beta) = 74.$$

Uočavamo da je  $(657, 74) = 1$  pa prema prethodno navedenoj napomeni slijedi da je najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  upravo  $\lambda$ ,  $\lambda \in \{\pm 1, \pm i\}$ .

Za kraj, navodimo korolar koji govori da je najveći zajednički djelitelj dvaju Gaussovih cijelih brojeva jedinstven do na množenje invertibilnim elementom. Prisjetimo se, jedini invertibilni elementi u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$  su  $\pm 1$  i  $\pm i$ .

**Korolar 3.3.11.** Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\alpha, \beta \neq 0$  te neka je  $\gamma$  najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  dobiven Euklidovim algoritmom. Tada je bilo koji najveći zajednički djelitelj  $\delta$  od  $\alpha$  i  $\beta$  oblika  $\delta = \lambda\gamma$ ,  $\lambda \in \{\pm 1, \pm i\}$ .

*Dokaz.* Neka je  $\gamma$  najveći zajednički djelitelj Gaussovih cijelih brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  koji je dobiven Euklidovim algoritmom. Neka je  $\delta$  najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ . Iz dokaza Euklidova algoritma (teorem 3.3.4.) znamo da  $\delta \mid \gamma$ , odnosno postoji Gaussov cijeli broj  $\epsilon$  takav da je  $\gamma = \delta\epsilon$  što nam implicira da je  $N(\gamma) = N(\delta)N(\epsilon)$ . Kako je  $N(\gamma) = N(\delta)$ , to nam govori da je  $N(\epsilon) = 1$ , odnosno da je  $\epsilon = \lambda$ ,  $\lambda \in \{\pm 1, \pm i\}$ .  $\square$

### 3.4 Bezoutov teorem

Na početku ovog dijela iskazuje se i dokazuje Bezoutov<sup>2</sup> teorem. Dalje se spominju posljedice ovog teorema i primjena u konkretnim primjerima.

**Teorem 3.4.1. (Bezoutov teorem)**

Neka je  $\delta$  najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\alpha, \beta \neq 0$ . Tada postoje  $x, y \in \mathbb{Z}[i]$  takvi da je  $\delta = \alpha x + \beta y$ .

*Dokaz.* Po korolaru 3.3.11. bez smanjenja općenitosti možemo pretpostaviti da je  $\delta$  dobiven Euklidovim algoritmom. Pogledajmo teorem 3.3.4. (Euklidov algoritam). Iz jednakosti (1) slijedi da je:

$$\delta_1 = \alpha - \beta\gamma_1.$$

Ovu jednakost uvrstimo u (2) i dobivamo:

$$\delta_2 = \beta - (\alpha - \beta\gamma_1)\gamma_2 = \beta(1 + \gamma_1\gamma_2) - \alpha\gamma_2.$$

Uočimo da smo ostatak  $\delta_1$  i ostatak  $\delta_2$  prikazali kao linearnu kombinaciju brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ . Postupak možemo analogno provesti dalje i dobivamo da je svaki  $\delta_k$  linearna kombinacija brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ . Posebno, najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  je linearna kombinacija od  $\alpha$  i  $\beta$ .  $\square$

**Korolar 3.4.2.** Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\alpha, \beta \neq 0$ .  $\alpha$  i  $\beta$  su relativno prosti akko je

$$\alpha x + \beta y = 1,$$

za neke  $x, y \in \mathbb{Z}[i]$ .

*Dokaz.* Neka su  $\alpha$  i  $\beta \in \mathbb{Z}[i]$  relativno prosti. Tada prema Bezoutovom teoremu slijedi da postoje  $x, y \in \mathbb{Z}[i]$  takvi da je  $\alpha x + \beta y = 1$ .

Obratno, ako je  $\alpha x + \beta y = 1$ ,  $x, y \in \mathbb{Z}[i]$ , tada bilo koji zajednički djelitelj od  $\alpha$  i  $\beta$  dijeli 1. Jedini elementi koji dijele 1 su invertibilni elementi pa nam iz toga slijedi da su brojevi  $\alpha$  i  $\beta$  relativno prosti.  $\square$

---

<sup>2</sup>Etienne Bezout (1730-1783.) - francuski matematičar

**Primjer 3.4.3.** U odjeljku Euklidov algoritam (primjer 3.3.6.) pokazali smo da je najveći zajednički djelitelj Gaussovih cijelih brojeva  $\alpha = 11 + 3i$  i  $\beta = 1 + 8i$  jednak  $-1 + 2i$ . Sada želimo prikazati  $-1 + 2i$  kao linearnu kombinaciju brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ . Koristeći raspis Euklidova algoritma iz primjera 3.3.6., imamo

$$\begin{aligned} -1 + 2i &= (1 + 8i) - (2 - 4i)(-1 + i) \\ &= (1 + 8i) - (11 + 3i - (1 + 8i)(1 - i))(-1 + i) \\ &= (11 + 3i)(1 - i) + (1 + 8i)(1 + (1 - i)(-1 + i)) \\ &= (11 + 3i)(1 - i) + (1 + 8i)(1 + 2i) \\ &= \alpha(1 - i) + \beta(1 + 2i). \end{aligned}$$

**Primjer 3.4.4.** U odjeljku Euklidov algoritam (primjer 3.3.5.) pokazali smo da je najveći zajednički djelitelj Gaussovih cijelih brojeva  $\alpha = 32 + 9i$  i  $\beta = 4 + 11i$  jednak  $-i$ . Sada želimo prikazati  $-i$  kao linearnu kombinaciju brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ . Koristeći raspis Euklidova algoritma iz primjera 3.3.5., imamo

$$\begin{aligned} -i &= (2 - 5i) - (3 - i)(1 - i) \\ &= (2 - 5i) - (4 + 11i - (2 - 5i)(-2 + i))(1 - i) \\ &= (2 - 5i)(1 + (-2 + i)(1 - i)) - (4 + 11i)(1 - i) \\ &= (2 - 5i)(3i) - (4 + 11i)(1 - i) \\ &= (32 + 9i - (4 + 11i)(2 - 2i))(3i) - (4 + 11i)(1 - i) \\ &= (32 + 9i)(3i) - (4 + 11i)(7 + 5i) \\ &= \alpha(3i) - \beta(7 + 5i). \end{aligned}$$

Dobili smo da je

$$-i = \alpha(3i) - \beta(7 + 5i).$$

Ako taj izraz pomnožimo s  $i$  dobit ćemo

$$1 = \alpha(-3) + \beta(5 - 7i).$$

**Primjer 3.4.5.** Neka je  $\alpha = 4 + 5i$  i  $\beta = 4 - 5i$ . Prikažimo najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  kao njihovu linearnu kombinaciju.

Prvo ćemo pomoću Euklidovog algoritma odrediti najveći zajednički djelitelj.

$$4 + 5i = (4 - 5i)(i) - (1 - i),$$

$$4 - 5i = -(1 - i)(-4) - i,$$



$$-1 + i = (-i)(1 + i) + 0.$$

Iz Euklidovog algoritma možemo vidjeti da je najveći zajednički djelitelj brojeva  $\alpha$  i  $\beta$  jednak  $-i$ . Uočavamo da su brojevi  $\alpha$  i  $\beta$  relativno prosti. Sada prikazujemo  $-i$  kao linearnu kombinaciju brojeva  $\alpha$  i  $\beta$ .

$$\begin{aligned} -i &= (4 - 5i) - (-(1 - i))(-4) \\ &= (4 - 5i) - (4 + 5i - (4 - 5i)i)(-4) \\ &= (4 + 5i)(4) + (4 - 5i)(1 - 4i). \end{aligned}$$

Množenjem izraza s  $i$  dobivamo:

$$1 = (4 + 5i)(4i) + (4 - 5i)(1 - 4i),$$

to jest

$$1 = 4\alpha + (1 - 4i)\beta.$$

**Napomena 3.4.6.** Uočimo da je u posljednjem primjeru  $N(\alpha) = N(\beta) = 41$  i norme nisu relativno proste u  $\mathbb{Z}$ , dok su Gaussovi cijeli brojevi  $\alpha$  i  $\beta$  relativno prosti u  $\mathbb{Z}[i]$ .

**Korolar 3.4.7.** Neka su  $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{Z}[i]$  i neka su  $\alpha$  i  $\beta$  relativno prosti. Ako  $\alpha \mid \beta\gamma$ , onda  $\alpha \mid \gamma$ .

*Dokaz.* Neka  $\alpha \mid \beta\gamma$ . Tada postoji Gaussov cijeli broj  $\delta$  takav da je  $\beta\gamma = \alpha\delta$ . Prema pretpostavci su  $\alpha$  i  $\beta$  relativno prosti. Prema Bezoutovom teoremu slijedi da postoje  $x, y \in \mathbb{Z}[i]$  takvi da je

$$\alpha x + \beta y = 1.$$

Množenjem ove jednakosti s  $\gamma$  dobivamo:

$$\alpha\gamma x + \beta\gamma y = \gamma.$$

Kako je

$$\beta\gamma = \alpha\delta,$$

slijedi da je

$$\alpha\gamma x + \alpha\delta y = \gamma,$$

odnosno

$$\alpha(\gamma x + \delta y) = \gamma.$$

Sada lako uočavamo da  $\alpha \mid \gamma$ , a to smo trebali pokazati. □

**Korolar 3.4.8.** *Neka su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\alpha$  i  $\beta$  relativno prosti.*

*Ako  $\alpha \mid \gamma$  i  $\beta \mid \gamma$  u  $\mathbb{Z}[i]$ , onda i  $\alpha\beta \mid \gamma$ .*

*Dokaz.* Znamo da  $\alpha \mid \gamma$  pa postoji  $\delta_1 \in \mathbb{Z}[i]$  tako da je  $\gamma = \alpha\delta_1$ . Isto tako  $\beta \mid \gamma$  pa postoji  $\delta_2 \in \mathbb{Z}[i]$  tako da je  $\gamma = \beta\delta_2$ . Kako su  $\alpha$  i  $\beta$  relativno prosti, postoje  $x, y \in \mathbb{Z}[i]$  takvi da je

$$\alpha x + \beta y = 1.$$

Množenjem ove jednakosti s  $\gamma$  dobivamo

$$\alpha\gamma x + \beta\gamma y = \gamma,$$

pa imamo

$$\alpha\beta\delta_2 x + \beta\alpha\delta_1 y = \gamma,$$

odnosno

$$\alpha\beta(\delta_2 x + \delta_1 y) = \gamma.$$

Iz ovoga slijedi da  $\alpha\beta \mid \gamma$ , a to smo trebali pokazati. □

**Korolar 3.4.9.** *Neka su  $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\alpha, \beta, \gamma \neq 0$ . Ako su  $\alpha$  i  $\gamma$  relativno prosti te  $\beta$  i  $\gamma$  relativno prosti, onda su i  $\alpha\beta$  i  $\gamma$  relativno prosti.*

*Dokaz.* Kako su  $\alpha$  i  $\gamma$  relativno prosti, prema Bezoutovom teoremu slijedi da postoje Gaussovi cijeli brojevi  $x_1$  i  $y_1$  takvi da je

$$\alpha x_1 + \gamma y_1 = 1.$$

Analogno, za relativno proste Gaussove cijele brojeve  $\beta$  i  $\gamma$  postoje  $x_2$  i  $y_2 \in \mathbb{Z}[i]$  takvi da je

$$\beta x_2 + \gamma y_2 = 1.$$

Međusobno pomnožimo ove dvije jednakosti:

$$\alpha\beta x_1 x_2 + \alpha\gamma x_1 y_2 + \gamma\beta y_1 x_2 + \gamma^2 y_1 y_2 = 1.$$

Sređivanjem izraza dobivamo

$$\alpha\beta(x_1 x_2) + \gamma(\alpha x_1 y_2 + \beta y_1 x_2 + \gamma y_1 y_2) = 1.$$

Konačno, po korolaru 3.4.2. zaključujemo da su  $\alpha\beta$  i  $\gamma$  relativno prosti. □

# Poglavlje 4

## Faktorizacija

### 4.1 Prosti Gaussovi cijeli brojevi

U ovome odjeljku definirat ćemo proste i složene Gaussove cijele brojeve. To će nam ujedno biti uvodni dio za sljedeći odjeljak - jedinstvenost faktorizacije.

**Lema 4.1.1.** *Neka je  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\alpha \neq 0$ . Bilo koji djelitelj od  $\alpha$ , čija je norma 1 ili  $N(\alpha)$ , je invertibilni element ili invertibilni element pomnožen s  $\alpha$ .*

*Dokaz.* Neka je  $\beta$  bilo koji djelitelj od  $\alpha$ . Ako  $\beta \mid \alpha$ , onda  $N(\beta) \mid N(\alpha)$ . U slučaju da je  $N(\beta) = 1$ , tada je  $\beta = \pm 1$  ili  $\beta = \pm i$ . Ako  $\beta \mid \alpha$  i  $N(\alpha) = N(\beta)$ , onda je  $\alpha = \beta\gamma$ , za neki  $\gamma \in \mathbb{Z}[i]$ . Tada je  $N(\alpha) = N(\beta)N(\gamma)$ , iz čega slijedi da je  $N(\gamma) = 1$ . Sada možemo zaključiti da je  $\gamma = \pm 1$  ili  $\gamma = \pm i$ , a tada je  $\beta = \pm\alpha$  ili  $\beta = \pm i\alpha$ .  $\square$

Uočimo da lema 4.1.1. ne govori da su jedini Gaussovi cijeli brojevi čija je norma  $N(\alpha)$ ,  $\pm\alpha$  i  $\pm i\alpha$ . Primjera radi, pogledajmo Gaussove cijele brojeve  $\alpha = 1 + 7i$  i  $\beta = 5 + 5i$ . Oba ta broja imaju normu 50 i nijedan ne možemo dobiti od drugoga množenjem s nekim invertibilnim elementom. Ono što nam lema 4.1.1. govori je da su jedini Gaussovi cijeli brojevi koji dijele  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  i čija je norma jednaka  $N(\alpha)$ ,  $\pm\alpha$  i  $\pm i\alpha$ .

Ako je  $N(\alpha) > 1$ , tada uvijek ima barem osam djelitelja od  $\alpha$ . To su:  $\pm 1$ ,  $\pm i$ ,  $\pm\alpha$  i  $\pm i\alpha$ . Te djelitelje zovemo *trivijalni djelitelji* ili *trivijalni faktori*. Možemo uočiti da su ti trivijalni faktori analogni trivijalnim faktorima u prstenu  $\mathbb{Z}$ :  $\pm 1$  i  $\pm n$ , gdje je  $n$  cijeli broj takav da je  $|n| > 1$ . Faktore koji nisu trivijalni zvat ćemo *netrivijalnim faktorima*. Po lemi 4.1.1. vrijedi da je njihova norma strogo između 1 i  $N(\alpha)$ .

**Definicija 4.1.2.** *Neka je  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  i  $N(\alpha) > 1$ . Broj  $\alpha$  zovemo složenim Gaussovim cijelim brojem ako ima barem jedan netrivialan faktor. Ako ima samo trivijalne faktore, tada kažemo da je  $\alpha$  prost Gaussov cijeli broj.*

Primijetimo da su prosti Gaussovi cijeli brojevi točno ireducibilni elementi u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$  (vidi definiciju 1.0.6.). Štoviše, u Korolaru 4.2.4. dokazat ćemo da je  $\mathbb{Z}[i]$  faktorijalan prsten pa su po propoziciji 1.0.10., kao što naziv sugerira, prosti Gaussovi cijeli brojevi točno prosti elementi u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$ .

**Napomena 4.1.3.** *Za  $\alpha = \beta\gamma$ , uvjet  $1 < N(\beta) < N(\alpha)$  je ekvivalentan uvjetu  $N(\beta) > 1$  i  $N(\gamma) > 1$ . Prikaz Gaussovog cijelog broja  $\alpha$  u obliku produkta Gaussovih cijelih brojeva čija je norma strogo veća od 1, zovemo netrivialna faktorizacija od  $\alpha$ .*

Pogledajmo neke primjere trivijalnih i netrivialnih faktorizacija Gaussovih cijelih brojeva.

**Primjer 4.1.4.** *Pogledajmo Gaussov cijeli broj  $\alpha = 13 - i$ . Njegova netrivialna faktorizacija bila bi  $(1 - 4i)(1 + 3i)$ , dok bi trivijalna faktorizacija glasila  $-1(i - 13)$ .*

**Primjer 4.1.5.** *Pogledajmo broj 5. Jedna njegova netrivialna faktorizacija glasi  $(1 - 2i)(1 + 2i)$ . Ovdje imamo zanimljivu činjenicu. Znamo da je broj 5 prost broj u prstenu  $\mathbb{Z}$ , dok je u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$  broj 5 složen broj. Isto tako je i broj 2 složen u  $\mathbb{Z}[i]$  jer je  $2 = (1 + i)(1 - i)$ .*

**Primjer 4.1.6.** *Pogledajmo broj 3. Znamo da je 3 prost broj u  $\mathbb{Z}$ , ali je prost broj i u  $\mathbb{Z}[i]$ . Kako bismo se u to uvjerali, pretpostavimo suprotno, tj. da je 3 složen broj, i neka je njegova netrivialna faktorizacija  $3 = \alpha\beta$ . Uzmimo normu obje strane i dobivamo  $9 = N(\alpha)N(\beta)$ . Kako je riječ o netrivialnoj faktorizaciji, znamo da vrijedi  $N(\alpha), N(\beta) > 1$ . Slijedi da je  $N(\alpha) = 3$  tj. za  $\alpha = a + bi \in \mathbb{Z}[i]$  vrijedi  $a^2 + b^2 = 3$ . Ovdje dolazimo do kontradikcije zato što ne postoje takvi  $a, b \in \mathbb{Z}$ . Dakle, broj 3 ima samo trivijalne faktore u  $\mathbb{Z}[i]$  pa je zato prost Gaussov cijeli broj.*

**Teorem 4.1.7.** *Ako je norma Gaussovog cijelog broja  $\alpha$  prost broj u  $\mathbb{Z}$ , tada je taj Gaussov cijeli broj prost u  $\mathbb{Z}[i]$ .*

*Dokaz.* Neka je norma Gaussovog cijelog broja  $\alpha$  prost broj. Označimo ju sa  $p = N(\alpha)$ . Trebamo pokazati da  $\alpha$  ima jedino trivijalne faktore, tj. da faktori imaju normu 1 ili  $N(\alpha)$ . Neka je  $\alpha = \beta\gamma$  bilo koja faktorizacija od  $\alpha$  u  $\mathbb{Z}[i]$ . Uzmemo norme sa obje strane i dobivamo da je  $N(\alpha) = p = N(\beta)N(\gamma)$ . Kako je  $p$  norma, ona mora biti pozitivna pa je zato

$p \in \mathbb{Z}^+$ . Iz ovoga slijedi da mora biti  $N(\beta) = 1$  ili  $N(\gamma) = 1$ . Tako je ili  $\beta$  ili  $\gamma$  invertibilan element, pa slijedi da  $\alpha$  nema netrivialnih faktora. Zaključujemo da je  $\alpha$  prost broj u  $\mathbb{Z}[i]$ .  $\square$

**Napomena 4.1.8.** Uočimo da obrat teorema 4.1.7. ne vrijedi, odnosno, prost Gaussov cijeli broj ne mora imati normu koja je također prost broj. Kao kontraprimjer uzmemo broj 3. U primjeru 4.1.6. pokazali smo da je 3 prost broj u  $\mathbb{Z}[i]$ , međutim njegova norma je 9, a znamo da 9 nije prost broj u  $\mathbb{Z}$ .

**Teorem 4.1.9.** Svaki  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  s normom strogo većom od 1 produkt je prostih Gaussovih cijelih brojeva.

*Dokaz.* Neka je  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  i  $N(\alpha) > 1$ . Dokaz provodimo metodom matematičke indukcije po  $N(\alpha)$ . Pretpostavimo da je  $N(\alpha) = 2$ . Drugačije rečeno, tada je  $\alpha = 1 \pm i$  ili  $\alpha = -1 \pm i$ . Prema teoremu 4.1.7. slijedi da je  $\alpha$  prost Gaussov cijeli broj. Pretpostavimo sada da je  $n \geq 3$  te da je svaki Gaussov cijeli broj  $\alpha$ , norme veće ili jednake 3 i strogo manje od  $n$ , produkt prostih Gaussovih cijelih brojeva. Želimo pokazati da je svaki  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  norme  $n$  produkt prostih Gaussovih cijelih brojeva. Najprije uočimo, ako ne postoji  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$  takav da je  $N(\alpha) = n$ , tada nemamo što dokazati. Zato pretpostavimo da postoji  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $N(\alpha) = n$ , gdje je  $\alpha$  složen Gaussov cijeli broj, i neka je  $\alpha = \beta\gamma$  netrivialna faktorizacija od  $\alpha$ . Vrijedi da su  $N(\beta), N(\gamma) < N(\alpha) = n$ . Prema pretpostavci indukcije,  $\beta$  i  $\gamma$  su produkti prostih Gaussovih cijelih brojeva. Zaključno, njihov produkt  $\alpha$  je produkt prostih brojeva u  $\mathbb{Z}[i]$ .  $\square$

## 4.2 Jedinственost faktorizacije

Prije samog iskaza i dokaza teorema o jedinstvenosti faktorizacije Gaussovih cijelih brojeva, dokazujemo lemu koja će nam pomoći u njegovu dokazivanju.

**Lema 4.2.1.** Neka je  $p$  prost Gaussov cijeli broj i neka su  $\alpha_1, \dots, \alpha_k \in \mathbb{Z}[i]$ . Ako  $p \mid \alpha_1 \cdots \alpha_k$ , tada  $p \mid \alpha_i$  za neki  $i \in \{1, \dots, k\}$ .

*Dokaz.* Dokaz provodimo metodom matematičke indukcije po  $k$ . Za  $k = 2$ , neka  $p \mid \alpha_1\alpha_2$ . Pretpostavimo da  $p$  ne dijeli  $\alpha_1$ . To znači da su  $p$  i  $\alpha_1$  relativno prosti pa prema korolaru 3.4.7 slijedi da  $p \mid \alpha_2$ . Pretpostavimo sad da tvrdnja leme vrijedi za neki  $k \in \mathbb{N}$ . Trebamo pokazati da, ako vrijedi da

$$p \mid \alpha_1 \cdots \alpha_{k+1},$$

onda  $p \mid \alpha_i$  za neki  $i \in \{1, \dots, k+1\}$ . Označimo  $\beta = \alpha_1 \cdots \alpha_k$ , tada

$$p \mid \beta\alpha_{k+1}.$$

Ako  $p \nmid \beta$ , onda slijedi da su oni relativno prosti pa mora  $p \mid \alpha_{k+1}$ . U suprotnome,  $p \mid \beta$  pa po pretpostavci indukcije slijedi da  $p \mid \alpha_i$  za neki  $i \in \{1, \dots, k\}$ .  $\square$

**Primjer 4.2.2.** *Primijetimo da je*

$$5 = (1 + 2i)(1 - 2i) = (2 - i)(2 + i).$$

*Uočimo da su svi faktori na desnoj strani prosti u  $\mathbb{Z}[i]$  zato što su njihove norme proste u  $\mathbb{Z}$ . Isto tako uočavamo da ove dvije faktorizacije nisu jednake, ali ako dopustimo množenje s jedinicom, lako vidimo da vrijedi:*

$$1 + 2i = i(2 - i),$$

$$1 - 2i = (-i)(2 + i).$$

*Ovaj primjer nam objašnjava ulogu invertibilnih elemenata kod množenja faktora u jedinstvenoj faktorizaciji.*

**Teorem 4.2.3.** *(Jedinstvenost prikaza Gaussovih cijelih brojeva u obliku produkta prostih Gaussovih cijelih brojeva)*

*Neka je  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\mathcal{N}(\alpha) > 1$ . Ako je*

$$\alpha = \alpha_1 \cdots \alpha_r = \alpha'_1 \cdots \alpha'_s,$$

*gdje su  $\alpha_j$ ,  $j \in \{1, \dots, r\}$  i  $\alpha'_k$ ,  $k \in \{1, \dots, s\}$  prosti Gaussovi cijeli brojevi, tada je  $r = s$  te postoji permutacija  $\sigma \in S_r$  i elementi  $\lambda_1, \dots, \lambda_r \in \{\pm 1, \pm i\}$  takvi da je  $\alpha_j = \lambda_j \alpha'_{\sigma(j)}$ .*

*Dokaz.* Pokazali smo da se svaki Gaussov cijeli broj može prikazati kao produkt prostih Gaussovih cijelih brojeva. Ako je  $\alpha$  prost Gaussov cijeli broj, tada je tvrdnja teorema očita. Zato pretpostavljamo da je  $\alpha$  složen Gaussov cijeli broj. Dokaz radimo metodom matematičke indukcije po  $\mathcal{N}(\alpha)$ . Za bazu indukcije uzimamo slučaj  $\mathcal{N}(\alpha) = 2$ . Ovaj slučaj smo već razmatrali u dokazu teorema 4.1.9. i vidjeli da ne postoje složeni Gaussovi cijeli brojevi  $\alpha$  norme 2, pa je tvrdnja trivijalno zadovoljena. Neka je  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 3$ , i pretpostavimo da za svaki  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $1 < \mathcal{N}(\alpha) < n$ , vrijedi dana tvrdnja. Želimo pokazati da  $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\mathcal{N}(\alpha) = n$  ima jedinstvenu faktorizaciju. Pretpostavimo da postoje dvije faktorizacije od  $\alpha$ , tj.

$$\alpha = \alpha_1 \cdots \alpha_r = \alpha'_1 \cdots \alpha'_s.$$

Kako  $\alpha_1 \mid \alpha$ , slijedi da  $\alpha_1 \mid \alpha'_1 \cdots \alpha'_s$ . Prema lemi 4.2.1. slijedi da  $\alpha_1 \mid \alpha'_j$  za neki  $j = 1, \dots, s$ . Bez smanjenja općenitosti možemo pretpostaviti da je  $j = 1$ , tj. da  $\alpha_1 \mid \alpha'_1$ . Kako su  $\alpha_1$  i  $\alpha'_1$  prosti, vrijedi da nemaju netrivialnih faktora. Slijedi da je  $\alpha_1 = \lambda_1 \alpha'_1$ , za neki  $\lambda_1 \in \{\pm 1, \pm i\}$ . Sada faktorizaciju broja  $\alpha$  možemo zapisati kao

$$\alpha = \lambda_1 \alpha'_1 \alpha_2 \cdots \alpha_r = \alpha'_1 \cdots \alpha'_s.$$

Dijeljenjem izraza s  $\alpha'_1$  dobivamo:

$$\frac{\alpha}{\alpha'_1} = \beta = \lambda_1 \alpha_2 \cdots \alpha_r = \alpha'_2 \cdots \alpha'_s.$$

Očito je da je  $N(\beta) = \frac{N(\alpha)}{N(\alpha'_1)} < N(\alpha)$ . Kako je  $\lambda_1$  jedinica, slijedi da je  $\lambda_1 \alpha_2$  prost Gaussov cijeli broj. Sada imamo dvije faktORIZACIJE broja  $\beta$  sa  $r - 1$  i  $s - 1$  prostih faktora. Kako je  $N(\beta) < n$ , prema pretpostavci slijedi da je  $r - 1 = s - 1$  iz čega slijedi da je  $r = s$ . Drugi dio pretpostavke povlači da postoji permutacija  $\sigma \in S_r$  i elementi  $\lambda_2, \dots, \lambda_r \in \{\pm 1, \pm i\}$  takvi da je  $\sigma(1) = 1$  i  $\alpha_j = \lambda_j \alpha'_{\sigma(j)}$  za sve  $j \in \{1, \dots, r\}$ .  $\square$

Uočimo da nam prethodni teorem govori da je faktORIZACIJA Gaussovog cijelog broja, čija je norma strogo veća od 1, jedinstvena do na poredak i množenje invertibilnim elementima (jedinicama). Iz teorema 4.1.9. i 4.2.3. lako slijedi (vidi definiciju 1.0.9.):

**Korolar 4.2.4.** Prsten  $\mathbb{Z}[i]$  je faktorijalan prsten.

**Primjer 4.2.5.** Prikažimo Gaussov cijeli broj  $\alpha = 7 + 11i$  kao produkt prostih faktora. Prvo trebamo odrediti normu. Vrijedi da je  $N(\alpha) = 7^2 + 11^2 = 170$ . Dalje ćemo faktORIZIRATI broj 170 u skupu prirodnih brojeva. Imamo:

$$170 = 2 \cdot 5 \cdot 17.$$

Sada želimo pronaći Gaussove cijele brojeve koji imaju norme 2, 5 i 17. Vrijedi da je:

$$N(1 + i) = 2 = N(1 - i),$$

$$N(1 + 2i) = 5 = N(1 - 2i),$$

$$N(4 + i) = 17 = N(4 - i).$$

Lako se vidi da ovi Gaussovi cijeli brojevi pomnoženi jedinicama u  $\mathbb{Z}[i]$  daju sve Gaussove cijele brojeve norme 2, 5 i 17.

Prema teoremu 4.1.7. slijedi da su ti Gaussovi cijeli brojevi prosti jer su njihove norme prosti brojevi u  $\mathbb{Z}$ . Izaberemo po jedan faktor norme 2, 5 odnosno 17 i pomnožimo ih. Jedna od konačno mnogo mogućih kombinacija dat će jedinstveni rastav zadanog broja na proste faktore.

U ovom primjeru faktori  $(1 - i)(1 - 2i)(4 - i) = -7 - 11i$  daju  $-\alpha$  pa zato jedinstveni rastav na proste fakore glasi:

$$7 + 11i = -(1 - i)(1 - 2i)(4 - i).$$

## Poglavlje 5

### Primjena $\mathbb{Z}[i]$ na aritmetiku u $\mathbb{Z}$

U ovom, posljednjem poglavlju navest ćemo neke od primjena  $\mathbb{Z}[i]$  na aritmetiku u  $\mathbb{Z}$ . Pro-matrat ćemo proste brojeve u  $\mathbb{Z}$  te iskoristiti Gaussove cijele brojeve za dokazivanje tvrdnje da se prost broj u  $\mathbb{Z}$  može zapisati kao suma dvaju kvadrata najviše na jedan način. Govorit će se i o primjeni  $\mathbb{Z}[i]$  na klasifikaciju primitivnih Pitagorinih<sup>1</sup> trojki te na određivanje cjelobrojnih rješenja jednadžbi  $a^2 + b^2 = c^3$  i  $y^2 + 1 = x^3$ .

#### 5.1 Prosti brojevi

Na početku ovog odjeljka navodimo Wilsonov teorem koji ćemo koristiti u dokazivanju tvrdnji.

**Teorem 5.1.1.** *Ako je  $p$  prost broj, onda je  $(p - 1)! \equiv -1 \pmod{p}$ .*

*Dokaz.* Dokaz Wilsonovog teorema možete pogledati u [2] ili [4]. □

**Lema 5.1.2.** *Neka je  $p = 4n + 1$ ,  $n \in \mathbb{N}$  prost broj. Tada  $p \mid m^2 + 1$  za neki  $m \in \mathbb{Z}$ .*

*Dokaz.* Primijenimo Wilsonov teorem na prost broj  $p = 4n + 1$  te dobivamo

$$\begin{aligned} -1 &\equiv 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots 4n \pmod{p} \\ &\equiv (1 \cdot 2 \cdots 2n) \cdot ((2n + 1) \cdots (4n - 1) \cdot (4n)) \pmod{p} \\ &\equiv (1 \cdot 2 \cdots 2n) \cdot ((-2n) \cdots (-2)(-1)) \pmod{p} \text{ jer je } p - k \equiv -k \pmod{p} \\ &= (1 \cdot 2 \cdots 2n)^2 (-1)^{2n} \pmod{p} \\ &= (1 \cdot 2 \cdots 2n)^2 \pmod{p}. \end{aligned}$$

Stavimo da je  $m = (2n)!$  pa imamo da je  $m^2 \equiv -1 \pmod{p}$ . Time smo dobili da  $p \mid m^2 + 1$ . □

<sup>1</sup>Pitagora (6. - 5. st. pr. Kr.) - starogrčki matematičar; prvi "pravi" matematičar



**Propozicija 5.1.3.** *Neka je  $p$  prost broj koji se može zapisati u obliku sume dvaju kvadrata, tj.  $p = a^2 + b^2$ ,  $a, b \in \mathbb{Z}$ . Tada su  $a$  i  $b$  jedinstveni do na predznak i poredak.*

*Dokaz.* Neka je zadan prost broj  $p$ ,  $p = a^2 + b^2$ ,  $a, b \in \mathbb{Z}$ . Broj  $p$  možemo faktorizirati u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$  kao

$$p = (a + bi)(a - bi),$$

gdje su faktori  $a \pm bi$  prosti Gaussovi cijeli brojevi (vidi teorem 4.1.9.).

Pretpostavimo da postoji još jedan zapis broja  $p$  kao sume dvaju kvadrata.

Neka su  $c, d \in \mathbb{Z}[i]$ . Tada je

$$p = (c + di)(c - di),$$

gdje su  $c \pm di$  prosti Gaussovi cijeli brojevi.

Prema teoremu o jedinstvenoj faktorizaciji u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$  (teorem 4.2.3.) slijedi da je

$$a + bi = \lambda(c + di) \text{ ili } a + bi = \lambda(c - di),$$

za neki  $\lambda \in \{\pm 1, \pm i\}$ . Dovoljno nam je promatrati samo jedan od ova dva slučaja zato što je razlika u predznaku, a nama je cilj pokazati da se brojevi  $a$  i  $b$  podudaraju s brojevima  $c$  i  $d$  do na predznak i poredak.

Dalje promatramo slučaj kada je

$$a + bi = \lambda(c + di).$$

Za  $\lambda = 1$  slijedi da je  $c = a$  i  $d = b$ . Za  $\lambda = -1$  slijedi da je  $c = -a$  i  $d = -b$ . Ako je  $\lambda = i$ , tada je  $c = b$  i  $d = -a$ . Ako je  $\lambda = -i$ , tada je  $c = -b$  i  $d = a$ .

Ovime smo pokazali da su brojevi  $c$  i  $d$  jednaki brojevima  $a$  i  $b$  do na predznak i poredak.

□

**Primjer 5.1.4.** *Pogledajmo neke proste brojeve kao sume dvaju kvadrata:*

$$2 = 1^2 + 1^2, \quad 5 = 1^2 + 2^2, \quad 13 = 2^2 + 3^2, \quad 17 = 1^2 + 4^2$$

Sada navodimo propoziciju koju ćemo koristiti u dokazu Fermatovog teorema o dva kvadrata, a dokaz propozicije nalazi se u [6, Poglavlje 6.3]

**Propozicija 5.1.5.** *Neka je  $p$  prost broj u  $\mathbb{Z}$ . Tada je  $p$  prost Gaussov cijeli broj ako i samo ako  $p$  nije suma dvaju kvadrata.*

**Teorem 5.1.6. (Fermatov teorem o dva kvadrata)**

Svaki prost broj oblika  $p = 4n + 1$  može se prikazati u obliku sume dvaju kvadrata, tj.

$$p = a^2 + b^2, \quad a, b \in \mathbb{Z}[i].$$

*Dokaz.* Neka je zadan prost broj  $p$  oblika  $p = 4n + 1$ , i neka je  $m \in \mathbb{Z}$  takav da  $p \mid m^2 + 1$  (kao što je bio slučaj u prethodnoj lemi). Pogledajmo broj  $m^2 + 1$ . Njegova faktorizacija u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$  glasi

$$m^2 + 1 = (m - i)(m + i).$$

$p \mid m^2 + 1$ , ali  $p \nmid m - i$  i  $p \nmid m + i$  zato što  $\frac{m}{p} - \frac{i}{p}$  i  $\frac{m}{p} + \frac{i}{p}$  nisu Gaussovi cijeli brojevi. Prema lemi 4.2.1. slijedi da  $p$  nije prost Gaussov cijeli broj. Sad prethodna lema povlači tvrdnju.  $\square$

Nadalje, uz oznake i pretpostavke teorema 5.1.6., slijedi da je

$$p = (a - bi)(a + bi)$$

faktorizacija u produkt prostih Gaussovih cijelih brojeva, a već smo dokazali da je ona jedinstvena do na poredak i množenje invertibilnim elementima. Slijedi iskaz snažnije tvrdnje Fermatovog teorema o dva kvadrata:

*Svaki prost broj oblika  $p = 4n + 1$  je suma dvaju kvadrata, tj.  $p = a^2 + b^2$ , gdje su  $a$  i  $b$  jedinstveni par prirodnih brojeva.*

**Primjer 5.1.7.** Pogledajmo peti Fermatov broj  $2^{2^5} + 1$ . Taj broj je suma dvaju kvadrata

$$2^{2^5} + 1 = (2^{16})^2 + 1.$$

Fermat je pretpostavljao da je taj broj prost broj, a Euler ga je zapisao na drugi način kao sumu dvaju kvadrata:

$$2^{2^5} + 1 = 62264^2 + 20449^2.$$

Prema propoziciji 5.1.3. možemo zaključiti kako peti Fermatov broj nije prost broj.

Dalje navodimo korolar koji će nam biti od koristi u daljnjem dokazivanju tvrdnji za proste brojeve oblika  $p = 4n + 1$ .

**Korolar 5.1.8.** Ako je  $p$  prost broj u  $\mathbb{Z}^+$  koji zadovoljava izraz  $p \equiv 3 \pmod{4}$ , tada se  $p$  ne može prikazati u obliku sume dvaju kvadrata u  $\mathbb{Z}$  te ostaje prost u  $\mathbb{Z}[i]$ .

*Dokaz.* Pretpostavimo suprotno, da se neki prost broj  $p \equiv 3 \pmod{4}$  može zapisati u obliku  $p = a^2 + b^2$  za neke  $a, b \in \mathbb{Z}$ . Kako je  $p$  neparan, slijedi da je točno jedan od brojeva  $a$  i  $b$  neparan; bez smanjenja općenitosti pretpostavimo da je  $a$  neparan, dakle  $a = 2m + 1$  za neki  $m \in \mathbb{Z}$ , dok je  $b$  paran, dakle  $b = 2n$  za neki  $n \in \mathbb{Z}$ . Sad imamo

$$p = a^2 + b^2 = (2m+1)^2 + (2n)^2 = 4m^2 + 4m + 1 + 4n^2 = 4(m^2 + m + n^2) + 1 \equiv 1 \not\equiv 3 \pmod{4}$$

Došli smo do kontradikcije. Dakle, za  $p$  prost broj u  $\mathbb{Z}^+$ ,  $p \equiv 3 \pmod{4}$  vrijedi da se  $p$  ne može prikazati u obliku sume dvaju kvadrata u  $\mathbb{Z}$ .  $\square$

**Teorem 5.1.9.** *Kongruencija  $x^2 \equiv -1 \pmod{p}$ , gdje je  $p$  neparan prost broj, ima rješenje ako i samo ako je  $p$  oblika  $p = 4n + 1$ .*

*Dokaz.* Lema 5.1.2. za  $p = 4n + 1$  daje  $x$  takav da je  $x^2 \equiv -1 \pmod{p}$ . Želimo pokazati da dana kongruencija nema rješenja kad je  $p$  oblika  $p = 4n + 3$ . Da bismo to dokazali, pretpostavimo suprotno. Ako je

$$x^2 \equiv -1 \pmod{p = 4n + 3},$$

tada potenciranjem obje strane s  $2n + 1$  dobivamo:

$$(x^2)^{2n+1} \equiv (-1)^{2n+1} \equiv -1 \pmod{p = 4n + 3}.$$

Dalje uočimo da je  $2(2n + 1) = 4n + 2 = (4n + 1) + 1 = p - 1$ . Iz toga slijedi:

$$x^{p-1} \equiv -1 \pmod{p}.$$

Sada smo došli do kontradikcije s Fermatovim malim teoremom: *Neka je  $a \in \mathbb{Z}$  i  $p$  prost broj,  $p \nmid a$ . Tada je  $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$ .* Dokaz ovog teorema može se pogledati u [2].

Konačno,  $x^2 \equiv -1 \pmod{p}$  nema rješenja za  $p = 4n + 3$  pa iz toga slijedi da je  $p$  prost broj oblika  $p = 4n + 1$ .  $\square$

Za kraj pokazat ćemo da ima beskonačno mnogo prostih brojeva oblika  $4n + 1$ .

**Teorem 5.1.10.** *Prostih brojeva  $p$  oblika  $p = 4n + 1$  ima beskonačno mnogo.*

*Dokaz.* Zbog prethodnog teorema, dovoljno je pokazati da postoji beskonačno mnogo prostih brojeva koji dijele vrijednosti izraza  $x^2 + 1$ ,  $x \in \mathbb{Z}$ . Pretpostavimo suprotno, tj. da postoji konačno mnogo prostih brojeva koji dijele te vrijednosti i označimo ih s  $p_1, p_2, \dots, p_k$ .

Promatramo polinom

$$g(y) = (p_1 p_2 \cdots p_k y)^2 + 1.$$

Svaki prost broj koji dijeli vrijednost polinoma  $g(y)$ ,  $y \in \mathbb{Z}$ , dijelit će i vrijednost od  $x^2 + 1$ , jer je  $x = p_1 p_2 \cdots p_k y$ . Uočimo da niti jedan od  $p_1, p_2, \dots, p_k$  ne dijeli  $g(y)$  jer uvijek ostaje ostatak 1. Zaključujemo da nema prostog broja koji dijeli  $g(y)$ ,  $y \in \mathbb{Z}$  pa su jedine mogućnosti za  $g(y) \pm 1$ , tj.

$$(p_1 p_2 \cdots p_k y)^2 + 1 = \pm 1, \quad \forall y \in \mathbb{Z}.$$

Sada smo došli do kontradikcije jer svaka od ovih kvadratnih jednadžbi ima najviše dva rješenja  $y$ . Zaključno,  $x^2 + 1$  je djeljiv sa beskonačno mnogo prostih brojeva, odnosno, postoji beskonačno mnogo prostih brojeva oblika  $p = 4n + 1$ .  $\square$

## 5.2 Primitivne Pitagorine trojke

U ovom odjeljku definirat ćemo pojam (primitivnih) Pitagorinih trojki te ih klasificirati uz pomoć Gaussovih cijelih brojeva.

**Definicija 5.2.1.** Uređenu trojku prirodnih brojeva  $(x, y, z)$  zovemo Pitagorina trojka ako su  $x$  i  $y$  katete, a  $z$  hipotenuza nekog pravokutnog trokuta, odnosno ako vrijedi

$$x^2 + y^2 = z^2.$$

Ako su  $x$ ,  $y$ ,  $z$  relativno prosti, onda kažemo da je  $(x, y, z)$  primitivna Pitagorina trojka. Takav trokut zovemo (primitivni) Pitagorin trokut.

**Napomena 5.2.2.** Uočimo da je u primitivnoj Pitagorinoj trojki točno jedan od brojeva  $x, y$  paran i točno jedan neparan. Ako bi oba bila parna, trojka očito ne bi bila primitivna. Ako bi oba bila neparna, a znamo da je kvadrat neparnog broja  $\equiv 1 \pmod{4}$ , imali bi  $x^2 + y^2 \equiv 2 \pmod{4}$ . Kako je paran kvadrat  $\equiv 0 \pmod{4}$ , slijedi da je  $z^2 \equiv 0 \pmod{4}$ . Sada smo došli do kontradikcije.

Dakle, u primitivnoj Pitagorinoj trojki  $(x, y, z)$  jedan od  $x, y$  je paran, drugi neparan i  $z$  je neparan.

**Primjer 5.2.3.** Neki primjeri primitivnih Pitagorinih trojki su:

$$(3, 4, 5), (5, 12, 13), (9, 40, 41), (20, 21, 29), (65, 72, 97)$$

Ako imamo

$$x^2 + y^2 = z^2,$$

tada možemo pisati

$$(x - yi)(x + yi) = z^2.$$

Faktori neparnog kvadrata  $z^2$  su  $x - yi$  i  $x + yi$ , koji su Gaussovi cijeli brojevi.

Sada ćemo iskazati i dokazati tri leme koje će nam trebati u dokazivanju teorema koji ćemo kasnije iskazati.

**Lema 5.2.4.** *Neka je  $(x, y, z)$  primitivna Pitagorina trojka. Tada su  $x - yi$  i  $x + yi$  relativno prosti u  $\mathbb{Z}[i]$ .*

*Dokaz.* Ako je  $(x, y) = 1$  u prstenu  $\mathbb{Z}$ , tada je i  $(x, y) = 1$  u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$ . Zajednički djelitelj brojeva  $x - yi$  i  $x + yi$  dijeli i njihovu sumu  $(x - yi) + (x + yi) = 2x$  te njihovu razliku  $(x - yi) - (x + yi) = -2yi$ . Kako je  $(x, y) = 1$ , slijedi da su svi zajednički prosti djelitelji brojeva  $x - yi$  i  $x + yi$  sadržani među prostim Gaussovima cijelim brojevima koji dijele 2 pa su oblika  $\pm 1 \pm i$ . Imamo faktorizaciju

$$(x - yi)(x + yi) = z^2,$$

gdje je  $z^2$  neparan. Slijedi da niti jedan Gaussov cijeli broj oblika  $\pm 1 \pm i$  ne dijeli  $z^2$  pa su stoga  $x - yi$  i  $x + yi$  relativno prosti.  $\square$

**Lema 5.2.5.** *Neka su  $x - yi$  i  $x + yi$  relativno prosti Gaussovi cijeli brojevi takvi da vrijedi*

$$(x - yi)(x + yi) = z^2,$$

*za neki  $z \in \mathbb{Z}[i]$ . Tada postoje  $\alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{Z}[i]$ ,  $\lambda_1, \lambda_2$  invertibilni elementi, takvi da je  $x - yi = \lambda_1 \alpha^2$  i  $x + yi = \lambda_2 \beta^2$ .*

*Dokaz.* Brojevi  $x - yi$  i  $x + yi$  nemaju zajedničkih prostih faktora, a svaki faktor od  $z^2$  se pojavljuje s parnom potencijom. Slijedi da se svaki prosti faktor od  $x - yi$  i  $x + yi$  mora također pojavljivati s parnom potencijom. Sada je očito da je produkt prostih brojeva od kojih se svaki pojavljuje s parnom potencijom, kvadrat. Zaključujemo da se svaki od brojeva  $x - yi$  i  $x + yi$  može prikazati kao produkt invertibilnih elemenata i potpunih kvadrata (preostali mogući faktori koji nisu prosti, mogu biti samo invertibilni elementi)  $\square$

Neka je  $(x, y, z)$  primitivna Pitagorina trojka. Pokazali smo da je  $x - yi$  produkt invertibilnog elementa i kvadrata pa ima jedan od sljedećih prikaza:

$$(a - bi)^2,$$

$$-(a - bi)^2,$$

$$i(a - bi)^2,$$

$$-i(a - bi)^2,$$

gdje su  $a$  i  $b \in \mathbb{Z}$ . Raspisivanjem ovih izraza vidimo da  $x - yi$  ima jedan od oblika:

$$\begin{aligned} &(a^2 - b^2) - 2abi, \\ &(b^2 - a^2) + 2abi, \\ &2ab + (a^2 - b^2)i, \\ &-2ab + (b^2 - a^2)i. \end{aligned}$$

U svakom od navedenih slučajeva, izjednačavamo realni i imaginarni dio pa dobivamo da je  $x$  ili  $y$  oblika  $u^2 - v^2$ ,  $u > v$ , dok je drugi od njih oblika  $2uv$ , gdje su  $u, v \in \mathbb{N}$ . Također, mora vrijediti da je  $(u, v) = 1$  zato što je svaki prosti zajednički djelitelj brojeva  $u$  i  $v$  zajednički djelitelj od  $u^2 - v^2$  i  $2uv$  (dakle od  $x$  i  $y$ ) pa su  $u$  i  $v$  međusobno relativno prosti i različite parnosti. Ako bi bili iste parnosti, onda bi  $x$  i  $y$  bili parni. Bez smanjenja općenitosti možemo pretpostaviti da je  $x$  neparan, a  $y$  paran.

**Korolar 5.2.6.** *Neka je  $(x, y, z)$  primitivna Pitagorina trojka u kojoj je  $x$  neparan broj. Tada je  $x + yi$  potpun kvadrat u  $\mathbb{Z}[i]$ .*

*Dokaz.* Prema lemi 5.2.5. znamo da je  $x + yi$  jednak produktu nekog invertibilnog elementa i kvadrata. Dakle,  $x + yi$  jednak je jednom od ovih izraza:

$$\begin{aligned} &(a + bi)^2, \\ &-(a + bi)^2, \\ &i(a + bi)^2, \\ &-i(a + bi)^2, \end{aligned}$$

za neke  $a, b \in \mathbb{Z}$ .

Raspisivanjem dobivamo:

$$\begin{aligned} &(a^2 - b^2) + 2abi, \\ &(b^2 - a^2) - 2abi, \\ &-2ab + (a^2 - b^2)i, \\ &2ab + (b^2 - a^2)i. \end{aligned}$$

Iz pretpostavke znamo da je  $x$  neparan što znači da je oblika  $u^2 - v^2$ ,  $u > v$ . Tada slijedi da je  $y$  paran i da je oblika  $2uv$ . Sada vidimo da je jedino moguće rješenje  $x + yi = (a + bi)^2$  ili  $x + yi = -(a + bi)^2 = (i(a + bi))^2$  pa je  $x + yi$  potpun kvadrat u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$ .  $\square$

**Primjer 5.2.7.** Pokažimo da je  $5 + 12i$  potpuni kvadrat u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$ .

*Rješenje:*

Kako je  $(5, 12, 13)$  primitivna Pitagorina trojka, prema prethodnom korolaru znamo da je  $5 + 12i = (a + bi)^2$ , za neke  $a, b \in \mathbb{Z}$ . Slijedi da je  $5 = a^2 - b^2$ ,  $12 = 2ab$ . Sada imamo:

$$a^2 - b^2 = 5$$

$$6 = ab.$$

Kvadriramo drugu jednakost i u nju uvrstimo  $b^2 = a^2 - 5$  pa dobivamo:

$$a^4 - 5a^2 - 36 = 0.$$

Uvođenjem supstitucije  $t = a^2$  izraz pojednostavljujemo na

$$t^2 - 5t - 36 = 0.$$

Rješenja ove kvadratne jednadžbe su:  $t_1 = 9$  i  $t_2 = -4$ . Kako tražimo cijele brojeve, promatramo samo  $t_1$ . Vraćanjem u supstituciju dobivamo da je jedno rješenje  $a = 3$  te  $b = 2$ .

Dakle,  $5 + 12i = (3 + 2i)^2$ .

**Teorem 5.2.8.** Ako je  $x^2 + y^2 = z^2$ , za relativno proste prirodne brojeve  $x$  i  $y$ , tada je jedan od brojeva  $x$  ili  $y$  oblika  $u^2 - v^2$ , a drugi je oblika  $2uv$ , gdje su  $u$  i  $v$  relativno prosti prirodni brojevi. U oba slučaja je  $z = u^2 + v^2$  jer je

$$(u^2 - v^2)^2 + (2uv)^2 = u^4 + 2u^2v^2 + v^4 = (u^2 + v^2)^2,$$

tj.  $z$  je suma dva kvadrata.

*Dokaz.* Bez smanjenja općenitosti pretpostavimo da je  $x$  neparan broj. Tada po korolaru 5.2.6. postoje  $u, v \in \mathbb{Z}$  takvi da je  $x + yi = (u + vi)^2$ , dakle imamo

$$x + yi = u^2 - v^2 + 2uvi,$$

tj.

$$x = u^2 - v^2, \quad y = 2uv.$$

Ovo dokazuje tvrdnju. □

**Lema 5.2.9.** *Jednadžba  $x^4 + y^4 = z^2$  nema rješenja u skupu prirodnih brojeva, tj. ne postoji pravokutni trokut kojem su duljine kateta kvadrati prirodnih brojeva.*

*Dokaz.* Pretpostavimo suprotno, tj. da postoji takav trokut i izaberemo među svim takvim trokutima onaj trokut koji ima najmanju hipotenuzu. Sada imamo Pitagorinu trojku  $(x^2, y^2, z)$ . Prvo pokažemo da su  $x$  i  $y$  relativno prosti. U protivnom bi bilo  $x = a \cdot d$ ,  $y = b \cdot d$ , za neki prirodan broj  $d > 1$ . Tada bi iz  $z^2 = d^4(a^4 + b^4)$  slijedilo da postoji neki  $c \in \mathbb{N}$  takav da je  $z = d^2 \cdot c$  pa bismo dobili Pitagorinu trojku  $(a^2, b^2, c)$  s hipotenuzom koja je manja od  $z$ , a to bi bila kontradikcija s odabirom  $z$ . Dakle,  $(x^2, y^2, z)$  je primitivna Pitagorina trojka. Prema teoremu 5.2.8., ako uzmemo da je  $y$  paran, postoje relativno prosti prirodni brojevi  $u$  i  $v$ , različite parnosti, takvi da vrijedi:

$$x^2 = u^2 - v^2, \quad y^2 = 2uv, \quad z = u^2 + v^2.$$

Iz prve jednakosti slijedi da je  $x^2 + v^2 = u^2$  pa je  $v$  paran, a  $u$  neparan. Dalje stavimo:  $v = 2k$ ,  $y = 2l$  pa imamo  $l^2 = uk$ . Odavde, s obzirom da su  $u$  i  $k$  relativno prosti, slijedi da postoje prirodni brojevi  $m$  i  $n$  takvi da je  $u = m^2$  i  $k = n^2$ . Kako je  $(x, v, u)$  primitivna Pitagorina trojka, prema teoremu 5.2.8. slijedi da postoje  $e$  i  $f$ ,  $(e, f) = 1$ ,  $v = 2ef$ ,  $u = e^2 + f^2$ . Sada iz  $v = 2n^2$  imamo da je  $n^2 = ef$ , pa postoje  $a, b \in \mathbb{N}$  takvi da je  $e = a^2$  i  $f = b^2$ . Prema tome,  $a^4 + b^4 = m^2$ . Sada je  $(a^2, b^2, m)$  Pitagorina trojka za čiju hipotenuzu vrijedi:  $m < m^2 = u < u^2 + v^2 = z$ , a to je u kontradikciji s izborom  $z$ .  $\square$



### 5.3 Cjelobrojna rješenja

U ovom odjeljku promatrat ćemo jednadžbe oblika  $a^2 + b^2 = c^3$  i  $y^2 + 1 = x^3$  te iskoristiti prsten  $\mathbb{Z}[i]$  za dokazivanje nekih njihovih karakteristika.

**Teorem 5.3.1.** *Neka je zadana jednadžba  $a^2 + b^2 = c^3$ . Cjelobrojna rješenja  $(a, b, c)$  ove jednadžbe sa svojstvom  $(a, b) = 1$  dana su sa*

$$a = m^3 - 3mn^2, \quad b = 3m^2n - n^3, \quad c = m^2 + n^2,$$

gdje je  $(m, n) = 1$  i  $m \not\equiv n \pmod{2}$ .

*Dokaz.* Iz činjenice da je  $(a, b) = 1$  slijedi da  $a$  i  $b$  nisu oba parna. Ako bi oba bila neparna, tada bi imali  $c^3 \equiv 1 + 1 \equiv 2 \pmod{8}$  što očito ne vrijedi ni za koji cijeli broj  $c$ . Zaključujemo da je jedan od brojeva  $a$  ili  $b$  paran, a drugi je neparan,  $a \not\equiv b \pmod{2}$  i  $c$  je neparan.

Zadanu jednadžbu možemo faktorizirati u  $\mathbb{Z}[i]$  kao

$$(a + bi)(a - bi) = c^3.$$

Prvo treba pokazati da su  $a + bi$  i  $a - bi$  relativno prosti. To se dokaže kao u dokazu leme 5.2.4. Nadalje, produkt faktora  $a + bi$  i  $a - bi$  je savršeni kub u  $\mathbb{Z}[i]$  te znamo da su faktori relativno prosti pa prema jedinstvenoj faktorizaciji u  $\mathbb{Z}[i]$  slijedi da su  $a + bi$  i  $a - bi$  oba kubovi do na umnožak invertibilnim elementom. Stoga, neka je  $a + bi = \lambda \alpha^3$  gdje je  $\lambda \in \{\pm 1, \pm i\}$ . Uočimo da je svaki invertibilni element sam po sebi kub:

$$1 = 1^3, \quad -1 = (-1)^3, \quad i = (-i)^3, \quad -i = i^3$$

pa zato možemo reći da je  $a + bi$  savršen kub.

Dalje zapisujemo  $a + bi = (m + ni)^3$ , gdje su  $m, n \in \mathbb{Z}$ . Desnu stranu jednakosti kubiramo, a potom izjednačimo realni i imaginarni dio s lijeve i desne strane. Sređivanjem izraza dobivamo:

$$a = m^3 - 3mn^2, \quad b = 3m^2n - n^3.$$

Kako su  $a$  i  $b$  relativno prosti, slijedi da su i  $m$  i  $n$  relativno prosti, tj.  $(m, n) = 1$ .

Ako bi bilo  $m \equiv n \pmod{2}$ , tada bi imali  $a \equiv -2m^3 \equiv 0 \pmod{2}$  i  $b \equiv 2m^3 \equiv 0 \pmod{2}$ , a to bi značilo da su i  $a$  i  $b$  parni što znamo da nije istina. Dakle,  $m \not\equiv n \pmod{2}$ .

Nadalje,  $c^3 = (a + bi)(a - bi) = (m + ni)^3(m - ni)^3 = (m^2 + n^2)^3$ . Dakle,  $c = m^2 + n^2$ .

Obratno, ako je  $(m, n) = 1$  i  $m \not\equiv n \pmod{2}$ , tada  $a$  i  $b$  (definirani kao gore) i  $c = m^2 + n^2$  zadovoljavaju  $a^2 + b^2 = c^3$  i  $a + bi = (m + ni)^3$ . Još treba pokazati da je  $(a, b) = 1$ , a to se lako pokaže koristeći činjenicu  $(m, n) = 1$ .

Izbor ovakvih  $m$  i  $n$  je jedinstven, a to proizlazi iz  $a + bi = (m + ni)^3$ . Ako bi imali  $m'$  i  $n'$  takve da zadovoljavaju jednakosti za  $a$ ,  $b$  i  $c$ , tada bi bilo  $(m + ni)^3 = (m' + n'i)^3$ . Iz ovoga slijedi  $m + ni = m' + n'i$  te konačno,  $m = m'$  i  $n = n'$ .  $\square$

**Primjer 5.3.2.** Pogledajmo primjere nekih rješenja jednadžbe  $a^2 + b^2 = c^3$  za odabrane  $m$  i  $n$ .

Za  $m = 1$ ,  $n = 0$  imamo:

$$a = m^3 - 2mn^2 = 1,$$

$$b = 3m^2n - n^3 = 0,$$

$$c = m^2 + n^2 = 1$$

pa slijedi  $1^2 + 0^2 = 1^3$ .

Za  $m = 7$ ,  $n = 2$  imamo:

$$a = m^3 - 2mn^2 = 259,$$

$$b = 3m^2n - n^3 = 286,$$

$$c = m^2 + n^2 = 53$$

pa slijedi  $259^2 + 286^2 = 53^3$ .

**Teorem 5.3.3.** Jedini  $x, y \in \mathbb{Z}$  koji zadovoljavaju jednadžbu  $y^2 = x^3 - 1$  su  $(x, y) = (1, 0)$ .

*Dokaz.* Uvrštavanjem  $(x, y) = (1, 0)$  u jednadžbu dobivamo:

$$0^2 = 1^3 - 1$$

$$0 = 0$$

iz čega se vidi da  $(x, y) = (1, 0)$  zadovoljava jednadžbu. Trebamo pokazati da je  $(1, 0)$  jedini uređeni par  $(x, y)$  koji zadovoljava jednadžbu. Jednadžbu najprije zapišemo u obliku

$$x^3 = y^2 + 1,$$

a potom jednadžbu faktoriziramo u prstenu  $\mathbb{Z}[i]$

$$x^3 = (y + i)(y - i).$$

Sada trebamo pokazati da su  $y + i$  i  $y - i$  relativno prosti; to se dokaže točno kao u dokazu leme 5.2.4. Kako su ta dva faktora relativno prosti u  $\mathbb{Z}[i]$  i kako je njihov produkt kub, svaki faktor treba također biti kub do na umnožak nekim invertibilnim elementom. Nadalje, možemo pisati

$$y + i = (m + ni)^3,$$

za neke  $m, n \in \mathbb{Z}$ . Argumentacija je ista kao i u dokazu teorema 5.3.1. Desnu stranu jednakosti kubiramo, a potom izjednačavamo realni i imaginarni dio s lijeve i desne strane. Sređivanjem izraza dobivamo:

$$y = m^3 - 3mn^2 = m(m^2 - 3n^2), \quad 1 = 3m^2n - n^3 = n(3m^2 - n^2).$$

Desna strana jednakosti povlači da je  $n = \pm 1$ . U slučaju kad je  $n = 1$  imamo  $1 = 3m^2 - 1$ , tj.  $3m^2 = 2$ , a ta jednažba nema cjelobrojnih rješenja. Ako je  $n = -1$ , tada imamo  $1 = -(3m^2 - 1)$  iz čega slijedi da je  $m = 0$ . Dakle,  $y = 0$ , a  $x^3 = y^2 + 1 = 0^2 + 1 = 1$ .  $\square$

**Napomena 5.3.4.** 1850. godine je francusko-belgijski matematičar Victor-Améd'ee Lebesgue dokazao tvrdnju da jednažba  $y^2 = x^d - 1$ ,  $d \geq 2$  nema rješenja u skupu  $\mathbb{Z} \setminus 0$ .

# Bibliografija

- [1] Keith Conrad, *The Gaussian integers*, dostupno na <https://kconrad.math.uconn.edu/blurbs/ugradnumthy/Zinotes.pdf> (lipanj 2020.).
- [2] Andrej Dujella, *Uvod u teoriju brojeva*, PMF-Matematički odjel, Sveučilište u Zagrebu (skripta) (2003).
- [3] Hrvoje Kraljević, *Algebra*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku (2008).
- [4] Ivan Matić, *Uvod u teoriju brojeva*, Odjel za matematiku Sveučilišta JJ Strossmayera u Osijeku (2015).
- [5] Boris Širola, *Algebarske strukture*, PMF-Matematički odjel, Sveučilište u Zagrebu, skripta (2014).
- [6] John Stillwell, *Elements of number theory*, Springer Science & Business Media, 2002.

# Sažetak

Prsten Gaussovih cijelih brojeva  $\mathbb{Z}[i]$  generalizacija je prstena cijelih brojeva  $\mathbb{Z}$ . Kao takvi, Gaussovi cijeli brojevi zadržali su većinu svojstava cijelih brojeva. U  $\mathbb{Z}[i]$  imamo faktORIZACIJU  $x^2 + y^2 = (x + yi)(x - yi)$ ,  $i = \sqrt{-1}$ .

Kroz svojstva invertibilnosti i dijeljenja iskazuje se i dokazuje modificirani teorem o dijeljenju s ostatkom u  $\mathbb{Z}$  koji nam pomaže u dokazivanju teorema o dijeljenju s ostatkom u  $\mathbb{Z}[i]$ . Kroz primjere vidi se upotreba Euklidovog algoritma pri određivanju najvećeg zajedničkog djelitelja dvaju Gaussovih cijelih brojeva. Upotrebom Bezoutovog teorema pokazali smo da su  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$  relativno prosti akko je  $\alpha x + \beta y = 1$  za neke  $x, y \in \mathbb{Z}[i]$ .

Govorili smo o prostim Gaussovima cijelim brojevima. Dokazali smo koristan teorem o prepoznavanju prostih brojeva u  $\mathbb{Z}[i]$ , koji nam govori da ako je norma Gaussovog cijelog broja prost broj u  $\mathbb{Z}$ , da je tada taj Gaussov cijeli broj prost u  $\mathbb{Z}[i]$ . Također, pokazali smo da je prikaz Gaussovih cijelih brojeva u obliku produkta prostih Gaussovih cijelih brojeva jedinstven do na permutacije i množenje faktora invertibilnim elementima.

Za kraj, govorilo se o primjenama Gaussovih cijelih brojeva. Posebno, pomoću Gaussovih cijelih brojeva dokazali smo neke tvrdnje o prostim brojevima, opisali (primitivne) Pitagorine trojke i proučavali cjelobrojna rješenja jednačbi  $a^2 + b^2 = c^3$  i  $y^2 + 1 = x^3$ .

# Summary

The ring of Gaussian integers  $\mathbb{Z}[i]$  is a generalization of the ring  $\mathbb{Z}$ . As such, Gaussian integers kept most of characteristics of integers. In  $\mathbb{Z}[i]$  we have factorization  $x^2 + y^2 = (x + yi)(x - yi)$ ,  $i = \sqrt{-1}$ .

Through the properties of invertibility and division, we proved the modified division theorem which helped us prove the division theorem in  $\mathbb{Z}[i]$ . Through examples we saw the use of Euclidean algorithm in finding the greatest common divisor of two Gaussian integers. With the help of Bezout's theorem we showed that  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[i]$  are relatively prime if and only if  $\alpha x + \beta y = 1$  for some  $x, y \in \mathbb{Z}[i]$ .

We have talked about primes in  $\mathbb{Z}[i]$ . Also, we proved a theorem about recognizing primes in  $\mathbb{Z}[i]$  which tells that if the norm of a Gaussian integer is prime in  $\mathbb{Z}$ , then this Gaussian integer is prime in  $\mathbb{Z}[i]$ . Moreover, we have shown the unique factorization into primes of the Gaussian integers.

At the end, we talked about applications of Gaussian integers. We used Gaussian integers to prove a few claims on primes in  $\mathbb{Z}$ , describe the (primitive) Pythagorean triples and study the integer solutions of equations  $a^2 + b^2 = c^3$  and  $y^2 + 1 = x^3$ .

# Životopis

## Osobni podaci

Ime i prezime: Iva Novak

Datum i mjesto rođenja: 26.04.1996., Čakovec

Adresa: Bana Josipa Jelačića 165, Mačkovec, 40 000 Čakovec

E-mail: ivily007@gmail.com

## Obrazovanje

Osnovnu školu pohađala sam u periodu između 2003. i 2011. godine. Pohađala sam Osnovnu školu Petar Zrinski Šenkovec. 2011. godine upisala sam Gimnaziju Josipa Slavenskog Čakovec smjer Opća gimnazija. Istu sam završila 2015. godine. U srednjoj školi rodila se moja ljubav prema matematici te sam zato 2015. godine upisala Prirodoslovno-matematički fakultet u Zagrebu, smjer: nastavnički. 2018. godine završila sam preddiplomski studij te stekla titulu univ. bacc. educ. math, a iste godine upisala Diplomski studij matematika: smjer nastavnički na istom fakultetu. Trenutno završavam petu godinu i pišem diplomski rad na temu *Prsten Gaussovih cijelih brojeva i primjene*.

## Radno iskustvo

U sklopu kolegija Metodika nastave matematike 3, 4. godine diplomskog studija matematika: smjer nastavnički, bila je obavezna praksa u osnovnoj školi. Praksu sam uspješno obavila u Osnovnoj školi Silvija Strahimira Kranjčevića Zagreb pod vodstvom profesorice Tanje Soucie. U sklopu prakse u osnovnoj školi imala sam priliku volontirati na večeri matematike i učenicima osnovnih škola približiti primjenu matematike u svakodnevnom životu te je tako učiniti još zanimljivijom. U sklopu kolegija Metodika nastave matematike 4, 5. godine diplomskog studija matematika: smjer nastavnički, bila je obavezna praksa u srednjoj školi. Praksu sam uspješno obavila u Tehničkoj školi Zagreb pod vodstvom profesorice Mirjane Matijević. U sklopu Tehničke škole Zagreb, smjerovi u kojima sam obavljala praksu bili su Tehnička gimnazija, Tehničar za elektrotehniku i računalstvo i Tehničar vuče – strojovođa. Volontiranjem i davanjem instrukcija učenicima osnovnih i srednjih škola, također sam stekla iskustvo rada s učenicima i uvidjela razlike u programima matematike ovisno iz koje škole učenici dolaze.

**Vještine**

Rad na računalu: aktivno i svakodnevno korištenje MSOffice paketa, programiranje u programskom jeziku Python, programski jezik LaTeX, korištenje Interneta i izrada web stranica, izrada interaktivnih sadržaja za nastavu

Strani jezici: engleski jezik aktivno u govoru i pismu, njemački jezik pasivno u govoru i pismu

**Slobodno vrijeme**

Trčanje, vježbanje, instrukcije