Komplex számok

(előadásvázlat, 2009. február 10.)

Maróti Miklós

Ennek az előadásnak a megértéséhez a következő fogalmakat kell tudni: test, test additív és multiplikatív csoportja, valós számok és tulajdonságaik.

Az előadáshoz ajánlott jegyzet:

- Klukovits Lajos: *Klasszikus és lineáris algebra*, Polygon Kiadó, Szeged, 1999.
- Szendrei Ágnes: *Diszkrét matematika*, Polygon Kiadó, Szeged, 1994–2002.

1. Definíció. A valós számokból álló számpárokat komplex számoknak nevezzük. A komplex számok halmazát $\mathbb{C}$ jelöli, azaz $\mathbb{C} = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$.

2. Definíció. Az (a, b) és (c, d) komplex számok összege és szorzata:

$$\begin{aligned} (a,b) + (c,d) &= (a+c, b+d) \\ (a,b) \cdot (c,d) &= (ac - bd, ad + bc). \end{aligned}$$

3. Példa. Az $(1, 2)$ és $(3, 4)$ komplex számok összege és szorzata:

$$\begin{gathered} (1,2) + (3,4) = (1+3, 2+4) = (4,6), \text{ és} \\ (1,2) \cdot (3,4) = (1 \cdot 3 - 2 \cdot 4, 1 \cdot 4 + 2 \cdot 3) = (3-8, 4+6) = (-5, 10). \end{gathered}$$

4. Tétel. $(\mathbb{C}; +, \cdot)$ *test.*

Bizonyításvázlat. Minden könnyen leellenőrizhető, ha az additív egységnek a $(0, 0)$, míg a multiplikatív egységnek az $(1, 0)$ komplex számokat választjuk. Az egyetlen érdekes kérdés a multiplikatív inverz létezése: tetszőleges, az additív egységtől különböző $(a, b) \in \mathbb{C}$ inverze

$$(a,b)^{-1} = \left(\frac{a}{a^2+b^2}, \frac{-b}{a^2+b^2} \right)$$

mivel

$$(a,b) \cdot \left(\frac{a}{a^2+b^2}, \frac{-b}{a^2+b^2} \right) = \left(\frac{a^2}{a^2+b^2} - \frac{-b^2}{a^2+b^2}, \frac{-ab}{a^2+b^2} + \frac{ab}{a^2+b^2} \right) = (1,0). \qquad \square$$

5. Példa.

$$\frac{(1,2)}{(3,4)} = (1,2) \cdot (3,4)^{-1} = (1,2) \cdot \left(\frac{3}{25}, \frac{-4}{25} \right) = \left(\frac{3-(-8)}{25}, \frac{-4+6}{25} \right) = \left(\frac{11}{25}, \frac{2}{25} \right).$$

6. Kérdések. A következő állítások közül melyek igazak tetszőleges $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ esetén:

(1) $(a, b) \cdot (c, d) = (a \cdot c, b \cdot d)$,
(2) $(a, 0) \cdot (c, 0) = (a \cdot c, 0)$,
(3) $(0, b) \cdot (0, d) = (0, b \cdot d)$?

7. Tétel. *Minden $a, b \in \mathbb{R}$ esetén*

$$\begin{aligned} (a,0) + (b,0) &= (a+b, 0), & -(a,0) &= (-a, 0), \\ (a,0) \cdot (b,0) &= (a \cdot b, 0), & (a,0)^{-1} &= (a^{-1}, 0). \end{aligned}$$

8. Definíció. Tetszőleges $a \in \mathbb{R}$ esetén az $(a, 0)$ komplex szám helyett egyszerűen a-t írunk, és nem is különböztetjük meg az a valós számtól. Úgy tekintjük, hogy $\mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$. Továbbá a $(0, 1)$ komplex számot i-vel jelöljük.

9. Tétel. *Tetszőleges $a, b \in \mathbb{R}$ esetén $(a, b) = a + bi$, azaz minden komplex szám egyértelmű módon előáll $a + bi$ alakban. Továbbá $i^2 = -1$.*

10. Definíció. A $z \in \mathbb{C}$ komplex szám $a + bi$ alakban való felírását z kanonikus alakjának nevezzük. Az $a \in \mathbb{R}$ számot z valós részének, míg a $b \in \mathbb{R}$ számot z képzetes részének hívjuk, és $a = \operatorname{Re} z$, illetve $b = \operatorname{Im} z$-vel jelöljük. Az i komplex szám neve képzetes egység.

11. Példa. A következő számolásban csak azt használtuk ki, hogy $\mathbb{C}$ test (azaz érvényesek a szokásos számolási szabályok) és $i^2 = -1$:

$$(a + bi) \cdot (c + di) = ac + adi + bci + bdi^2 = (ac - bd) + (ad + bc)i$$

Vessük össze a kapott eredményt a komplex számok szorzásának definíciójával! A multiplikatív inverz kiszámolásánál azt a jól ismert azonosságot alkalmazzuk, hogy $(a+b)(a-b) = a^2 - b^2$:

$$(a + bi)^{-1} = \frac{1}{a + bi} = \frac{1}{a + bi} \cdot \frac{a - bi}{a - bi} = \frac{a - bi}{a^2 - (bi)^2} = \frac{a - bi}{a^2 + b^2} = \frac{a}{a^2 + b^2} + \frac{-b}{a^2 + b^2} i.$$

12. Definíció. Legyen adott a síkban egy Descartes-féle derékszögű koordinátarendszer, és feleltessük meg az $a + bi$ komplex számnak az (a, b) koordinátájú pontot. Így kapjuk a komplex számsíkot, más néven a Gauss-féle számsíkot. Az első tengelyt (abszcissza) valós tengelynek, a második tengelyt (ordináta) pedig képzetes tengelynek hívjuk. A valós tengelyen találhatók a valós számok, a képzetes tengelyen pedig a tiszta képzetes számok.

13. Definíció. A $z = a + bi$ komplex szám konjugáltján a $\overline{z} = a - bi$ komplex számot, és abszolút értékén a $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ valós számot értjük.

14. Megjegyzés. A komplex számsíkon a konjugálás nem más, mint a valós tengelyre való tükrözés, az abszolút érték az origótól (nullától) mért távolság, a komplex számok összeadása pedig (hely)vektorok összeadása.

15. Tétel. *Tetszőleges $u, v \in \mathbb{C}$ számra*

(1) $\overline{\overline{u}} = u$,
(2) $\overline{u + v} = \overline{u} + \overline{v}$,
(3) $\overline{u - v} = \overline{u} - \overline{v}$,
(4) $\overline{u \cdot v} = \overline{u} \cdot \overline{v}$
(5) $\overline{u/v} = \overline{u}/\overline{v}$, *ha* $v \neq 0$,
(6) $\overline{u} = u \iff u \in \mathbb{R}$,
(7) $u + \overline{u} = 2 \operatorname{Re} u$,
(8) $u \cdot \overline{u} = |u|^2$.

16. Tétel. *Tetszőleges $u, v \in \mathbb{C}$ számra*

(1) $|u| = 0 \iff u = 0$,
(2) $|u \cdot v| = |u| \cdot |v|$,
(3) $|u/v| = |u|/|v|$, *ha* $v \neq 0$,
(4) $|u + v| \leq |u| + |v|$,
(5) $|\overline{u}| = |u|$.

17. Tétel. *Legyenek $z_1, z_2, \ldots, z_n$ komplex számok úgy, hogy a komplex számsíkon az általuk meghatározott poligon konvex, és a $z_1, \ldots, z_n$ csúcsok az óramutató járásával ellentétes irányban helyezkednek el. Ekkor a poligon területe a következő képlettel számolható:*

$$\frac{1}{2} \operatorname{Im}(\overline{z_1} z_2 + \overline{z_2} z_3 + \cdots + \overline{z_{n-1}} z_n + \overline{z_n} z_1).$$

18. Definíció. Egy nemnulla z komplex szám argumentuma az a szög, amivel a valós tengely pozitív felét el kell forgatni az origó körül, hogy átmenjen a z-nek megfelelő ponton, amit $\arg z$-vel jelöljük. A nulla számnak nincsen argumentuma.

19. Kérdések. Az alábbi állítások közül melyek igazak és melyek hamisak?

(1) Minden nemnulla valós szám argumentuma nulla.
(2) Minden π argumentumú komplex szám valós.

(3) Az i komplex szám argumentuma $3\pi/2$.
(4) Az $1-i$ komplex szám argumentuma $-\pi/4$.
(5) Az $\frac{1}{2}-\frac{\sqrt{3}}{2}i$ komplex szám argumentuma $-\pi/3$.
(6) Minden nemnulla $z \in \mathbb{C}$ számra $\overline{\arg z} = \arg \overline{z}$.
(7) Minden nemnulla $z \in \mathbb{C}$ számra $\arg(-z) = \arg z + \pi$.
(8) Minden nemnulla $z \in \mathbb{C}$ számra $\arg(2z) = 2\arg z$.

20. Tétel. *Tetszőleges $0 \neq z \in \mathbb{C}$, $r \in \mathbb{R}^+$ és $\varphi \in \mathbb{R}$ számok esetén*

$$z = r(\cos\varphi + i\sin\varphi) \iff r = |z| \text{ és } \varphi \equiv \arg z \pmod{2\pi}.$$

21. Definíció. A nemnulla komplex számok

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

alakban való felírását trigonometrikus alaknak nevezzük. A nulla komplex számnak nincsen trigonometrikus alakja.

22. Megjegyzés. A nullától különböző komplex számok argumentuma csak „modulo 2π”, azaz 2π egész számú többszöröseitől eltekintve meghatározott. Ezért a komplex számok trigonometrikus alakja sem egyértelmű: például mind $\cos\frac{\pi}{2} + i\sin\frac{\pi}{2}$, mind a $\cos\frac{-3\pi}{2} + i\sin\frac{-3\pi}{2}$ az i komplex szám trigonometrikus alakja. Viszont ha egy konkrét komplex szám trigonometrikus alakját kell meghatároznunk, akkor az argumentumot mindig a $[0, 2\pi[$ intervallumban adjuk meg.

23. Tétel. *Tetszőleges nullától különböző $u = r(\cos\varphi + i\sin\varphi)$ és $v = s(\cos\psi + i\sin\psi)$ komplex számokra*

(1) $\bar{u} = r(\cos(-\varphi) + i\sin(-\varphi))$,
(2) $u \cdot v = rs(\cos(\varphi+\psi) + i\sin(\varphi+\psi))$,
(3) $u^{-1} = r^{-1}(\cos(-\varphi) + i\sin(-\varphi))$,
(4) $u/v = r/s \cdot (\cos(\varphi-\psi) + i\sin(\varphi-\psi))$,

24. Megjegyzés. A komplex számok kanonikus alakját felhasználva látható, hogy rögzített $v \in \mathbb{C}$ komplex szám esetén a $z \mapsto z + v$ leképezés nem más, mint a v-hez tartozó vektorral való eltolás a komplex számsíkon. A komplex számok trigonometrikus alakját felhasználva pedig látható, hogy rögzített $v = \cos\psi + i\sin\psi$ esetén a $z \mapsto z \cdot v$ leképezés nem más, mint az origó körüli ψ szögű forgatás a komplex számsíkon.

25. Példa. Az ismert szinusz és koszinusz összegzési képleteket könnyen megkaphatjuk komplex számok segítségével. Tekintsük a

$$u = \cos\varphi + i\sin\varphi, \qquad v = \cos\psi + i\sin\psi$$

komplex számokat. A trigonometrikus alakokkal számolva a szorzatuk

$$u \cdot v = \cos(\varphi+\psi) + i\sin(\varphi+\psi).$$

De ha a kanonikus alakot használjuk a szorzat kiszámolására, akkor

$$\begin{aligned} u \cdot v &= (\cos\varphi + i\sin\varphi) \cdot (\cos\psi + i\sin\psi) \\ &= \cos\varphi \cdot \cos\psi + \cos\varphi \cdot i\sin\psi + i\sin\varphi \cdot \cos\psi + i\sin\varphi \cdot i\sin\psi \\ &= (\cos\varphi \cdot \cos\psi - \sin\varphi \cdot \sin\psi) + i(\cos\varphi \cdot \sin\psi + \sin\varphi \cdot \cos\psi). \end{aligned}$$

Mivel az $u \cdot v$ komplex szám egyértelműen írható fel kanonikus alakban, ezért

$$\begin{aligned} \cos(\varphi+\psi) &= \cos\varphi \cdot \cos\psi - \sin\varphi \cdot \sin\psi, \text{ és} \\ \sin(\varphi+\psi) &= \cos\varphi \cdot \sin\psi + \sin\varphi \cdot \cos\psi. \end{aligned}$$

Hasonlóan számítható ki a $\cos(\varphi-\psi)$ és $\sin(\varphi-\psi)$ képlete is, de ekkor az u és v komplex számok hányadosát kell vennünk.

26. Tétel (Moivre-képlet). *Bármely nem zéró $z = r(\cos\varphi + i\sin\varphi)$ komplex szám és $n \in \mathbb{Z}$ esetén*

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

27. Kérdések.

(1) Miért nem lehet az előző tétel képletét használni például a $i^{0.123456}$ értékének definiálásához?
(2) Igaz-e, hogy $i^{-1} = -i$?
(3) Igaz-e minden $0 \neq z \in \mathbb{C}$ és $n \in \mathbb{N}$ esetén, hogy $|z^n| = |z|^n$?
(4) Igaz-e minden $0 \neq z \in \mathbb{C}$ és $n \in \mathbb{N}$ esetén, hogy $\overline{z^n} = (\overline{z})^n$?
(5) Milyen vonalon helyezkednek el a $z \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$ valódi komplex szám egész hatványai?
(6) Melyek azok a z komplex számok, amelyekre $\arg z = \arg(z^2)$?
(7) Melyek azok a z komplex számok, amelyekre $\arg z = \arg(z^3)$?
(8) Melyek azok a z komplex számok, amelyekre $\arg z = \arg(z^{-1})$?
(9) Melyek azok a z komplex számok, amelyekre $|z| = |z^2|$?

28. Példa. Tudjuk, hogy $\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha$ és $\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha$. Megmutatjuk, hogy $\cos 3\alpha$ és $\sin 3\alpha$ hogyan számítható ki egyszerűen. Vegyük a $z = \cos\alpha + i\sin\alpha$ komplex számot és számoljuk ki a harmadik hatványát a trigonometrikus alakja

$$z^3 = \cos 3\alpha + i\sin 3\alpha,$$

és a kanonikus alakjai segítségével (felhasználva azt, hogy $(a+b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$)

$$\begin{aligned} z^3 &= (\cos\alpha + i\sin\alpha)^3 \\ &= \cos^3\alpha + 3i\cos^2\alpha\cdot\sin\alpha - 3\cos\alpha\cdot\sin^2\alpha - i\sin^3\alpha \\ &= (\cos^3\alpha - 3\cos\alpha\cdot\sin^2\alpha) + i(3\cos^2\alpha\cdot\sin\alpha - \sin^3\alpha). \end{aligned}$$

Tehát azt kaptuk, hogy

$$\begin{aligned} \cos 3\alpha &= \cos^3\alpha - 3\cos\alpha\cdot\sin^2\alpha, \text{ és} \\ \sin 3\alpha &= 3\cos^2\alpha\cdot\sin\alpha - \sin^3\alpha. \end{aligned}$$

29. Definíció. Tetszőleges n pozitív egész szám és $z \in \mathbb{C}$ esetén azt mondjuk, hogy az u komplex szám n-edik gyöke z-nek, ha $u^n = z$.

30. Tétel. *Minden nemnulla $z = r(\cos\varphi + i\sin\varphi)$ komplex számnak pontosan n különböző n-edik gyöke van, mégpedig*

$$\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r}\left(\cos\frac{\varphi + 2k\pi}{n} + i\sin\frac{\varphi + 2k\pi}{n}\right) \qquad (k = 0, \ldots, n-1).$$

31. Példa. Számítsuk ki az 1 komplex számnak a tizenkettedik gyökeit, és adjuk meg őket kanonikus alakban. Az 1 trigonometrikus alakja természetesen az $1 \cdot (\cos 0 + i\sin 0)$. Felhasználva a nevezetes szögek szinuszát és koszinuszát azt kapjuk, hogy az 1 tizenkét gyöke:

$$\begin{aligned} u_0 &= 1\cdot\left(\cos\frac{0}{12} + i\sin\frac{0}{12}\right) = 1, \\ u_1 &= 1\cdot\left(\cos\frac{2\pi}{12} + i\sin\frac{2\pi}{12}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i, \end{aligned}$$

$$u_2 = 1 \cdot \left(\cos\frac{4\pi}{12} + i\sin\frac{4\pi}{12}\right) = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$$
$$u_3 = 1 \cdot \left(\cos\frac{6\pi}{12} + i\sin\frac{6\pi}{12}\right) = i,$$
$$u_4 = 1 \cdot \left(\cos\frac{8\pi}{12} + i\sin\frac{8\pi}{12}\right) = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$$
$$u_5 = 1 \cdot \left(\cos\frac{10\pi}{12} + i\sin\frac{10\pi}{12}\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i,$$
$$u_6 = 1 \cdot \left(\cos\frac{12\pi}{12} + i\sin\frac{12\pi}{12}\right) = -1,$$
$$u_7 = 1 \cdot \left(\cos\frac{14\pi}{12} + i\sin\frac{14\pi}{12}\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}i,$$
$$u_8 = 1 \cdot \left(\cos\frac{16\pi}{12} + i\sin\frac{16\pi}{12}\right) = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i$$
$$u_9 = 1 \cdot \left(\cos\frac{18\pi}{12} + i\sin\frac{18\pi}{12}\right) = -i,$$
$$u_{10} = 1 \cdot \left(\cos\frac{20\pi}{12} + i\sin\frac{20\pi}{12}\right) = +\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i$$
$$u_{11} = 1 \cdot \left(\cos\frac{22\pi}{12} + i\sin\frac{22\pi}{12}\right) = +\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}i,$$

32. Definíció. Az ε komplex számot n-edik egységgyöknek nevezzük ($n \in \mathbb{N}^+$), ha $\varepsilon^n = 1$. Az ε komplex szám egységgyök, ha n-edik egységgyök valamely $n \in \mathbb{N}^+$-re.

33. Tétel. *Az n-edik egységgyökök a következők:*
$$\varepsilon_k = \cos\frac{2k\pi}{n} + i\sin\frac{2k\pi}{n} \qquad (k = 0, \dots, n-1).$$
Ezzel a jelöléssel $\varepsilon_0 = 1$ és $\varepsilon_k = \varepsilon_1^k$ minden $k = 0, \dots, n-1$ esetén.

34. Megjegyzés. Az n-edik egységgyökök egy szabályos n-szöget alkotnak a komplex számsíkon, amelynek a körülírt köre az origó középpontú egységkör, és egyik csúcsa 1. (Ez a két információ egyértelműen meg is határozza az n-szöget.)

35. Példa. Az első egységgyökök halmaza a
$$\{\, z \in \mathbb{C} : z^1 = 1 \,\} = \{1\}.$$
A második egységgyökök halmaza a
$$\{\, z \in \mathbb{C} : z^2 = 1 \,\} = \{1, -1\}.$$
A harmadik egységgyökök halmaza a
$$\{\, z \in \mathbb{C} : z^3 = 1 \,\} = \left\{1, -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i, -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right\}.$$
A negyedik egységgyökök halmaza a
$$\{\, z \in \mathbb{C} : z^4 = 1 \,\} = \{1, i, -1, -i\}.$$
A hatodik egységgyökök halmaza a
$$\{\, z \in \mathbb{C} : z^6 = 1 \,\} = \left\{1, \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i, -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i, -1, -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i, \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right\}.$$

36. Tétel. *Egy nemnulla komplex szám összes n-edik gyökét megkaphatjuk, ha egy rögzített n-edik gyökét megszorozzuk sorra az n-edik egységgyökökkel. Tehát ha $u^n = z \neq 0$, akkor a z komplex szám n-edik gyökei: $u \cdot \varepsilon_k$ ahol $k = 0, \ldots, n-1$.*

37. Példa. Számoljuk ki a $\sqrt[3]{8i}$ értékeit. A $8i$ trigonometrikus alakja

$$8i = 8 \cdot (\cos\frac{\pi}{2} + i\sin\frac{\pi}{2}),$$

tehát mindhárom köbgyökének az abszolút értéke $\sqrt[3]{8} = 2$, és a gyökök

$$2 \cdot \left(\cos\frac{\frac{\pi}{2}}{3} + i\sin\frac{\frac{\pi}{2}}{3}\right) = 2 \cdot \left(\cos\frac{\pi}{6} + i\sin\frac{\pi}{6}\right) = 2 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i\right) = \sqrt{3} + i,$$

$$2 \cdot \left(\cos\frac{\frac{\pi}{2} + 2\pi}{3} + i\sin\frac{\frac{\pi}{2} + 2\pi}{3}\right) = 2 \cdot \left(\cos\frac{5\pi}{6} + i\sin\frac{5\pi}{6}\right) = 2 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i\right) = -\sqrt{3} + i,$$

$$2 \cdot \left(\cos\frac{\frac{\pi}{2} + 4\pi}{3} + i\sin\frac{\frac{\pi}{2} + 4\pi}{3}\right) = 2 \cdot \left(\cos\frac{9\pi}{6} + i\sin\frac{9\pi}{6}\right) = -2i.$$

Könnyen leellenőrizhető, hogy $-2i$ gyök, mivel $(-2i)^3 = -8i^3 = 8i$. Tehát ha alkalmazzuk az előző tételt, és tudjuk a harmadik egységgyököket, akkor megkapjuk a három gyököt:

$$-2i \cdot 1 = -2i,$$

$$-2i \cdot \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) = \sqrt{3} + i,$$

$$-2i \cdot \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) = -\sqrt{3} + i.$$

38. Definíció. Azt mondjuk, hogy a ε komplex szám primitív n-edik egységgyök, ha n-edik egységgyök, de nem m-edik egységgyök semmilyen $0 < m < n$ egészre.

39. Példa. Az 1 primitív első egységgyök. A -1 primitív második egységgyök. A $-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$ és $-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i$ primitív harmadik egységgyökök. Az i és $-i$ primitív negyedik egységgyökök. Az $\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$ és $\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i$ primitív hatodik egységgyökök.

40. Tétel. *Az $\varepsilon_k = \cos\frac{2k\pi}{n} + i\sin\frac{2k\pi}{n}$ egységgyök akkor és csak akkor primitív n-edik egységgyök, ha k relatív prím n-hez.*

41. Tétel. *A primitív n-edik egységgyökök száma $\varphi(n)$, ahol φ az Euler-féle függvény.*

42. Kérdések.

(1) Hány primitív ötödik egységgyök van?
(2) Hány primitív tizedik egységgyök van?
(3) Igaz-e, hogy minden egységgyök primitív n-edik egységgyök valamely n egészre?
(4) Igaz-e, hogy minden olyan z komplex szám, amelyre $|z| = 1$, egységgyök?
(5) Létezik-e olyan komplex szám, amely 17-edik és 73-madik egységgyök is?
(6) Létezik-e olyan komplex szám, amely 17-edik és 73-madik primitív egységgyök is?

43. Tétel (Az algebra alaptétele). *Ha $p = a_n x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0$ komplex együtthatós ($a_n, \ldots, a_0 \in \mathbb{C}$) nemkonstans ($n \geq 1$, $a_n \neq 0$) polinom, akkor multiplicitással számolva pontosan n darab komplex gyöke van.*

44. Tétel. *Tetszőleges $z = a + bi$ komplex számra*

$$e^z = 1 + z + \frac{z^2}{2} + \frac{z^3}{3!} + \frac{z^4}{4!} + \cdots = e^a \cdot (\cos b + i\sin b).$$

45. Példa (Euler-formula). $e^{i\pi} + 1 = 0$.