1. Hatvány és többszörös gyűrűben

Hatvány és többszörös

Definíció (K2.2.19)
Legyen $*$ asszociatív művelet és n pozitív egész. Ekkor a^n jelentse az n tényezős $\underline{a * a * \ldots * a}$ szorzatot. Ez az a elem n-edik *hatványa*. Ha a művelet jele $+$, akkor a^n helyett na-t írunk. Ez az a elem n-szerese (*többszörös*).

Ha a $*$ szorzásra van 1 egységelem, akkor legyen $a^0 = 1$. Ha a $+$ összeadásra van nullelem, akkor legyen $0a = 0$.

Ha a-nak van egy b inverze, akkor legyen $a^{-n} = b^n$. Ha a-nak van egy b ellentettje, akkor legyen $(-n)a = nb$.

Értelmeztük az *egész kitevőjű* hatvány (többszörös) fogalmát. Így minden gyűrű elemeit tudjuk egész számokkal „szorozni".

A hatványozás tulajdonságai

Állítás (K2.2.20)
Legyenek a és b invertálható elemek egy asszociatív, egymás mellé írással jelölt műveletre nézve, és m, n egész számok. Ekkor a következők teljesülnek.

(1) a^{-n} az a^n inverze.

(2) $a^m a^n = a^{m+n}$.

(3) $(a^m)^n = a^{mn}$.

(4) Ha a és b *felcserélhetők* ($ab = ba$), akkor $(ab)^n = a^n b^n$.

Az analóg állítások érvényesek hatvány helyett többszörösre is.

Bizonyítás
Pozitív kitevőkre egyszerű leszámlálás. A többi esetben esetszétválasztás (HF).

Tagonkénti hatványozás

Állítás (K3.3.22)
Legyen p prímszám, és R olyan kommutatív gyűrű, amelyben minden elem p-szerese nulla. Ekkor $r, s \in R$ esetén $(r + s)^p = r^p + s^p$: *tagonként lehet p-edik hatványra emelni.*

Bizonyítás
A binomiális tétel alkalmazható minden kommutatív gyűrűben.
Egyszerű számelméleti megfontolás, hogy a $\binom{p}{j}$ binomiális együttható osztható p-vel, ha $1 \leq j \leq p - 1$.

Alkalmazás
$\mathbb{Z}_p$-ben $2^p = (1 + 1)^p = 1^p + 1^p = 1 + 1 = 2$. Azaz $p \mid 2^p - 2$. Ugyanígy $3^p = (1 + 1 + 1)^p = 1^p + 1^p + 1^p = 3$. HF: belátni a kis Fermat-tételt.

2. Polinomok gyűrű fölött

A polinom definíciója

Polinom (K2.1. szakasz)
Legyen R kommutatív, egységelemes gyűrű. *R fölötti egyhatározatlanú polinomnak* nevezzük az $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \ldots + a_nx^n$ formális kifejezéseket, ahol $n \geq 0$ egész szám és $a_0, \ldots, a_n \in R$. Ezek halmaza $R[x]$.

Egyenlőség (K2.1.1)
Két polinom akkor *egyenlő*, ha együtthatóik megegyeznek (x^j együtthatója ugyanaz a két polinomban minden $j \geq 0$-ra).

Nullapolinom
A *nullapolinom* az a polinom, amelynek minden együtthatója nulla. Ugyanúgy 0 jelöli, mint az R nullelemét. Minden $c \in R$ elemet *konstans* polinomnak tekintünk.

Polinomok összege, különbsége

A nulla együtthatójú tagokat igény szerint írjuk ki:

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \ldots + a_nx^n =$$
$$= a_0 + a_1x + a_2x^2 + \ldots + a_nx^n + 0 \cdot x^{n+1} + 0 \cdot x^{n+2} + \ldots .$$

Megállapodunk abban, hogy $0 = a_{n+1} = a_{n+2} = \ldots$.
Így bármely két polinomot ugyanannyi taggal írhatunk fel.

Összeg és különbség

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \ldots + a_nx^n$$
$$g(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \ldots + b_nx^n$$

összege és különbsége:

$$(f+g)(x) = (a_0 + b_0) + (a_1 + b_1)x + \ldots + (a_n + b_n)x^n$$
$$(f-g)(x) = (a_0 - b_0) + (a_1 - b_1)x + \ldots + (a_n - b_n)x^n.$$

Polinomok ellentettje és szorzata

Ellentett
Az $f \in R[x]$ *ellentettje* h, ha $f + h = 0$. Az ellentett jele $h = -f$.
Az $f(x) = a_0 + a_1x + \ldots + a_nx^n$ (egyetlen) ellentettje
$h(x) = (-f)(x) = (-a_0) + (-a_1)x + \ldots + (-a_n)x^n$.
A kivonás az ellentett hozzáadása: $g - f = g + (-f)$.

Szorzat
$(a_0 + a_1x + \ldots + a_nx^n)(b_0 + b_1x + \ldots + b_mx^m)$-ben
x^k együtthatója legyen $c_k = a_0b_k + a_1b_{k-1} + \ldots + a_kb_0$.
Azaz $(fg)(x) = \sum_{k=0}^{m+n} c_kx^k$, ahol $c_k = \sum_{j=0}^{k} a_jb_{k-j} = \sum_{j+\ell=k} a_jb_\ell$.

Tétel (K2.1.6, K2.3.2)
$R[x]$ is egységelemes, kommutatív gyűrű ezekre a műveletekre.

Polinom foka

Definíció
Ha $f(x) = a_0 + a_1x + \ldots + a_nx^n \in R[x]$, ahol $a_n \neq 0$, akkor f *foka* n.
Jele: $\mathrm{gr}(f)$. *A nullapolinomnak nincs foka.*

Tétel (K2.1.5, K2.3.2)
Ha R nullosztómentes gyűrű, akkor $\mathrm{gr}(fg) = \mathrm{gr}(f) + \mathrm{gr}(g)$. Így ha R nullosztómentes, akkor $R[x]$ is az.

Bizonyítás
$f(x) = a_0 + a_1x + \ldots + a_nx^n$ és $g(x) = b_0 + b_1x + \ldots + b_mx^m$ szorzatában x^{n+m} együtthatója a_nb_m. Ez nem nulla, ha a_n és b_m nem nulla, mert R nullosztómentes.
Megjegyzés: Szorzásnál a főegyütthatók és a konstans tagok is összeszorzódnak, hiszen fg konstans tagja nyilván a_0b_0.

A polinomgyűrű egységei

Definíció
Legyen R egységelemes gyűrű és $r, s \in R$. Ha $rs = 1$, akkor r *balinverze* s-nek, s *jobbinverze* r-nek. (Kétoldali) *inverz:* balinverz és jobbinverz is: $rs = sr = 1$. *Invertálható elem*, vagy *egység*: van inverze.

Tétel (K2.3.2)
Ha R (egységelemes, kommutatív és) nullosztómentes, akkor az $f \in R[x]$ polinom pontosan akkor egység, ha egy olyan konstans polinom, amely egység R-ben.

Bizonyítás
Ha $fg = 1$, akkor $\mathrm{gr}(f) + \mathrm{gr}(g) = 0$, így f és g konstans.
Megfordítva: ha $c \in R$ egység, akkor $1/c \in R[x]$.

3. Polinomok gyökei

Behelyettesítés polinomba

Polinomfüggvény (K2.4.1)
Legyen R kommutatív, egységelemes gyűrű és $b \in R$.
Az $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \ldots + a_nx^n \in R[x]$ polinom b *helyen felvett helyettesítési értéke* $f^*(b) = a_0 + a_1b + a_2b^2 + \ldots + a_nb^n \in R$.
Az $f^* : R \mapsto R$ az f-hez tartozó *polinomfüggvény.* Az $f^*(b)$ kiszámítása: Horner elrendezéssel. A b *gyöke* f-nek, ha $f^*(b) = 0$.

A gyöktényező kiemelhetősége (K2.4.6)
A $b \in R$ akkor és csak akkor gyöke az $f \in R[x]$-nek, ha van olyan $q \in R[x]$, hogy $f(x) = (x - b)q(x)$. Az $x - b$ a b gyökhöz tartozó *gyöktényező.*
Bizonyítás: Horner-elrendezéssel.

Több gyöktényező kiemelése

Tétel (K2.4.7)
Ha R (kommutatív, egységelemes és) *nullosztómentes*, akkor
minden $0 \neq f \in R[x]$ fölírható $f(x) = (x - b_1) \ldots (x - b_k)q(x)$ alakban, ahol a (nem feltétlenül különböző) $b_1, \ldots, b_k \in R$ az f-nek az *összes* R-beli gyökei, és q-nak nincs gyöke R-ben.

A bizonyítás kulcslépése

Addig emelünk ki gyöktényezőket, ameddig lehet. Legfeljebb $\mathrm{gr}(f)$ lépésben biztosan megállunk: $f(x) = (x - b_1) \ldots (x - b_k)q(x)$, ahol q-nak már nincs gyöke. *Belátjuk, hogy f-nek nincs más gyöke, mint $b_1, \ldots, b_k$.*
Valóban: ha $f^*(b) = 0$, akkor $(b-b_1) \ldots (b-b_k)q^*(b) = 0$. A *nullosztómentesség* miatt valamelyik tényező nulla. De $q^*(b) \neq 0$, ezért $b - b_j = 0$ valamelyik j-re. Azaz $b = b_j$.

Gyöktényező a nem nullosztómentes esetben

Példa (K, 57. oldal)
Legyen $R = \mathbb{Z}_8$ és $f(x) = x^2 - 1$ másodfokú polinom. A $\mathbb{Z}_8$ gyűrű 8 elemét végigpróbálgatva a gyökök $1, 3, 5, 7$. (Páratlan szám négyzete nyolccal osztva 1-et ad maradékul.) Azaz egy *másodfokú* polinomnak *négy* gyöke van.

Magyarázat
$x^2 - 1 = (x - 1)(x + 1)q(x)$, ahol a $q(x) = 1$-nek nincs gyöke. $x = 3$ helyettesítéssel $0 = 3^2 - 1 = (3 - 1)(3 + 1) = 4 *_8 2$. Vagyis a probléma az, hogy $\mathbb{Z}_8$ nem nullosztómentes. Ugyanígy $x^2 - 1 = (x - 3)(x + 3)$ is teljesül, azaz *a gyöktényezős alak nem egyértelmű.*

A különböző gyökökhöz tartozó gyöktényezőket *egyszerre* csak nullosztómentes gyűrű fölött lehet kiemelni.

A gyökök száma

A polinomok azonossági tétele (K2.4.10, K2.4.11)
Ha R kommutatív, egységelemes és *nullosztómentes*:

(1) Minden polinomnak legfeljebb annyi gyöke van, mint a foka.

(2) Ha két, legfeljebb n-edfokú polinom több mint n helyen megegyezik, akkor egyenlők (együtthatóik megegyeznek).

(3) Ha R *végtelen* gyűrű, és az f^* és g^* polinomfüggvények egyenlők, akkor $f = g$. Ha R *véges*, akkor van két különböző polinom, melyek polinomfüggvénye ugyanaz.

A bizonyítások megjegyzendő fő gondolatai:
(1): Egyszerre kiemelhetők a gyöktényezők.
(2): Alkalmazzuk (1)-et a két polinom különbségére.
(3): Ha R végtelen, akkor (2)-ben van „elég" elem.
Véges gyűrű fölött csak véges sok polinomfüggvény van.

Véges gyűrű fölötti polinomfüggvények

Példa
Legyen $R = \mathbb{Z}_2$. Ekkor az x^k-hoz tartozó polinomfüggvény minden $k \geq 1$ esetén ugyanaz: az identitás. Valóban: x^k értéke $x = 0$-nál 0 és $x = 1$-nél 1.

Legyen $R = \mathbb{Z}_p$ ahol p prím. Ekkor az x^p-hez és x-hez tartozó polinomfüggvény ugyanaz. Valóban: A kis Fermat-tétel szerint $p \mid x^p - x$ minden x egészre.

$\mathbb{Z}_p$ fölött $x^{p-1} - 1 = \big(x-1\big)\dots\big(x-(p-1)\big)$.
Valóban: $\mathbb{Z}_p$ test, a két oldal különbsége legfeljebb $p-2$ fokú, mert x^{p-1} kiesik, de az $1, 2, \dots, p-1$ helyeken megegyeznek.

HF: Lássuk be ebből Wilson tételét: $p \mid (p-1)! + 1$, ha p prím.
Ötlet: $x = 0$ helyettesítés.

4. Számelmélet gyűrűkben

Oszthatóság

Definíció (K3.1.3)
Az R *szokásos* gyűrű, ha kommutatív, egységelemes, nullosztómentes. Számelméleti vizsgálatokban ezt feltesszük.
Ha $r, s \in R$, akkor r *osztója* s-nek (s *többszöröse* r-nek), ha van olyan $t \in R$, hogy $rt = s$. Jele: $r \mid s$.

Példa: $2x \mid 3x^2$ igaz $\mathbb{R}[x]$-ben, nem igaz $\mathbb{Z}[x]$-ben.

Tulajdonságok (K3.1.4)

(1) Ha $r \mid s$ és $r \mid t$, akkor $r \mid s \pm t$.

(2) Ha $r \mid s$, akkor $r \mid st$, sőt $rt \mid st$. Megfordítva, ha $t \neq 0$, akkor $rt \mid st$-ből $r \mid s$ következik (R nullosztómentes!).

(3) *Tranzitivitás*: ha $r \mid s$ és $s \mid t$, akkor $r \mid t$.

(4) *Reflexivitás*: $r \mid r$ minden $r \in R$ esetén (R egységelemes!).

Felbonthatatlan elem

Emlékeztető (K3.1.9)
Az $e \in R$ *egység*, ha $e \mid 1$. Ez ugyanaz, mint az invertálható elem. Minden egység osztója R minden elemének.

Példa: A $\mathbb{Z}$ gyűrű egységei ± 1. Az egység*eleme* az 1.
HF: Mik a 0 osztói? Mely elemeknek osztója a 0?

Definíció (K3.1.12, K3.1.13, K3.1.14)
A $b = cd$ a b-nek *triviális* felbontása, ha c és d egyike egység. A $p \in R$ *felbonthatatlan* (irreducibilis), ha nem nulla, nem egység, és *nincs nemtriviális felbontása*.
Ekvivalens: p minden osztója egység, vagy p egységszerese.

Példa: A 23 felbonthatatlan $\mathbb{Z}$-ben, mert nem nulla, nem ± 1, és osztói csak ± 1 és ± 23. Az összes felbontása: $23 = 1 \cdot 23 = 23 \cdot 1 = (-1)(-23) = (-23)(-1)$.

Alaptételes gyűrű

Definíció (K3.1.15)
Az R gyűrűben *érvényes a számelmélet alaptétele*, ha R minden nem nulla és nem egység eleme a sorrendtől és az egységszerestől eltekintve *egyértelműen* felbontható felbonthatatlan elemek szorzatára. Az ilyen gyűrűt *alaptételes* gyűrűnek nevezzük.

Tétel (K3.2.12)
A $\mathbb{Z}$, és minden $T[x]$ polinomgyűrű, ahol T test, alaptételes.

- elvégezhető a maradékos osztás, ezért
- létezik „legnagyobb” közös osztó, ezért
- a felbonthatatlan elemek ugyanazok, mint a prímek, ezért
- egyértelmű a felbontás.

Prímtulajdonságú elem

Feladat
Pistike megszámolta a kockás füzetlapján a négyzetek számát, és 23-mal osztható számot kapott. Igazoljuk, hogy a lap valamelyik oldalán 23-mal osztható számú kis négyzet van.

Definíció (K3.1.25)
A $p \in R$ *prím* R-ben, ha nem nulla, nem egység, és tetszőleges $b, c \in R$ esetén $p \mid bc$-ből következik, hogy $p \mid b$ vagy $p \mid c$.

Tétel (K3.1.26, K3.1.27, K3.2.13, K3.2.14)
A $\mathbb{Z}$ gyűrűben, továbbá a $T[x]$ polinomgyűrűben, ahol T test, *a felbonthatatlan elemek ugyanazok, mint a prímek*. Oka: létezik „legnagyobb" közös osztó.
HF: Minden szokásos gyűrűben minden prím felbonthatatlan.

Maradékos osztás

Tétel (K3.2.1)
Legyen R szokásos gyűrű.
Ekkor az $R[x]$ polinomgyűrűben minden olyan $g \in R[x]$ polinommal lehet *maradékosan osztani*, amelynek *főegyütthatója invertálható* (azaz egység).
Ez azt jelenti, hogy tetszőleges $f \in R[x]$ polinomhoz léteznek olyan $q, r \in R[x]$ polinomok, melyekre $f = gq + r$, és vagy $r = 0$, vagy r foka kisebb g fokánál.
A q és r polinomok *egyértelműen* meghatározottak.

A bizonyítás ugyanaz mint komplex együtthatós polinomokra. A tétel magában foglalja azt is, hogy q és r együtthatói az f és g együtthatóiból a négy alapművelettel kaphatók:

Emlékeztető (K3.2.2)
Ha $g \mid f$ a $\mathbb{C}[x]$-ben, és $f, g \in \mathbb{R}[x]$, akkor $g \mid f$ az $\mathbb{R}[x]$-ben is.

Kitüntetett közös osztó

Definíció (K3.1.19)
A b és c elemeknek d *kitüntetett közös osztója*, ha

(1) közös osztó, azaz $d \mid b$ és $d \mid c$;

(2) minden közös osztónak többese: $d' \mid b$ és $d' \mid c \implies d' \mid d$.

Állítás (K3.1.27)
Ha egy szokásos gyűrűben bármely két elemnek van kitüntetett közös osztója, akkor a felbonthatatlanok prímek.

Tétel (K5.5.9)
Ha egy R szokásos gyűrűben *„elvégezhető a maradékos osztás"*, akkor az euklideszi algoritmus miatt, bármely két elemnek van kitüntetett közös osztója, ezért R *alaptételes*.

Kanonikus alak

Definíció (K3.1.16)
A $0 \neq r$ *kanonikus alakja* $r = ep_1^{\alpha_1}p_2^{\alpha_2}\dots p_k^{\alpha_k}$, ahol e egység, $p_1, p_2, \dots, p_k$ pedig felbonthatatlanok, amelyek páronként nem egységszeresei egymásnak.

Példák
$\mathbb{Z}$-ben $-36 = (-1)2^23^2$. $\mathbb{C}[x]$-ben $f(x) = c(x-b_1)^{k_1}(x-b_2)^{k_2}\dots(x-b_m)^{k_m}$, ahol a c a főegyüttható (nem nulla konstans, így egység). Ez a gyöktényezős alak, a k_i a b_i gyök multiplicitása.

Az *osztók száma*, a *kitüntetett közös osztó*, és a kitüntetett közös többszörös hasonló képletekkel kapható a kanonikus alakból, mint az egész számok számelméletében.

Gyökök és irreducibilitás

Tétel (K3.3. szakasz)
Legyen T test.

(1) Az $f \in T[x]$ akkor és csak akkor irreducibilis T fölött, ha nem konstans, és nem bontható $T[x]$-ben *alacsonyabb fokú* polinomok szorzatára.

(2) *Elsőfokú* polinom mindig irreducibilis $T[x]$-ben.

(3) *Másod- és harmadfokú* polinom akkor és csak akkor irreducibilis $T[x]$-ben, ha *nincs gyöke* T-ben.

(4) *Legalább negyedfokú* polinom, *HA* van gyöke T-ben, akkor biztosan *NEM* irreducibilis $T[x]$-ben. *Ha nincs gyöke, attól még lehet reducibilis!*
Példa: $\mathbb{Q}[x]$-ben $(x^2+1)^2$.

(5) Gyök létezése *elsőfokú* irreducibilis tényezőnek felel meg.

5. Többhatározatlanú polinomok

Rekurzív definíció

Definíció (K2.6.1)
Legyen R kommutatív, egységelemes gyűrű. Ekkor $R[x_1, \dots, x_n]$-et n szerinti indukcióval (rekurzióval) értelmezzük: $R[x_1, x_2] = \big(R[x_1]\big)[x_2]$, és így tovább, $R[x_1, \dots, x_n] = \big(R[x_1, \dots, x_{n-1}]\big)[x_n]$. Vagyis a határozatlan x_n, az együtthatók a már definiált $n-1$-határozatlanú polinomok gyűrűjének elemei.

Előny
Mivel $S = R[x_1, \dots, x_{n-1}]$ is kommutatív, egységelemes gyűrű,
az $R[x_1, \dots, x_n] = S[x_n]$ is az. *A tulajdonságokat nem kell külön ellenőrizni.*
Példa: Ha R nullosztómentes, akkor indukcióval világos, hogy $R[x_1, \dots, x_n]$ is nullosztómentes.

A szimmetrikus polinomok alaptétele

Példa
A négyzetösszeg: $s_2 = x_1^2 + \ldots + x_n^2 = \sigma_1^2 - 2\sigma_2$.
Vagyis ha $F(y_1, y_2, \ldots, y_n) = y_1^2 - 2y_2$, akkor $s_2 = F(\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_n)$.
Tehát s_2 az elemi szimmetrikus polinomok *polinomja*.

Tétel (K2.7.3)
Legyen R szokásos gyűrű. Ekkor minden $f \in R[x_1, \ldots, x_n]$ szimmetrikus polinom *egyértelműen* fölírható az elemi szimmetrikus polinomok polinomjaként. Azaz létezik pontosan egy $F \in R[y_1, \ldots, y_n]$ polinom, melyre

$$f(x_1, \ldots, x_n) = F(\sigma_1, \ldots, \sigma_n).$$

A F együtthatói a f együtthatóiból összeadás és kivonás segítségével kaphatók.

A többhatározatlanú polinomok számelmélete

Tétel (K3.4.10, K3.4.11)
A $\mathbb{Z}[x]$ polinomgyűrű alaptételes.
Ugyanígy: Ha R alaptételes, szokásos gyűrű, akkor $R[x]$ is az.

Bizonyítás
Csak haladón és intenzíven, lásd K3.4. és K5.7. szakasz.

Következmény (vö. K3.4.12)
Ha R alaptételes, szokásos gyűrű, akkor $R[x_1, x_2, \ldots, x_n]$ is az.
Speciálisan $\mathbb{Z}[x_1, x_2, \ldots, x_n]$, és ha T test, akkor $T[x_1, x_2, \ldots, x_n]$ is *alaptételes gyűrűk*.

Általános gyűrűkben az alaptétel vizsgálata: K5.5. szakasz (az Algebra3 tárgy keretében).

6. Összefoglaló

A 11. előadáshoz tartozó vizsgaanyag

Fogalmak
Hatvány és többszörös általános gyűrűben, tulajdonságaik. Gyűrű fölötti polinomgyűrű, műveletek, fok. Polinomfüggvény. Oszthatóság, egység, felbonthatatlan, prím, kitüntetett közös osztó általános gyűrűben. Alaptételes gyűrű, kanonikus alak.

Tételek
Ha $(\forall r)(pr = 0)$, akkor tagonként lehet p-edik hatványra emelni. A polinomgyűrű egységei. Gyöktényezők egyszerre kiemelhetősége. A polinom és a polinomfüggvény véges és végtelen gyűrű fölött. Ha van legnagyobb közös osztó, akkor minden irreducibilis prím. Maradékos osztás szokásos gyűrű fölött. Gyökök és irreducibilitás kapcsolata test fölött. A szimmetrikus polinomok alaptétele.
$\mathbb{Z}[x_1, x_2, \ldots, x_n]$, $T[x_1, x_2, \ldots, x_n]$ alaptételes (T test).

7. A vizsgán kérdezett bizonyítások listája

Komplex számok, polinomok

1. A rend és a jó kitevők kapcsolata (K1.5.8).
2. Hatvány rendjének képlete (K1.5.9, K1.5.10).
3. A primitív egységgyökök jellemzései (K1.5.13).
4. Gyöktényezők kiemelése *egyszerre* (K2.4.7).
5. A racionális gyökteszt (K3.3.10).
6. A Lagrange-interpoláció (K2.4.12).
7. $f \in \mathbb{R}[x]$ gyöke konjugáltjának multiplicitása (K3.3.6).
8. A maradékos osztás tétele: létezés és egyértelműség (K3.2.1).
9. A polinom és a polinomfüggvény kapcsolata véges és végtelen gyűrű fölött (K2.4.10, K2.4.11).
10. Minden test nullosztómentes (K2.2.29).
11. Ha az R kommutatív gyűrűben pr azonosan nulla, akkor tagonként lehet p-edik hatványra emelni (K3.3.22).

Lineáris algebra

12. Összefüggés lineáris, illetve homogén lineáris egyenletrendszer esetében a megoldások száma, az egyenletek száma és az ismeretlenek száma között (F3.1.2, F3.1.4. Tétel).
13. Transzpozíció előjele (K4.2.12).
14. A páros permutációk száma (K4.2.16).
15. Felső háromszögmátrix determinánsa (F1.2.3. Feladat).
16. A transzponált determinánsa (F1.3.6. Tétel).
17. Ha a determináns két sora egyenlő, akkor nulla (F1.3.3. Tétel).
18. A ferde kifejtési tétel (F1.4.3. Tétel).
19. Az inverz mátrix képlete (F2.2.2. Tétel, F2.2.3. Lemma).
20. A Vandermonde-determináns (F1.5.2. Tétel).
21. A Cramer-szabály (F3.2.1. Tétel).

A felsorolt 21 bizonyítás szerepelhet a vizsga *harmadik* részében.